

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

Otmar PETYNIAK

**STAV A BUDOUCÍ VÝVOJ ODTRŽENÉHO
MEANDRU V CHKO LITOVELSKÉ POMORAVÍ**

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.

Olomouc 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci magisterského studia oboru Geoinformatika vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Jakuba Miřijovského, Ph.D.

Všechny použité materiály a zdroje jsou citovány s ohledem na vědeckou etiku, autorská práva a zákony na ochranu duševního vlastnictví.

Všechna poskytnutá i vytvořená digitální data nebudu bez souhlasu školy poskytovat.

V Olomouci 18. srpna 2014

Poděkování

Zde bych rád poděkoval všem, kteří byli při tvorbě této práce nápomocni. Na prvním místě patří dík vedoucímu práce RNDr. Jakubu Miřijovskému, Ph.D. za ochotu a trpělivost při konzultacích, zapůjčení vybavení a pořízení leteckých snímků. Dále děkuji Ing. Josefu Faltysovi z Magistrátu města Olomouce za poskytnutí hydrologických dat, Ing. Olze Žerníčkové ze Správy CHKO Litovelské Pomoraví za poskytnutí podkladů. Za možnost umístit na svém pozemku meteorologické senzory děkuji panu Pavlu Konopkovi.

Poděkování patří také Martinu Knotovi za sítování sedimentů. Za pomoc při terénních pracích děkuji především Heleně Uhrové a Markétě Trdličkové. Dále však také Lence Paclíkové, Robertu Minaříkovi, Tomáši Purketovi, Marii Hrudíčkové, Suche Ganbaatarovi, Valdislavu Holcovi, Martinu Šimíčkoví, Tomáši Urbanovi, Jonáši Veselkovi a Adamu Baronovi.

Na místě je také poděkování mojí rodině, která mě podporovala v průběhu celého studia.

OBSAH

ÚVOD	6
1 CÍLE PRÁCE.....	7
2 POUŽITÉ METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ	8
2.1 Použitá data	8
2.2 Použité programy	8
2.3 Postup terénních prací	8
3 TEORETICKÁ VÝCHODISKA PRÁCE.....	10
3.1 Meandrování řek	10
3.2 Sedimentace	20
3.3 Odškracení meandru a jeho následný vývoj	24
4 CHARAKTERISTIKA A HISTORICKÝ VÝVOJ ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ.....	28
4.1 Vymezení a charakteristika zájmového území.....	28
4.2 Vývoj břehové linie.....	31
4.3 Přehled průtoků od roku 2001	42
5 MONITORING PŘÍČNÝCH PROFILŮ KORYTA MEZI LETY 2011-2014....	47
6 BUDOUCÍ VÝVOJ LOKALITY	68
6.1 Postup modelování v HEC-RAS	68
6.2 Výsledky	72
6.3 Budoucí vývoj lokality	75
7 DISKUZE	79
8 ZÁVĚR	81
POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	
SUMMARY	
PŘÍLOHY	

ÚVOD

Odškrcení meandru je na vodních tocích s přirozeným korytem zcela běžný a častý jev. Je překvapující, že až do 60. let 20. století, a u nás ještě o třicet let později, byl zájem o tuto problematiku prakticky nulový. Do té doby se člověk pokoušel vodní toky ovládnout, podřídit svým záměrům a plánům, aniž by znal a chápal jejich vlastnosti a procesy, které v korytech působí. V době, kdy se u nás začali lidé zajímat o to, co se v přirozených korytech řek děje, nenacházely se na našem území téměř žádné.

Na začátku středního toku Moravy najdeme CHKO Litovelské Pomoraví. Největší areál v České republice, kde byl dán prostor přirozeným procesům v člověkem málo ovlivněné řece. Nachází se zde u nás unikátní anastomózně meandrující říční vzor, kdy se meandrující Morava a okolní toky větví do sítě mnoha navzájem se proplétajících ramen s reziduálními jezery dřívějších meandrů, sítí občasně protékaných koryt (smuh) a na ně navazujících ekosystémů lužních lesů.

Kenický meandr je velikostí jedním z největších na území CHKO: Jeho vývoj započal zhruba před 140 lety a proces odškrcení vyvrcholil protržením jeho šíje v roce 2012. Význam události potvrzují velmi časté návštěvy (nejen) školních exkurzí, které si chodí prohlédnout protrženou šíji meandru. Tato práce navazuje na mou bakalářskou práci, kde je odškrcení zaznamenáno, a mapuje počáteční fázi vývoje po protržení, kdy byly přesměrovány síly vodního toku a nastartovala se tak nová etapa jeho vývoje.

