

Program TransAdapt

Translace poznatků a transfer postupů pro adaptaci na klimatickou změnu do zemědělské a lesnické praxe a veřejné správy: co-creative přístup

Aktivita 1.6

Digitální dvojče povodí Želivky a v.n. Švihov včetně 3D modelu nádrže – dokončení a kalibrace simulačních modelů v systému hydrologického povodí řeky Želivky

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA
PROSINEC 2024

1 Úvod

Hlavním účelem vodárenské nádrže Švihov na Želivce, (dále VN Švihov) je zásobování pitnou vodou jednak hlavního města Prahy, jednak Středočeské kraje a části Jihočeského kraje a Kraje Vysočina. Z hlediska objemu vody v zásobním prostoru i z pohledu odebíraného množství je toto vodní dílo největší vodárenskou nádrží v České republice. Součástí vodohospodářského komplexu jsou představné nádrže Trnávka na Trnávce, Němčice na Sedlickém potoce, a Sedlice na Želivce, jejichž účelem je zachycení splavenin a části znečištění přinášeného vodním tokem.

VN Švihov je dlouhodobě znečišťována z plošných zdrojů zemědělského původu (zejména dusičnany a pesticidy). Toto zatížení představuje např. cca 75 - 85 % celkového rozsahu znečištění dusičnany. V důsledku malého procenta zastoupení ploch travních porostů a vytvoření velkých bloků půdy v období kolektivizace zemědělství jsou v povodí VN Švihov výrazné problémy s erozí půdy, jejímž výsledkem je zanášení místních rybníků, před zdrží, vodních nádrží i vodárenských objektů sedimenty. Tyto sedimenty společně s nutrienty (dusík a fosfor) a pesticidy potenciálně ohrožují jakost vody v nádrži, která je důležitá pro její bezproblémový odběr a následnou úpravu na vodu pitnou.

Hydrogeologické poměry

Povodí Želivky leží v západní části hydrogeologického rajónu Krystalinikum v povodí Sázavy zahrnujícího povodí Želivky a povodí Sázavy po Zruč. Horniny krystalinika mají sníženou puklinovou propustnost, která v dosahu zvětrávacích procesů závisí hlavně na charakteru zvětralin. Relativně lepší puklinovou propustnost mají granitoidy moldanubického plutonu vyskytující se v jižní části. Z kvartérních sedimentů mají větší hydrogeologický význam fluviální akumulace sedimentů údolních niv a některá mocnější eluvia. Propustnost kvartéru se mění podle uloženin. Pro území jsou charakteristické mělké zvodně vázané na povrchovou zónu kvartérních uloženin, zónu zvětrávání, případně přípovrchového rozpojení hornin. Oběh vody má lokální charakter. Infiltrace probíhá v celé ploše kolektoru v závislosti na propustnosti zvětralinového pláště. K odvodňování dochází v úrovni nebo nad místní erozní bází.

Hydrologické poměry

Povodí toku Želivka zaujímá plochu 1188,4 km² z toho plocha vlastního povodí VN Švihov činí 1178,5 km². Povodí Želivky je součástí dílčího povodí Dolní Vltavy, vymezeného vyhláškou Ministerstva zemědělství č. 393/2010 Sb., o oblastech povodí.

Želivka, v horní části též nazývaná Hejlovka, je tokem III. řádu a je levostranným přítokem Sázavy, do které se vlévá pod Zručí nad Sázavou. Pramení v Křemešnické vrchovině na severním svahu Trojáku, asi 10 km od Pelhřimova v nadmořské výšce 677,25 m. Průměrný průtok při ústí do Sázavy je 7 m³/s. Délka toku je 103,89 km, plocha povodí 1188,4 km². V povodí se nachází 136 vodních ploch větších než 1 ha s celkovou rozlohou 1935,8 ha. Největší z nich je vodní nádrž Švihov o ploše 1396,6 ha. V jižní části má hlavní pravostranné přítoky Bělou a Jankovský potok, ve střední části levostranný přítok Trnavu, v severní části již přímo zprava ústí do VN Švihov Sedlický potok, Blažejovický potok a Martinický potok. Parametry významnějších toků v povodí vodárenské nádrže Švihov jsou uvedeny v tabulce Tab 1.

Tab. 1 Seznam významných toků v povodí Želivky

Hydrologické významných toků	parametry	Plocha povodí	Délka toku	Přítok Želivky
		km2	km	
Želivka		1 188,4	103,9	-
Cerekvický potok		54,5	16,9	levostranný
Bělá		130,6	25,1	pravostranný
Jankovský potok		130,0	22,8	pravostranný
Trnava		340,2	56,3	levostranný
Martinický potok		116,0	38,7	levostranný
Blažejovický potok		33,41	14,1	levostranný
Sedlický potok		95,8	23,6	levostranný

Vliv klimatické změny a změna klimatických proměnných a parametrů

Vliv klimatické změny na vodní bilanci systému přítoků a vodárenské nádrže definuje fundamentální otázku funkce budoucnosti funkce hydrologického systému povodí s výraznou vodohospodářskou infrastrukturou. Proto bylo překročeno ke tvorbě simulačního modelového dvojčete hydrologického povodí včetně vlastní nádrže, které poslouží k posouzení vlivu klimatické změny na vodní bilanci a také na oběh živin a látkového zatížení za změněných podmínek v celém povodí. Tato predikce dopadu klimatické změny na povodí Želivky je zásadní pro další rozhodování při návrhu a realizaci adaptačních opatření v povodí a posouzení jejich efektivnosti. Zároveň ukáže dopad klimatické změny na vlastní vodohospodářské řešení řízení odtoku a odběrů z nádrže Švihov a tedy celkové disponibilní zásoby vody v nádrži v závislosti na změně klimatických proměnných a parametrů. Zásadním požadavkem na tvorbu digitálního dvojčete byla úplná integrace vodohospodářských procesů tak, aby bylo možné simulační modely bez problémů propojit a procesy bilanční sledovat od horních částí povodí až po pohyb vody nebo látek v nádrži. Předzdrže a rybníky byly schematizovány zjednodušeně.

Vlastní zpráva je koncipována tak, že kromě textu s vysvětlením je přílohou systém map a grafických výstupů pro jednotlivé části modelů – 1. hydrologický model a hydrodynamický model říční sítě a vodních děl, simulační model kvality vod v říční síti 3. vlastní simulační hydrodynamický model nádrže (3D) Švihov. Každému z těchto segmentů modelového díla je věnován prostor pro popis, základní funkcionalitu, způsob kalibrace, verifikace a pak popis základních simulačních úloh, které byly v rámci projektu TA 1.6 realizovány. Výstupy jednotlivých segmentů digitálního dvojčete povodí Želivky jsou organizovány do mapových – grafických výstupů, které jsou umístěny v přílohách s popisem mapových děl.

2 Příprava modelu Mike SHE a jeho sestavení k výpočtům a predikci vlivu klimatické změny na vodní bilanci

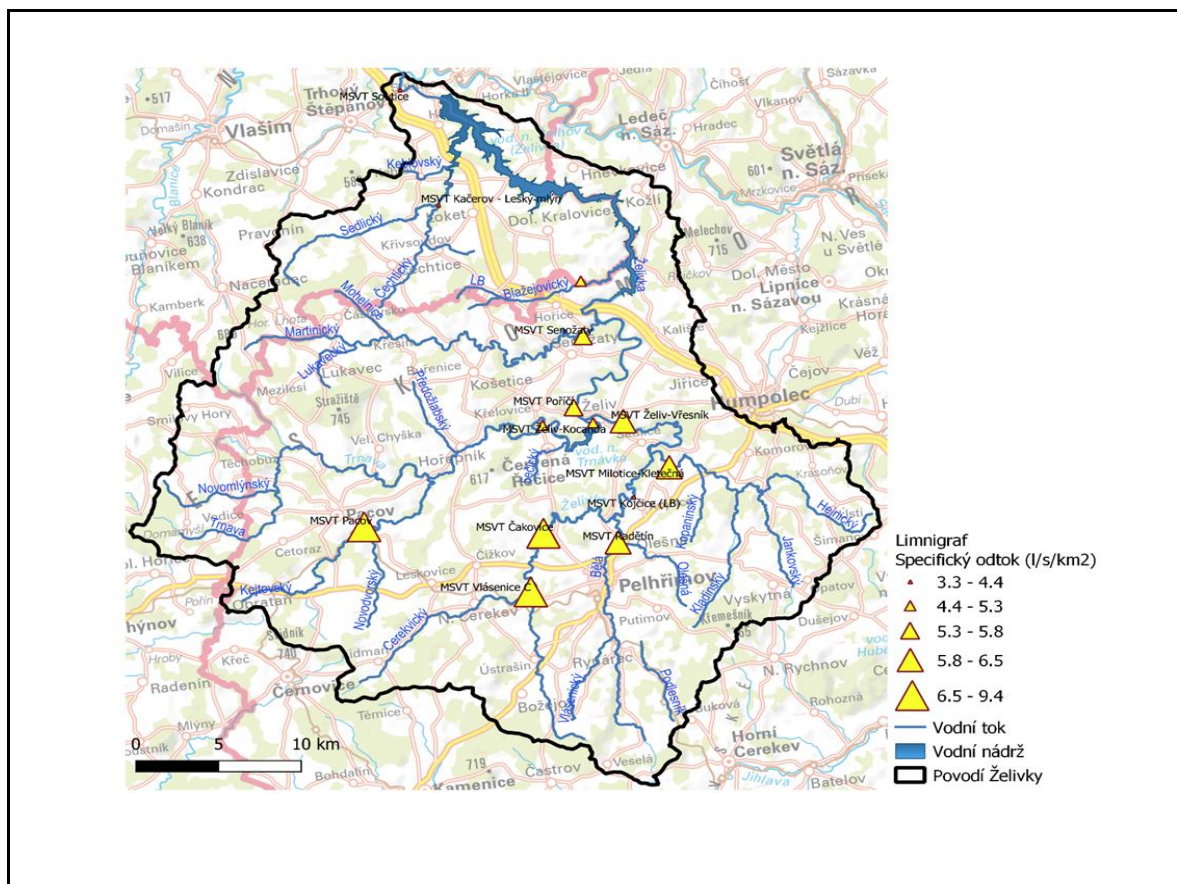
Během aktuální fáze projektu TA byl model úspěšně rekalibrován, verifikován. Tato zpráva poskytuje přehled použitých vstupních dat, popisuje proces jejich zpracování, sestavení modelu, kalibraci a validaci. V závěrečné části jsou zhodnoceny možnosti dalšího využití modelu, zejména s ohledem na vývoj trendů vybraných klimatických a meteorologických proměnných.

2.1 Základní informace a vymezení území

Hydrologický model zahrnuje celé povodí Želivky, vymezené hydrologickou rozvodnicí (viz Obr. 1). Závěrový profil říční sítě je situován v místě soutoku s vodním tokem Sázava. Pro toto území byly využity jednotné mapové vstupy pokrývající celé povodí bez výjimek. Modelová schematizace byla rovněž zvolena jednotná pro celé řešené území. Parametry řídicích rovnic byly nastaveny na základě prostorové regionalizace provedené během kalibračních běhů a citlivostních analýz. Podrobnosti o metodách použitých při tvorbě modelové schematizace a regionalizaci parametrů jsou uvedeny v příslušných kapitolách. V modelu bylo použito 14 hydrologických stanic s měřením průtoků (Tab. 2).

2.2 Modelované území

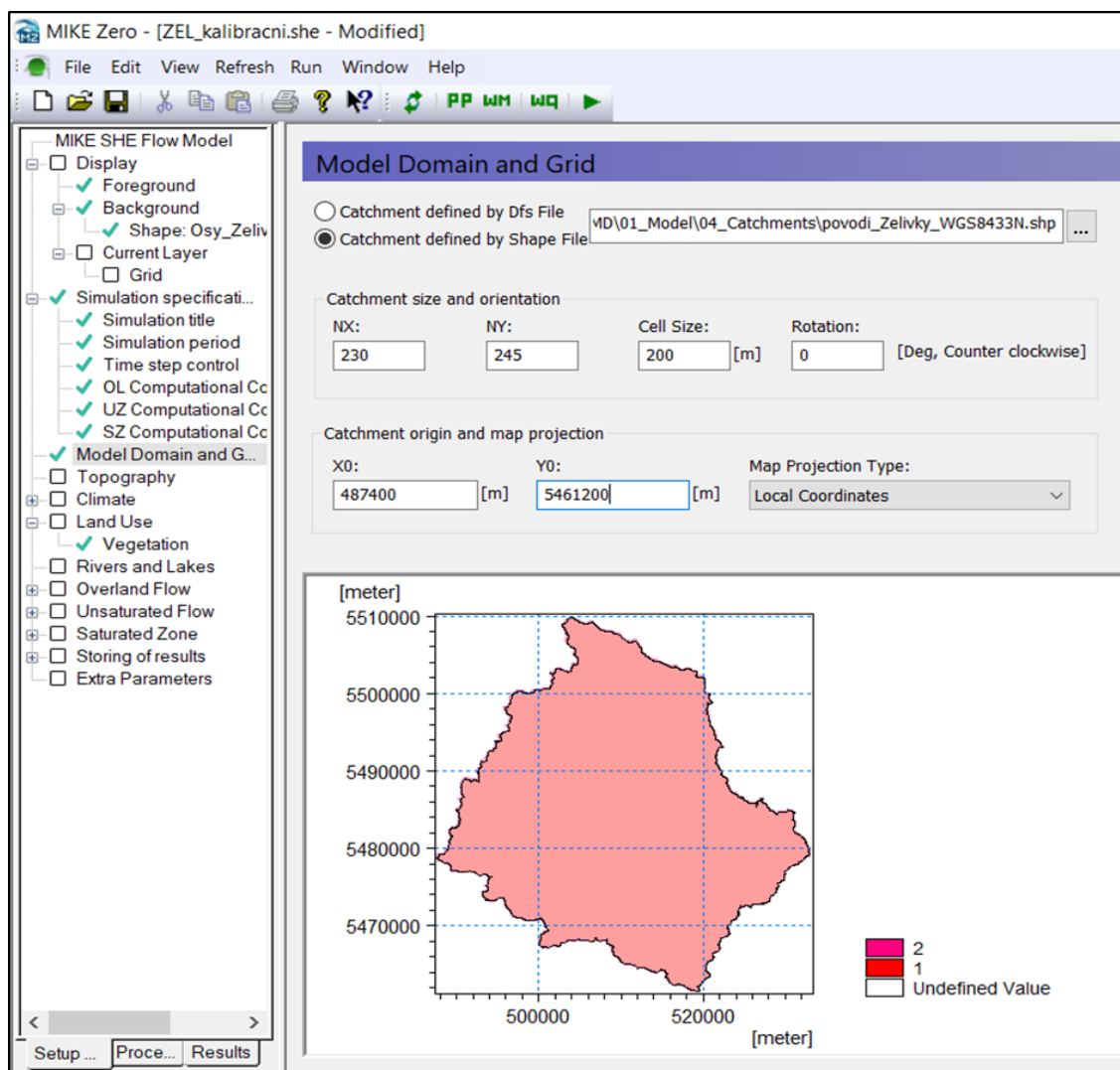
Model zahrnuje povodí Želivky o celkové ploše 1219 km² (dle hydrologické rozvodnice), což odpovídá 30 477 výpočetním buňkám o velikosti 200 x 200 m. Oblast je rozdělena do pravidelného čtvercového gridu s hloubkou modelu 30 m pod povrchem a rozměry 46 km ve směru osy X a 49 km ve směru osy Y. Model je vytvořen v souřadnicovém systému EPSG: 32633 (WGS 84 33N), což zajišťuje jeho kompatibilitu s dalšími modely spravovanými CzechGlobe. Okraj modelu je definován levým dolním rohem sítě, jehož souřadnice jsou X = 487400 m a Y = 5461200 m (viz Obr. 2).



Obr. 1 Hydrologické schéma povodí Želivky a vybraných 14 hydrologických stanic s měřením hladin a průtoků

Tab. 2 Seznam vybraných měrných profilů v povodí Želivky, šedě podbarvené nemají časový záznam dostatečně dlouhý pro celé kalibrační období

Název (MSVT)	X (S-JTSK)	Y (S-JTSK)	Vodní tok	Qa m ³ /s	q l/s/km ²
Čakovice	-698211.1	-1119308.4	Hejlovka	0.8	6.6
Blažejovice	-693774.2	-1102624.8	Blažejovický potok	0.1	4.5
Kačerov - Leský mlýn	-701632.7	-1096396.6	Sedlický potok	0.3	4.2
Červená Řečice	-697323.7	-1112032.8	Trnava	1.7	5.3
Milotice-Kletečná	-690096.7	-1115836	Jankovský potok	0.8	5.9
Kojčice (LB)	-692477.4	-1117567.6	Hejlovka	1.2	4.3
Poříčí	-695306.8	-1111070.6	Želivka	4.5	5.8
Pacov	-708897.2	-1117479	Kejtovní potok	0.4	7.6
Senožaty	-694132.3	-1106353	Martinický potok	0.6	5.4
Radětín	-693817	-1120493.3	Bělá (PE)	0.7	6.4
Vlásenice C	-699479.8	-1123150.4	Cerekvický potok	0.5	9.4
Soutice	-702933.5	-1088366.5	Želivka	2.8	3.3
Želiv-Vřesník	-692455.5	-1112385.6	Želivka	2.6	6.1
Želiv-Kocanda	-694278.2	-1112256.1	Trnava	1.8	5.3



Obr. 2: Geografické zadání modelované oblasti v uživatelském rozhraní MIKE SHE

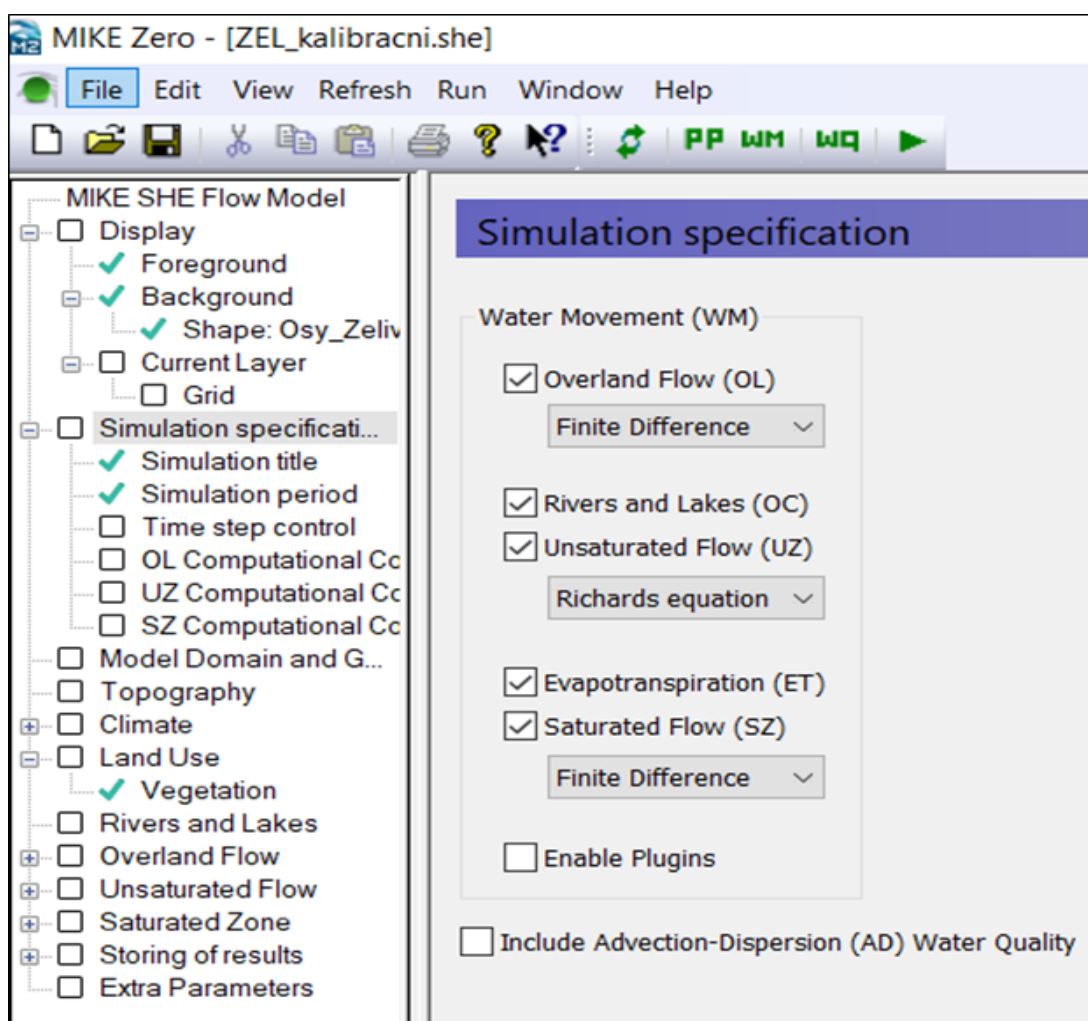
2.3 Nastavení modelovaných procesů a koncept matematického modelu

Pro schematizaci dlouhodobé vodní bilance v povodí Želivky byl vytvořen fyzikálně a procesně založený 3D distribuovaný hydrologický model za použití softwarového nástroje MIKE SHE (MIKE Zero Release 2023, DHI a.s. Dánsko).

Plocha povodí Želivky spadá do oblasti krystalinika. Jednotvárná série Moldanubika je tvořena převážně metamorfity a vykazuje nízkou hodnotu transmisivity. Lze očekávat odtok formovaný především mělkým přípovrchovým prouděním, případně také

povrchovým odtokem v oblastech s vyšším sklonem. Relativně mělké a málo významné polohy podzemní vody jsou spíše lokálního charakteru, obvykle v nepříliš širokých nivách podél hlavních vodních toků. Z hlediska modelování je nutné se zaměřit jednak na procesy proudění v mělké vrstvě paralelně s povrchem a dále na odtok přímo v korytech.

Byla definována schematizace hydrologických procesů se zahrnutím plně dynamického řešení povrchového odtoku včetně vodních toků a nádrží (Obr. 3). Simulace zahrnuje detailní výpočet aktuální evapotranspirace. Proudění v nesaturované zóně je řešeno na základě Richardsovy rovnice. 3D proudění v saturované zóně je řešeno rovněž plně dynamicky na základě rovnice Darcyho zákona.

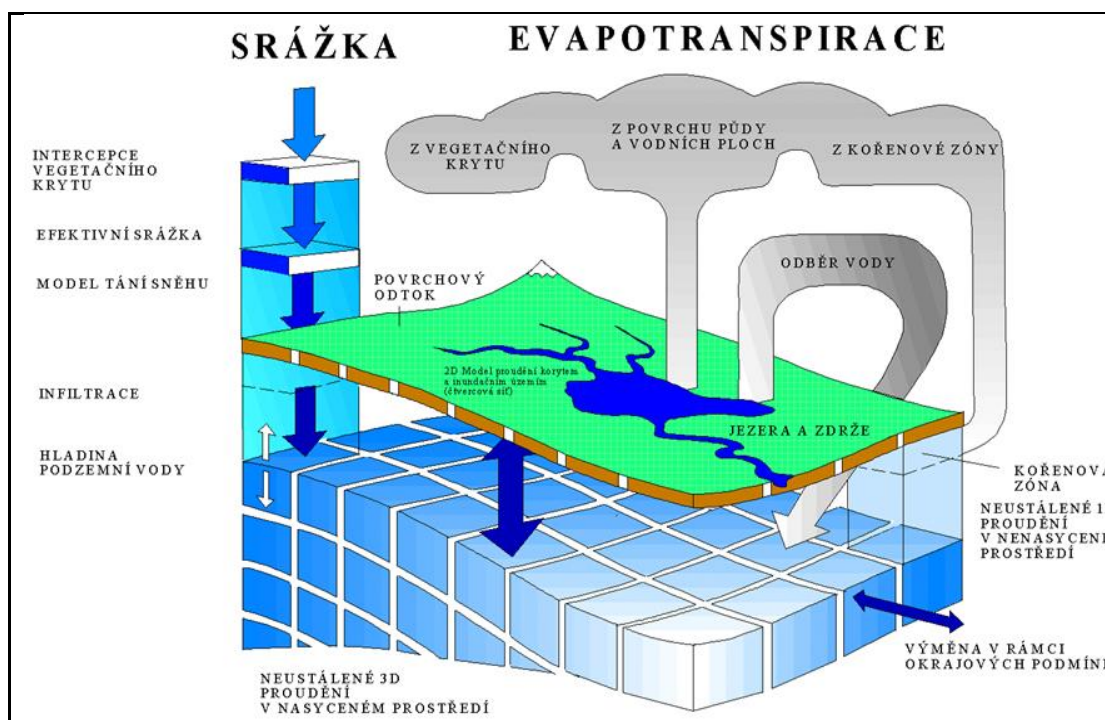


Obr. 3. Základní definice modelovaných procesů zahrnutých do aplikace numerického hydrologického modelu Želivky – schematizace se všemi procesy na základě fyzikálně založených parametrů diferenciálních rovnic.

2.4 Stručný popis modelovacího prostředí MIKE SHE

Model MIKE SHE je dynamický, deterministický matematický modelovací systém pro simulaci pohybu a transportu látek v povrchových a podzemních vodách integrovaným způsobem. Lze jej využít pro komplexní simulaci celého hydrologického cyklu v zájmovém území nebo pro detailní úlohy. K prostorově distribuovanému popisu procesů proudění vody (Obr. 4) lze připojit další moduly (bilance, transport látek, particle tracing apod.). Výstupem jsou časové řady či mapy prostorového rozdělení veličin. Pro modelování pohybu vody lze využít několik různě podrobných schematizací podle typu konkrétní úlohy.

MIKE SHE se běžně používá v úlohách od měřítka jednotlivých metrů až po velká povodí (desítky tisíc km²) a v časovém měřítku od vteřin po roky. Používá se zejména tam, kde je podstatná interakce mezi povrchovou a podzemní vodou (mokřady, nivy, vodní zdroje), při řešení environmentálních úloh (bilance v povodí, klimatická změna, nebezpečí sucha, vlivů lidské činnosti na hydrologický režim, změny využití území), při modelování scénářů budoucího vývoje či managementu povodí a také jako předpovědní model.



Obr. 4: Schéma modelovacího systému MIKE SHE

Hlavní součásti modelovacího systému MIKE SHE zahrnují popis plošného povrchového odtoku, proudění v korytech vodních toků, proudění v nasycené a nenasycené zóně pod povrchem, výpočet aktuální evapotranspirace, intercepce a tání sněhu – včetně propojení a interakcí mezi procesy. Procesy jsou popsány pomocí obecných parciálních diferenciálních rovnic pohybu vody, aproximovaných metodou

konečných diferencí, případně zjednodušenými konceptuálními popisy při zvolení zjednodušené formy výpočtu daného procesu.

2.5 Vstupní data a schematizace

Kapitola zahrnuje popis vstupních dat modelu povodí řeky Želivky. Při sestavování databáze vstupních dat byl kladen důraz na nejvyšší možnou míru časoprostorové diskretizace datových vstupů.

2.5.1 Digitální model terénu – modelová vrstva topografie

Digitální model terénu vstupuje do modelu ve formě nadmořské výšky agregované do výpočetních buněk (200x200 m) jako průměrná hodnota této veličiny. Podkladní vrstva pro výpočet průměrné nadmořské výšky je bodové pole 5G modelu terénu zpracované Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním na území ČR (v souřadném systému S-JTSK). Nejprve byl z mračna bodů metodou IDW (Inverse Distance Weighting) vygenerován geotiff v rozlišení 5m. Tento rastr byl převeden do jednotného modelového geografického systému EPSG 32633 (WGS 84 + UTM zone 33N).

V rámci upřesnění hydrologického modelu došlo k úpravám rastru v oblastech okolo vodních toků (okolí 200 m) nutným pro správný popis území v rámci hydrologického modelu (pozn.1). Digitální model terénu byl v těchto místech „zhlazen“ metodou „Zarovnání lokálních depresí“ (pozn. 2). Jedná se o hydrologickou korekci v rámci které jsou vyvýšeny všechny lokální deprese na úroveň okolního terénu tak, aby byl vždy zajištěn gravitačně řízený odtok z dané lokality. Důvodem použití této korekce je zarovnat terén v místech ostrých terénních zlomů, kde není koryto ve čtvercovém rastru průběžné. Vznikl tedy pomyslný digitální terén údolí „bez koryta“, kde nejnižší bod údolnice reprezentuje úroveň břehů. Koryto a jeho detailní geometrie je popsána v 1D říčním modulu MIKE HYDRO a s ostatním moduly MIKE SHE je integrováno přes břehové linie.

Rastr hydrologicky korektního digitálního modelu terénu byl následně metodou IDW agregován na velikost buňky 200x200 m. Na tento digitální model byla opět aplikována hydrologická korekce „Zarovnání lokálních depresí“, ale tentokrát v celé ploše území povodí Želivky (zarovnání lokálních depresí). Účelem této hydrologické korekce bylo odstranit uměle vzniklé lokální deprese, které mohou v modelu způsobit nežádoucí akumulaci vody. Vznikla tak vrstva modelové topografie.

Poslední aplikovanou hydrologickou korekcí bylo propojení vrstvy modelové topografie s říční sítí. Tato korekce vycházela z předpokladu, že 200 m buňka nesprávně reprezentuje výškopis říčního údolí, které je popsáno modulem MIKE HYDRO. Vzhledem k aplikované míře agregace a generalizace se nadmořské výšky modelové vrstvy topografie na některých úsecích říčních koryt lišily od zaměření. Správné sesazení říčních koryt a modelové vrstvy topografie je navíc zásadním předpokladem správného popisu předávání odtoku mezi jednotlivými moduly a obzvláště významnou

¹ Hydrologické korekce digitálního modelu terénu

² Fill Holes

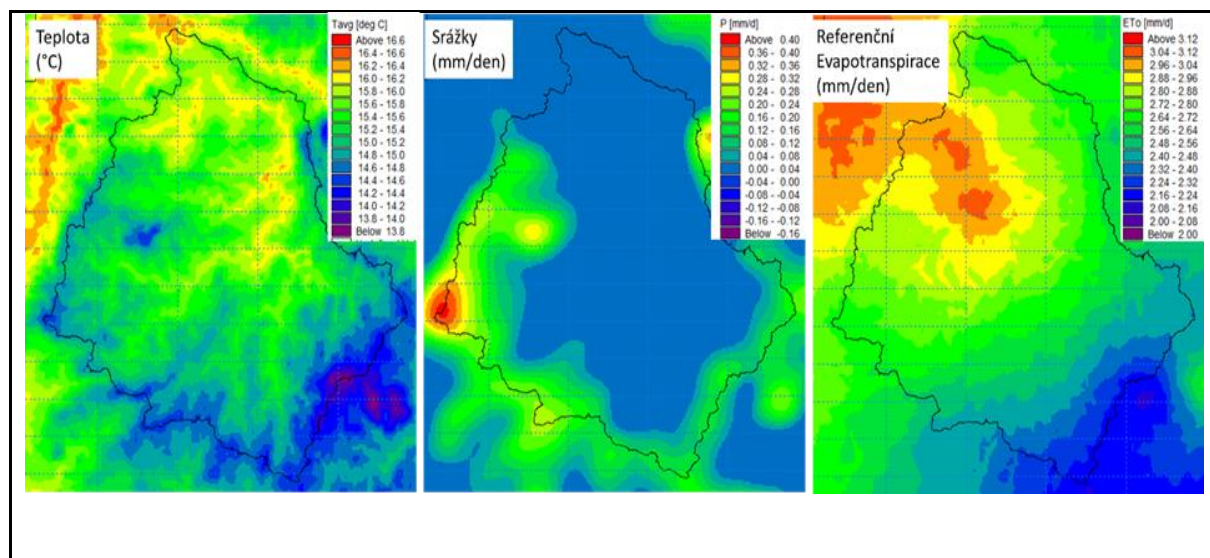
roli hraje v nastavení generace základního odtoku řízeném výškovými gradienty hladin vody v jednotlivých modulech. Proto byla modelová topografie upravena tak, aby buňky reprezentovaly popis z modelu říční sítě (P1.1 – Přílohy). Výškové rozdíly byly vyrovnány, a tak byl zajištěn správný přetok mezi jednotlivými moduly, byly výškové rozdíly vyrovnány. V některých lokalitách tak došlo k pomyslnému zvětšení šířky údolí reprezentovaného modelovým souborem topografie. Vzhledem k tomu, že nejsou v MIKE SHE modelovány rozlivy, není očekáván negativní vliv tohoto zkreslení.

2.5.2 Dynamika sněhových zásob

V modelu je zahrnut dynamický výpočet generace a tání sněhu a odtoku tavných vod v závislosti na denních hodnotách teploty vzduchu a na úhrnu srážek. Nastavení řídicích parametry empirické rovnice „degree-day“ (Degree Day Factor, Teplota tání) bylo hledáno v rámci kalibrace modelu. Parametry byly regionalizovány na základě výškových a sklonitostních parametrů dané lokality.

2.5.3 Klimatické podmínky

Klimatická data vstupují do modelu ve formě okrajových podmínek (Obr.5). Jedná se o předepsané denní úhrny srážek, referenční evapotranspirace (pozn. 3) a průměrné denní hodnoty teploty. Distribuce těchto proměnných je dána gridem 500 x 500 m a vychází z prostorového rozlišení podkladních dat.



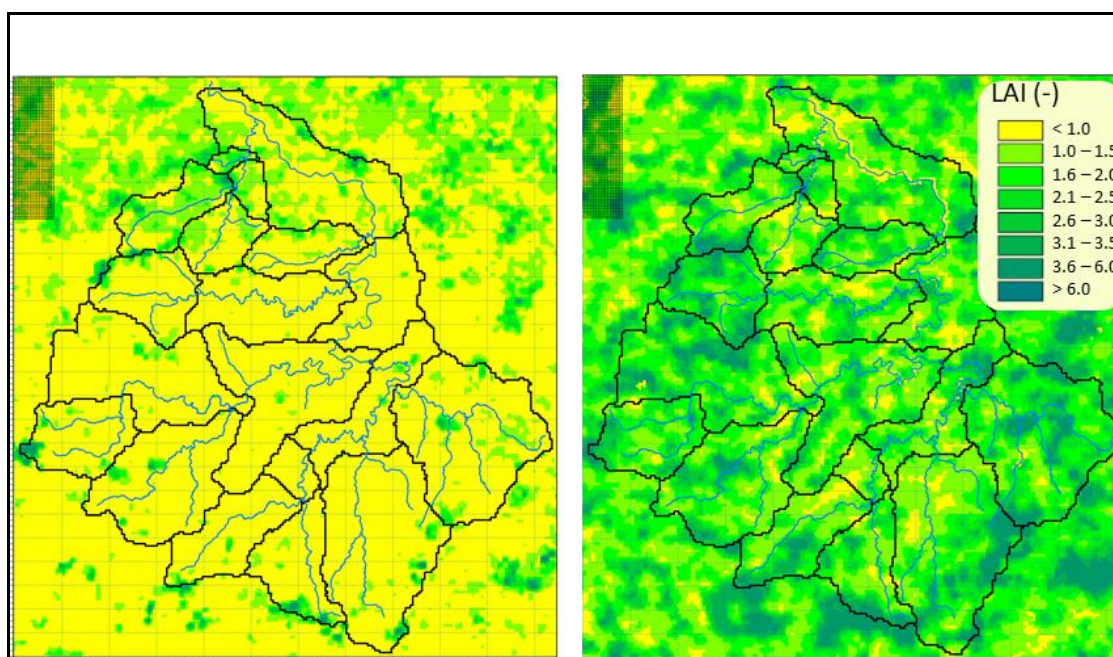
Obr. 5: Příklad plošné distribuce klimatických vstupů zadaných v denním časovém kroku (23.8.2008)

³ Potenciální evapotranspirace za daných klimatických podmínek při dostatku půdní vláhy

2.5.4 Vegetace

Základním podkladem pro určení vegetačních parametrů je databáze snímků dálkového průzkumu Země pořízená družicí Terra (senzor MODIS).

Vegetační parametry (Obr. 6) byly zadány formou časoprostorově distribuovaných map o rozlišení 500x500 m a délce časového kroku 1 den. Hodnoty vegetačních parametrů jsou odvozeny z období hydrologických let 2001 – 2020, které je plně pokryto snímkováním. Pro hydrologické roky 1981-2000 byly stanoveny náhradní roky ze snímkaného období na základě podobnosti indexu NDVI⁴. Z družicových snímků byla převzata hodnota LAI (Index listové plochy) a hodnoty dalších parametrů (Crop coefficient – Kc, Hloubka kořenů – Rd) byly z mapy LAI odvozeny.



Obr. 6: Příklad rozložení indexu listové plochy (LAI) v prostoru povodí řeky Želivky v období vegetačního klidu (vlevo, 1.1.2000) a na vrcholu vegetační sezóny (vpravo, 31.7.2000)

Dalším zdrojem dat o využití území byla vrstva Land Use CLC 2018 (CORINE Land Cover 2018⁵). Standardní třídy využití území byly agregovány do 8 kategorií, (Tab. 3 a P 2.2 – Přílohy). V povodí řeky Želivky převažují orné plochy a jehličnatý les s podílem na celkové ploše 59% a 30%. Třetí nejrozšířenější kategorií je trvalý travní porost, který pokrývá 6% plochy území. Zastavěné plochy pokrývají 3% území a smíšené a jehličnaté lesy pokrývají podle klasifikace CLC 2018 pouze 2%. Vodní plochy pokrývají 1% území a jedná se obzvláště o plochu vodního díla Švihov.

Tab. 3 Agregované kategorie využití území a jejich zastoupení v povodí řeky Želivky (CORINE Land Cover 2018)

⁴ Normalized difference vegetation index

⁵ Copernicus Land Monitoring Service, DOI: <https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acdf0>

Kód	LU	Area (km ²)
100	Zástavba	39.2
211	Orná půda	799.6
231	Trvalý travní porost	76.2
311	Listnatý les	0.9
312	Jehličnatý les	403.7
313	Smíšený les	30.2
500	Vodní plochy	15.7

2.5.5 Půdy a hydropedologické vlastnosti

Hydropedologické vlastnosti půd jsou zadány do modulu nesaturovaného proudění a zásadním stylem ovlivňují infiltrační rychlost a kapacitu půd, ale také využitelnou vodní kapacitu zásadní pro stanovení transpirace vegetací. Stanovení půdních vlastností vychází ze dvou typů datových podkladů. V prvním kroku je zapotřebí vymezit a regionalizovat půdní typy a jejich pokrytí území. V hydrologickém modelu povodí řeky Želivky byla pro tento úkol využita mapa půdních typů ČR (Tomášek a kol., 1995; 1:500 000). K regionům daného půdního typu je následně zapotřebí přiřadit vhodné hydropedologické vlastnosti určené na základě terénního šetření anebo analogií se známými půdními sondami. V případě modelu povodí řeky Želivky byla v první fázi použita analogie půdních parametrů s půdními sondami v sousedním povodí řeky Dyje umístěnými ve stejných geografických podmínkách. Zároveň proběhlo terénní šetření 5 lokalitách uvnitř hranic povodí řeky Želivky, avšak v čase tvorby této průběžné zprávy ještě nebyly výsledky půdního rozboru vzorků z 19 kopaných půdních sond k dispozici.

V povodí řeky Želivky převažují kambizemě (82,7% plochy povodí). Menší podíl plochy připadá na pseudogleje a oglejené půdy (9%) (P 2.3 – Přílohy).

Mapa půdních typů byla protnuta s vrstvou využití území a půdní vlastnosti byly pro jednotlivé půdní typy přiřazovány na základě krajinného pokryvu. Data půdních vlastností byla určena analogií z měření realizovaných v roce 2020-2021 v CzechGlobe. Vytypované lokality kopaných sond reprezentují půdy pod hlavními typy využití krajiny (les, orná půda, pastvina). Mateční horninou na většině povodí jsou ruly. Proto byla snaha zvolit reprezentativní půdní sondy s odpovídajícím substrátem. Základní hydropedologické vlastnosti zadané do modelu jsou Van Genuchten parametry pro tvorbu retenčních křivek (α , n), hodnoty objemové vlhkosti půdy při daných úrovních nasycení (plná saturace, polní kapacita, bod vadnutí), koeficient saturované vodivosti (K_s) a parametry popisující rychlost a objem vody proteklé systémem půdních makropórů a preferenčních cest ve vertikálním směru. Hloubka půdy byla odvozena na základě mapové služby VÚMOP - KPP (Komplexní průzkum půd). V povodí se nachází především půdy středně hluboké až hluboké (60 cm)

V zastavěných lokalitách a v místech vodních ploch byly zadány náhradní půdní vlastnosti (nízká hodnota K_s , malá retenční kapacita). Jednotlivé půdní typy v povodí Želivky byly použity pro nastavení parametru Hydraulická vodivost (K_s). V případě hnědé půdy (Kambizem) je očekávána větší dynamika proudění a proto je zadána

střední hodnota K_s (Model_Id = 1xxx). U pseudogleje je naopak zadána nižší hydraulická vodivost. (Model_Id = 2xxx). Pro hnědé půdy se surovými půdami (u vodní nádrže) jsou zadány vyšší hodnoty saturované K_s . Zadání vychází z předpokladu větší skeletovitosti a tudíž byl zadán větší podíl vody, která je převedena systémem makropórů přímo do saturované zóny (Model_Id = 3xxx). Dále byla vyčleněna samotná plocha vodních děl (Model_Id = 5xxx) a zastavěných ploch (Model_Id = 4xxx), které byly z hlediska schematizace půdních vlastností pojednány podobným způsobem. Vychází se z předpokladu, že v obou typech lokalit dochází ke značnému omezení infiltrační rychlosti. Byla zde zavedena náhradní půda s nízkými hodnotami K_s . Data půdních vlastností byla obohacena o informace z prostorové databáze KPP (komplexní průzkum půd) vzniklé v 70. letech 20. století. Databáze poskytla cenné informace například ohledně množství organického uhlíku ovlivňujícího infiltrační rychlost i kapacitu půd a dále databáze poskytuje rozsáhlé vyhodnocení hydropedologických vlastností půd vyhodnocených na mračnu bodových lokalit (P 2.4 – Přílohy).

Využitelnost tohoto datového zdroje je vzhledem k dataci jeho původu v této fázi projektu předmětem testování.

2.5.6 Meliorace a parametry přímého povrchového odtoku

Vzhledem k bilančnímu charakteru modelu a charakteristikám území byl povrchový odtok v modelu schematizován zjednodušeně. Předpokládá se, že plošný povrchový odtok má z hlediska dlouhodobé bilance význam spíše malý, lokální a omezený na období extrémních srážek či jarního tání. V modelu je aproximován umožněním proudění po povrchu terénu ve směru sklonu (aproximace 2D difusní vlnou) s jednotnou hodnotou Manningova drsnostního součinitele $N = 10$.

2.5.6.1 Povrchová drenáž

Pro hydrologický model povodí Želivky byla dále obstarána geodatabáze dat o melioracích. Součástí datové sady jsou plochy „Areál odvodnění“ s atributy vycházejícími z intenzity odvodnění (Celková kapacita) a dále místa svodu drenážního systému do vodního toku. Plochy s celkovou kapacitou pod 10 tis. m³ byly z důvodu generalizace vyloučeny.

Ostatní plochy byly kategorizovány do 6 tříd omezených percentily celkové kapacity (viz. P 2.5 - Přílohy). Výsledkem byla regionalizace intenzity odvodnění. Intenzita je do modelu zavedena parametrem povrchové drenáže. Stanovení absolutních hodnot tohoto parametru bylo předmětem kalibrace, avšak prostorové rozdělení vychází z této regionalizace.

Rychlý povrchový odtok v modelu není pouze výsledkem antropogenního odvodnění zemědělské půdy, ale vychází i z předpokladu epizodické generace koncentrovaného odtoku preferenčními cestami⁶. Pro schematizaci tohoto předpokladu byly dále regionalizovány parametry povrchové drenáže na základě výstupů sklonitostní analýzy. Ta byla zhotovena na podkladu DMR 5G v gridu 5x5 m. Následně byly vybrány oblasti se sklonem větším než 10 %; (5,7°), (P 2.6 - Přílohy). Těmito oblastem byla

⁶ Zde se nejedná o preferenční cesty v půdě, ale spíše o strouhy, modelem nepopsané vodní toky a cestní síť

přiřazen identifikátor ID = 10. Výsledná regionalizace oblastí se zvýšenou generací koncentrovaného povrchového odtoku vychází z kombinace odvodněných a sklonitých oblastí (P 2.7 - Přílohy). V oblastech překryvu mají vyšší prioritu meliorace.

Výsledkem je grid 200 x 200 m se 7 třídami, 1-6 označují oblasti meliorace rozčleněné podle jejich celkové kapacity a třída 10 reprezentuje oblasti s vyšším sklonem než 10 %. V oblastech s překryvem mají prioritu oblasti meliorací. Pro jednotlivé třídy byla nastavena hodnota podílu odvodněné plochy, která je vztažena k výpočetní buňce gridu. Například, výpočetní buňka připadá do kategorie 4, potom je 25 % z plochy této buňky odvodněno rychlým odtokem až do dosažení kapacity „drénu“ (pozn. 7)⁷.

Odtok generovaný povrchovou drenáží je přidán do říčního modelu ve formě laterálního přítoku. Povodí řeky Želivky bylo pro tyto potřeby rozděleno do podoblastí, z nichž je odtok odváděn do říčních úseků spadajících do dané oblasti (P 2.8 - Přílohy).

2.5.7 Odběry povrchových vod

Z oficiálního seznamu odběrů a vypouštění předaného PVL bylo vybráno 6 odběrných míst s průměrným měsíčním odebraným množstvím větším než 0.5 l/s (P 2.9 - Přílohy, Tab. 4): Seznam všech míst odběrů povrchových vod v povodí řeky Želivky. Červeně jsou označeny odběry zahrnuté v modelu povodí řeky Želivky). Menší odběry (nebo evidovaná místa bez záznamů o odběru) byly z důvodu generalizace modelu zanedbány. Odběrná místa byla polohově usazena a byla jim přiřazena informace o příčném profilu říčního modelu, ke kterému jsou odběry připojeny formou okrajové podmínky. Profil pro napojení okrajové podmínky byl zvolen podle následujících priorit:

- Nejblížejší profil místu odběru/vypouštění nebo zaústění toku nezahrnutého do říčního modelu, do kterého odběr/vypouštění ústí
- Pakliže je místo zaústění mezi 2 profily, byl zvolen ten ve směru proudění
- Pakliže je nejblížejší profil poblíž hydraulického objektu na toku, byl zvolen profil jiný

Tab. 4: Seznam všech míst odběrů povrchových vod v povodí řeky Želivky. Červeně jsou označeny odběry zahrnuté v modelu povodí řeky Želivky

⁷ Pomyslný drén funguje na metodologickém principu lineární nádrže. Svádí odtok do přiřazeného vodního toku a má kapacitu omezenou rychlostí prázdnění nádrže. Rychlost je kalibračním parametrem a hodnoty se stanovují iterativně na základě úspěšnosti srovnání modelovaných a pozorovaných dat průtoků na měrných profilech.

Číslo VHB	Název místa	Vodní tok	Říční km	X JTSK	Y JTSK	Průměrný odběr
120810	Dřevozpracující družstvo Lukavec	Kejtovecký potok	9.4	-709151	-1117804	-
120827	Lihovar Dvořiště Šimpach	Machátský potok	1.1	-713455	-1120465	0.25
120807	DH Dekor Lukavec Mladé Bříště	Jankovský potok	10.1	-685866	-1117862	1.49
120803	Škrobárny Pelhřimov Bělá	Bělá	6.9	-694800	-1123377	1.97
120818	Dřevozpracující družstvo Lukavec	Lukavecký potok	4.5	-710204	-1106941	-
120821	Dřevozpracující družstvo Lukavec	Martinický potok	35.2	-709206	-1104547	0.87
120801	CEREPA Červená Řečice	Trnava	9.1	-697414	-1111623	11.38
120867	AGRIA Obrataň	Cetorazský potok	1.8	-713511	-1118914	0.12
120110	Želivská provozní ÚV Želivka	Želivka	4.4	-700440	-1089342	3028.21
120785	ALKO Kožlí	Želivka	24.6	-689647	-1096907	0.51
120830	TJ Start Lukavec zasnežování	Martinický potok	30.7	-706251	-1104910	0.3
120868	Dřevozpracující družstvo Lukavec	Lukavecký potok	3.5	-710292	-1106195	-

2.5.8 Vypouštění povrchových vod

Z oficiálního seznamu odběrů a vypouštění předaného PVL bylo vybráno 37 míst vypouštění s průměrným měsíčním odebraným množstvím větším než 0.5 l/s (P 2.10 – Přílohy Tab. 5). Menší odběry byly z důvodu generalizace modelu zanedbány. Místa byla polohově usazena a byla jim přiřazena informace o příčném profilu říčního modelu, ke kterému jsou odběry připojeny formou okrajové podmínky. Profil pro napojení okrajové podmínky byl zvolen podle stejných priorit jako v případě odběrů povrchových vod.

Tab. 5: Seznam všech míst vypouštění povrchových vod v povodí řeky Želivky. Modře jsou označeny místa vypouštění zahrnutá v modelu povodí řeky Želivky

Číslo VHB	Název míst	Vodní tok	Riční km	X JTSK	Y JTSK	Průměrný odběr (l/s)
120104	VODAK Humpolec Křivsoudov ČOV	Křivsoudovský potok	0.4	- 702592	- 1099111	0.6
120105	VODAK Humpolec Loket ČOV	Loketský potok	2.1	- 699635	- 1096882	0.9
120106	VODAK Humpolec Loket Brzotice ČOV	bezejmenný tok	2.3	- 698136	- 1096394	0.4
120116	Obec Chmelná KČOV	bezejmenný tok	0.4	- 708638	- 1097256	0.7
120120	Obec Blažejovice ČOV	bezejmenný tok	0.7	- 694093	- 1102173	0.2
120195	VODAK Humpolec Tomice ČOV	Tomický potok	3.2	- 696400	- 1098690	0.4
120196	Obec Snět KČOV	bezejmenný tok	0.3	- 691748	- 1101604	0.2
120199	CEREPA Červená Řečice ČOV	Trnava	9.1	- 697290	- 1111990	10.3
120801	VODAK Humpolec Červená Řečice ČOV	Řečický potok	0.4	- 696265	- 1113482	6.0
120802	VODAK Humpolec Obrataň ČOV	Kejtovecký potok	20.1	- 714289	- 1121123	3.1
120803	Obec Sedlice ČOV	LP Želivky z lesa v ř.km 65,200	1.4	- 692271	- 1114425	0.5
120804	VoKa Onšov KČOV	Martinický potok	16.2	- 699242	- 1106429	0.9
120805	Dřevozpracující družstvo Lukavec ČOV	bezejmenný tok	0.1	- 710371	- 1106261	0.5
120806	ZOD Hořice ČOV	Blažejovický potok	7.5	- 695341	- 1103173	0.1
120808	VODAK Humpolec Červená Řečice Popelištná KČOV	Popelištný potok	1.2	- 695916	- 1114989	0.2
120810	Město Pacov Roučkovice VK	bezejmenný tok	1.1	- 707768	- 1116459	0.2
120812	Obec Ústrašín VK	Želivka	95.6	- 699597	- 1127435	0.3
120813	VoKa Kaliště VK	bezejmenný tok	1.7	- 687357	- 1105832	0.5
120814	Obec Veselá VK	bezejmenný tok	1.3	- 696254	- 1135064	0.4
120815	Město Pacov Jetřichovec BR	bezejmenný tok	0.8	- 711432	- 1112879	0.3
120816	CEREPA Červená Řečice	Trnava	8.4	- 697333	- 1112086	0.1
120817	VoKa Bratřice VK	bezejmenný tok	0.5	- 710219	- 1111479	0.3
120818	Obec Čelístná VK	bezejmenný tok	1.0	- 697056	- 1130532	0.2
120819	VoKa Dobrá Voda u Pelhřimova VK	Podlesník	4.6	- 692391	- 1131136	0.3
120820	VoKa Leskovice ČOV I	bezejmenný tok	1.6	- 705290	- 1121438	0.2
120821	Obec Hojanovice ČOV	bezejmenný tok	1.8	- 689907	- 1104946	0.1

120822	VODAK Humpolec Krasoňov BR	bezejmenný tok	0.7	- 681789	- 1117142	0.4
120824	Obec Moraveč VK	Cerekvický potok	9.5	- 705628	- 1123977	0.3
120825	ERMAR Iihovar Proseč- Obořiště	bezejmenný tok	1.6	- 702141	- 1124607	0.8
120826	VoKa Dobrá voda u Pacova VK	Novodvorský potok	8.4	- 709445	- 1123924	0.1
120827	VoKa Těchobuz ČOV	Barborka	1.5	- 714660	- 1111799	0.2
120828	VoKa Lidmaň ČOV	Cerekvický potok	13.4	- 708364	- 1126435	0.4
120829	Obec Jankov VK	bezejmenný tok	0.5	- 683851	- 1125995	0.1
120851	Obec Smilovy Hory Smilovy Hory VK	Barborka	8.0	- 718037	- 1107900	0.2
120855	Obec Pojbuky VK	bezejmenný tok	1.5	- 717511	- 1113080	0.2
120856	VODAK Humpolec Humpolec Petrovice VK	Vitický potok	4.7	- 689849	- 1110909	0.2
120857	HRANIPEX Komorovice ČOV	bezejmenný tok	0.5	- 685624	- 1115273	0.1
120858	Obec Věžná VK	Vitířovský p.	1.5	- 712482	- 1122692	0.1
120859	Město Pacov Velká Rovná VK	bezejmenný tok	0.8	- 714964	- 1115514	0.2
120860	Obec Ondřejov VK	bezejmenný tok	0.5	- 699109	- 1126800	0.2
120861	VODAK Humpolec Moraveč KČOV	Cerekvický potok	9.2	- 705292	- 1123996	0.3
120862	VoKa Vystrkov ČOV	ZVHS 109020290/6.1	0.3	- 684937	- 1114783	0.6
120863	VoKa Putimov VK	bezejmenný tok	2.7	- 692297	- 1125398	0.3
120864	Obec Obrataň Vintířov BR	Vitířovský p.	3.5	- 712602	- 1124110	0.2
120865	Obec Smilovy Hory Malý Ježov VK	Barborka	6.0	- 716441	- 1108538	0.1
120866	Obec Smilovy Hory Velký Ježov VK	Barborka	5.0	- 715950	- 1109289	0.1
120867	Obec Smilovy Hory Stojslavice VK	ZVHS 109020390/4	0.2	- 717893	- 1107555	0.1
120868	VoKa Utěchovice pod Stražištěm VK	bezejmenný tok	0.7	- 707193	- 1109708	0.2
120869	VoKa Velký Rybník VK	Kopaninský potok	1.2	- 688197	- 1117072	0.2
120870	VoKa Olešná VK	Olešná	2.8	- 692255	- 1121713	0.5
120871	VoKa Zachotín VK	bezejmenný tok	0.9	- 685772	- 1120799	0.3
120872	VoKa Mladé Bříště VK	bezejmenný tok	0.4	- 686324	- 1117357	0.2
120874	VoKa Cetoraz ČOV	Cetorazský potok	2.7	- 714032	- 1118334	0.4
120875	Obec Želiv Vřesník VK	PBP Želivky-Vřesník (02)	0.9	- 691495	- 1112379	1.9

120876	Obec Křelovice ČOV	bezejmenný tok	0.2	- 697586	- 1111514	0.6
120877	Obec Věžná ČOV	Vitřovský p.	1.3	- 712680	- 1122609	12.6
120880	KAMENOLOMY ČR Těchobuz	Barborka	0.2	- 713534	- 1112112	2.1
120881	VoKa Kaliště ČOV	bezejmenný tok	1.5	- 687565	- 1105768	1.7
120882	VoKa Vyskytná nová ČOV	bezejmenný tok	1.0	- 684591	- 1123968	0.9
120883	VODAK Humpolec Pelhřimov Myslův VK	Myslůvský potok	2.6	- 697135	- 1125791	56.1
120884	Obec Čížkov VK	bezejmenný tok	2.1	- 702014	- 1121569	6.8
120885	Obec Samšín Samšín VK	bezejmenný tok	0.8	- 705671	- 1115606	1.2
120886	VoKa Nový Rychnov Sázava ČOV	Nemojovský potok	8.7	- 688253	- 1127998	0.1
120888	VoKa Nová Cerekev Proseč-Obořiště VK	bezejmenný tok	1.5	- 702006	- 1124511	3.0
120889	VoKa Zajíčkov VK	Podlesník	1.7	- 693226	- 1128906	0.3
120890	Obec Bělá VK	Bělá	24.5	- 693877	- 1136391	0.3
120891	Obec Útěchovičky VK	Útěchovičský potok	1.7	- 703579	- 1118424	0.2
120892	VODAK Humpolec Pelhřimov Skryšov VK	bezejmenný tok	0.2	- 694080	- 1125423	78.2
120893	Obec Bádovice VK	bezejmenný tok	1.6	- 698248	- 1117541	0.1
120895	VoKa Zhořec VK	bezejmenný tok	0.5	- 713447	- 1113968	0.1
120896	Obec Samšín Přáslavice VK	bezejmenný tok	0.3	- 704380	- 1115500	0.1
120897	Dřevozpracující družstvo Lukavec BR	bezejmenný tok	0.0	- 710284	- 1106271	0.1
120952	Obec Ústí ČOV	bezejmenný tok	0.2	- 681078	- 1120141	1.2
120958	Obec Kalhov VK	bezejmenný tok	0.1	- 679054	- 1119309	0.2
121118	SHB Kamenolom Bernartice	LBP Želivky do nádrže Švihov v ř. km 12,2 - od Lipiny	1.6	- 699359	- 1094113	0.3
121778	Obec Kamenná Lhota ČOV	LP č. 2 od Kamenné Lhoty (přítok č.3) - LP LP Hradišského potoka od rybníka Pinkas	0.3	- 688670	- 1099314	0.3
121801	VoKa Vokov VK	bezejmenný tok	0.3	- 695637	- 1126986	0.2
121802	Obec Kojčice VK	bezejmenný tok	0.8	- 692211	- 1118206	0.2
121803	Obec Kojčice VK	bezejmenný tok	0.6	- 691743	- 1117901	0.1
121808	Obec Kojčice ČOV	bezejmenný tok	2.8	- 692328	- 1117769	0.4
124048	VaK Havlíčkův Brod Kožlí ČOV	PP Želivky od obce Kožlí (přítok č. 10)	1.2	- 690090	- 1097070	1.3