Při zadávání práce se předpokládalo, že během dvouletého období sběru dat a monitoringu meandru, se vyskytne alespoň jedna povodeň, která bude výrazně působit na morfologii koryta a naznačí tak tempo dalšího vývoje. Bohužel došlo k přesně opačnému stavu, kdy roční maxima posledních dvou let byly nejnižší za minimálně 15 let.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je dlouhodobě monitorovat stav odtrženého Kenického meandru v CHKO Litovelské Pomoraví ve vazbě s jeho nejbližším okolím. Analýza se zaměřuje především na vývoj fluviálních tvarů v závislosti na průtocích řeky. Systematický monitoring zahrnuje opakované geodetické zaměření profilů koryta a břehů, sběr hydrologických dat leveloggerem a barologgerem, opakované letecké snímkování a také odběr a interpretaci vzorků sedimentů. Doplněním dat z bakalářské práce, historických leteckých snímků a map bude objasněn historický vývoj Kenického meandru a jeho současný stav. Data jsou použita jako vstup do hydrologické simulace, která bude jedním z podkladů pro určení budoucího vývoje zájmové oblasti v závislosti na vodních stavech řeky Moravy.

2 POUŽITÉ METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

2.1 Použitá data

V rámci práce bylo použito velké množství primárních dat. Elektronickou tachymetrií byla určena poloha břehové linie a bodů příčných profilů, nivelací byly zaměřovány křivky příčných profilů. Ze sensorů byla sbírána data o výšce vodní hladiny, teplotě vody, atmosférickém tlaku, teplotě vzduchu a dešťových srážkách (data ze srážkoměru nakonec nebyla zpracována, kvůli velmi krátké časové řadě z důvodu softwarové nekompatibility a jejího nevyřešení). Bylo odebráno 14 vzorků dnových sedimentů a terénu byl také zakreslen povrch dna zájmové oblasti. Byly využity historické mapové zdroje a letecké snímky (tab. 4.2). Kromě snímku z roku 1938, který byl poskytnut správou CHKO Litovelské Pomoraví, pocházejí z vlastnictví KGI, která je zakoupila od VGHMÚř Dobruška a jsou uloženy u vedoucího práce. Vedoucím práce byly zhotoveny a poskytnuty také 4 ortofoto snímky Kenického meandru pořízené metodou UAV snímkování. Snímky byly využity k potvrzení geodetických měření, zjištění změn polohy břehu a říčního dřeva. Z Odboru ochrany Magistrátu města Olomouce byly poskytnuty časové řady průtoků a vodního stavu pro jez Hynkov od začátku měření v roce 2001 do současnosti. Pro doplnění historických povodní byly využity také data evidenčního listu hlásného profilu Olomouc Nové sady. Zpracováním těchto zdrojů vzniklo velké množství odvozených dat. Všechna vektorová prostorová data byla ukládána do geodatabáze výhradně v souřadnicovém systému S-JTSK EastNorth (EPSG: 5514).

2.2 Použité programy

Veškerá prostorová data byla zpracovávána v prostředí ArcGIS for Desktop 10.1. Na postprocessing geodetických dat a opravování chyb v nich byl použit software Groma 10. Ke stažení a zpracování sensorových dat levelloggeru a barologgeru byl použit software Levellogger 4.1, pro data srážkoměru (v době, kdy to ještě fungovalo) byl použit BoxCar Pro 4.3. Příčné profily a jejich geometrické charakteristiky byly vykreslovány a zjišťovány v programu CoreDRAW X7. Ke grafické úpravě map, obrázků a příloh sloužil Adobe Photoshop CS5. Tabelární data a matematické výpočty byly zpracovávány v editoru Microsoft Excel 2010na. Pro modelování průtoku sedimentů byl použit model HEC-RAS 4.1 a extenze HEC-GeoRAS 10.1 do prostředí ArcGIS.