124062	Čistírna OV Pelhřimov Pelhřimov ČOV	Bělá	5.0	- 694742	- 1121731	70.8
124063	Město Pacov ČOV	Kejtovecký potok	9.0	- 708965	- 1117516	14.8
124064	VODAK Humpolec Dolní Kralovice ČOV	Zahrádkický potok	2.5	- 694848	- 1098790	3.3
124073	Obec Hořepník ČOV	Trnava	19.1	- 701705	- 1112896	2.0
124074	VODAK Humpolec Pošná Pošná VK	bezejmenný tok	0.3	- 708119	- 1118330	0.5
124075	VODAK Humpolec Pošná Proseč u Pošné VK	bezejmenný tok	0.5	- 707791	- 1120098	0.2
124076	VODAK Humpolec Košetice ČOV	bezejmenný tok	0.3	- 700105	- 1108185	3.6
124077	Městys Lukavec ČOV	Lukavecký potok	1.4	- 708889	- 1105571	6.0
124173	VoKa Vyskytná stará ČOV	bezejmenný tok	1.4	- 684922	- 1124218	1.0
124199	VoKa Nová Cerekev ČOV	bezejmenný tok	0.2	- 702595	- 1123314	2.0
124201	VoKa Senožaty ČOV	bezejmenný tok	0.7	- 695460	- 1107148	4.8
124205	Obec Velká Chyška VK	Smrčinský potok	0.8	- 707818	- 1112776	0.3
124211	Obec Křelovice VK	bezejmenný tok	0.4	- 697648	- 1111327	0.5
124228	VODAK Humpolec Želiv ČOV	Želivka	52.2	- 695118	- 1111675	6.6
124234	VODAK Humpolec Božejov ČOV	bezejmenný tok	0.5	- 700264	- 1129936	2.7
124247	VoKa Hořice ČOV	bezejmenný tok	0.3	- 695660	- 1103655	0.3
124248	VoKa Vojslavice ČOV	PBP Želivky v ř.km 38,400 - od Vojslavic	0.3	- 692338	- 1105240	0.3
124249	VODAK Humpolec Bernartice ČOV	bezejmenný tok	2.1	- 698314	- 1094850	1.4
124250	VaK Havlíčkův Brod Hněvkovice ČOV	LP č. 1 (přítok č. 3) - LP PP Želivky od Chotěměřic	0.2	- 693603	- 1095131	1.1
124264	VoKa Komorovice BR	bezejmenný tok	0.5	- 685618	- 1115270	0.3
124286	VODAK Humpolec Hněvkovice VK	Hněvkovický potok	3.5	- 686201	- 1114025	0.5
124290	VoKa Cetoraz VK	Cetorazský potok	3.0	- 714004	- 1118138	0.4
124291	Obec Libkova Voda VK	bezejmenný tok	0.2	- 698026	- 1128938	0.5
124292	VoKa Lidmaň VK	bezejmenný tok	0.2	- 708684	- 1126659	0.4
124293	Obec Kámen u Pacova VK	bezejmenný tok	0.5	- 709958	- 1122204	0.3
124298	VODAK Humpolec Čechtice ČOV	bezejmenný tok	0.6	- 704673	- 1099789	5.0
124314	Obec Pavlov BR	bezejmenný tok	0.0	- 694375	- 1127030	0.3

2.5.9 Hydrogeologické vlastnosti území

Povodí Želivky spadá do hydrogeologického rajonu 6520, krystalinikum v povodí Sázavy v rámci skupiny rajonů krystalinikum Českomoravské vrchoviny. Geologická stavba je charakterizována jako Jednotvárná série moldanubika (svorové ruly, pararuly až migmatity) místy protnutá s pestrá série moldanubika (svorové ruly, pararuly až migmatity s vložkami vápenců erlanu, kvarcitu grafitu a amfibolitu).

Krystalinikum je tvořeno převážně metamorfity a vykazuje střední až nízkou hodnotu transmisivity (10^{-5} – 10^{-4} m²/s, PVL, 2022). Hladina podzemní vody (HPV) je volná a propustnost puklinová. Povodí Želivky zasahuje do 2 geomorfologických celků – Vlašimská pahorkatina a Křemešnická vrchovina. Specifický odtok podzemních vod by měl dosahovat cca 2-3 l/s/km². Filtrační koeficient (K_s) (pozn. č. 8) Je v modelu považován za kalibrační parametr a bylo pro něj odvozeno rozpětí 3×10^{-5} – 3×10^{-6} při uvažování 30 m mocnosti zvodnělého kolektoru a daného rozpětí hodnot transmisivity.

Odtok i čerpání podzemních vod je v oblasti krystalinika omezen převážně na oblast zvětralinového pláště. Mocnost zvětralinového pláště neznámým parametrem, avšak lze očekávat korelaci mocnosti zvětralinového pláště a nadmořské výšky.

2.5.9.1 Vertikální diskretizace

V modulu saturované zóny jsou vymezeny 3 vrstvy.

a. Shallow = Mělká podpovrchová vrstva

Vrstva, ve které se nejvíce pohybuje hladina podzemní vody. Vrstva se nachází přímo pod povrchem a hladina podzemní vody vymezuje rozhraní mezi nesaturovanou a saturovanou zónou. Vrstva je shora omezena povrchem a dolní hranici tvoří arbitrárně stanovená hloubka 3 m pod povrchem. Hodnoty K_s vycházejí z půdních vlastností zadanych v modulu proudění nesaturovanou zónou (Tab. 6 a P 2.11 – Přílohy).

Tab. 6: Hodnoty koeficientu nasycené hydraulické vodivosti (K_s) v nejvyšší vrstvě saturované zóny

Grid Code	Soil_ID	LU	Název sondy	K_s (m/
5	5000	Vodní plochy	Elluvium	1×10^{-5}
8	4000	Zástavba	Dvoriste_3_kambi	2×10^{-5}
4	2211	Orná půda	Dvoriste_3_pseudoglej	5×10^{-6}
3	2310	Les	Krizanky_3_pseudoglej	8×10^{-6}
2	1310	Les	Krizanky_3_kambi	1×10^{-5}
7	3310	Les	Krizanky_3_kambi	1×10^{-5}
1	1211	Orná půda	Dvoriste_3_kambi	2×10^{-5}
6	3211	Orná půda	Dvoriste_3_kambi	2×10^{-5}
11	2231	TTP	Habri_3_pseudoglej	5×10^{-5}
9	1231	TTP	Habri_3_kambi	8×10^{-5}
10	3231	TTP	Habri_3_kambi	8×10^{-5}

⁸ Vyjádřen jako $K_s = T/m$, kde m je zvodnělá mocnost kolektoru

Vážený průměr K_s uvedených v Tab. 6 pro celou plochu povodí Želivky dosahuje $2.7 \cdot 10^{-6}$ m/s. Dále byl do schematizace vrstvy zapracován předpoklad, že v okolí vodních toků, perenních i intermitentních, je Elluvium, jehož propustnost je vyšší. V oblasti modelovaných i modelem nezadancých drobných vodních toků byla proto hodnota K_s nastavena $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

b. Střední vrstva

Substrat-River = Střední vrstva, ve které se hladina podzemní vody vyskytuje jen v omezených lokalitách a epizodách.

Střední vrstva (P 2.12 – Přílohy) slouží hlavně k popisu přímého předání základního odtoku ze saturované zóny do protínajícího vodního toku a je shora omezena vrstvou svrchní a spodní omezení tvoří arbitrárně nastavená hloubka 10 m pod povrchem. Předpokladem pro schematizaci střední vrstvy je ztenčující se mocnosti zvětralinového pláště s nadmořskou výškou. Čím je menší mocnost zvětralinového pláště, tím nižší je propustnost této vrstvy. V povodí byly vymezeny 3 hypsometrická pásma, podle vrstevnic 600 m a 500 m. Filtrační koeficient je zadán pro každé pásmo a jeho hodnota klesá s nadmořskou výškou. Předpoklad přítomnosti propustnější vrstvy Elluvia v okolí vodních toků je zachován i v případě této střední vrstvy.

Tuto vrstvu rovněž protínají perforované části vrtů odebírajících vodu pro užívání. Schematizace depresního kužele v okolí vrtů je provedena zvýšením filtračního koeficientu v okolních buňkách a tím je zajištěn zvýšený přísun podzemní vody do vrtů. V Obrázek 19 je možné povšimnout si omezených lokalit čtvercového tvaru s nejtmaší barvou, které značí lokality odběrných míst. Čerpání vody z jiných hydrogeologických struktur než je zvětralinový plášť není možné hydrologickým modelem popsat, jelikož se jedná o tektonické struktury čistě lokálního charakteru.

c. Substrate Deep = Nejhlubší modelová vrstva

Z této vrstvy (P 2.13 – Přílohy) je již základní odtok generován pouze v ojedinělých případech velkých toků či obzvláště zařízých koryt. Vrstva proto nevymezuje Elluvia drobných toků i když koryta modelovaných toků jsou stále vyčleněna. Vrstva vychází ze stejného předpokladu snižující se mocnosti zvětralinového pláště a tím snížené propustnosti s nadmořskou výškou jako vrstva střední. Gradace snížení K_s má tedy horizontální charakter (snížení s nadmořskou výškou), ale i vertikální charakter (snížení s hloubkou). Opět jsou zahrnuty lokality odběrných míst a prostor pro tvorbu depresních kuželů (tmavé čtverce na vyobrazení P 2.13 - Přílohy).

Regionalizace a nastavení konkrétních hodnot filtračního koeficientu K_s ve vertikálním a horizontálním směru zůstávají v této fázi projektu stále hlavním předmětem zájmu.

2.5.10 Mělká podpovrchová drenáž

Mělká podpovrchová drenáž v modelu představuje především hypodermický odtok, ale zahrnuje i část koncentrovaného povrchového odtoku který je odváděn perenními či intermitentními vodními toky nepopsanými v říčním modelu (pozn. 9). Drenáž je

⁹ Koncentrovaný odtok vodních toků, které nejsou popsány říčním modelem je kromě mělké podpovrchové drenáže odváděn také Povrchovou drenáží

spuštěna v případě, že hladina podzemní vody dosahuje hloubky nižší, než je definovaná hloubka mělké podpovrchové drenáže. Poté je daný objem vody ze satureované zóny odváděn metodou prázdnění lineární nádrže rychlostí danou časovou konstantou až do časového kroku, ve kterém hloubka podzemní vody klesne pod hloubku mělké podpovrchové drenáže a proces ustane.

Mělká podpovrchová drenáž byla do modelu zavedena za účelem vystižení odtokového hydrogramu v profilech měření na vodních tocích, zejména sestupné větve; a dále pro vhodné vystižení celkové bilance odtoků. Hloubka drenáže (v rozsahu 0 – 2 m) a časová konstanta jsou parametry, jejichž hodnoty byly předmětem kalibrace.

Regionalizace těchto parametrů vychází z analýzy sklonitostních a z hypsografických poměrů v povodí řeky Želivky.

V případě regionalizace hloubky mělké podpovrchové drenáže byly vyčleněny oblasti s větším sklonem než 5° . Pro tyto oblasti byla zadána nižší hloubka a tím byl posílen rychlý podpovrchový odtok. Toto nastavení vychází z předpokladu, že ve sklonitých oblastech se hladina podzemní vody nachází hlouběji než v oblastech rovinných. Čím menší je hloubka drenáže, tím méně vody odtéká tímto systémem za nízkých stavů a modul se tedy neúčastní tvorby základního odtoku. Tato schematizace je vhodná v oblastech, kde je většina základního toku generována vodními toky popsánymi říčním modelem. V oblastech, kde k základnímu odtoku více přispívají říčním modelem nepopsané toky je zapotřebí hloubku drenáže snížit pro zajištění dostatečné generace základního odtoku z vodních toků nepopsaných říčním modelem.

Časový parametr odtoku z mělké podpovrchové drenáže (m/s) byl distribuován podle nadmořské výšky pro naplnění předpokladu rychlejšího hypodermického odtoku ve vyšších nadmořských výškách (P 2.14 – Přílohy). Tento předpoklad vychází z rozložení půdních typů v území, kde se vyskytují ve vyšších nadmořských půdy surovější s vyšším obsahem skeletu, a tudíž je očekáváno vyšší intenzita proudění preferenčními cestami.

Odtok generovaný mělkou podpovrchovou drenáží je přidán do říčního modelu ve formě laterálního přítoku. Povodí řeky Želivky bylo pro tyto potřeby rozděleno do podoblastí, z nichž je odtok odváděn do říčních úseků spadajících do dané oblasti.

2.5.11 Proudění koryty vodních toků a vodní nádrže

Pro popis hydrodynamického proudění v říčním systému povodí řeky Želivky je v rámci modelovacího systému MIKE SHE používán matematický model MIKE HYDRO RIVER. Tento softwarový nástroj je jednorozměrný (1D) matematický model popisující neustálené nerovnoměrné proudění v otevřených přirozených nebo umělých korytech a v jim přilehlých inundačních územích extravilánu nebo intravilánu. Struktura modelu je založena na jednotlivých modulech, jež jsou navzájem spojeny společnými datovými soubory. Znamená to například, že dva různé moduly využívají tatáž data jako své vstupní soubory nebo že výsledkový soubor jednoho modulu je vstupním souborem modulu druhého. Výhodou takového uspořádání modelu je možnost efektivního nasazení vybraných modulů podle potřeb a zaměření konkrétního projektu či studie. Pro potřeby této studie bylo využito pouze jediného modulu a to modulu Hydrodynamic (HD).

HD - Hydrodynamic - modul vychází ze základních Saint-Venantových rovnic pro popis neustáleného proudění v otevřených korytech. Může být použit k popisu jak větevné tak okružové sítě a lze ho aplikovat i na problémy pseudo-dvourozměrného proudění. Umožňuje výpočty při proudění říčním i bystřinném. Součástí tohoto modulu je také široká škála možností popisu objektů na toku včetně objektů manipulovatelných.

Říční model MIKE HYDRO RIVER je přímo dynamicky spřažen s hydrologickým modelem MIKE SHE, avšak časový krok výpočtu dynamického proudění koryty je řádově nižší než časový krok potřebný pro simulaci ostatních procesů v povodí (pozn. č. 10). K předávání výsledků simulace z jednotlivých částí modelovacího systému dochází v modelem určeném a proměnlivém časovém kroku. Toto předání je implicitního iterativního charakteru, a tak je zajištěno zachování bilance v celém modelovaném území v každém časovém kroku. Odtok je do tohoto modulu dynamicky přidán z několika zdrojů formou laterálního přítoku (Pozn. č. 11).

Říční model zahrnuje 24 toků, jejichž trasy jsou popsány pomocí os vodních toků (zdroj: DIBAVOD). Tyto toky jsou vzájemně spojeny do funkčního celku. Geometrie těchto celkem 433 km vodních toků je popsána pomocí databáze více než 3 000 geodeticky zaměřených příčných profilů (zdroj: PVL s. p.; P 2.15 – Přílohy). Všechny profily byly zkontrolovány a upraveny tak, aby popisovaly korektně proudění v korytě i inundačním území.

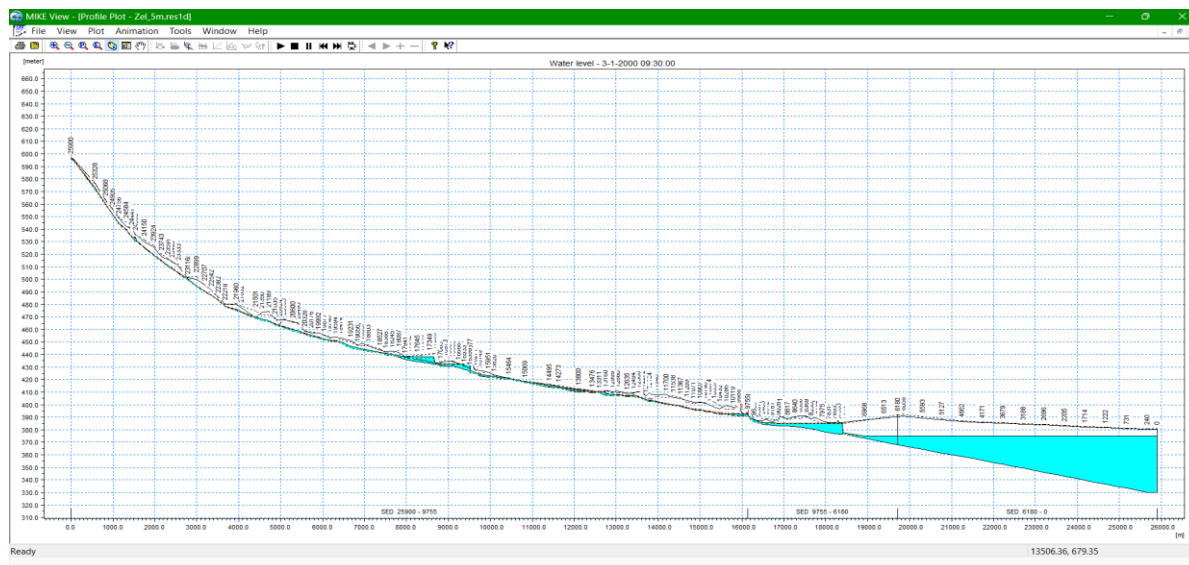
V hydrodynamickém modelu byly také zohledněny všechny prvky modelované říční sítě v povodí Želivky, které mají významný vliv na proudění. Jedná se především o 70 objektů hrází přímo protékaných rybníků, které výrazným způsobem zpomalují proudění a prodlužují dobu zdržení vody v daném úseku vodního toku. Ze stejného důvodu bylo schematizováno také 35 významných jezových zdrží. Dále byly schematizovány významné dnové stupně ovlivňující stabilitu numerického řešení. Na těchto typech objektů na toku je v modelu schematizována ztráta energie přerušením pohybových rovnic. Hydraulické charakteristiky proudění (pozn. č. 12) jsou řešeny přímo na základě rovnice vhodné pro daný objekt (rovnice přepadu přes přelivnou hranu či přes širokou korunu).

Objekty mostů, které většinou ovlivňují proudění pouze při vyšších stavech byly schematizovány zavedením náhradní hydraulické drsnosti. Stejným způsobem byly schematizovány také mostní propustky, které ovlivňují proudění pouze v lokálním měřítku a z hlediska cílů této studie je jejich vliv nevýznamný. Objekty mostů, jejichž geometrie neovlivňuje proudění v říčním korytě ani inundačním území byly ze schematizace zcela vypuštěny.

¹⁰ Zatímco dynamika říčního proudění je simulována s časovým krokem v rozmezí 1-5 min, pro ostatní procesy plně dostačuje časový krok v rozmezí 1-24 hod.

¹¹ Na tvorbě odtoku se podílí modul povrchového odtoku a modul proudění saturovanou zónou. Oba moduly předávají odtok do koryta formou drenáže (metoda lineární nádrže) a přímo při protnutí lokality vodním tokem

¹² Především hladina nad objektem a průtok objektem



Obr. 7 Podélný profil Sedlického potoka – včetně části nádrže Švihov vpravo

V říčním modelu jsou rovněž schematizovány nádrže s kontrolovanou hladinou (obr. 7). Jedná se o 5 významnějších vodních děl (VD), z nichž největší důraz byl kladen na korektní schematizaci VD Švihov. Objem VD Švihov a příčné profily v zatopené oblasti byly nastaveny na základě objemové křivky vycházející z měření batymetrie (zdroj: PVL s.p.). Výpustné objekty byly schematizovány podle pravidel a priorit vycházejících z platného manipulačního řádu (MŘ). Způsob a míra schematizace byly konzultovány s pracovníky PVL s.p. V modelu byly pro popis VD Švihov vytvořeny 3 objekty (minimální zůstatkový průtok, odběr vody pro úpravnu, odtok spodními výpustěmi), u kterých je možné definovat různé hodnoty průtoku v závislosti na různých veličinách (průtok nebo hladina vody v určených profilech a určených časových krocích) a podmínky, za kterých budou dané hodnoty použity v aktuálním časovém kroku. Samostatně byl schematizován bezpečnostní přeliv, jehož měrná křivka byla převzata z MŘ.

Každý vodní tok je popsán sadou měřených příčných profilů, ve kterých jsou počítány hydraulické charakteristiky proudění. Formou objektů na toku jsou schematizovány významné jezy a vodní díla, která zásadním způsobem ovlivňují proudění – jeho rychlost a distribuci odtoku. Na obr. 7 je uveden příklad toku Hejlovky – Želivky.

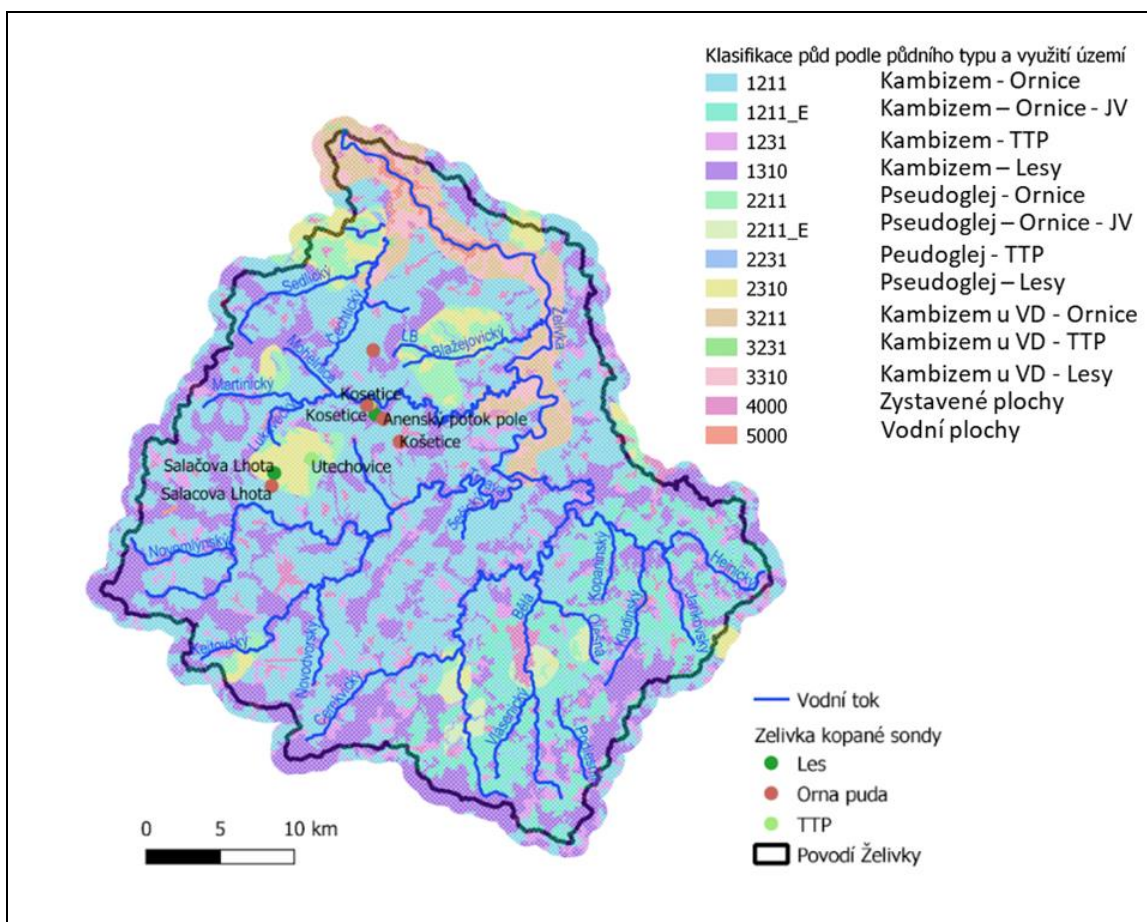
Součástí DTM použitého pro popis modelové topografie jsou i měřená data batymetrie zdrží vodních děl, která byla do DTM integrována viz (P 2.16 – Přílohy).

2.6 Časový krok výpočtu a ukládání výsledků

Základní časový krok výpočtu je 1 den i když jednotlivé procesy rozdělují tento řídicí interval na interní časové kroky v řádu minut až hodin. V základním časovém kroku jsou ukládány časové řady v zájmových bodech (1D). Časové řady lze ukládat v libovolných lokalitách a v modelu Želivky slouží především pro srovnání měřených a simulovaných dat v procesu kalibrace a verifikace. Vzhledem k objemu dat jsou výsledky v celé ploše modelovaného území (2D) a v celém vertikálně rozčleněném geologickém profilu (3D) ukládány v intervalech 5 dnů a dále vyhodnocovány.

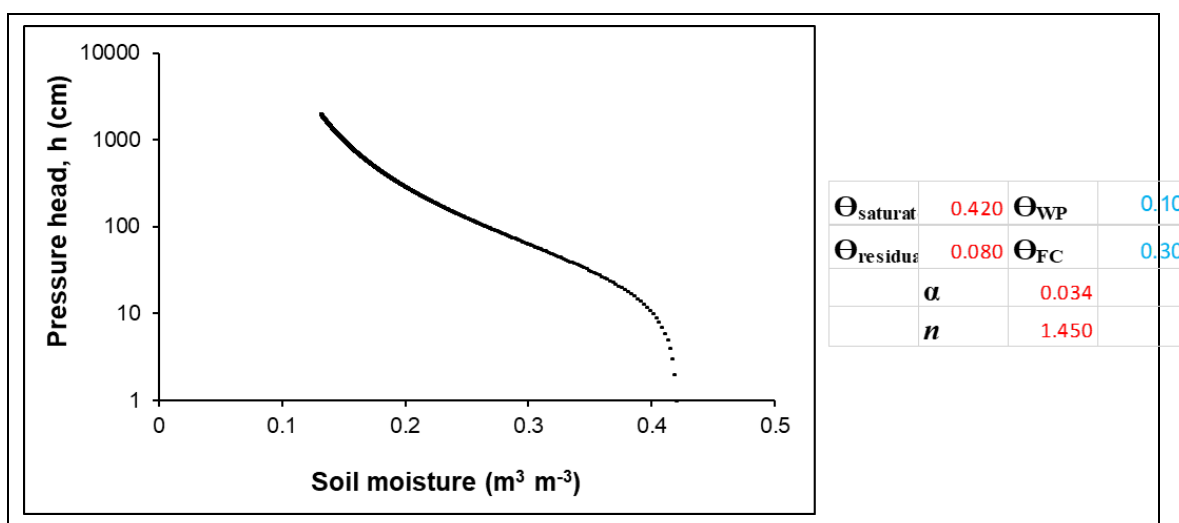
2.7 Aktualizace dat

V září 2024 tým obdržel výsledky nových měření hydopedologických vlastností vybraných půdních vzorků z průzkumné kampaně realizované v počátcích projektu (Obr. 8). Sondy byly pořízeny v povodí Blažejovického a Martinického potoka a zasahují i do severní části povodí Trnavy. Přestože jsou půdní vlastnosti místně specifické, umístění sond bylo voleno tak, aby byly hydopedologické vlastnosti v nejvyšší možné míře reprezentativní pro širší okolí. Pro potřeby modelu řeky Želivky byly tyto sondy použity pro popis celého modelovaného území.