2.3 Postup terénních prací

V první fázi zpracování na jaře 2013 byly stabilizovány dva body a zaměřeny statickou metodou dvoufrekvenčním GNSS přijímačem Topcon HiPer II v majetku KGI (zpracování těchto dvou bodů proběhlo v rámci bakalářské práce R. Minaříka, 2013). Z těchto známých bodů se odvíjela další elektronickou tachymetrií. K tomu byla zapůjčena totální stanice Topcon GTS-105N z majetku KGI. Nejprve byly obnoveny znovu zaměřeny krajní body příčných profilů a stabilizovány body 4 nových profilů, dále byla zaměřená břehová linie pod protrženou šíjí.

Na jaře byl také umístěn poblíž profilu 2 levelogger měřící výšku hladiny a v Hynkově barologger měřící tlak nutný ke kompenzaci měření a určení nadmořské výšky hladiny (oba přístroje značky Solinst). Od této doby bylo potřeba vždy po několika měsících senzory zkontrolovat a stáhnout naměřená data (z důvodu studijního pobytu v Norsku prováděl stažení dat od srpna do prosince 2013 vedoucí práce). V této době byla také získána data z jezu Hynkov, která musela být zdlouhavě upravována, než byla vhodná pro další zpracování (nevyhovující formát html tabulky, velké množství chybějících hodnot průtoků atd.), postup byl opakován ještě dvakrát při dalších dodávkách dat za aktuální období.



Obr. 2.1 Nivelování profilu 7 v roce 2013 z lodi

Na přelomu jara a léta 2013 byla pořízena třetí sada příčných profilů. K nivelaci byl zapůjčen přístroj značky South, typ NL-20 s kompenzátořem, ve vlastnictví KGI. V tomto období došlo také ke kalibraci a instalaci elektronického srážkoměru Amet se záchytnou plochou 200 cm² a záznamníkem dat Hobo.

V únoru 2014 proběhlo další zaměření břehové linie a kontrola a doplnění krajních bodů příčných profilů. V dubnu bylo odebráno 14 vzorků sedimentů z oblasti příčných profilů. Ty byly roztříděny do zrnitostních frakcí metodou síťování. Suchý vzorek se při ní vysype na soustavu sít s klesajícím průměrem oka. Částice, které zůstanou na jednotlivých sítích jsou zváženy a vypočítá se procentuální podíl všech frakcí. Síťování na přístroji Retsch AS 200 provedl v rámci své diplomové práce Martin Knot z Geografického ústavu MU v Brně. V červnu a červenci byla nivelována zatím poslední čtvrtá sada příčných profilů a spolu s ním bylo provedeno poslední vybrání dat a údržba leveloggeru a barologgeru .



Obr. 2.2 Vzorek sedimentů profilu 1

3 TEORETICKÁ VÝCHODISKA PRÁCE

Výsledky výzkumů meandrování řek a vývoje meandrů jsou nejčastěji publikovány v odborných časopisech *Geomorphology*, *Journal of Geophysical Research*, *Geological Society of America Bulletin*, *Sedimentology*, *Earth Surface Process and Landforms*. První práce na téma meandrujících vodních toků začaly vznikat na přelomu 50. a 60. let 20. století (např. LEOPOLD, WOLMAN, 1957) a následný rozvoj technologií umožnil rozšíření zájmu o toto téma do celého světa, přesto těžiště výzkumu zůstalo v USA a Velké Británii. Mezi nejčastěji publikujícími a citovanými autory současnosti dle Web of Science patří američané José Constantine (Cardiff University), Thomas Dunne (University of California), britská geografka Janet Hooke (University of Liverpool) a francouzi Hervé Piégay (University of Lyon) a Jerome Le Coz. Systematický a dlouhodobý výzkum je prováděn především na řekách Mississippi a Sacramento River v USA, Dane a Bollin ve Velké Británii a na řece Doubs ve Francii. Jednorázové projekty se zabývaly např. Wabash River (USA), Ain, Rhône, Allin (Francie), Cecina (Itálie).

V České republice nejsou přírodní meandrující řeky častým tématem výzkumu. Práce zabývající se říčním dřevem a biogeomorfologií publikují Zdeněk Máčka a Lukáš Krejčí, fluviální geomorfologií se dlouhodobě věnuje Monika Šulc Michalková. Několik článků o geochemických analýzách se zaměřením na těžké kovy a toxické sloučeniny v sedimentech odškracených meandrů Moravy ve Strážnickém Pomoraví publikoval také geolog Ondřej Bábek.