Obr.8: Lokalizace kopaných půdních sond realizovaných v rámci průzkumné kampaně (CzechGlobe). Sondy jsou klasifikovány a barevně odlišeny podle typu využití území

Výsledky měření půdních vlhkostí na vybraných vzorcích zahrnují potřebné informace o vlastnostech zvlhčovací a drenážní větve a jsou přímým podkladem pro stanovení Van Genuchten parametrů (α , n , Θ_s , Θ_r). Tyto hodnoty byly stanoveny proložením měřených půdních vlhkostí při daném sacím potenciálu empirickou křivkou (Obr.9). Hodnoty byly přímo zavedeny do modelového formátu. Mapa půdních typů byla protnuta s mapou využití území a vzniklo tak 11 půdních tříd, ze kterých byla nadále vyčleněna oblast JV povodí (tok Bělé, Janovský potok), kde jsou na základě výsledků kalibrace předpokládány jiné hydropedologické vlastnosti. Pro jednotlivé půdní třídy byly vybrány reprezentativní sady Van Genuchten parametrů, které nebyly v procesu kalibrace měněny.



Obr. 9 Příklad proložení retenční křivky měřenými daty sacích tlaků při různých půdních vlhkostech a odvození parametrů Van Genuchten rovnice (kopaná půdní sonda 54: Anenský potok, pole).

Dalším novým datovým podkladem pro model TA 1.6 byly hodnoty nasycené hydraulické vodivosti měřené na stejných lokalitách (Czech Globe). Výsledné hodnoty byly přiřazeny půdním typům a vzhledem k tomu, že pro většinu půdních typů bylo k dispozici více výsledků měření hydraulické vodivosti, byla pro každý půdní typ uvažována minimální, maximální a průměrná hodnota tohoto parametru. Vhodnost použití jednotlivých variant pro každé modelované subpovodí byla testována jako jeden z hlavních kalibračních parametrů.

Vzhledem k tomu, že modul proudění v nesaturované zóně byl zcela aktualizován o nové datové vstupy, bylo nutné model povodí Želivky překalibrovat. Vznikla tak nová verze modelu (sakronymem ZEL_200_v02). Od předchozích verzí se tato verze liší především v popisu nesaturované zóny, dále byly upraveny obecné výpočetní parametry pro zvýšení efektivity simulací a modelové parametry zahrnuté v modulech proudění v saturované zóně a výpočet evapotranspirace byly podrobeny analýze citlivosti a kalibraci.

2.8 Kalibrace a verifikace

Obrázek P 2.17 - Přílohy ukazují výčet kalibračních lokalit v rámci kterých byl srovnáván simulovaný a měřený průtok.

2.8.1 Popis metodiky a kalibračních parametrů

Potřeba rekalibrace modelu vycházela především ze zahrnutí aktuálních dat měření hydrogeologických vlastností v rámci kampaně půdního průzkumu charakteristických půdních sond v povodí Martinického a Blažejovického potoka. Vzhledem k tomu, že parametry popisující nesaturovanou zónu byly zcela změněny, byla jí věnována pozornost hlavně v prvním kroku kalibrace.

Jak již bylo zmíněno, parametry Van Genuchten rovnice byly přiřazeny z výsledků měření půdních sond a zafixovány. Parametr saturovaná hydraulická vodivost (K_s) byl naopak předmětem citlivostní analýzy, ale jeho hodnoty v jednotlivých lokalitách byly vůči sobě svázané. Aby byl vždy naplněn předpoklad, že hodnoty K_s jsou vyšší pro Kambizem než pro Pseudoglej, byly sestaveny 3 varianty plošné distribuce parametru K_s vycházející z měření výtopovou metodou měření rychlosti ustálené infiltrace:

- Maximální hodnoty K_s ($1.2 \cdot 10^{-5}$ - $1.0 \cdot 10^{-4}$ m/s)
- Minimální hodnoty K_s ($1.0 \cdot 10^{-6}$ - $2.8 \cdot 10^{-5}$ m/s)
- Střední hodnoty K_s ($7.9 \cdot 10^{-6}$ - $6.4 \cdot 10^{-5}$ m/s)

Dále byly v procesu kalibrace měněny parametry popisu saturované zóny a to především:

- Nasycená hydraulická vodivost (K_s) v horizontálním a vertikálním směru (proudění ve vertikálním směru je vždy uvažováno 10x pomalejší než v horizontálním směru, tyto parametry jsou tedy svázané).
- Hloubka mělké podpovrchové drenáže (pomyslný drén reprezentuje především hypodermický odtok a hydraulickým modelem nepopsané vodní toky)
- Časová konstanta odtoku mělké podpovrchové drenáže (koncept lineární nádrže)
- Hloubka kořenění (tento plošně a časově distribuovaný parametr sice vychází z měřených dat dálkového průzkumu Země, je však odvozen na základě

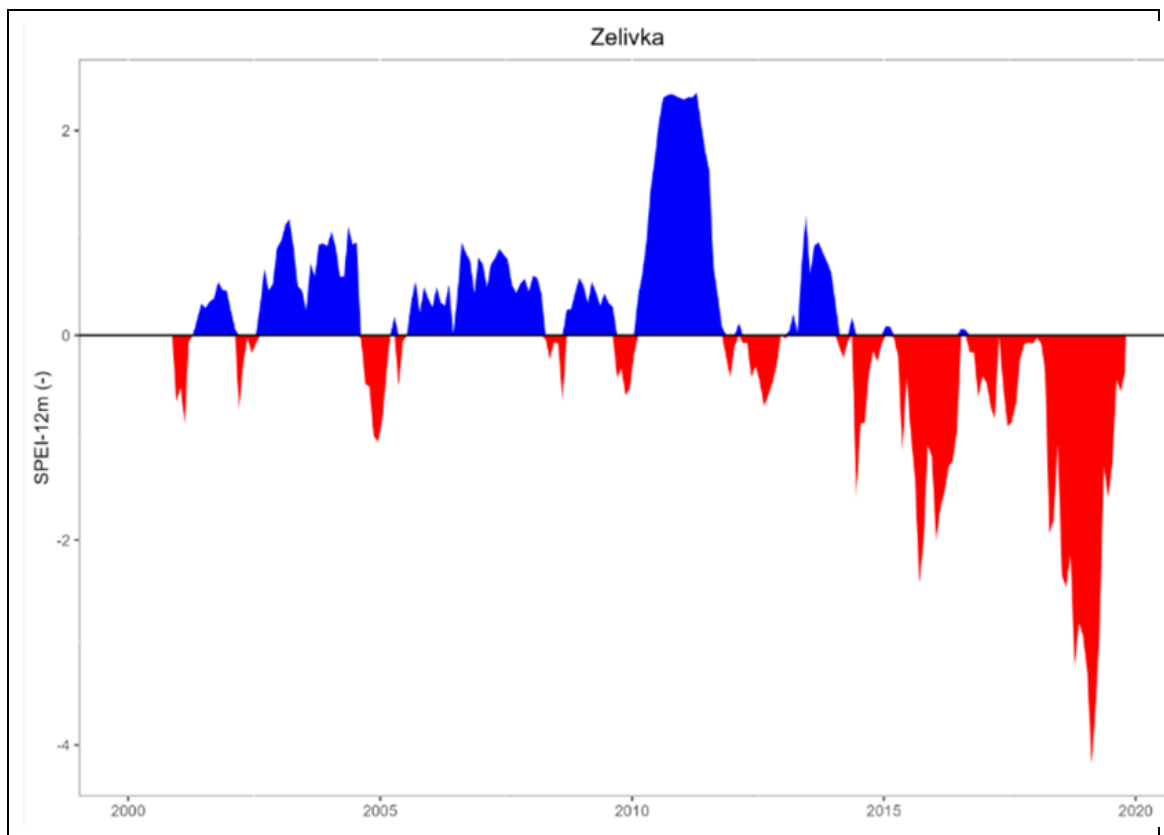
nelineárního vztahu s LAI. Přesná hodnota hloubky kořenění je zatížena značnou mírou nejistoty a byla plošně i lokálně (Intravilán Pelhřimova) korigována)

- Výpar z nádrže Švihov. Proces výparu z vodní plochy je předmětem výzkumu a vzhledem k tomu, že není jasné, do jaké míry proces ovlivňuje celkovou bilanci vodního díla, byl parametr podroben citlivostní analýze a korigován v rámci kalibračních běhů.

Výše popsané parametry jsou zároveň parametry s největší citlivostí. Jejich hodnota byla regionalizována na základě výškopisných a geomorfologických poměrů v povodí Želivky. Mapy parametrů byly v rámci kalibrace buď posouvány o konstantu a nebo byly zvětšovány rozdíly mezi jednotlivými regionalizovanými celky. Byla však vždy zajištěna svázanost parametrů podle předem stanovených pravidel (například, vyšší polohy vykazují nižší hodnoty transmisivity než nižší polohy, svahy mají větší podíl rychlé složky odtoku a koncentrovaného proudění nepopsanými toky než nížiny apod.) Pro zjištění citlivosti a směru reakce povodí na danou změnu bylo zapotřebí nejprve měnit pouze 1 parametr (či několik svázaných parametrů) a posléze navrhnout a posuzovat vhodné kombinace parametrů. Hydrologické procesy v povodí a jejich reakce na kombinaci parametrů vykazuje vysoce nelineární chování a je tudíž zapotřebí parametry vhodným způsobem skládat, testovat a posouvat v závislosti na fyzikální podstatu daného procesu.

Kalibrace byla provedena poloautomaticky. Byla sestavena matice parametrů a jejich limitních hodnot, avšak vhodnost dané parametrizace vstupovala do sestavení následujícího souboru modelových parametrů jako hlavní rozhodovací faktor.

Pro kalibraci bylo zvoleno období vymezené hydrologickými roky 2000-2010 (1.11.1999-31.10.2010). Období představuje především "normální hydrologické podmínky". Pro validaci modelu bylo následující desetiletí (1.11.2010-31.10.2020). Toto období je podle indexu SPEI (Vicente-Serrano et al. 2010) charakterizováno výrazným hydrologickým suchem s počátkem v roce 2015 (Obrázek 10).



Obrázek 10 SPEI – (The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) pro povodí Želivky odvozený z denních dat srážek a potenciální evapotranspirace

2.8.2 Kalibrační cíle a objektivní funkce

Kalibrační cíle představují objektivní kritérium, kterého má být v procesu kalibrace modelu dosaženo. Vzhledem k tomu, že byl kalibrován hydrologický bilanční model, byly kalibrační cíle rozděleny do 3 hlavních skupin s následnou prioritizací:

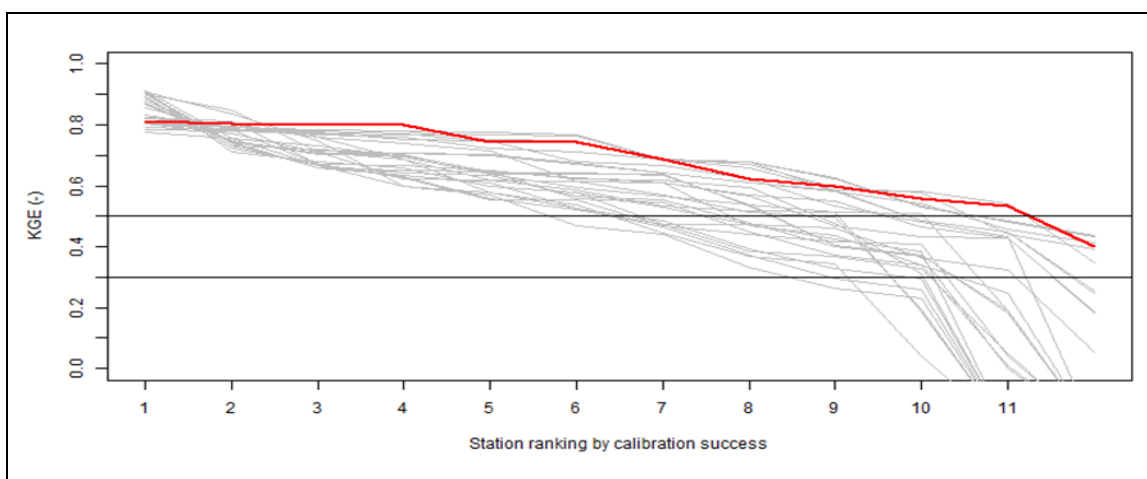
- Cíl 1 (Priorita 1) Dosažení dobré shody mezi pozorovanými a měřenými průtoky ve 12 hydrologických stanicích
- Cíl 2 (Priorita 2) Zajištění srovnatelné variability chodu hladin podzemní vody
- Cíl 3 (Priorita 3) Dosažení dobré shody mezi pozorovanými a odvozenými hodnotami vodní hodnoty sněhu na vybraných klimatických stanicích

Úroveň dosažení kalibračních cílů byla posuzována pomocí objektivních funkcí Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), Klinge-Gupta efficiency (KGE), Root Mean Square Error (RMSE), a také byla srovnána celková hodnota vodní bilance reprezentována dlouhodobým průměrným průtokem (Qa).

2.8.3 Výsledky kalibrace a verifikace

Výsledky kalibrace přináší (Obr. 11) souhrnný pohled na všechny výsledky objektivní funkce Kling-Gupta efficiency (KGE) v celém souboru kalibračních variant a napříč všemi

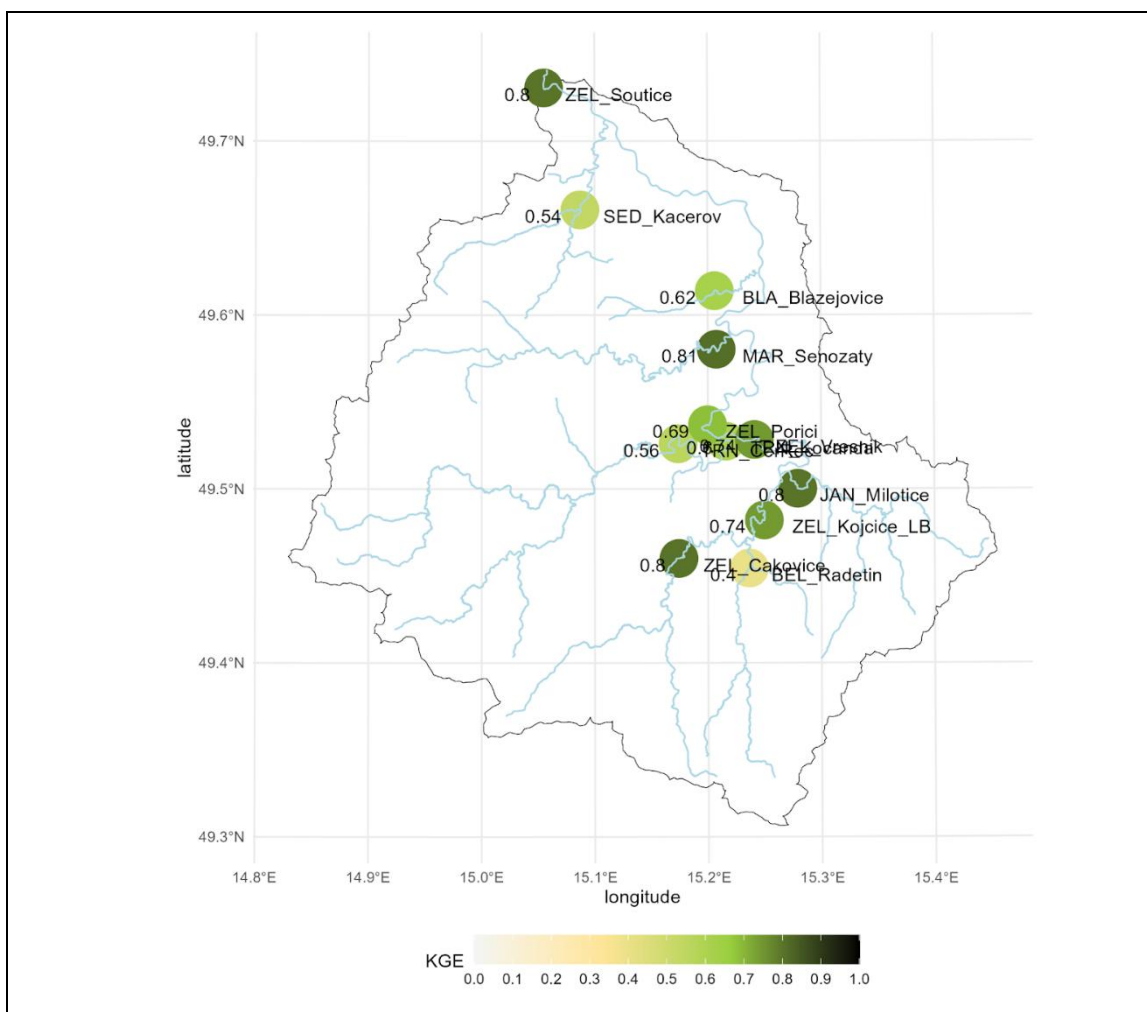
hydrologickými stanicemi, jejichž průtoky byly zahrnuty do zpracování a představují tak hlavní kalibrační cíle. Objektivní funkce hodnotí shodu pozorovaných a měřených dat, přičemž hodnota 1 vyjadřuje dokonalou shodu a v případě fyzikálně založeného modelu lze za přijatelnou shodu považovat ještě hodnotu 0.5. Hodnoty nižší než 0.3 již poukazují na špatnou shodu. Z obrázku je patrné, že téměř všechny stanice vykazují velmi dobrou shodu měřených a simulovaných hodnot. Nejhorší výsledek KGE byl vždy zaznamenán ve stanici Bělá-Radětín. Přestože i ve stávající verzi modelu je v této stanici hodnota KGE celkem nízká (i když ne kritická), je zřejmé, že v průběhu kalibrace byla shoda průtoků na této stanici zásadním způsobem vylepšena.



Obr. 11: Vyhodnocení kalibračních cílů na základě objektivní funkce Kling-Gupta efficiency (KGE). Vybraná modelová varianta je zvýrazněna červeně

Z Obr. 11 je patrné, že téměř všechny stanice vykazují velmi dobrou shodu měřených a simulovaných hodnot. Nejhorší výsledek KGE byl vždy zaznamenán ve stanici Bělá-Radětín. Přestože i ve stávající verzi modelu je v této stanici hodnota KGE celkem nízká (i když ne kritická), je zřejmé, že v průběhu kalibrace byla shoda průtoků na této stanici zásadním způsobem vylepšena. Průměrná hodnota výsledků objektivní funkce KGE ve zvolené variantě parametrů modelu dosahuje 0.68 (Obr. 12). Model může být považován v celku jako důvěryhodný. Nejlepších hodnot objektivní funkce bylo dosaženo ve stanicích Senožaty (Martinický potok), Mílotice (Janovský potok), Čakovice (Želivka), a na závěrovém profilu Soutice (Želivka). Model zde dosahuje hodnot 0.8, což je považováno v rámci distribuovaného fyzikálně založeného modelování za výbornou shodu. I v ostatních stanicích je shoda velmi dobrá s tím, že obecně lépe vychází srovnání v oblastech s rychlejší generací srážko-odtokového procesu ($KGE > 0.7$). Horší shody mezi měřenými a simulovanými měsíčními průtoky

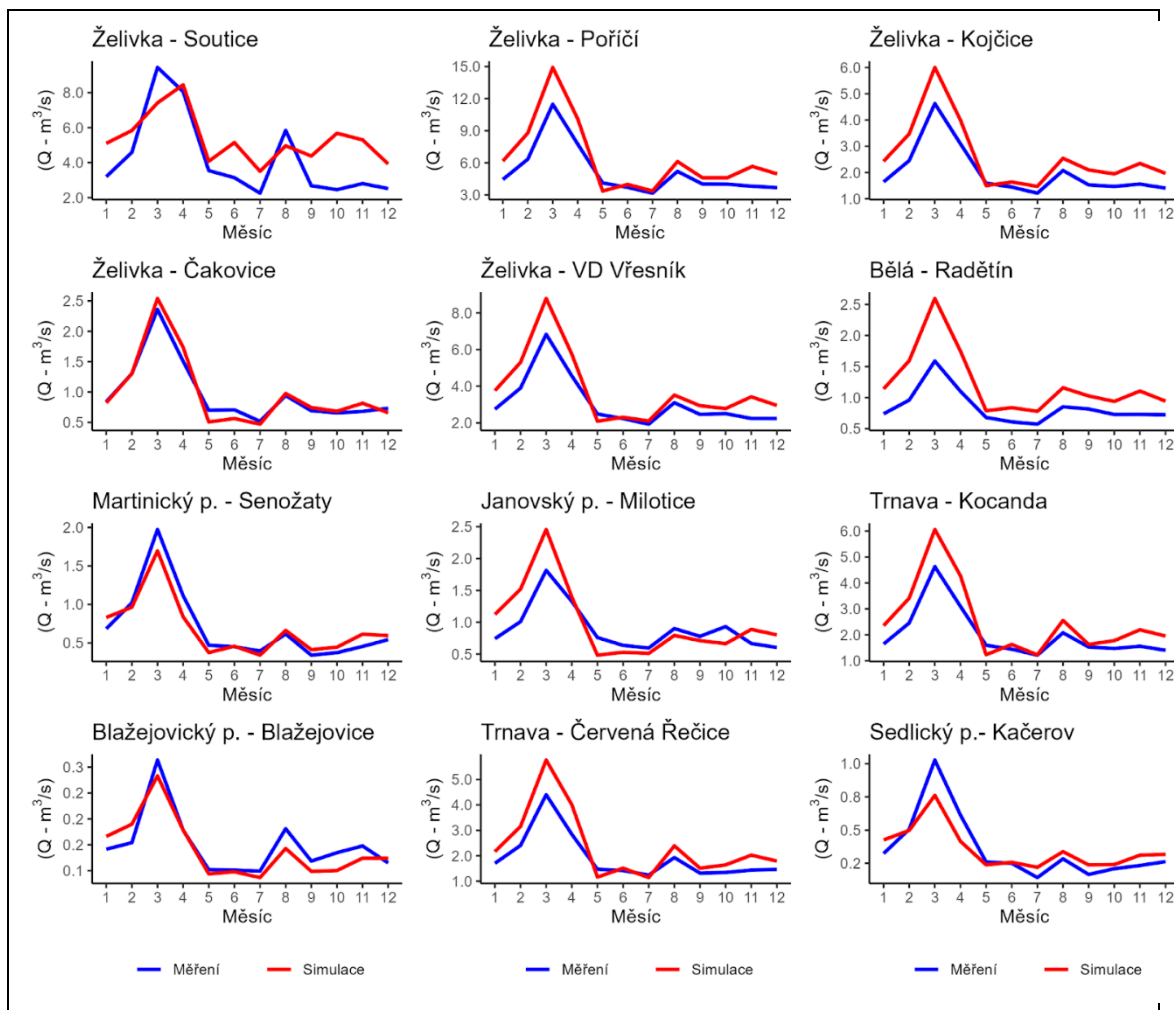
bylo dosaženo pouze na stanici Radětín (Bělá). Během kalibračního procesu bylo zjištěno, že model pravděpodobně naráží na limity zjednodušeného popisu městské hydrologie v oblasti urbanizace Pelhřimov, jejíž území významným způsobem dominuje povodí toku Bělá. V současné verzi modelových parametrů je nadhodnocena dlouhodobá bilance odtoku v Radětině o 30%. Vzhledem k tomu, že tento fenomén se na jiných částech povodí nevyskytuje a že modelové parametry mají čistě regionalizovaný charakter (plošné rozlišení parametrů vychází z geografických podmínek a hranice jednotlivých sub-povodí netvoří v tomto rozlišení žádné diskontinuity), nebylo v této verzi ve stanici Radětín - Bělá možné nalézt lepší shodu. Fenomén městské hydrologie bude předmětem dalšího výzkumu.



Obr.12 Výsledek objektivní funkce Klinge-Gupta Efficiency - nejlepších hodnot objektivní funkce bylo dosaženo ve stanicích Senožaty (Martinický potok), Milotice (Janovský potok), Čakovice (Želivka), a na závěrovém profilu Soutice (Želivka)

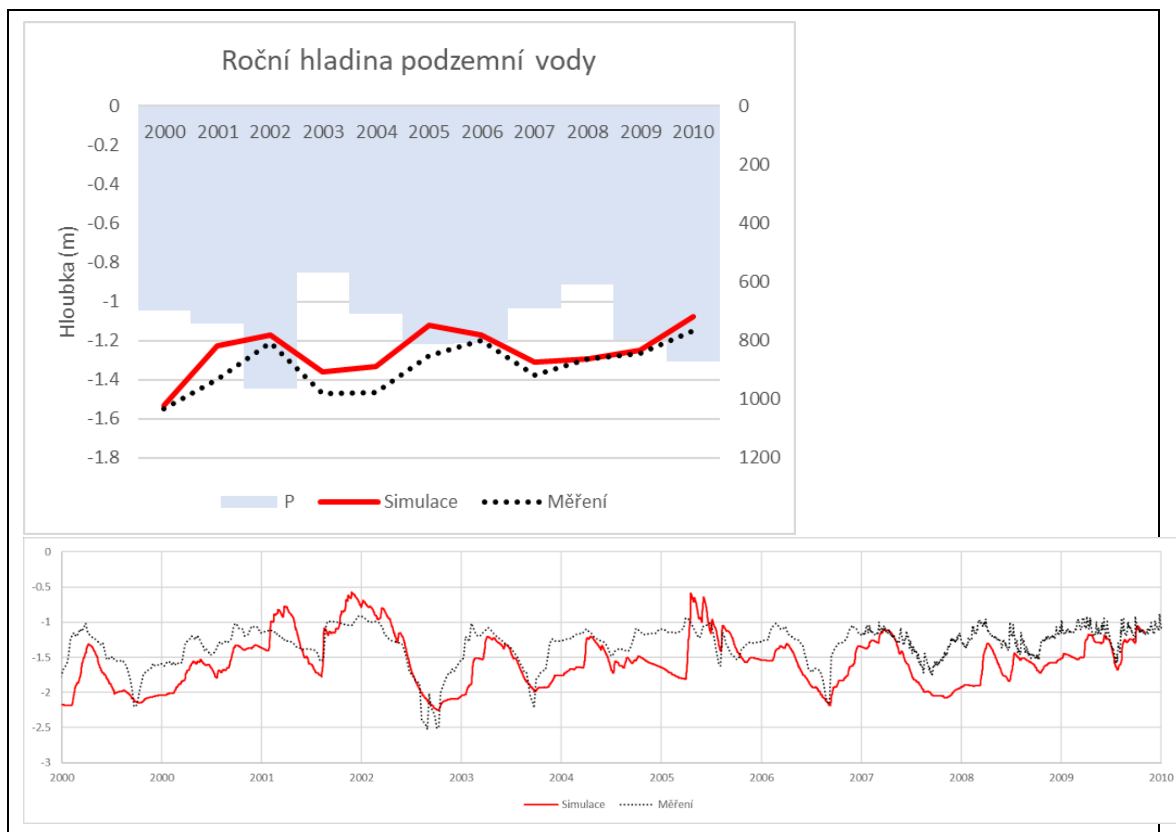
Měřené a simulované průtoky vykazují dobrou shodu i z hlediska srovnání průměrného ročního chodu, který vychází z porovnání průměrných průtoků v daném měsíci, vypočtených za celé kalibrační období 2000-2010 (Obr. 13). Srovnání přináší informaci o rozložení průtoků v rámci roku a o úspěšnosti jednotlivých procesů generace odtoku.

Je zřejmé, že v některých stanicích se model rozchází s měřenými jarními průtoky. Přestože je zahrnut a kalibrován sněhový modul, míra nejistoty jednoduché metody Degree day je vysoká a schopnost modelu popsat složité odtokové procesy, mezi které patří například srážka do tání sněhu, je ve zvoleném měřítku a při dané úrovni schematizace omezená. Důležité je, že model věrohodně replikuje letní a podzimní průtoky, což poukazuje na korektní popis odtokového procesu v období bez sněhové pokrývky, jemuž v první řadě dominuje proces evapotranspirace.