Ve výzkumu vývoje meandrů nachází uplatnění zejména terénní měření (geodetická), letecká fotogrammetrie, laserové skenování, geologické, pedologické a chemické analýzy sedimentů, sonarová měření rychlosti proudění (metoda ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler), zkoumání historických mapových zdrojů, digitální modely reliéfu, statistické analýzy morfometrických parametrů a geometrie meandrů, matematické modelování průtoků, sedimentů a splavenin a další. Některé studie se také zabývají laboratorními simulacemi meandrování.

3.1 Meandrování řek

3.1.1 Definice a geometrické charakteristiky

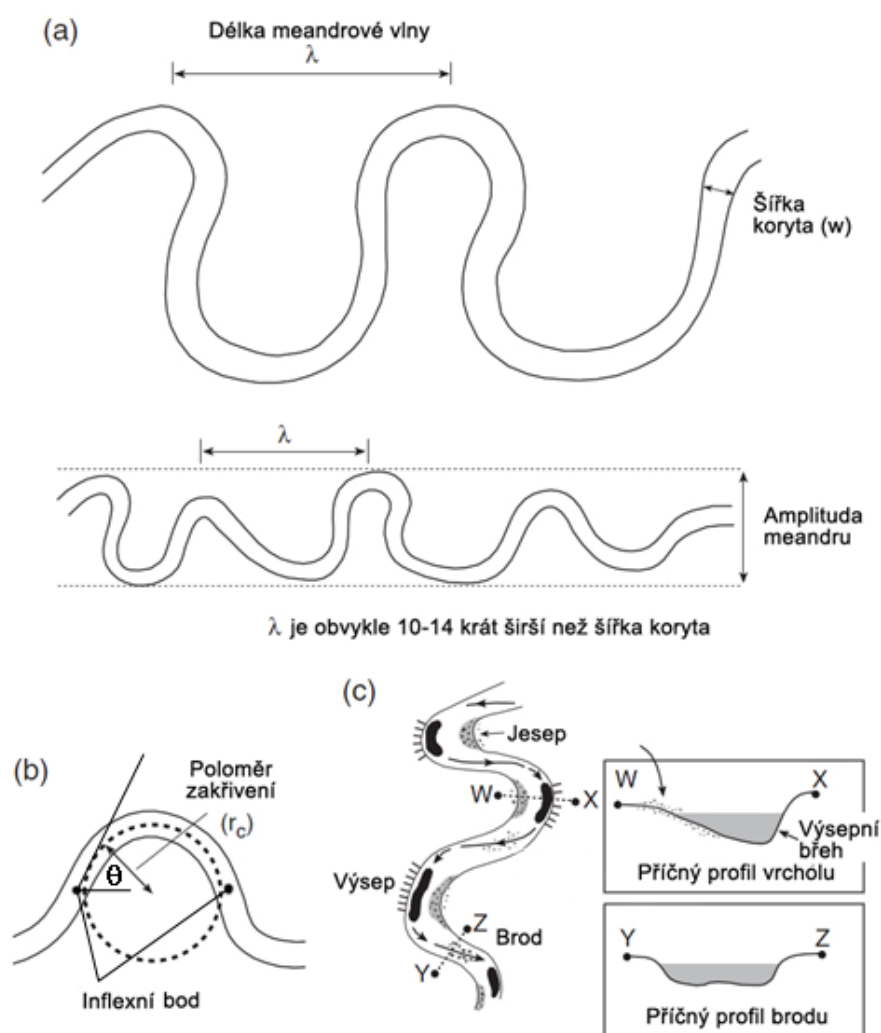
Meandrování patří k základním procesům, které ovlivňují vývoj vodních toků. Patří mezi říční vzory, které byly poprvé klasifikovány v článku *River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight* (LEOPOLD, WOLMAN, 1957). Hlavní parametr určující meandrující řeku je sinusoita (STØLUM, 1996):

$$s = L/l \quad (1)$$

kde s ... sinusoida
 L ... je délka vodního toku mezi dvěma body osou koryta
 l ... nejkratší spojnice těchto dvou bodů.

Hlavním znakem meandrující řeky je $s > 1,5$ (LEOPOLD, WOLMAN, 1957).