Obr. 13 Průměrné měsíční průtoky v kalibračním období na hydrologických stanicích hlavních modelovaných toků povodí Želivky

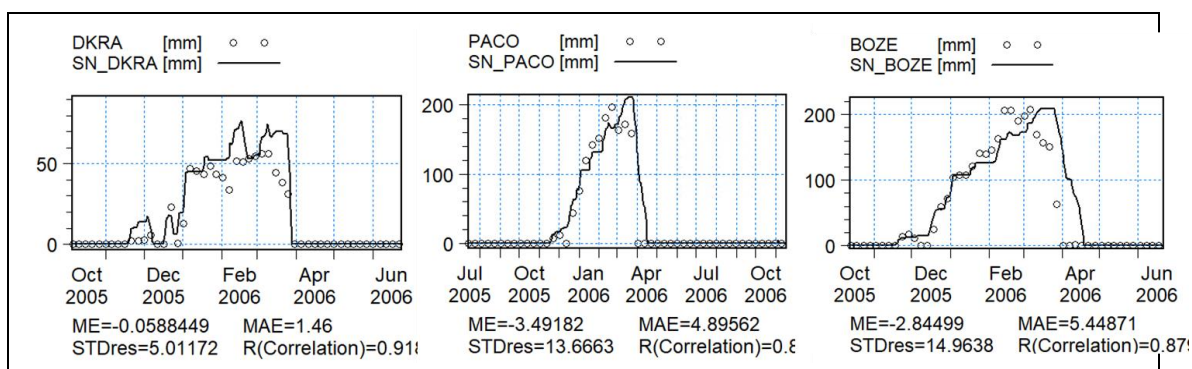
Shoda průměrných měsíčních průtoků byla hodnocena nejen z hlediska objektivní funkce, ale také z hlediska celkové bilance (Q_a). Dalším kalibračním cílem bylo zajištění dostatečné shody mezi průběhem pozorovaných a měřených hladin v lokalitě VP1311 (Obr.14) a shoda mezi modelovanou a odvozenou vodní hodnotou sněhu na vybraných klimatických stanicích (Obr.15). Proto není zvolený scénář horní obálkou simulovaných variant, ale je to nejlepší možný scénář naplňující všechny kalibrační cíle.



Obr.14 Srovnání chodu hladin podzemní vody v měrné lokalitě VP1311

V lokalitě 1311 pokrývá měření hladiny podzemní vody celé kalibrační období (2000-2010). Proto byla tato lokalita zvolena jako hlavní kalibrační bod.

Lokality VP1328, VP1329, VP1330 a VP1331 byly také srovnávány. Nicméně, jejich umístění v nivě nepopsaného toku či v buňce, která v modelu reprezentuje svah neumožňuje srovnání konkrétních hodnot, ale pouze celkové variability hladin. Měření rovněž nepokrývá celé kalibrační období a tak byly tyto lokality hodnoceny spíše pro srovnání než jako konkrétní kalibrační cíl.



Obr. 15 Příklad shody mezi simulovanou a měřenou vodní hodnotou sněhu na vybraných stanicích v povodí

2.9 Závěrečné shrnutí k části hydrologického distribuovaného modelu

Hydrologický model na uceleném povodí byl dokončen v souladu s cíli TA 1.6. Ucelený model byl zkalibrován a verifikován a poskytuje základní informace o proměnných vodní bilanci v čase a prostoru. Historická data z období 2000- 2020 tvořila páteř srovnávací analýzy. Na Přílohách P 2.18 – 2.29 jsou ukázky mapových výstupů vybraných proměnných, případně parametrů s proměnou v čase, důležitých pro vodní bilanci v povodí Želivky.

Tyto mapové podklady budou základem srovnávací analýzy pro aplikaci adaptačních opatření a jejich vlivu na vodní bilanci v období klimatické změny. Bude podstatné využít srovnávací analýzy plošných dat a jejich časovou variabilitu, aby bylo možné ocenit vliv jednotlivých opatření na kompenzaci vlivu klimatické změny.

Je potřeba srovnávat dopad ve vodní bilanci ve všech segmentech zájmů – tj zejména ve vodním hospodářství, zemědělství, lesnictví a dalších segmentech v povodí aktivních.

3 Hydrodynamický simulační model 3D nádrže Švihov v systému M3

3.1 Úvod

Segment simulačního nástroje pro popis hydrodynamiky a kvality v nádrži Švihov byl sestaven k posouzení charakteristik proudění v nádrži Švihov od hráze až po dosah vzdutí. Jde o logický segment digitálního dvojčete Želivky, protože hydraulicky složitá nádrž nemůže být simulována zjednodušeným způsobem.

Systém popisuje hydrologické, hydraulické a vybrané chemické procesy a lze využít k simulacím biologických procesů v nádrži. K posouzení charakteristik proudění byl sestaven simulační nástroj v modelovém systému MIKE 3, který zahrnuje vliv teplotní stratifikace nádrže včetně výměny mezi vodou v nádrži a proudícím vzduchem nad hladinou. Simulační nástroj zohledňuje vliv okrajových podmínek (přítoky, odtoky, odběry a směry a normy větrného pole) vlhkost vzduchu, intenzitu slunečního záření a poměrné zastínění vodní hadiny.

Součástí řešení je simulace (havarijního) kvalitativního zatížení nádrže v epizodním časovém období pro celkem 5 variant, pro 2 z nich byly provedeny simulace po adaptačním opatření. Okrajové podmínky pro látkové zatížení byly vybrány po konzultaci se správcem povodí.

Zadáním segmentu „Testovací simulace na HPC“ bylo ověřit rychlost simulace proudění a šíření znečišťujících látek 3D numerickým modelem na výkonném hardwaru. Při 5 simulacích byly prověřovány různé konfigurace výpočetního hardwaru (včetně GPU) a rovněž minimální nutná podrobnost schematizace vodárenské nádrže Švihov, která bude dostatečná pro získání relevantních výsledků a zároveň umožní získat předpověď charakteristik proudění a šíření polutantu při případné ekologické havárii v přijatelně krátké době (P 3.1 – Přílohy).

3.2 Vymezení zájmové oblasti modelu

Zadáním bylo stanoveno pokrytí celé vodní nádrže Švihov až po konec vzdutí hladiny na přítocích. Nádrž tak byla zahrnuta do 3D modelu od lokality Bělský Mlýn na přítoku Želivky a konce vzdutí dalších významných přítoků – Martinického a Blažejovického potoka. Sedlická zátoka je zahrnuta až po hráz VN Němčice. Oblast vodní nádrže je zahrnuta v celém rozsahu hloubek, včetně břehů až do nadmořské výšky 383 m n.m.

Vodní nádrž Švihov je největší vodárenskou nádrží ve střední Evropě. Přehrada je vybudována v ř.km 4,29 Želivky nad soutokem Želivky se Sázavou. Maximální provozní hladina nádrže je 377 m.n.m. Celkový objem nádrže představuje 309 mil. m³, přičemž plocha vodní nádrže Švihov je 1397 ha. Vzdutí nádrže Švihov dosahuje od hráze 39,1 km na toku Želivky. Obvod nádrže při maximální provozní hladině je 112 km. Jde o nádrž s víceletým řízením odtoku.

3.3 Podklady topologické

Výchozím topologický podkladem pro model dna nádrže je bodové pole dna pod hladinou, které bylo měřené echolotem z měřicí lodi (Povodí Vltavy s.p.). Zdrojem dat pro model břehů nad hladinou vodní nádrže je bodové pole DMR5G (ČUZAK).

Dalšími podklady pak jsou zejména dokumentace a ruční doměření objektů v nádrži (ÚVGZ AV ČR, v. v. i.), Manipulační řády (Povodí Vltavy a.s.) a ortofoto.

3.4 Hydrologická a klimatická data

Hydrologická a klimatická data jsou základními parametry potřebnými k sestavení hydrodynamického modelu. Pro potřeby sestavení 3D numerického modelu VN Švihov byly k dispozici časové řady z limnigrafických stanic měření na vodních dílech:

- hydrologická data a teploty vody **na přítocích** pro období 2000 až 2021 a v dodatku pro období měrných kampaní (5 a 6/2022 a 6 a7/2023):
 - Želivka (MSVT Tukleky) – od r. 2012, stav, průtok, teplota vody
 - Želivka (MSVT Poříčí) – od r. 2000, stav, průtok
 - Martinický potok (MSVT Senožaty) - od r. 2000, stav, průtok, teplota vody, teplota vzduchu od 6/2011
 - Blažejovický potok (MSVT Blažejovice) – od r. 2000, stav, průtok, teplota vody od 3/2013, teplota vzduchu, srážky od 7/2017
- hydrologická data **na nádržích** pro období 2000 až 2021 a v dodatku pro období měrných kampaní (5 a 6/2022 a 6 a7/2023):
 - VD Němčice – od r. 2000, hladina, odtok, srážky, teplota vzduchu – denní data, od 10/2007 hodinová data (mimo odtok)
 - VD Švihov – od r. 2000, hladina, odtok, vodárenský odběr, srážky, teplota vzduchu – denní data, od r. 2005 - hodinová data pro hladinu, odtok
- klimatická data – pro období vybraných kalibračních epizod
 - stanice Hulice - srážky, teplota a vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru (ČHMÚ, zpracováno a dodáno ÚVGZ AV ČR, v. v. i.)
 - solární radiace

3.5 Kvalita vody- datové vstupy

Na vodní nádrži Švihov, v před-nádržích a na přítocích do nádrže probíhá rozsáhlý dlouhodobý monitoring parametrů jakosti/kvality (Povodí Vltavy s.p.). Veškerá data z monitoringu kvality vody byla zpracovateli předána na základě dohody o spolupráci.

Pro účely simulací na 3D modelu nádrže Švihov byla využita data z monitoringu v měrných profilech na přítoku do nádrže viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a v zónačních profilech v nádrži viz Tab. 10.

Tab. 9: Měrné profily na přítocích do nádrže Švihov

IE profilu	vodní tok	název profilu	hydrologické pořadí	ř. km	X-JTSK	Y-JTSK
4200	Želivka	Poříčí	1-09-02-0690-0-00	50.60	-695300.0	-1111071.0
3000	Martinický p.(př.Želivky)	Senožaty (Jankovský mlýn)	1-09-02-0880-0-00	2.10	-694206.0	-106225.0
2100	Blažejovický p.(př.Želivky)	Blažejovice	1-09-02-0920-0-00	5.00	-693842.0	-102728.0
0500	Sedlický p.(př.Želivky)	VN Němčice odtok	1-09-02-1080-2-00	7.30	-700849.0	-1094815.0

Tab. 10: Zonační měrné profily ve vodní nádrži Švihov

IE profilu	název profilu	vodní tok	hydrologické pořadí	ř. km	X-JTSK	Y-JTSK
26	VN Švihov Vojslavice	Želivka	1-09-02-0890-0-00	35.7	-693605.00	-1104776.00
20	VN Švihov Zahrádka	Želivka	1-09-02-0890-0-00	30	-690641.00	-1102712.00
16	VN Švihov Budeč	Želivka	1-09-02-0970-0-00	24.2	-691038.00	-1097923.00
08	VN Švihov Dolní Kralovice	Želivka	1-09-02-1010-0-00	15.2	-697018.00	-1095013.00
02	VN Švihov Sedlická zátoka	Sedlický p. (př.Želivky)	1-09-02-1080-2-00	2	-699584.00	-1091785.00
00	VN Švihov hráz	Želivka	1-09-02-1090-1-00	4.3	-700470.13	-1089325.49

3.6 Metodika – základní principy použitého diskrétního 3D modelu MIKE3 FM

3.6.1.1 Hydrodynamický model

K posouzení charakteristik proudění v nádrži Švihov a následně šíření znečišťujících látek, byl sestaven 3D matematický model v software MIKE3 FM, který umožňuje modelovat stratifikaci teplot v nádrži včetně teplotní výměny mezi vodou v nádrži a proudícím vzduchem nad hladinou 0. Teplotní stratifikace včetně charakteristik proudění v jednotlivých vrstvách „po hloubce“ je významně ovlivňována větrem nad nádrží. Matematický model simuluje vliv účinku větru – do výpočtu vstupuje směr a rychlost větru a tlak vzduchu (jako proměnná veličina v čase i v prostoru nad nádrží). Model MIKE 3 FM zohledňuje i vlhkost vzduchu a intenzitu slunečního záření, resp. i poměrné „zastínění“ vodní hladiny.

Matematický model MIKE 3 FM je založen na řešení Navier-Stokesových pohybových rovnic numerickou metodou konečných objemů. Základní řídicí rovnice 3D HD modelu mohou být uvedeny například ve tvaru (MIKE3 Flow model FM, Hydrodynamic and Transport Module v. 2021. Scientific Documentation. DHI A/S, Hørsholm, Denmark):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

- rovnice kontinuity:

- rovnice pohybové:

kde: t čas
x, y, z zeměpisné (kartézské) souřadnice
η úroveň hladiny vody

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \\ = fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} \\ = -fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + F_w + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

u, v, w složky rychlosti ve směrech x, y, a z
q tlak v kapalině
f Coriolisův parametr (závislý na úhlové odchylce směrů proudění a zeměpisné šířce)
utv vertikální složka turbulentní viskozity
uth horizontální složka turbulentní viskozity
g gravitační zrychlení
pA atmosférický tlak na hladině vody
ρ hustota vody
ρ₀ referenční hustota vody
Fu, Fv, Fw difúzní členy ve směru x, y, z definované vztahy:

Zásadní význam při použití vícerozměrných matematických modelů hraje použitý „turbulentní model“, který popisuje vnitřní turbulenci proudění a přenos hybností mezi jednotlivými vrstvami (elementy) 3D rozměrné výpočetní sítě. Použitý turbulentní model pro 3D numerický model proudění v nádrži Želivka je výsledkem kalibrace modelu –

pro horizontální turbulentní viskozitu byl použit turbulentní model, popsany Smagorinského rovnicí, pro vertikální – tento přístup vychází ze zjednodušujícího principu, že turbulentní napětí v kapalině jsou úměrná gradientu rychlosti a vzdálenosti mezi jednotlivými elementy výpočetní sítě. Pro výpočet vertikální turbulentní viskozity byla použita rovnice vycházející z logaritmického zákona rozdělení smykového napětí u dna.

Z výše uvedeného je zřejmé, že matematický model MIKE3 FM je mocný simulační prostředek pro výpočet charakteristik typicky třírozměrného proudění, jakým je proudění a transport znečišťujících látek v nádrži Švihov. Použití však klade značné nároky na dostupná data, bez nichž není možné dosáhnout odpovídajících a správných výsledků.

3.6.1.2 Transport znečišťujících látek

Šíření znečišťujících látek ve vodárenské nádrži Švihov bylo schematizováno dvěma metodami:

1. transportním modulem MIKE 3 FM za zjednodušujícího předpokladu konzervativního šíření znečišťujících látek, tj. během doby simulace nedochází k rozpadu či přeměně těchto látek
2. modulem ECOLab 0 – použit pro šíření znečišťujících látek nekonzervativního charakteru – látek, které podléhají chemickým či biologickým změnám.
- 3.

3.6.1.3 Transportní modul MIKE 3 FM

Transportní modul MIKE 3 FM pracuje na principu „advection – dispersion“ a základními vstupními parametry simulačního modulu jsou způsoby výpočtu součinitele disperze v horizontální i vertikální rovině a koncentrace znečišťujících látek v přítocích 0.

3.6.1.4 Modul ECOLab

Univerzální stavebnicový modul MIKE ECOLab umožňuje transformovat jakýkoli vodní ekosystém na numerický model, jednoduše definovat proces pomocí standardních šablon pro eutrofizaci, kvalitu vody, jejich chemické přeměny a transport těžkých kovů. Šablony MIKE ECOLab popisují fyzické, chemické a biologické procesy související s problémy životního prostředí a znečištěním vody – výsledné koncentrace řady proměnných jako např. bakterií, které ovlivňují kvalitu vody ke koupání, vyčerpání kyslíku v důsledku biologické spotřeby kyslíku, nadměrné koncentrace živin, interakce chlorofyl-živiny a degradace chemických látek. Šablona MIKE ECOLab je nezávislá na diskretizaci výpočetní sítě, umožňuje tedy např. i dodatečnou úpravu schematizace HD, pokud by se po simulacích šíření znečišťujících látek jevila potřebnou.

MIKE ECOLab je integrován s modulem advekce-disperze, který popisuje procesy fyzického transportu v každém bodě domény pokrývající oblast zájmu. Další požadované údaje jsou koncentrace na hranicích modelu, průtok a koncentrace ze zdrojů znečištění, teplota vody atd. Systém MIKE ECOLab řeší procesní rovnice

metodou polynomicke extrapolace v integrovaném dvou krokovém postupu s modulem advekce-disperze.

MIKE ECOLab řeší systém diferenciálních rovnic popisujících fyzikální, chemické a biologické interakce spojené s podmínkami produkce bakterií, degradací organické hmoty, výslednými podmínkami tvorby či spotřeby kyslíku a nadbytkem živin. Obvykle je změna hmotnosti nebo koncentrace proměnné v průběhu času popsána obyčejnou diferenciální rovnicí, *ordinary differential equation* ODE:

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} = P_1 + P_2 - P_3 \dots$$

Termín (P_1 , P_2 , P_3) vyskytující se na pravé straně takové ODE se běžně nazývá "proces", protože obvykle popisuje příspěvek jednotlivého procesu nebo reakcí P_x pro stavovou proměnnou A_i , např. změna A_i v důsledku růstu a procesu dýchání. Dynamika pro A_i vyplývá ze souhry všech souvisejících procesů.

Procesné orientované modelování je široce používáno, např. k modelování koncentrací, jako jsou hladiny kyslíku, znečištění nebo biomasa. Ve skutečnosti tvoří funkční jádro systému MIKE ECOLab.

3.7 Realizace 3D modelu nádrže Švihov v systému MIKE M3

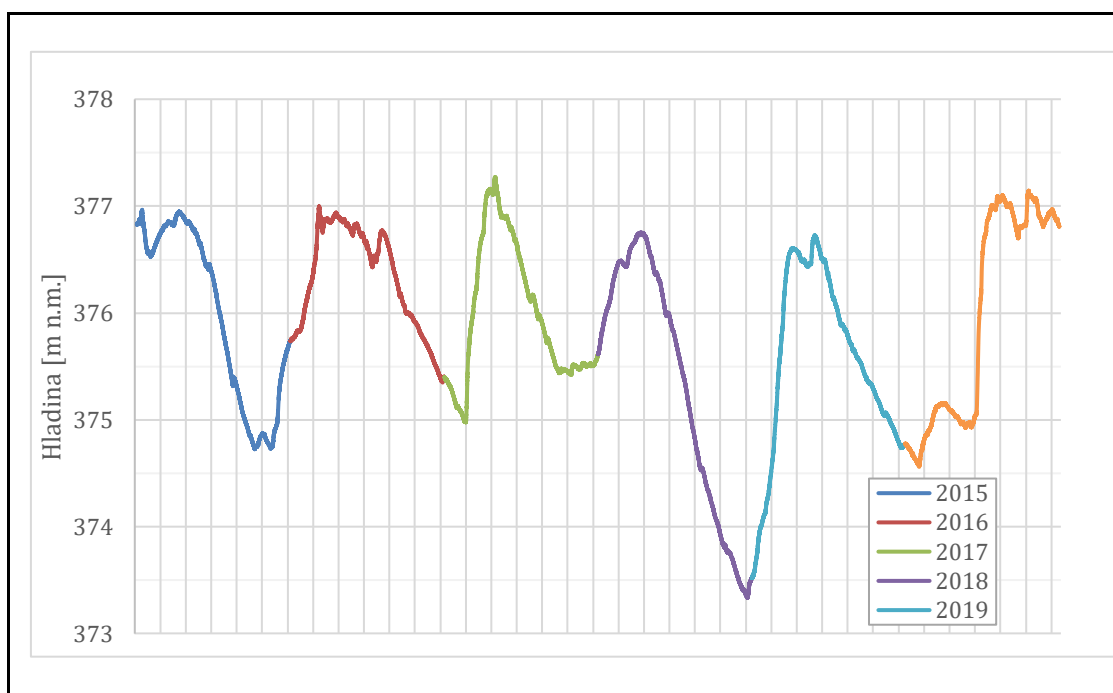
Zpracování 3D modelu probíhalo v několika průběžných etapách. Nejprve bylo třeba shromáždit a analyzovat data a zpracovat digitální model terénu. Souběžně byla vytvářena výpočetní síť v horizontální rovině. Z dodaných měřených dat byly vybrány a připraveny časové řady pro zadání okrajových podmínek a byly připraveny počáteční podmínky pro epizodní výpočty. Velká pozornost byla věnována kalibraci modelu. Byly vybrány a odsouhlaseny výsledné výpočetní scénáře, které byly v závěru byly simulovány.

3.8 Zpracování dat

Hydrologická data (Obr. 20) byla k dispozici základně v řadách od r. 2000 až do r. 2021 včetně. Data obsahují obvykle hodnotu hladiny, odtoku, odběru a teplotu vzduchu měřené jednou denně (7:00), do 14/12/2004 chybí hodnota odběru. Od r. 2005 je měřená hodnota odtoku každou hodinu, od r. 2006 hodnota hladiny každou hodinu. Nejmenší odtok, 0,005 m³/s při hladině 373,8 byl zaznamenán 30/10/2018, nejvyšší pak na přelomu března a dubna 2006, kdy z nádrže odtékalo po několik dnů řádově 150 m³/s při hladině okolo 378,20. Nejnižší hladina 372,89 m n.m. byla zaznamenána v dubnu 2004 a nejvyšší teplota vody 27,2 °C v srpnu 2018. Teplota vody je zaznamenána až od r. 2017. (je ale měřená v zonačních profilech). V průběhu zpracování se vyskytly nejasnosti ohledně poskytnutých dat odtoku z nádrže Němčice a zaznamenávaných hodnot odběru na vodárenském objektu. Všechny tyto nejasnosti byly velmi promptně a precizně prošetřeny dispečinkem Povodí Vltavy s.p.

Data z dlouhodobého monitoringu kvality vody byla dodána v časových řadách od r. 1999 až do r. 2021. Tato data jsou pořizována zpravidla jednou měsíčně, a to

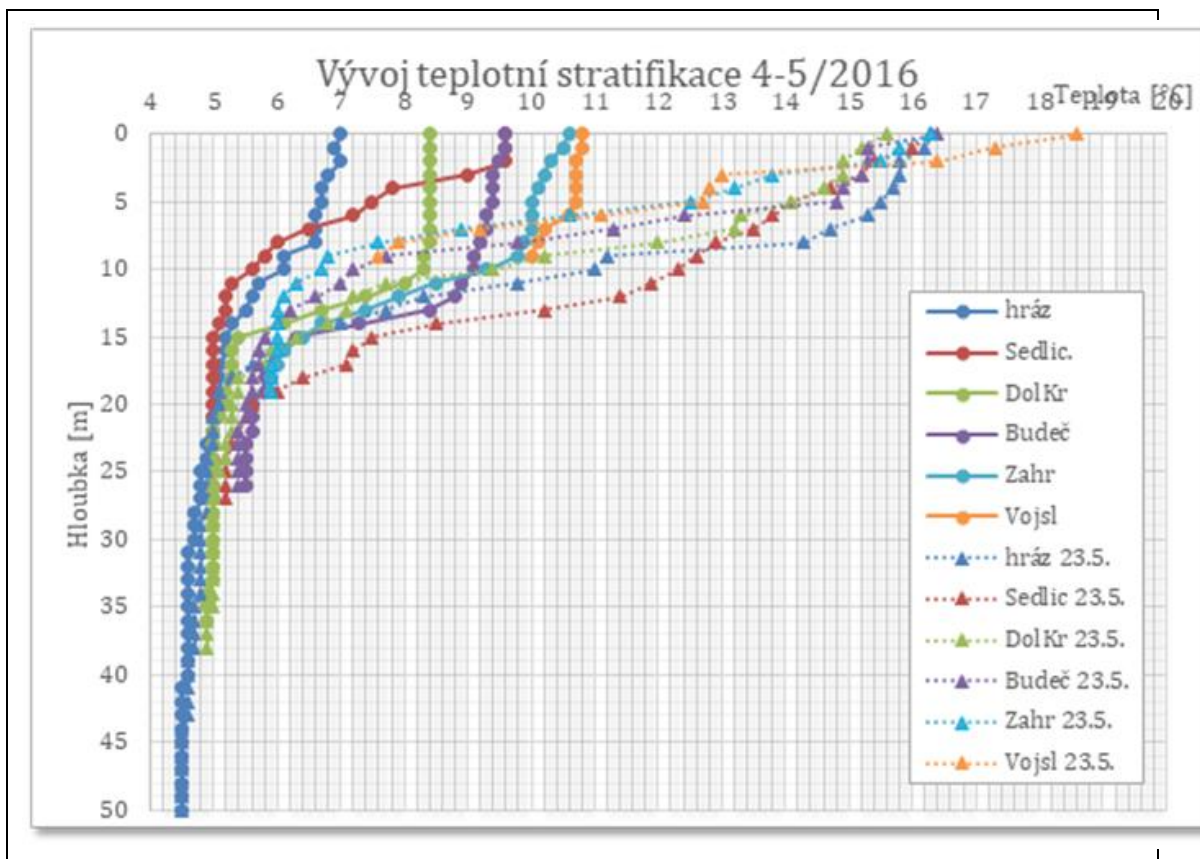
v zonačních profilech (Obr. 21) a na přítocích do nádrže. V průběhu sledování je měřeno přes 290 ukazatelů, z nichž některé nejsou měřeny v souvislých řadách. V rámci neustálého zkvalitňování monitoringu jsou průběžně zařazovány nové látky a časové řady měření jsou tak kratší, některé parametry nejsou měřeny pravidelně atp. V zimních měsících (listopad až březen) nejsou měřeny hodnoty v zonačních profilech, vyjma profilu u hráze. Data tak nejsou zcela konzistentní pro celý časový úsek. Bylo třeba vyvinout metodu pro doplnění chybějících dat na přítocích pro vytvoření kontinuálních okrajových podmínek pro epizodní simulace (Obr. 22).



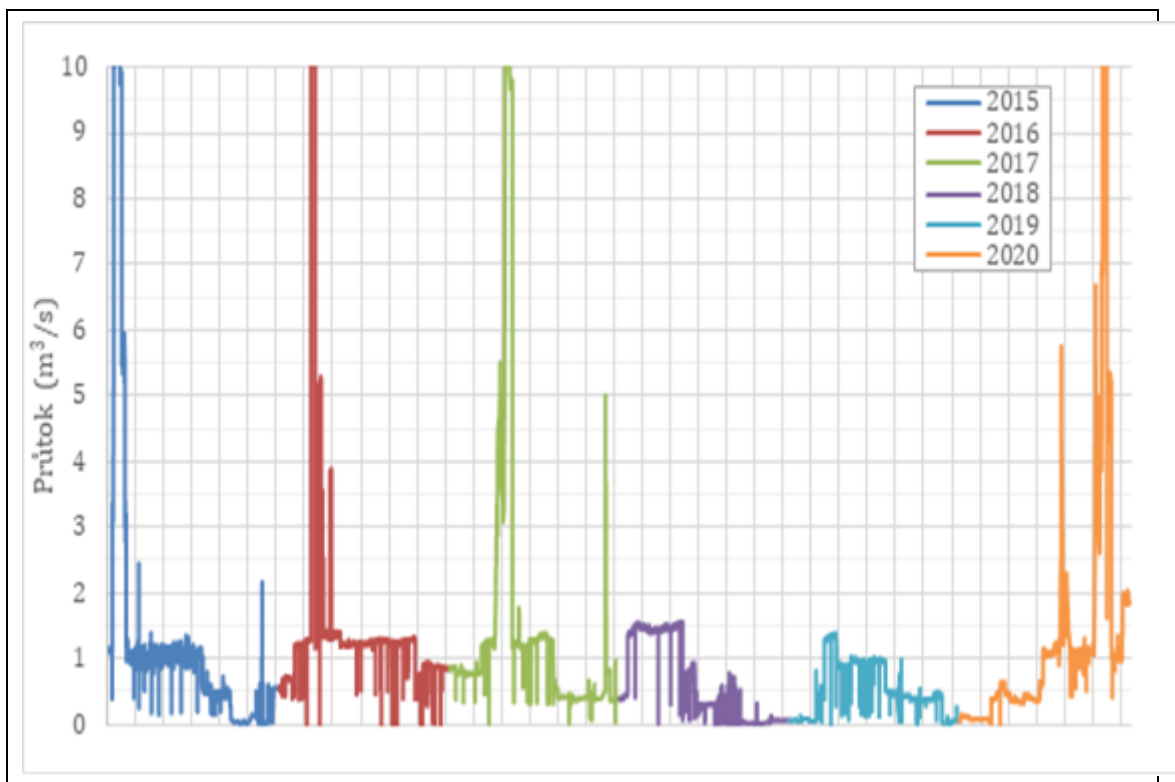
Obr. 20: Odtok v nádrži Švihov v průběhu let 2015 - 2020.

název profilu																						
	amoniak a amoniakové ionty	bakterie koliformní semotobazická (SKO)	biochemický spotřeba kyslíku (BSK ₅)	dusičnanový	dusík amoniakový	dusík celkový	dusík dusičnanový	dusičnan	eukaryotická koncentrace v ložisku	teplota celková v	tuhlina	houbovitá složka	pH základního roztoku	množství živin	sodík	pH ve vodě (pH)	pH ve vodě (pH) za tepla	pH ve vodě	uhlíky organické celkové	základní		
	mg/l	KTJ/ml	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/m	mg/l	m n.m.	m	mg/l	%	m3/s	(blank)	(blank)	°C	°C	mg/l	ZF	
VN Švihov Vojslavice 00m	0.019			19	0.015			4.3	0.043	0.14			0.1	11	125		8.7	8.7	21.5		0.5	
VN Švihov Vojslavice 01m													1	11.1	125		8.6	8.6	21.4		0.5	
VN Švihov Vojslavice 02m													2	11.1	125		8.5	8.5	20.9		1.1	
VN Švihov Vojslavice 03m													3	10.1	111		7.8	7.8	20.1		1.3	
VN Švihov Vojslavice 04m													4	8.7	94.7		7.5	7.5	19.5		0.5	
VN Švihov Vojslavice 05m	0.1			23	0.08			5.2	0.05	0.16			5.1	8.7	93.8		7.5	7.5	18.9		2.4	
VN Švihov Vojslavice 06m													5.6	7.6	80.3		7.3	7.3	18.8		3.8	
VN Švihov Vojslavice dno	0.14			27	0.11			6.1	0.057	0.19			7.2	8.2	88		7.4	7.4	18.5		2.5	
VN Švihov Vojslavice směs	0.077	0.28	2	22	0.06	5.7		5	0.048	0.16	27.9	0.037	376.17	7	9.4	104	0.664	8	20.3	17	8.9	1.5
VN Švihov Zahrádka 00m hl	0.019			18	0.015			4.1	0.042	0.14			0.1	11.9	138		8.9	8.9	22.8		0.5	
VN Švihov Zahrádka 01m													1	11.9	138		8.9	8.9	22.8		0.5	
VN Švihov Zahrádka 02m													2	13	150		9	9	22.2		1.3	
VN Švihov Zahrádka 03m													3	11.1	123		8.4	8.4	20.1		0.5	
VN Švihov Zahrádka 04m													29	8.7	94.4		7.6	7.6	19.3		0.5	
VN Švihov hráz 10m	0.05			18.00	0.04			4.10	0.02	0.06	30.30	0.00	10.00	11.00	106.00		7.80	7.80	13.60		0.50	
VN Švihov hráz 11m											30.50		11.00	11.10	104.00		7.70	7.70	12.20		0.50	
VN Švihov hráz 12m											30.30		12.00	12.10	108.00		7.60	7.60	10.40		0.50	
VN Švihov hráz 13m											30.30		13.20	12.40	107.00		7.60	7.60	8.90		0.50	
VN Švihov hráz 14m											30.40		14.10	12.40	106.00		7.60	7.60	8.20		0.50	
VN Švihov hráz 15m											30.40		15.00	12.30	103.00		7.50	7.50	7.60		0.50	
VN Švihov hráz 16m											30.40		16.00	12.20	101.00		7.50	7.50	7.20		0.50	
VN Švihov hráz 17m											30.40		17.00	11.90	97.50		7.40	7.40	6.90		0.50	
VN Švihov hráz 18m											30.40		17.90	11.70	96.10		7.40	7.40	6.80		0.50	
VN Švihov hráz 19m											30.30		19.00	11.60	94.90		7.40	7.40	6.70		0.50	

Obr. 21a Vývoj teplotní stratifikace v zonačních profilech také Příloha P 3.1 - mapy



Obr. 21b Vývoj teplotní stratifikace v zónačních profilech – teplotní stratifikace 4-5/2016.