DEMEK (1987) definuje meandry jako zákruty koryta větší délky, než je polovina obvodu opsané kružnice nad její tětivou. Středový úhel oblouku (poloměr zakřivení mezi dvěma inflexními body) je větší než 180° . Meandrování je samoorganizující se proces, který kolísá okolo kritického stavu – kolísání představuje nárůst meandrů a protržení jejich šíje (odškrcení). Meandrující vodní tok má také charakteristiku fraktální geometrie (STØLUM, 1996).

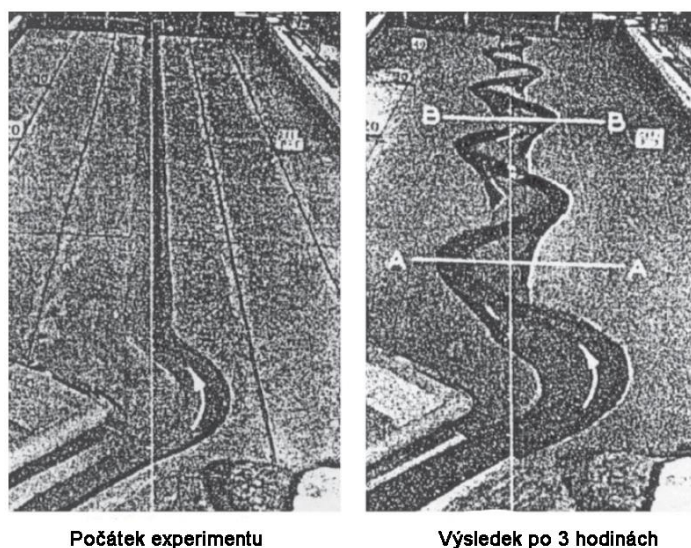


Obr. 3.1 Geometrická charakteristika meandru (upraveno podle CHARLTON, 2008).

- (a) Charakteristiky meandrového pásu. (b) Charakteristiky půdorysného profilu meandru.
(c) Typický příčný profil v oblasti výsepního břehu (mezi body W, X) a v oblasti brodu (mezi body Y, Z).

Kromě sinusoidy je důležitým parametrem **poloměr zakřivení** (r_c) určený poloměrem kružnice vepsané zhruba kopírující osu koryta mezi inflexními body (v **inflexním bodu**

přechází jeden zákrut ve druhý). θ je hodnota vstupního úhlu do meandru – úhel svírající spojnice inflexních bodů daného meandru a tečna osy koryta v inflexním bodě na počátku meandru. **Délka meandrové vlny** (λ) je vzdálenost mezi inflexními body dvou po sobě jdoucích zakřivení meandru, **amplituda meandru** určuje šířku meandrového pásu. **Jesep** (konvexní, nánosový břeh) tvoří vnitřní břeh meandru, kde dochází k depozici transportovaných sedimentů, vznikají tak jesešní lavice. **Výsep** (konkávní, nárazový břeh) označuje vnější břeh meandru, kde dochází k odnosu materiálu břehu a laterální erozi, vznikají tak břehové nátrže. **Brod** je místo spojující břehy kolmé na osu vodního toku v inflexním bodě. Koryto toku má zde největší šířku a nejmenší průměrnou hloubku a jeho příčný profil je relativně symetrický.



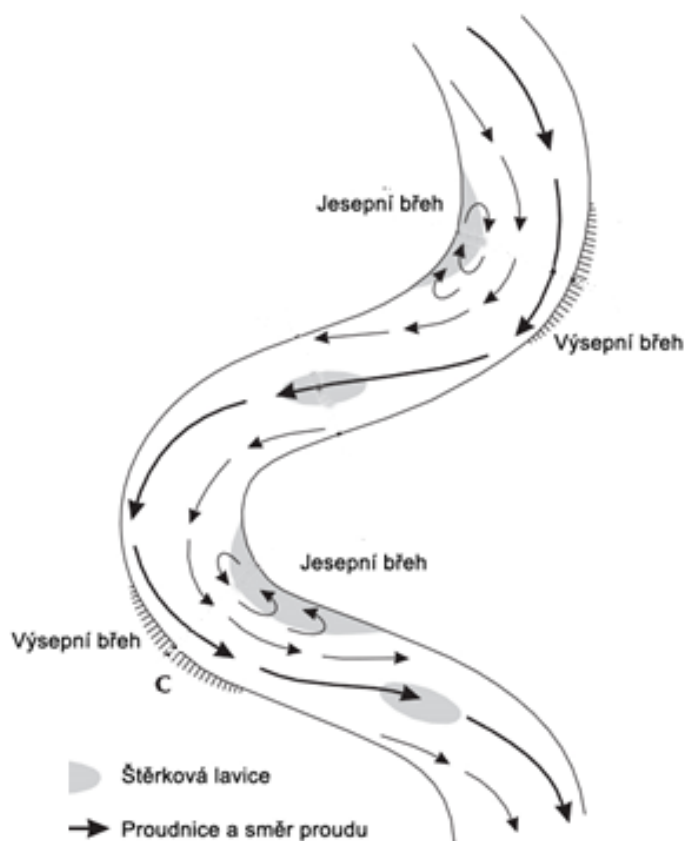
Obr. 3.2 Laboratorní experiment J. Friedkina, 1945 (podle DUAN, JULIEN, 2005).

3.1.2 Vznik meandrování

Vznik meandrování nebyl doposud spolehlivě vysvětlen, existuje více teorií, nebyla však nalezena všeobecná shoda (HUGGET, 2007). Jsou však známy podmínky, za kterých začne řeka meandrovat. Těmi jsou nízký sklon toku, dostatečný průtok a šířková a hloubková variabilita koryta při stabilním rozdělení energie, kdy je v rovnováze eroze, transport a akumulace materiálu. Délka meandrové vlny koreluje s množstvím ukládaných sedimentů a sklonem koryta (HUGGET, 2007). První laboratorní pokusy s meandrováním prováděl J. Friedkin v roce 1945 (obr. 3.2): bylo vybudováno několik metrů rovného modelového koryta z materiálu průměrné zrnitosti 0,45 mm, které začínalo zákrutem. Průtok korytem byl konstantní 1,416 l/s. Po třech hodinách se rovné koryto přeměnilo na meandrující, vyvinulo se spirálovité proudění a konvexní a konkávní břehy. Byly zkoumány vztahy meandrů k průtoku, uloženým sedimentům, břehové kompozici a sklonu koryta (DUAN 2005). Laboratorní simulace s různými parametry a podmínkami jsou prováděny stále

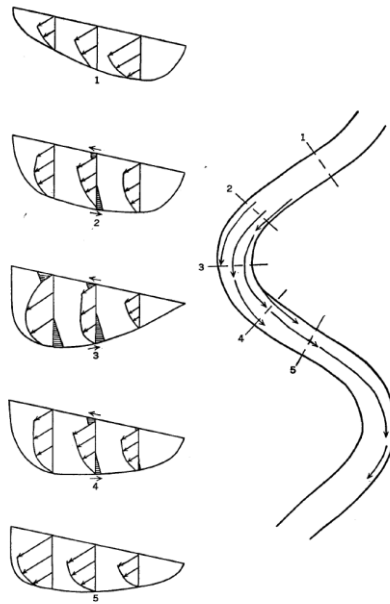
(např. BRAUDRICK, 2009; BLANCKAERT, 2011; VAN DIJK, 2012), není neobvyklé i opakování starších laboratorních experimentů numerickými modely (DUAN, 2005).

3.1.3 Charakteristika proudění



Obr. 3.3 Primární proudění v meandrujícím korytě (upraveno podle HUGGET, 2007)

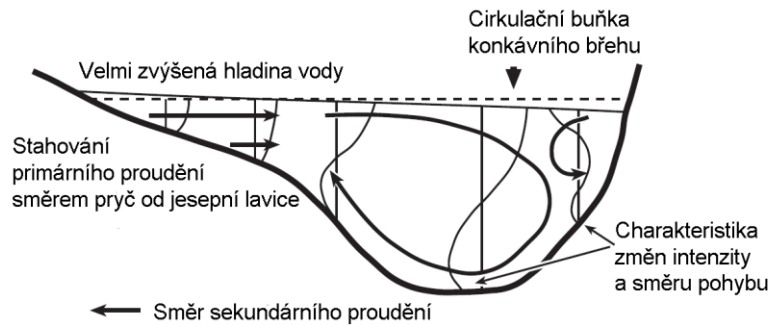
Proudění v meandrech je svým charakterem velmi turbulentní ve všech směrech. Proudnice primárního proudění (obr. 3.3) směřuje do zákrutu meandru přibližně ze středu koryta. V ohybu meandru se těsně přimyká ke konkávnímu břehu a s klesajícím zakřivením míří na druhou stranu přes střed koryta. V oblasti brodu se v některých případech stává proudnice málo zřetelnou díky vyrovnané dynamice primárního proudění ve všech částech příčného profilu koryta. Rychlosti primárního proudění na hladině na začátku meandru významně klesá, posléze roste, v oblasti brodu je nejvyšší (obr. 3.4). Přibližně v polovině maximální hloubky koryta a u dna je rychlost proudění menší než na hladině, při vstupu do meandru se zvyšuje a hladinovou rychlost překonává (zčásti díky přítomnosti sekundárního proudění).