Obr. 22: Ukázka zpracování dat v zonačních profilech.

3.9 Měrné kampaně, rekognoskace

V rámci pořízení dat (Obr. 23) pro kalibraci modelu proběhly 3 měrné kampaně ve spolupráci s Povodím Vltavy, s.p. a to detailním na třech profilech v Sedlické zátocě, další v profilech v horní části nádrže, pod Bělským Mlýnem a v oblasti Vojslavic.



Obr. 23: Hydrometrování v profilu pod Bělským mlýnem

3.10 Digitální model terénu

Základním podkladem 3D numerického modelu (P 3.2, P 3.3 – Přílohy) je kvalitní digitální model terénu, jehož kvalita závisí zejména na kvalitě a hustotě vstupních dat. V případě VN Švihov byly k dispozici 2 hlavní zdroje dat, a to zaměření dna nádrže a DMR 5G okolí nádrže, viz kap. 3.3.

Tyto dvě základní datové sady byly převedeny do globálního souřadného systému WGS 84/UTM zone 33N – EPSG:32633 a byly z nich vygenerovány dva dílčí digitální modely terénu. Tyto modely byly ošetřeny od extrémních chybových hodnot a „hladinových bodů“ v DMR5G. Následně byly a sloučeny v jeden celek.

Vzhledem k tomu, že data pořízená měrnou lodí jsou měřitelná do minimální hloubky 1 m a naopak data pořízená laserscanem (DMR5G) nejsou měřitelná pod hladinou vody, vzniká v mělkých oblastech „hluché“ pásmo kde bylo potřeba s ohledem na břehovou linii reálný reliéf dna domodelovat.

Zároveň, a to naopak v oblastech strmých břehů*, dochází díky nepřesnostem a chybám při pořízení dat k jejich překryvům. Tyto překryvy je třeba rovněž domodelovat, tak aby vznikl reálný reliéf terénu. Podrobně ošetřeno bylo celých 112 km terénu podél břehové linie.

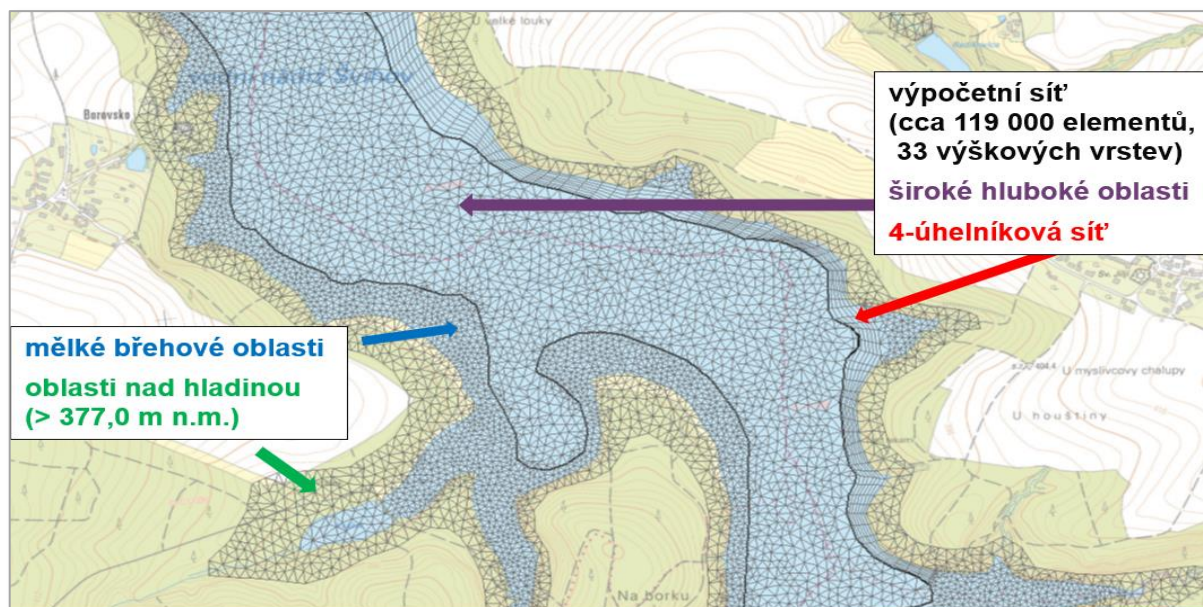
V modelu terénu byly dále ošetřeny oblasti kolem objektů a jejich návaznost na břehy. Nezbytným pomocníkem při modelování terénu byly ortofoto snímky.

3.11 Výpočetní síť a batymetrie modelu

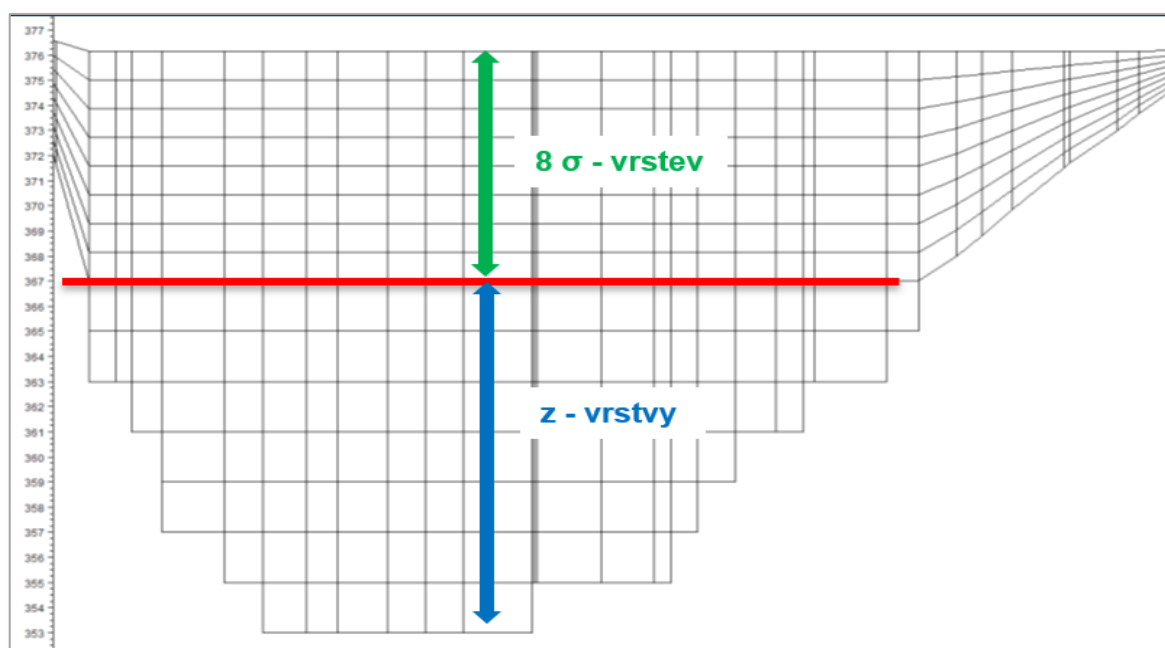
Základem 3D numerického modelu (viz kap. 3.6) je výpočetní síť. Výpočetní síť bylo nutné volit tak, aby dostatečně podrobně popisovala nádrž v horizontálním i vertikálním směru a zároveň aby byla adekvátní její náročnost na výpočetní čas. (P 3.4 – Přílohy)

V **horizontální** (Obr. 24) rovině byla vytvořena síť s celkovým počtem 118 623 polohopisných elementů. Při tvorbě sítě bylo navrženo několik zón s různou hustotou a velikostí elementů v závislosti na oblasti nádrže. V rozsáhlých vodních plochách byly voleny větší trojúhelníkové prvky o maximální ploše až 600 m², v mělkých břehových oblastech a v zátokách menší trojúhelníkové prvky o maximální ploše 160 m². V úsecích přímých, strmých břehů a úzkých zátok byly vytvořeny čtyřúhelníkové prvky. Největší trojúhelníkové prvky byly navrženy v oblastech vždy nad maximální hladinou, tj. > 377,0 m n.m.

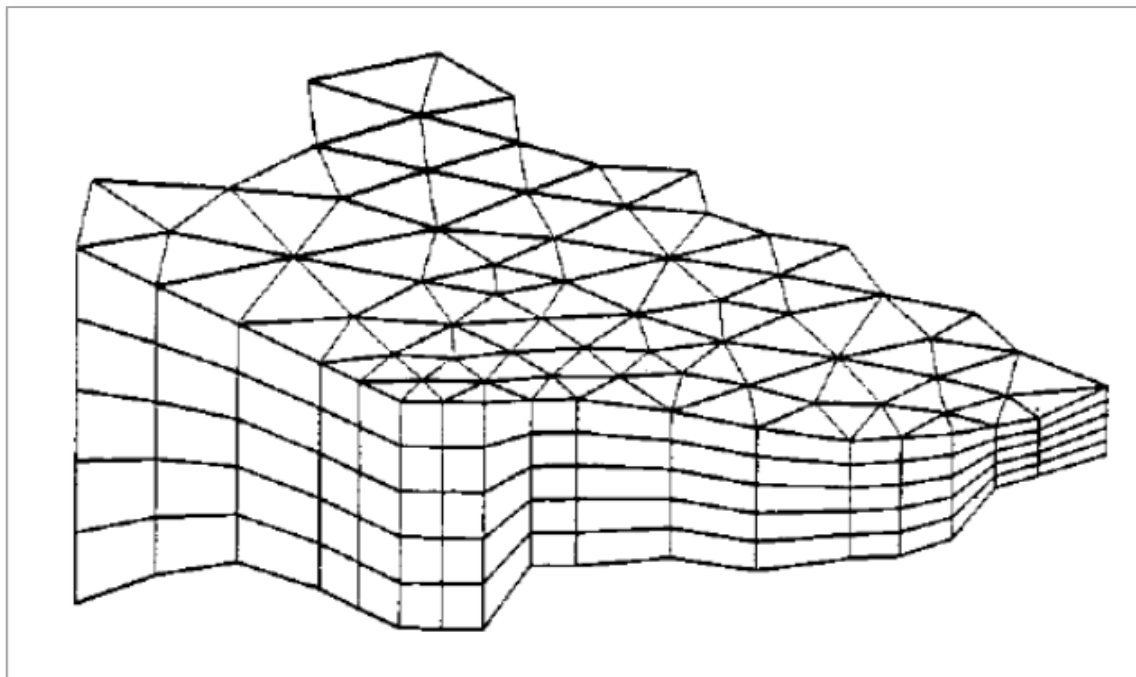
Ve **vertikálním** směru (Obr. 25) bylo zadáno 33 výškových vrstev. Vrchních 5 vrstev schematizuje nádrž od aktuální hladiny typicky po niveletu 372,0 m n.m. (výška těchto vrstev – cca 0,8 m – je proměnná, neboť vždy představuje 1/5 rozdílu mezi aktuální niveletou hladiny a 372,0 m n.m.). Následuje většinou 8 vrstev tloušťky 1 m až po niveletu 364,0 m n.m. – v tomto výškovém rozsahu jsou podrobně schematizovány břehy nádrže, mělké oblasti a ústí všech významných přítoků do nádrže. Pod niveletu 364,0 m n.m. úroveň hladiny v nádrži klesá jen výjimečně, a proto byla v tomto pásu zvolena výška (vertikální rozměr) výpočetního elementu 2 m. Takto definované rozměry prostorových elementů jsou dostatečné pro správný popis teplotní stratifikace i podrobné rozlišení rychlostního profilu po svislici. Počet elementů modelu na výšku je proměnlivý, neboť závisí na aktuální hladině vody v nádrži při jednotlivých řešených epizodách. Pro scénáře z počáteční úrovní hladiny v nádrži 363 m n.m. byla vertikální struktura výpočetní sítě poněkud modifikována.



Obr. 24: Stavba výpočetní sítě v horizontální rovině.

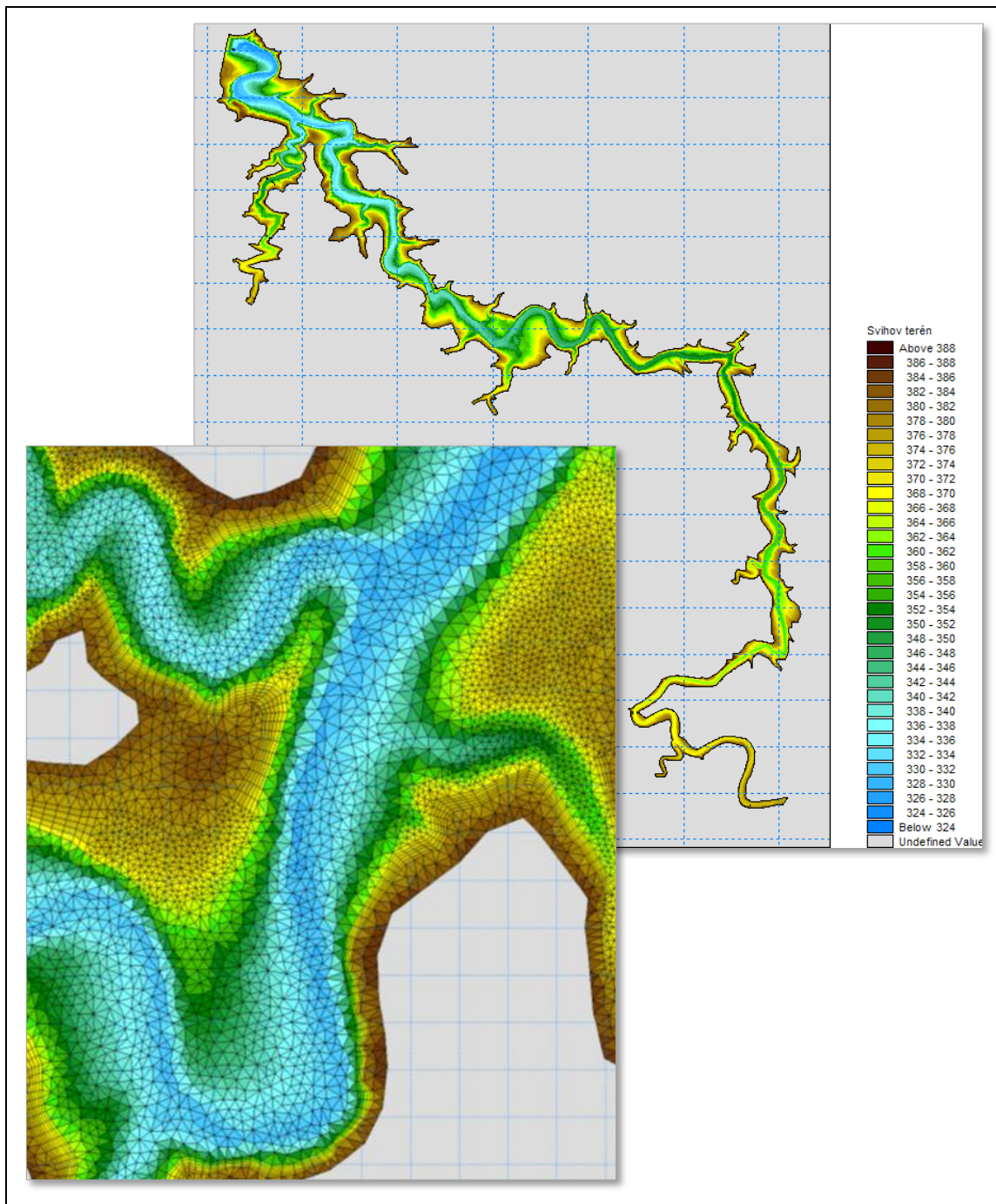


Obr. 25: Vertikální stavba výpočetní sítě (ilustrační obrázek).



Obr. 26: Prostorová výpočetní síť (ilustrační obrázek)

Protnutím horizontální výpočetní sítě s digitálním modelem terénu vznikla tzv. **batymetrie** (topologie polohy dna) 3D modelu. V batymetrii byly vhodným způsobem ošetřeny oblasti okrajových podmínek a zdrojů, aby vyhovovaly podmínkám modelu pro přítoky a vnos látek (Obr. 26, 27).



Obr. 27: Batymetrie 3D modelu VN Švihov.

3.12 Počáteční a okrajové podmínky

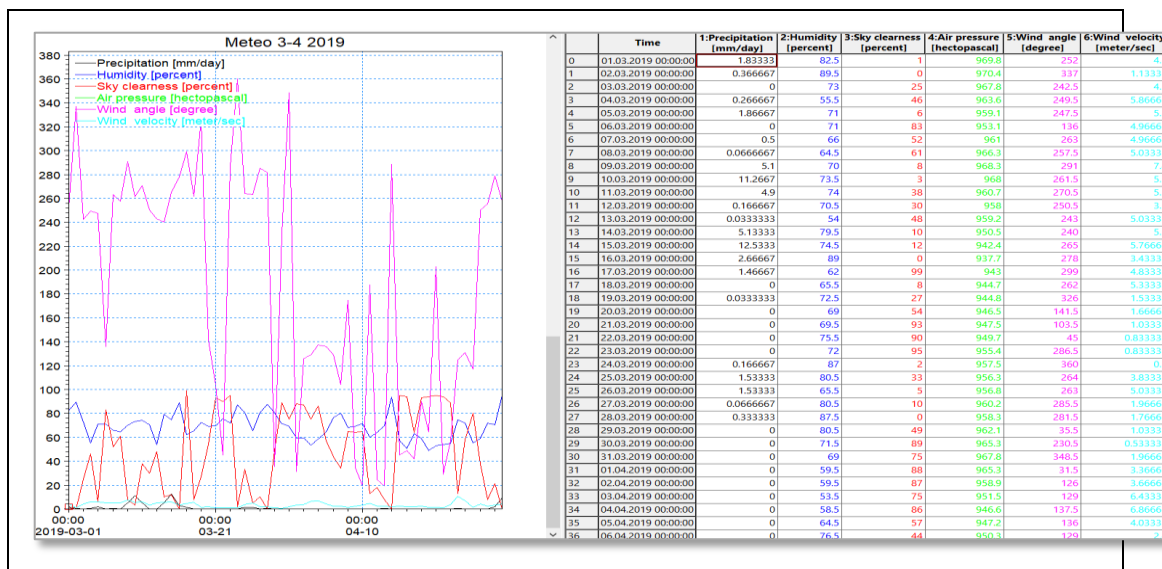
Zatěžovací stavy a podmínky hydrodynamického proudění a dalších procesů v modelu jsou určeny počátečními a okrajovými podmínkami. V případě 3D modelu VN Švihov bylo třeba stanovit pro každou variantu hladinovou počáteční podmínku a počáteční

podmínky teplotní stratifikace v nádrži. Pro výpočty kvality vody v modelu ECOLab pak stratifikaci jakostních ukazatelů (Obr. 28., 29., 30, 31).

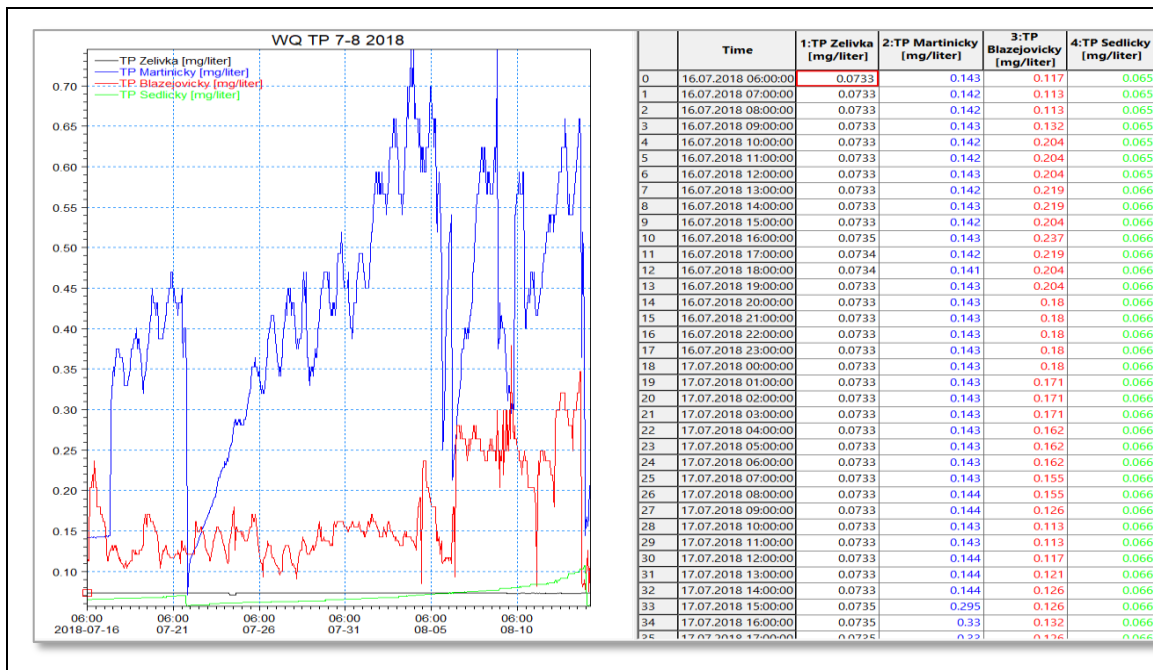
Okrajové podmínky byly stanovovány na významných přítocích do nádrže přímo v okrajové linii modelu nebo bodovým zdrojem, a to ve formě časových řad průtoků, teplot, případně chemických ukazatelů získaných z dodaných dat. Dále byly zadávány meteorologické okrajové podmínky (srážky, vlhkost vzduchu, jasnost oblohy, rychlost a směr větru a tlak vzduchu) pro celou plochu nádrže ve formě časových řad. Pro hydrodynamické kalibrace měrných kampaní byla použita prostorová větrná data, která byla zpracována na základě měření ze sedmi anemometrů rozmístěných podél nádrže (viz. Tab. 11).

Tab. 11: Přehled průtokových (a WQ) okrajových podmínek modelu.

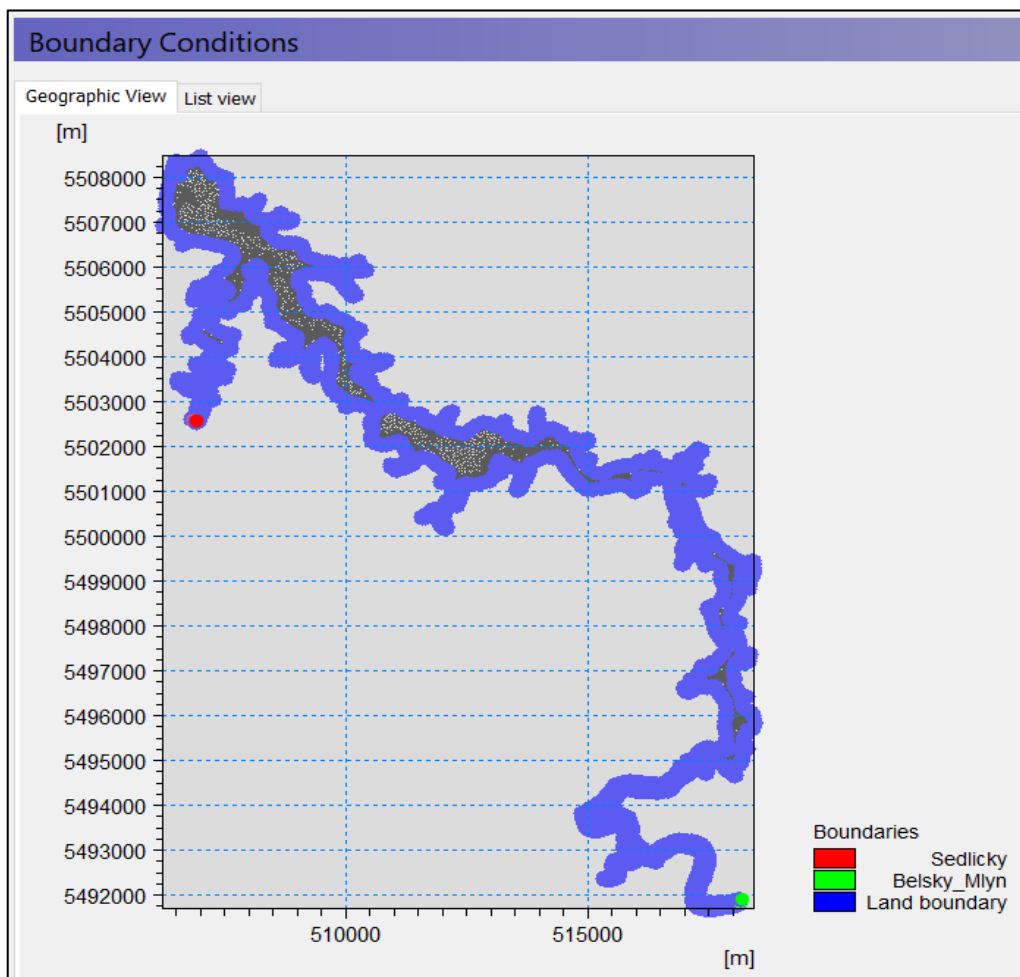
Název OP	Zdroj dat	tok	typ
Bělský Mlýn	Tukleky	Želivka	Liniová OP (boundary)
Martinický	Senožaty	Martinický p.	Zdroj (source)
Blažejovický	Blažejovice	Blažejovický	Zdroj (source)
Sedlický	odtok Němčice	Sedlický	Liniová OP (boundary)
zakl. vypust	odtok	VN Švihov	Zdroj (source)
Odběr vodár	odběr vodárna	VN Švihov	Zdroj (source)
<i>havárie</i>	<i>dle scénáře havárie</i>	<i>dle scénáře havárie</i>	Zdroj (source)



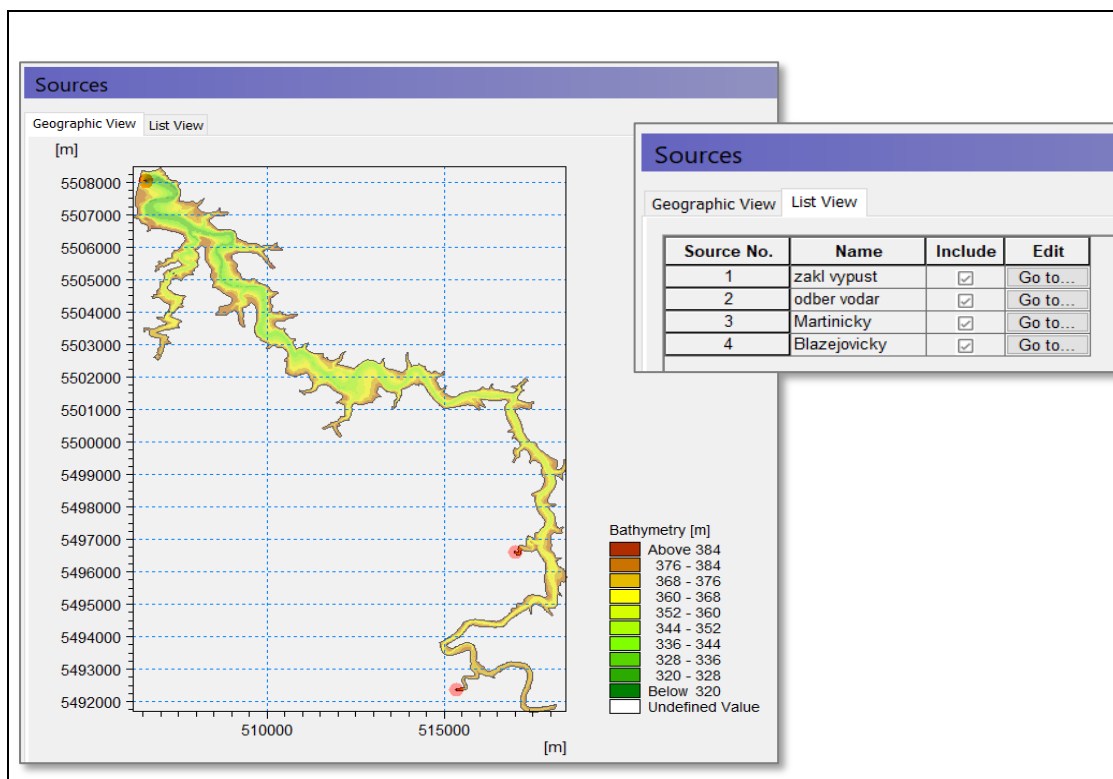
Obr. 28: Vstupní časová řada – ukázky řad meteorologických dat a WQ dat.



Obr. 29: Okrajové podmínky na hranici modelu.



Obr. 30: Okrajové podmínky – bodové zdroje.



Obr. 31: Okrajové podmínky – bodové zdroje.

3.13 Kalibrace 3D modelu

Předmětem kalibrace modelu bylo nastavení parametrů, které ovlivňují vypočtené charakteristiky proudění – především se jednalo o následující parametry:

- turbulentní viskozita – v horizontálním i vertikálním směru
- hydraulická drsnost dna a břehů nádrže – zejména v mělkých oblastech (často zarostlých vodními rostlinami)
- účinek (třecí síla) větru na pohyb vody v nádrži (u hladiny)
- disperze – v horizontálním i vertikálním směru
- teplotní výměna mezi vodou v nádrži a proudícím vzduchem nad hladinou

Účinek tření proudícího větru na vodní hladinu τ_s je pak dán výrazem

$$\tau_s = \rho_a c_d \mathbf{u}_w |\mathbf{u}_w|$$

kde ρ_a ... hustota vzduchu

$\mathbf{u}_w = (u_w, v_w)$... složky vektoru rychlosti větru 10 m nad hladinou.

Teplotní výměna mezi vodou v nádrži a proudícím vzduchem nad hladinou ovlivňuje teplotu vody v nádrži – teplotní stratifikaci, promíchávání vody v nádrži a výpar z vodní hladiny. Ztráta tepla výparem z vodní hladiny je v MIKE 3 FM počítána vztahem:

$$q_v = LC_e(a_1 + b_1 W_{2m})(Q_{water} - Q_{air})$$

kde $L = 2.5 \cdot 10^6$ J/kg ... odpařování latentního tepla
 $C_e = 1.32 \cdot 10^{-3}$... koeficient prostupu vlhkosti (Daltonovo číslo)
 a_1, b_1 ... koeficienty Daltonova zákona – kalibrační parametry
 W_{2m} ... rychlost větru 2 m nad hladinou
 Q_{water} ... vlhkost vzduchu u hladiny
 Q_{air} ... vlhkost vzduchu v atmosféře

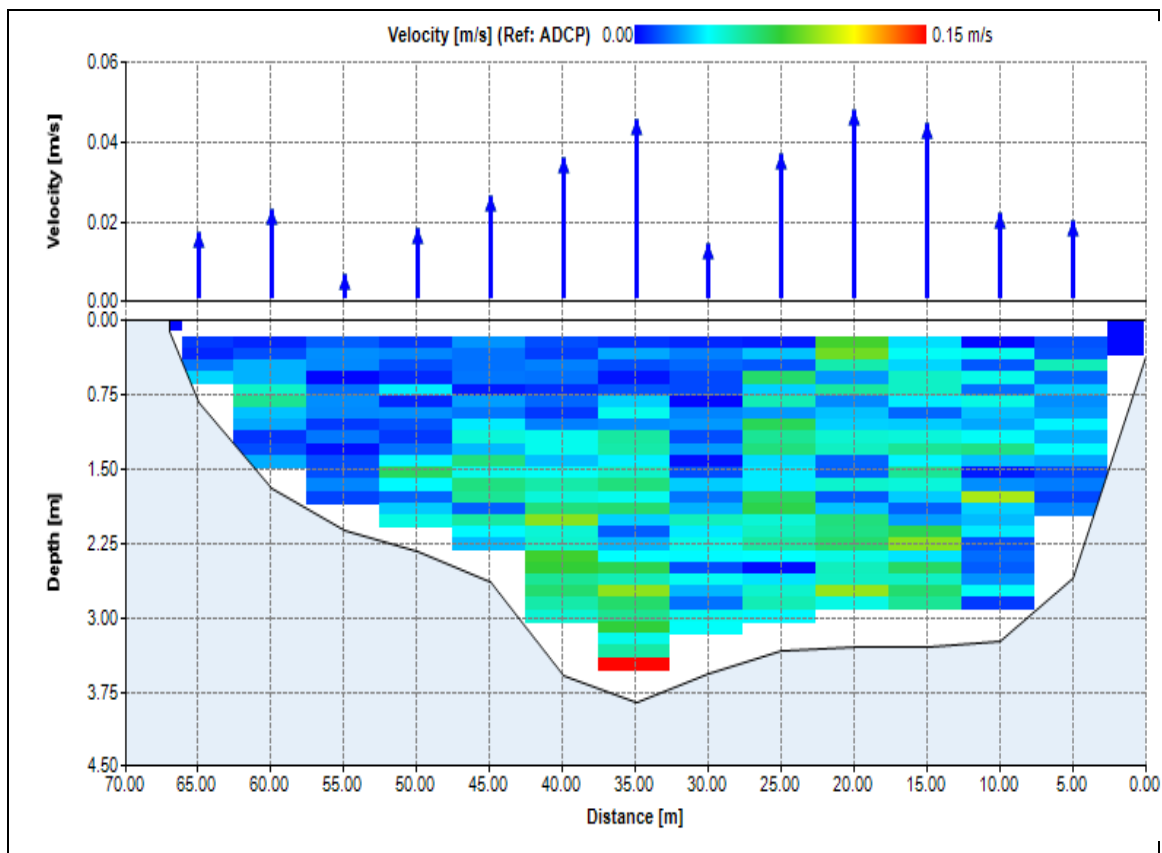
Teplotu vody u hladiny a promíchávání vrstev blízko hladiny dále ovlivňují vlhkost vzduchu a sluneční radiace (osvětlení či zastínění vodní hladiny), což jsou další vstupní parametry teplotního modulu MIKE 3 FM. Teplotní stratifikace včetně charakteristik proudění v jednotlivých vrstvách „po hloubce“ je zároveň významně ovlivňována větrem nad nádrží. Matematický model MIKE 3 FM simuluje vliv účinku větru – do výpočtu vstupuje směr a rychlost větru; kalibračním parametrem je součinitel tření (unášecí síly) větru c_d na vodní hladinu:

$$c_d = \begin{cases} c_a & W_{10} < W_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{W_b - W_a}(W_{10} - W_a) & W_a \leq W_{10} < W_b \\ c_b & W_{10} \geq W_b \end{cases}$$

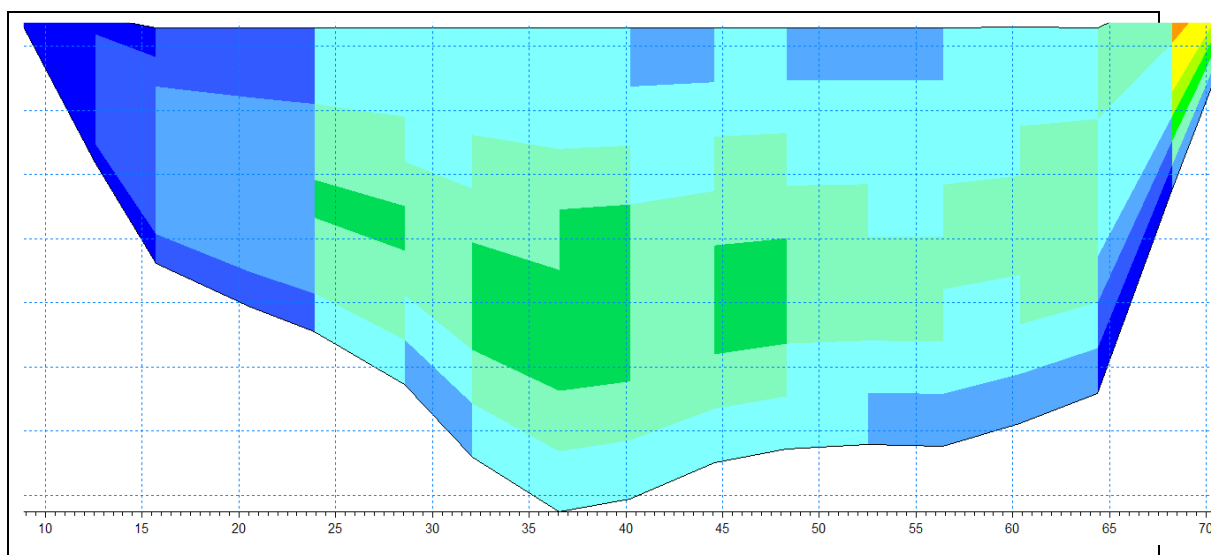
kde c_a, c_b ... empirické faktory (kalibrační parametry)
 W_a, W_b ... prahové hodnoty rychlosti větru (kalibrační parametry)
 W_{10} ... rychlost větru 10 m nad hladinou

3.13.1.1 Kalibrace HD modelu

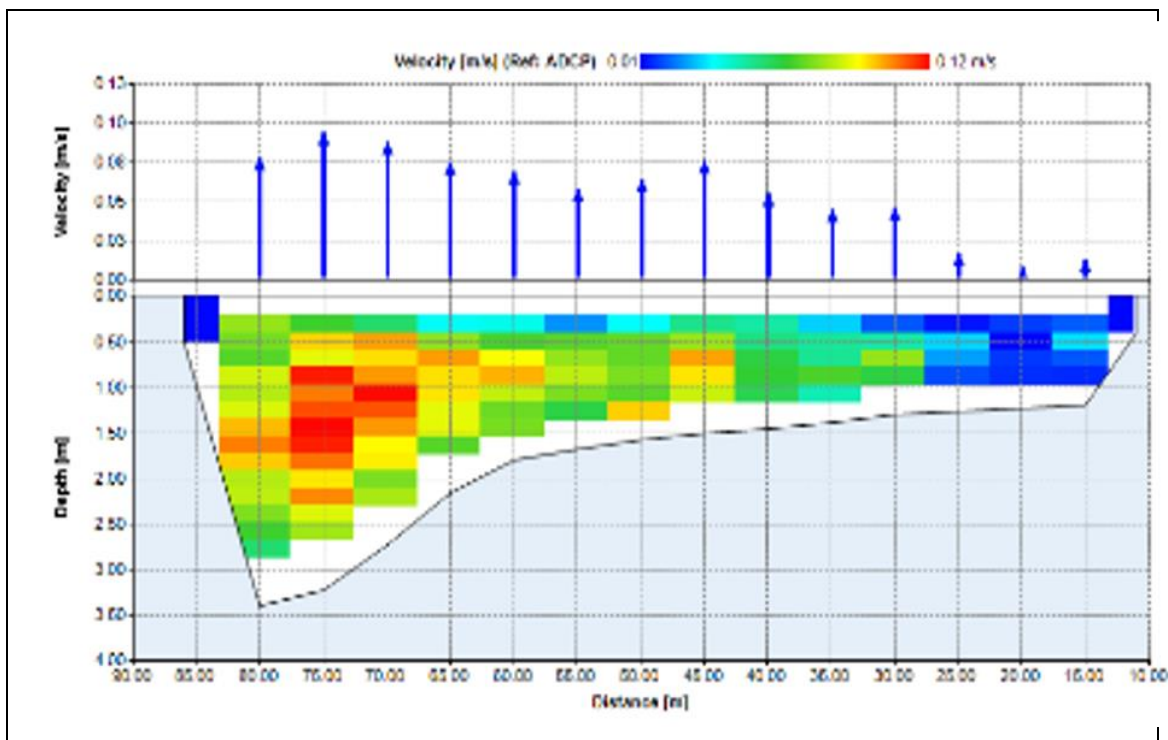
Pro kalibraci HD modelu byly využity výsledky provedených terénních měření na VN Švihov. Porovnání rychlostní polí vypočtených MIKE 3 FM a změřených systémem ADCP je provedeno na následujících obrázcích **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** až **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Z vykreslených rychlostních polí vyplývá, že kalibrací modelu bylo dosaženo dobré shody mezi simulovanými výsledky a hodnotami změřenými na nádrži.



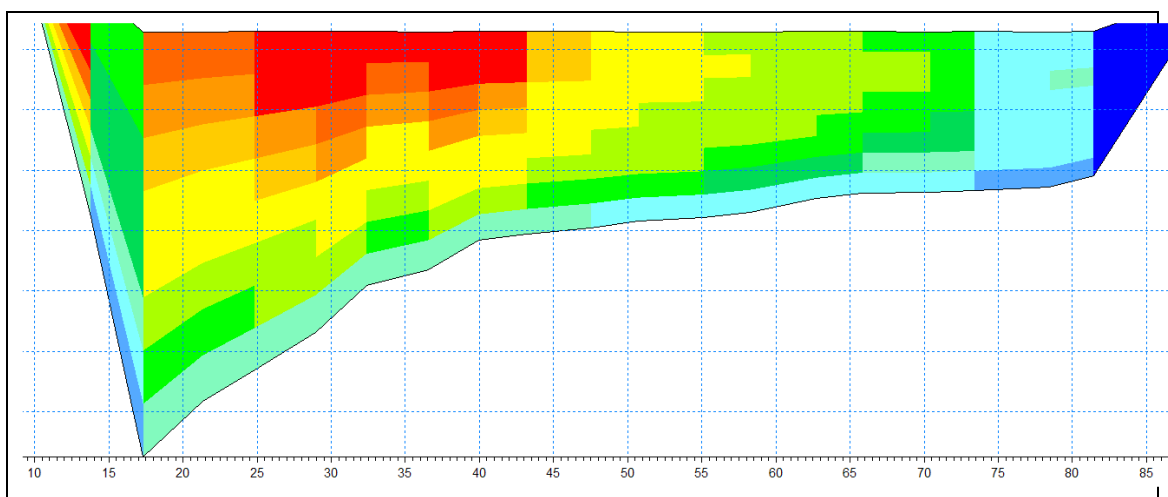
Obr. 32: Rychlostní pole při měření 14.9.2021 v Sedlické zátocě – PF 1
Měření ADCP: 11:00 Q (vyhodnocený) = 5,6 m³/s



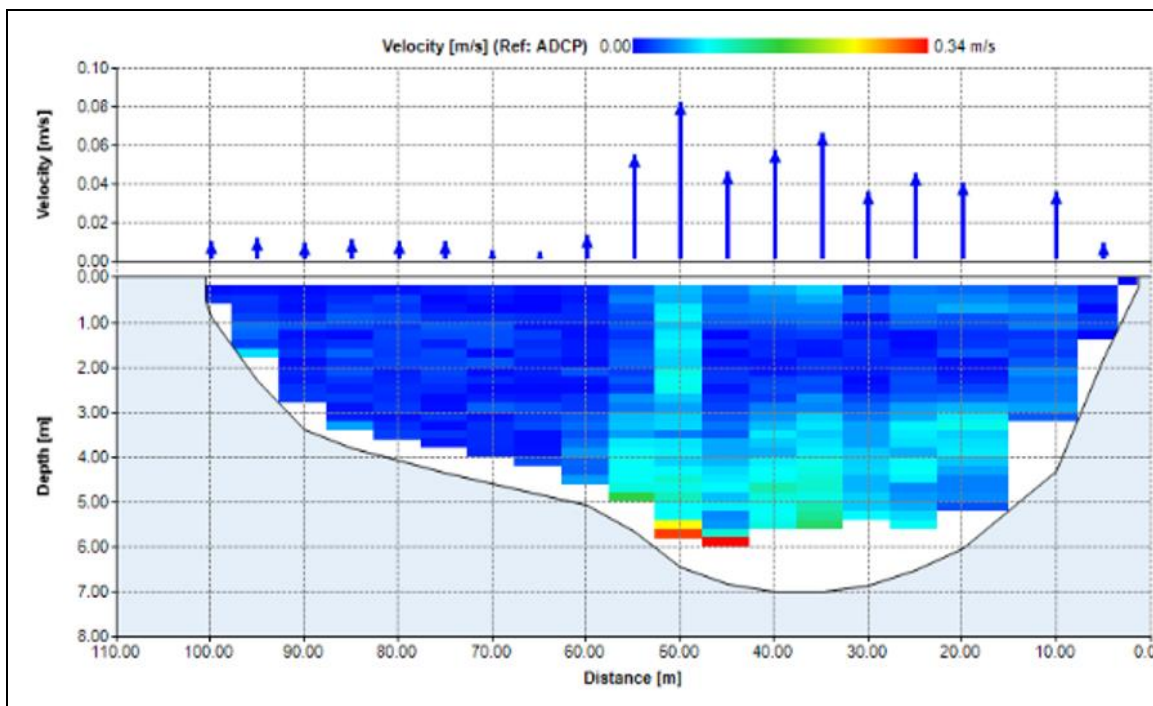
Obr. 33: MIKE 3 FM: 11:00 Q (simulovaný) = 5,62 m³/s



Obr. 34: Rychlostní pole při měření 7.5.2022 – PF 3
Měření ADCP: 11:12 až 11:34 Q (vyhodnocený) = 8,2 m³/s

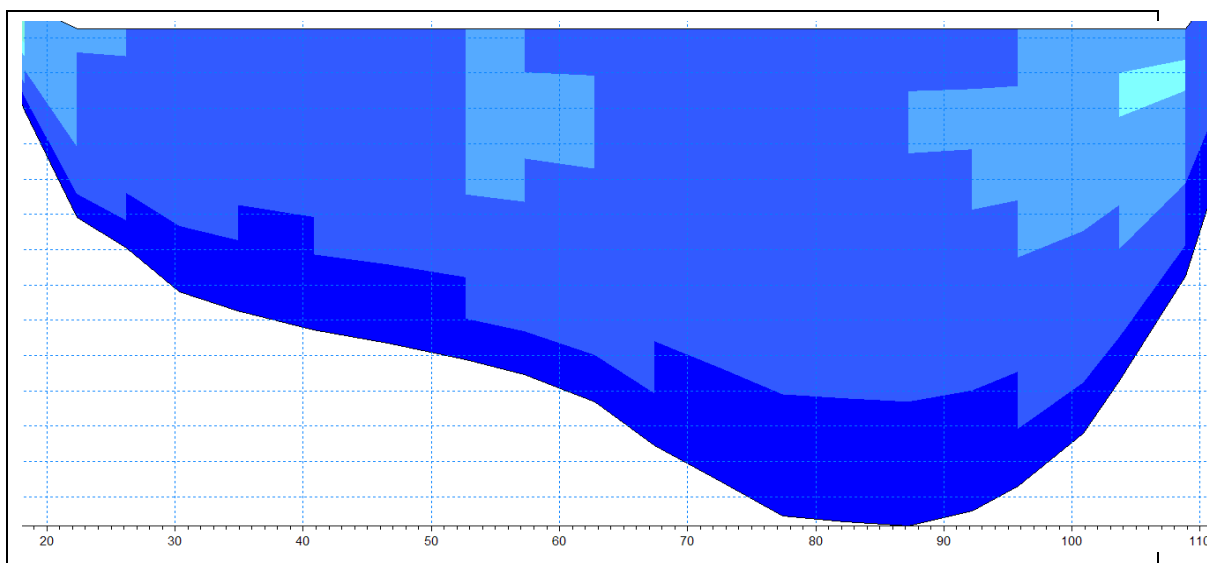


Obr. 35: MIKE 3 FM: 11:30 Q (simulovaný) = 9,8 m³/s



Obr. 36: Rychlostní pole při měření 7.5.2022 – PF 2

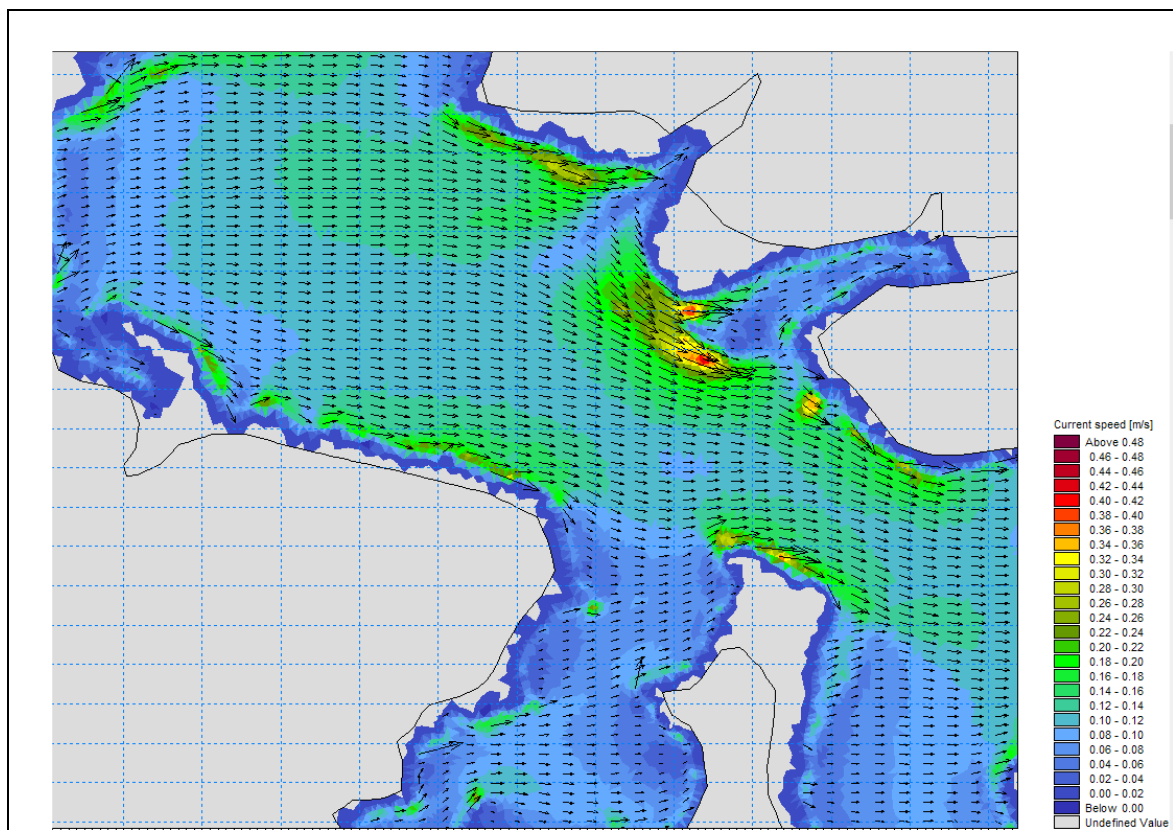
Měření ADCP: 13:40 až 14:10 Q (vyhodnocený) = 17,2 m³/s



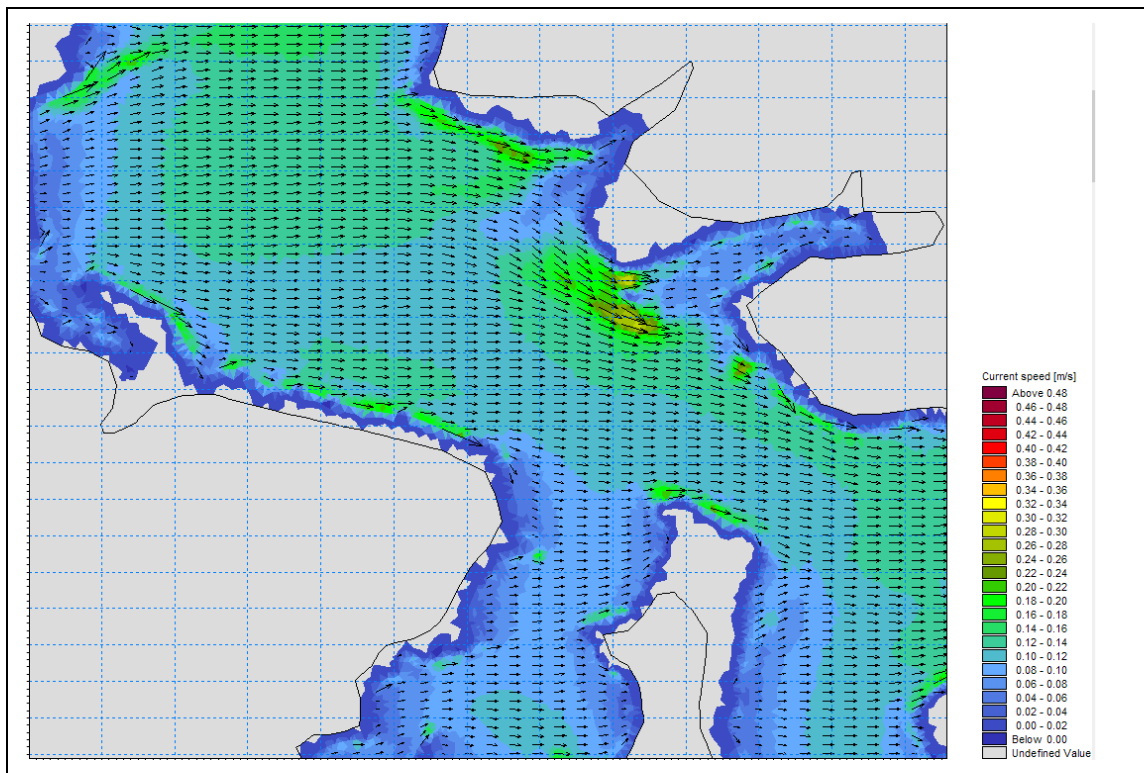
Obr. 37: MIKE 3 FM: 14:00 Q (simulovaný) = 17,6 m³/s

Nastavené kalibrační parametry účinku proudícího větru na vodní hladinu byly ověřeny simulací typického silnější větru nad vodní hladinou – pro ověření byl zvolen konstantní západní vítr o rychlosti 10 m/s. Výsledky simulací jsou zobrazeny na obrázcích níže (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, 39) s nastavením vyšší hydraulické drsnosti dna v mělkých oblastech (Obr. 39).

Dále bylo provedena verifikace modelu na datech z dodatečné měrné kampaně.



Obr. 38: Rychlosti proudění v hladinové vrstvě při rychlosti větru 10 m/s



Obr. 39: Rychlosti proudění v hladinové vrstvě při rychlosti větru 10 m/s s vyšší hydraulickou drsností dna

3.13.1.2 Kalibrace teplotní stratifikace (první úloha kalibrace Adecion_dispersion AD modulu)

Pro kalibraci teplotní stratifikace byly využity vybrané epizody ze získaných dat. Určujícími faktory při výběru epizod byla frekvence měření v zónačních profilech a na přítocích a měřené hodnoty sledovaných ukazatelů. Dále byl výběr zaměřen na velikost průtoku na přítocích a roční období, tak aby byly vystiženy různé podmínky v nádrži.

3.13.1.3 Výběr kalibračních epizod

Vzhledem k tomu, že měření jakosti v zónačních profilech probíhá jednou měsíčně, byly voleny měsíční epizody. Z prvního vybraného dne měření byly sestaveny počáteční podmínky a po výpočtu trvajícím cca jeden měsíc reálného času byly porovnávány výsledky s daty dalšího dne zónačního měření. Navíc v zimním období, tj. zpravidla listopad až březen, měření v zónačních profilech neprobíhá a jsou k dispozici pouze některé směšné hodnoty – tyto okolnosti ovlivňovaly výběr kalibračních epizod. Dalším problémem bylo, že měření jakostních dat na přítocích probíhá rovněž jen jednou měsíčně, a v jiné dny – okrajové podmínky (koncentrace simulovaných znečišťujících látek) však musí být do modelu zadány jako časové řady, vystihující změny koncentrace během celé kalibrační epizody.

K vytvoření těchto časových řad teplotní stratifikace a zároveň vybranou koncentrací polutantů byly sestaveny závislosti látkových toků uvažovaných polutantů na průtocích

(z původních měření cca v měsíčním kroku) ve významných přítocích do nádrže a z těchto závislostí byly následně korelací odvozeny podrobné časové řady koncentrací polutantů v přítocích během uvažované kalibrační epizody. Závislosti látkových toků polutantů na průtocích byly nejprve odvozeny ze sedmileté řady měření (2015 – 2021); ukázalo se však, že koncentrace polutantů se významně mění v čase, takže bylo nutné závislosti látkových toků polutantů na průtocích vytvořit jen z krátkého období, do kterého spadala kalibrační epizoda – zpravidla jen ze 4 měsíčních hodnot. Z výše popsaného postupu je zřejmé, že okrajové podmínky modulů pro simulaci šíření znečišťujících látek mohou být zatíženy značnou chybou.

Sledovanými ukazateli pro kalibraci byly po konzultaci s Povodím Vltavy vybrány celkové hodnoty fosforu TP a dusík dusičnanový N (NO_3). Kalibrační epizody byly vybrány tak, aby v dané období byl zaznamenán zvýšený látkový tok jednoho z ukazatelů a zároveň zvýšený, běžný či minimální průtok a charakteristická stratifikace v nádrži pro dané období. Zároveň bylo nutné volit období, kdy jsou měřená data co nejvíce kompletní. Pro kalibraci byly vybrány celkem 4 epizody, které jsou shrnuty v následující tabulce. Epizody se zvýšeným látkovým tokem dusíku dusičnanového N (NO_3), který nepodléhá rychlému rozpadu, byly kalibrovány s využitím transportního modulu. Pro kalibraci celkového fosforu, který podléhá biochemickým procesům v nádrži byl testován nadstavbový modul ECOLab.

Tab. 12: Vybrané epizody pro kalibraci WQ modelu.

období rok	Kalibrační epizoda Datum měření v zon. profilech	Počet dnů	Q Želivka [m/s]		Hladina začátek konec	Sledovaný ukazatel
			maximum	průměr		
Zima/Jaro 2019	13.3. – 10.4.	28	18.5	6.7	375.78 376.60	N (NO ₃)
Jaro 2016	25.4. – 23.5.	28	23.0	2.6	376.89 376.76	TP
Jaro/Léto 2020	12.5. – 1.6. – 29.6.	20 + 28	36.1	8.1	374.97 376.17	N (NO ₃)
Léto 2018	16.7. – 13.8.	28	7.1	0.7	375.51 374.91	TP

3.13.1.4 Výsledky kalibrace

Základem pro adekvátní vývoj chemických a biochemických procesů v nádrži je odpovídající teplotní profil – stratifikace teplot v nádrži. První podstatná část kalibračního procesu byla tedy věnována nastavení koeficientů viz výše, pro výměnu tepla v hladinové vrstvě a mezi vrstvami vody v nádrži. Výsledek je závislý na mnoha faktorech, včetně přesnosti vstupních dat počátečních a okrajových podmínek, a zejména na přesnosti dat rozložení velikosti a směru větru a sluneční radiace.

Kalibrační epizoda zima/jaro 2019 (3-4/2019) se vyznačuje rozkolísanými zvýšenými průtoky v první polovině měsíce, které klesnou v závěru měsíce k běžným průtokům. Velmi rozkolísané jsou rovněž meteorologické podmínky v počátku jarního období. Teplotní profil nádrže je na počátku období promíchaný, s vyrovnanými teplotami. Během období se začíná zvolna vytvářet stratifikace, přičemž je tento proces narušován výkyvy počasí. V tomto období byla kalibrace nesnadná, neboť v dynamicky měnícím se prostředí patrně nejsou v datech a parametrech dostatečně vystiženy místní podmínky (např. vliv neprohřátého povrchu, zastínění hladiny okolním členitým reliéfem apod.)

Kalibrační epizoda jaro 2016 4-5/2016 je obdobím s nižšími vyrovnanými průtoky, ačkoliv během období dojde celkem třikrát ke krátkodobému zvýšení průtoků (1-2 dny). Během období dochází k pozvolnému nárůstu teplot s výkyvy typickými pro toto období. Tato epizoda byla vybrána ke kalibraci také z důvodu vyšších měřených hodnot celkového fosforu v zonačních profilech, s potencionálem pro následnou simulaci v modulu Ecolab.

Kalibrační epizoda jaro/léto 2020 5-6/2020 byla vybrána z důvodu nejvyšších zaznamenaných průtoků za poslední dekádu, kdy byly navíc změřeny zvýšené hodnoty sledovaného ukazatele NO₃, který byl vybrán jako zástupce konzervativní látky ke kalibraci. Jako jediné bylo celkové simulované období této epizody delší 28 dní, neboť měření v zonačních profilech proběhlo v nestandardních termínech a je k dispozici více sad měření. V kratším intervalu, a to 12.5.2020 a již po 20 dnech 1.6.2020 a dále již standardně po 28 dnech 29.6.2020. První mezidobí měření (12.5.-1.6.2020) je charakteristické běžnými, spíše nižšími průtoky, kdy se rozvíjí tepelná stratifikace. Toto

období je zakončeno dvoudenními zvýšenými průtoky (pravděpodobně vypouštěním z Trnávky). V dalším mezidobí zonačního měření (1.6. – 29.6.2020) následují běžné průtoky a v posledních 10ti dnech zvýšené průtoky až 36 m³/s z hlavního přítoku Želivky.

Kalibrační epizoda léto 2018 (7-8/2018) je charakteristická vyhraněnou letní stratifikací v nádrži již v rámci počátečních podmínek v červenci. Léto 2018 bylo extrémně teplé a chudé na srážky, po celou dobu simulace jsou průtoky nádrží velmi nízké a zároveň jsou dosahovány vysoké teploty vzduchu. Teploty v nádrži byla dosaženy nejvyšší za celé sledované období 1999–2021. Tato epizoda byla vybrána pro testovací výpočty vývoje fosforu modulem Ecolab.

Kalibrační test transportního modulu MIKE 3 FM

3.14 Výsledky simulací 3D modelem

3.14.1.1 Výpočetní scénáře

Tabulka 13: Výpočetní scénáře pro HD a WQ simulace

HD scénáře - návrh					WQ nadstavba – potenciální znečištění		
Q přítoky do nádrže	H hladina	Vítr směr rychlo st	Teplotní stratifika ce v nádrži	Odběr ze sdružené ho objektu	Lokalita kde dojde k potencion ál. vnosu	Charakter znečištění (konzervativ ní)	Typ znečiště ní (způsob vnosu)
nízké	plná nádrž	Z	$T_{\text{zneč}} < T_{\text{vody}}$	běžný (IV. odběr?)	určí PVI (most)	konz. látka klesající transport	bodový
nízké	plná nádrž	V	$T_{\text{zneč}} > T_{\text{vody}}$	běžný (I. odběr?)	určí PVI (most)	konz. látka, hladinový transport např. ropné látky	bodový
vysoké	plná nádrž	-	letní	běžný	vybrané přítoky	konz. látka např. produkty z požárů*	plošný ze břehu
vysoké/běž né – na přítoku <i>Korelace Q a koncentrac e, určí PVI</i>	zakleslá/běž ná	-	letní $T_{\text{zneč}} = T_{\text{vody}}$ v horní vrstvě	běžný/změn a	Sedlice Bělský Mlýn	konz. látka ze zemědělství -původně plošný	bodový na přítoku
vysoké/běž né – na přítoku	zakleslá/běž ná	-	letní $T_{\text{zneč}} = T_{\text{vody}}$ v horní vrstvě	běžný/změn a	Sedlice Bělský Mlýn	konz. látka havárie z bodového zdroje	bodový na přítoku

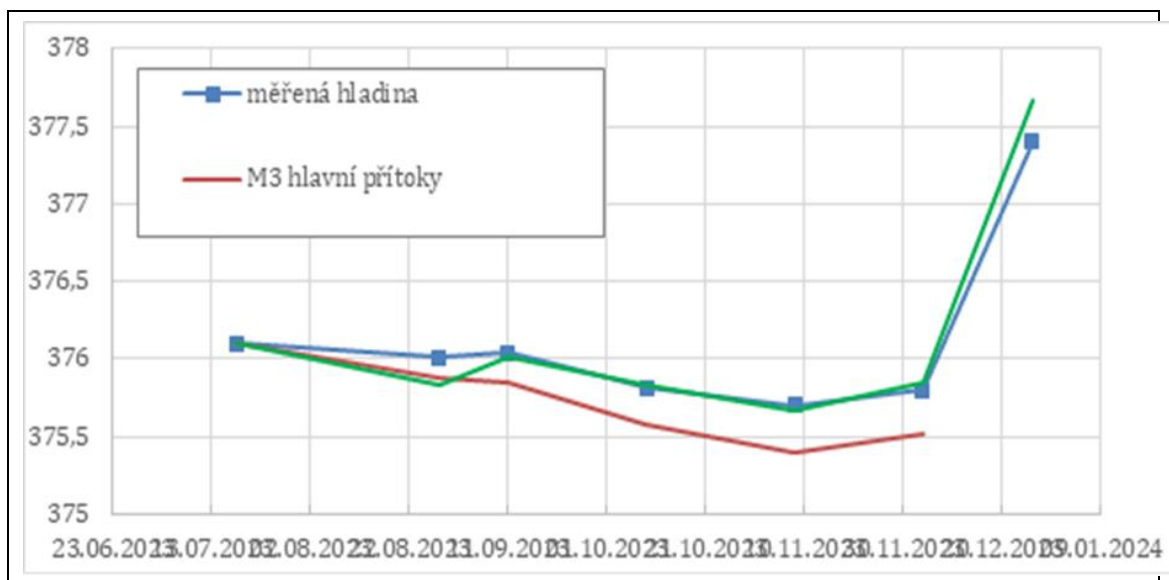
Vzhledem zadanému celkovému počtu scénářů hydrodynamických simulací na 3D modelu (3 scénáře) byly zpracovatelem předem navrženy varianty těchto scénářů. Nastavení základních parametrů jednotlivých scénářů (průtok, hladina, vítr, stratifikace, odběry) bylo vybráno tak, aby nastavily příhodné podmínky pro vnos potencionálního znečištění do nádrže a následnou simulaci kvality vody. (Tab. 13) Tyto scénáře budou dokončeny včetně kvalitativních dat v úkolu TA 1.8 s datumem odevzdání Q2/2025

3.15 Odhad přítoku z povodí nádrže

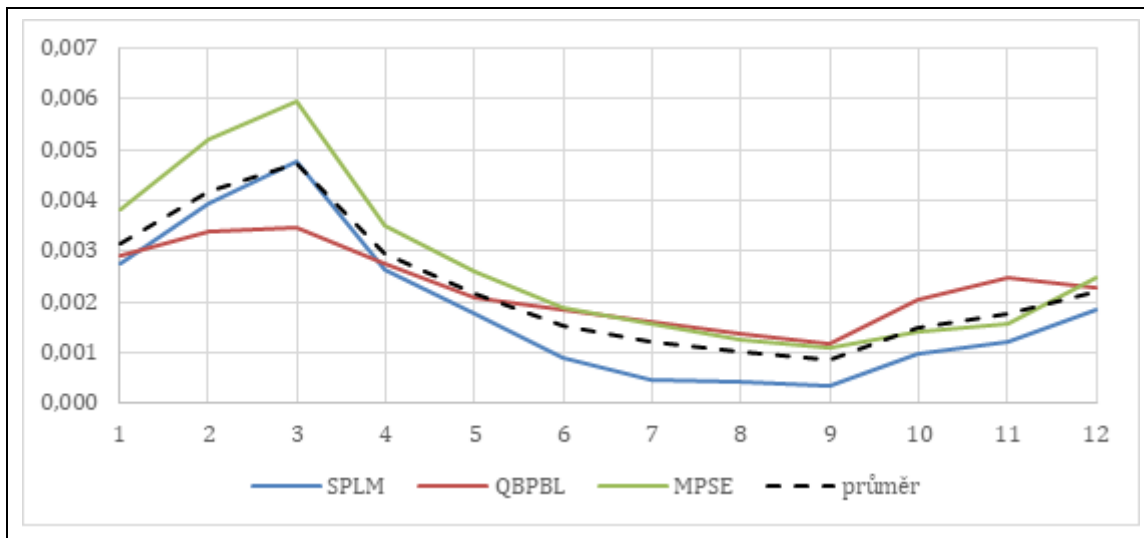
V průběhu simulací delších časových období byl pozorován pokles hladiny vody v nádrži oproti měřeným hodnotám. Tento pokles je způsoben zápornou objemovou bilancí přítoku, která je způsobená mimo jiné tím, že do nádrže vstupují jako okrajové podmínky pouze hlavní, monitorované přítoky.

Dalším příkladem propojení modelů tak může být využití modelu povodí pro výpočet chybějícího přítoku do nádrže z plochy povodí nádrže. Tento modelovaný průtok může být následně doplněn formou vhodných okrajových podmínek do objemové bilance v 3D modelu nádrže (Obr. 41).

Při kalibracích modelu byl nejprve doplňován průtok odhadovaný pouze na základě chybějících objemů. Jeho použití vede k plnému dorovnání hladin s měřenými. Dle výpočtů z modelu povodí se však ukázalo, že hodnoty možného přítoku z vlastní plochy nádrže jsou poněkud nižší a je třeba uvažovat další vlivy (Obr. 40).



Obr. 40: Porovnání měřené hladiny v nádrži simulované 3D modelem.



Obr. 41: Výsledky simulace přítoku z plochy povodí nádrže na modelu povodí.

3.16 Závěr a doporučení pro užití 3D hydrodynamického simulačního modelu nádrže Švihov

V rámci projektu byly ověřeny konceptualizace a propojení nástrojů na platformě DHI MIKE s využitím společných formátů souborů pro předávání okrajových podmínek. Jednotlivé popisy procesů proudění a procesy šíření látek byly kalibrovány na v současnosti dostupných datech monitoringu PVL, CZGL a VUMOP, ČHMU pro různá prostorová rozlišení ve vybraných dílčích povodí Želivky a současně ve vlastní nádrži Švihov.

V případě povodí Želivky a vodní nádrže Švihov byly použity tyto nástroje a popisy:

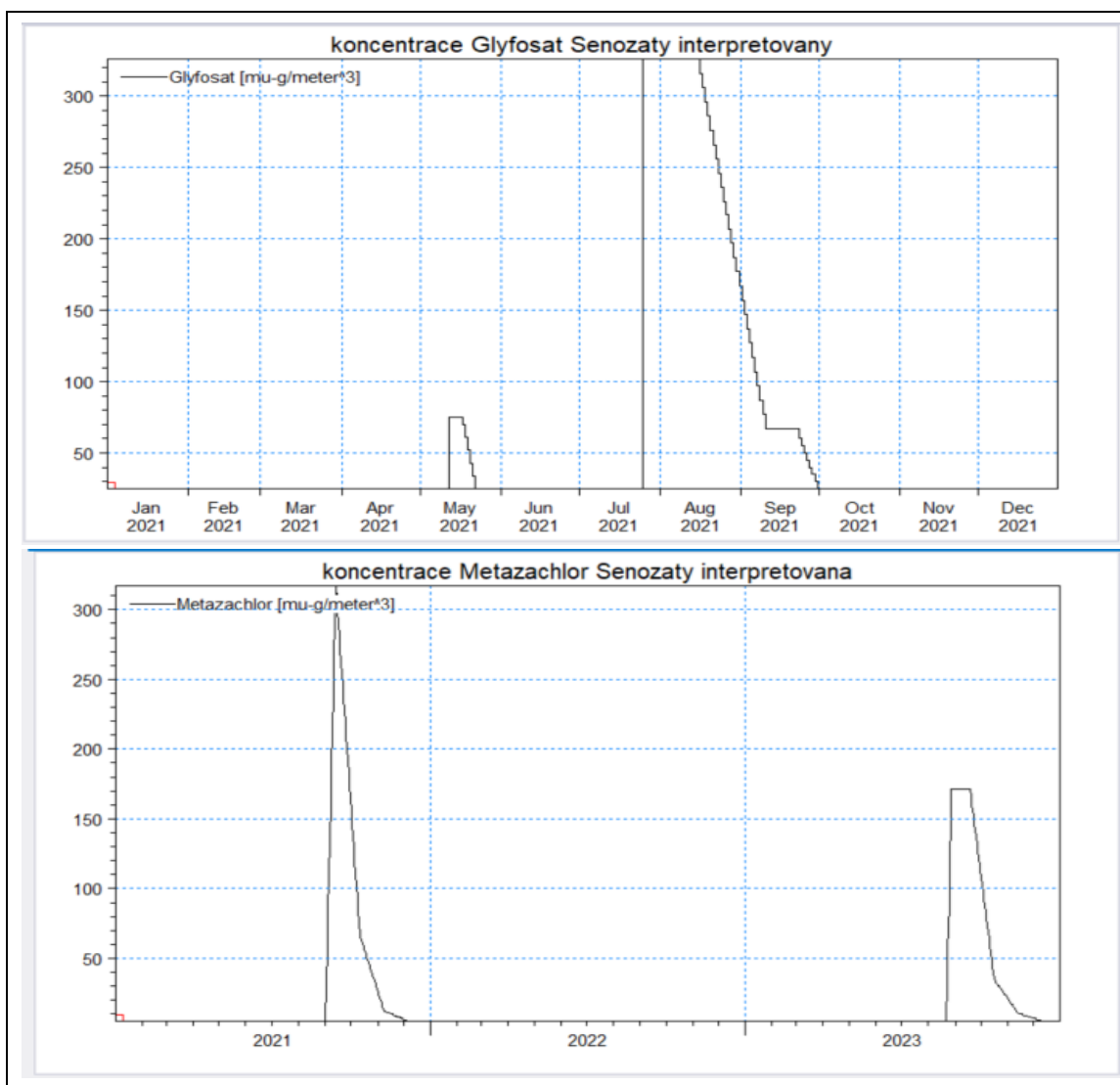
- ✓ pro popis proudění vody v ploše povodí, komplexně povrchová i podpovrchová doména, povrchové vodní toky a malé nádrže: MIKE SHE WM popis schematizací
- ✓ popis pohybu látek v ploše povodí: MIKE SHE AD (alternativně + ECOLAB): popis procesů a schematizací
- ✓ popis proudění vody v nádrži Švihov: 3D schematizace MIKE 3FM
- ✓ popis šíření látek v nádrži Švihov: 3D schematizace MIKE 3FM AD

Simulační prostředky, kalibrované pro popis dílčích výseků, je nutné propojit se vstupními daty a okrajovými podmínkami a také vzájemně tak, aby bylo dosaženo plynulého předávání výstupů ze simulačního nástroje pro plochu povodí do simulačního nástroje pro vlastní nádrž. Dále je nutné výstupy ze simulačních nástrojů zpracovat a interpretovat.

Pro příklad propojení modelů povodí a 3D modelu nádrže byly na základě analýzy

souborů historických časových řad monitoringu kvality vody vybrány zaznamenané výraznější epizody šíření znečištění dvou látek, které po vyplavení do vody nepodléhají rozpadu. Vzhledem k velké náročnosti na získání celého souboru meteorologických dat byly zároveň vybírány epizody pro ta období, kdy jsou tato data již k dispozici z jiných prováděných simulací v rámci projektu. (P.3.16 – Přílohy)

Jednou z vybraných epizod je záznam zvýšeného vnosu látky glykosát v období červenec–září 2021 a druhou vnos látky metazachlor, a to v období srpen–říjen 2021 (kalibrační srpen – prosinec 2023). Data byla prostřednictvím modelu povodí interpretována do plynulých časových řad, které jsou přímým vstupem – okrajovou podmínkou 3D modelu nádrže, viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**



Obr. 51: Interpretované plynulé časové řady vytvořené v modelu povodí jako vstupní okrajové podmínky do 3D modelu nádrže.

Závěrem uvádíme aktivity, které zvažujeme jako přípravu na řešení dalších etap projektu TA pro užití a rozvoj a využití sestaveného 3D modelu proudění vody a šíření znečišťujících látek ve VN Švihov:

- ✓ Podrobně analyzovat směry a rychlosti proudění větru nad nádrží, a to s využitím dalších výsledků měření a maximálně zpřesňovat jejich hodnoty (prostorově i časově) pro kalibrační epizody. S těmito výsledky podrobit vliv účinku větru na pohyb vody v nádrži v hladinových vrstvách detailnějšímu rozboru s cílem dosáhnout lepší shody simulovaných rychlostí s hodnotami získanými při polních měřeních.
- ✓ Dokončit přípravu pro kalibraci WQ modulu na vybrané epizody šíření látek znečištění v rámci TA 1.8
- ✓ Rozšíření funkčnosti – možnost přidávat knihovny počátečních podmínek
- ✓ Zvážit změnu funkčnosti – volba počtu a výšek vertikálních vrstev 3D modelu => zrychlení a zpřesnění výpočtu
- ✓ Rozšíření funkčnosti – zobrazení a animace výsledků ve svislých řezech nádrží

4 Závěry a popis dalšího postupu

Spoluprací expertů vznikla jedna z důležitých částí integrovaného simulačního nástroje pro dopad adaptačních opatření ve vodní bilanci, a to v povodí Želivky, která je se svojí vodárenskou nádrží primární strategický vodní zdroj v ČR.

Zkalibrovaný hydrodynamický model 3D nádrže Švihov (M3) spojený s hydrologickým plně distribuovaným modelem MIKE SHE (pohybu vody a případně látek) v podzemních vodách, v korytech představuje sofistikovaný simulační nástroj pro ověřování scénářů vodní bilance a složitých 3D procesů ve vodním hospodářství právě plnou integrací a procesní optimalizací. (P 3.17 – Přílohy)

Zkalibrovaný systém hydrodynamického 3D model doplňuje celý integrovaný systém pohybu vody v povodí Želivky od srážkovodních procesů, po hydrodynamiku ve vodních tocích, nádrži Švihov až po pohyb vody v podzemích rajonech a zajišťuje tak nezbytnou podmínku pro řešení pohybu látek v celém povodí v kontinuální podobě bez významných kompromisů.

V této etapě projektu byly ukončeny práce na kalibracích kvantitativních proměnných, parametrů a charakteristik, které vykazují dostačenou shodu s časovými řadami těchto proměnných, které zajistil buď správce povodí nebo ČHMU ve formě historických časových řad. Také validace těchto modelů ve vybraném období z celkové časové řady 2000-2021 (resp. 2023) se nachází celkově v toleranci chyb modelových nástrojů.

Sestavený systém simulačních nástrojů v povodí Želivky umožňuje řešitelům úloh TA postupovat dále dle časové osy jednotlivých etap a doplnit kvantitativní modely kvalitativní složkou pohybu vybraných látek v povodí nebo jeho částech.

Integrované simulační modely v hydrologickém povodí Želivky (tedy přesně od rozvodnice k profilu hráze Švihov) byly realizovány v rámci TransAdapt kapitoly 1.6 jako příprava na

analýzu vlivu klimatických změn na bilanci vody v povodí a také na bilance látkových toků za změněných klimatických, hydrologických a vodohospodářských podmínek. V současné době byla započata rozsáhlá analýza vlivu změn modelových parametrů na vypovídací schopnost modelu, jak ve srovnání s nově naměřenými daty, tak při zatížení klimatickými scénáři.

Díky regionalizaci modelových parametrů byly z výsledkových map odstraněny diskontinuity a tak v předkládané verzi integrovaných modelů se výrazně zlepšila možnost prezentace prostorově distribuovaných výsledků. Systém modelů je integrován a umožňuje propojení jednotlivých procesů přes hranice působnosti jednotlivých segmentů modelového systému.

Zároveň byl model doplněn o nejnovější měřená data z roku 2023-2024 a o poznatky poznatky, které vedly k realističtější schematizaci všech procesů v povodí Želivky. Předkládaná verze „systému modelů „digitální dvojče AdaptŽelivka“ povodí Želivky je připravena pro užití pro úlohy 1.7 a 1.8 a zároveň 1.9. Úkol byl splněn podle harmonogramu, některé komponenty byly již rozpracovány z dalších etap , protože s pracemi v této etapě souvisely.

Je potřeba poděkovat všem spolupracovníkům za jejich nadstandardní přístup k řešení této náročné úlohy. Pro zdárnou realizaci 3D modelu proudění ve VN Švihov je potřeba vyzdvihnout spolupráci mnoha expertů, kteří svojí expertizou a uplatňovanými postupy stimulovali celý tým k tomuto výsledku dosaženému se složitými procesními vazbami. Tým autorů této etapy TA 1.6 předpokládá, že tento systém propojených model pomůže řešit látkový pohyb a jeho změny za klimatické změny, což bude řešeno v etapě TA1.7, TA 1.8 se závěrem v etapě TA 1.9.

Závěrem je nezbytné vyzdvihnout spolupráci se správcem povodí a dalšími spolupracujícími organizacemi, která zajišťuje sady velmi dobře verifikovaných dat, bez kterých by nebylo možné tak složitý systém sestavit a zkalibrovat a následně verifikovat.

5 Seznam použitých zkratk

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav
DPZ - dálkový průzkum země
DisALEXI - disaggregated Atmosphere-Land Exchange
DIBAVOD - Digitální BÁze VOdohospodářských Dat
DMR5G - Digitální model reliéfu České republiky 5. generace v S-JTSK, Bpv
ET_o - roční potenciální evapotranspirace
ET_{ref} - referenční evapotranspirace
HPV - hladina podzemní vody
K_c - vegetační koeficient
KPP - komplexní průzkum půd
LAI - leaf area index - index listové plochy
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
RD - root depth - kořenová hloubka
TA – TransAdapt
TAČR - Technologická agentura ČR
VH - vodní hospodářství
VÚMOP - Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
VÚV TGM - Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka
Zabaged - Základní báze geografických dat České republiky

6 Použitá literatura

Zeman, E. Jiřinec, P, Ingeduldova, E. a kol (2024); „Předpovědní model nádrže Švihov pro operativní řízení vodárenské nádrže v důsledku významného znečištění vod“; pp 9-17, Městské vody 2024, Velké Bílovice, Ardec 602 00 Brno, Česká republika, 2024, ISBN: 978-80-86020-00-6

Fischer, M., Zeman, E., Vizina, A., Hanel, M., Bernsteinová, J. et al (2023 a) Metodika pro stanovení hlavních poruch vodohospodářské bilance a optimalizace adaptačních opatření v podmínkách změny klimatu, Certifikovaná metodika, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. 2023, ISBN 978-80-87902-37-0

Fischer, M., Zeman, E., Bernsteinová, J, Vizina, A., Hanel, M., et al (2023 b) Metodika pro rychlé, komplexní, nezávislé rozhodování o potřebnosti, efektivitě a interakci adaptačních opatření v povodích v podmínkách změny klimatu, Certifikovaná metodika, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. 2023, ISBN 978-80-87902-38-7

Mendiguren, G., Koch, J., and Stisen, S.: Spatial pattern evaluation of a calibrated national hydrological model – a remote-sensing-based diagnostic approach, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 5987–6005, <https://doi.org/10.5194/hess-21-5987-2017>, 2017.

MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation. DHI Software Documentation, 2021

MIKE 3 Flow Model FM, ECO Lab / Oil Spill Module, User Guide. DHI Software Documentation, 2021

Zabezpečení jakosti vody v nádrži FLÁJE – studie proudění v nádrži Fláje se zaměřením na možnosti odklonění proudění z přítoku s vysokým obsahem huminových látek od odběrného objektu. DHI a.s., Praha, prosinec 2008