Obr. 3.4 Obecné rychlosti primárního proudění v meandru podle polohy příčného profilu (podle LEOPOLD, WOLMAN, 1960)

Sekundární proudění je kolmé na primární a působí ve vertikálním a laterálním směru na vývoj koryta. Má větší vliv na koryto než turbulentní víry primárního proudění, i když je slabší. Sekundární proudění je způsobeno nepravidelnostmi břehů a dna. Jak voda postupuje meandrem, hromadí se u konvexního břehu, kde je nižší hloubka a hladina je zde výše než u konkávního břehu. Na vodu zde působí odstředivá a gravitační síla, která způsobuje její pohyb směrem ke konkávnímu břehu (obr. 3.5 vlevo). Naopak u konkávního břehu, působí na vodu se rostoucí hloubkou vyšší tlakový gradient, který ji tlačí směrem ke konvexnímu břehu. Vzniká tak cirkulační buňka konkávního břehu (obr. 3.5 vpravo). Primární a sekundární proudění dohromady při protékání korytem dávají cirkulačním buňkám šroubovitý tvar (CHARLTON, 2008). V případě nízkých vodních stavů nebo příliš strmého konvexního břehu nemusí být sekundární proudění v meandru vyvinuto (KASVI, VAAJA et al., 2013). Porovnáním laboratorních a reálných situací vlivu sekundárního proudění na erozi břehů se zabýval BLANCKAERT, 2011.

Přes to, že je sekundární proudění ve srovnání s primárním relativně slabé, je velmi významné pro pohyb plavenin a splavenin ve vodním toku (CHARLTON, 2008). Voda je sekundárním prouděním vytlačována směrem k jesešní lavici vzhůru, kde ztrácí energii a postupně deponuje sedimenty podle zrnitosti od nejhrubších po nejjemnější (obr. 3.5). O sedimenty ochuzená voda se vrací cirkulační buňkou směrem ke konkávě. Neprotékaný povrch jesešní lavice je obvykle zakryt jemnými sedimenty narůstajícími za povodňových průtoků.



Obr. 3.5 Sekundární proudění v meandrujícím korytě (podle CHARLTON, 2008)

Pohyb vody v otevřeném korytě se dá rozdělit podle časového nebo prostorového měřítka. V časovém měřítku je ustálené proudění je konstantní v čase, neustálené je proměnlivé. V prostorovém měřítku se dá proudění definovat jako rovnoměrné nebo nerovnoměrné [1]. U základních hydrometrických rovnic je často uvažováno rovnoměrné nebo ustálené proudění. Pro hydrotechnický výpočet rychlosti ustáleného proudění se využívá Chézyho rovnice [1]:

$$v = c \cdot \sqrt{R \cdot I} \quad (2)$$

kde

- v ... rychlost proudění
- c ... Chézyho rychlostní součinitel (empirická konstanta)
- R ... hydraulický rádius
- I ... okamžitý sklon toku.

K výpočtu ustáleného a rovnoměrného proudění se využívá Manningova rovnice [1]:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (3)$$

kde

- v ... rychlost proudění
- n ... Manningův součinitel drsnosti (tabulková hodnota)
- R ... hydraulický rádius
- I ... okamžitý sklon toku.

Proudění vody svou silou způsobuje vznik tangenciálního napětí mezi nejspodnější vrstvou vody a nejsvrchnější vrstvou dna. Schopnost proudu erodovat materiál vyjadřuje bezrozměrné Shieldsovo číslo – θ_{cr} (CHARLTON, 2008):

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot D} \quad (4)$$

kde τ_{cr} ... tangenciální napětí dna
 g ... gravitační konstanta
 ρ_s ... hustota sedimentů
 ρ ... hustota vody
 D ... charakteristická velikost zrna.

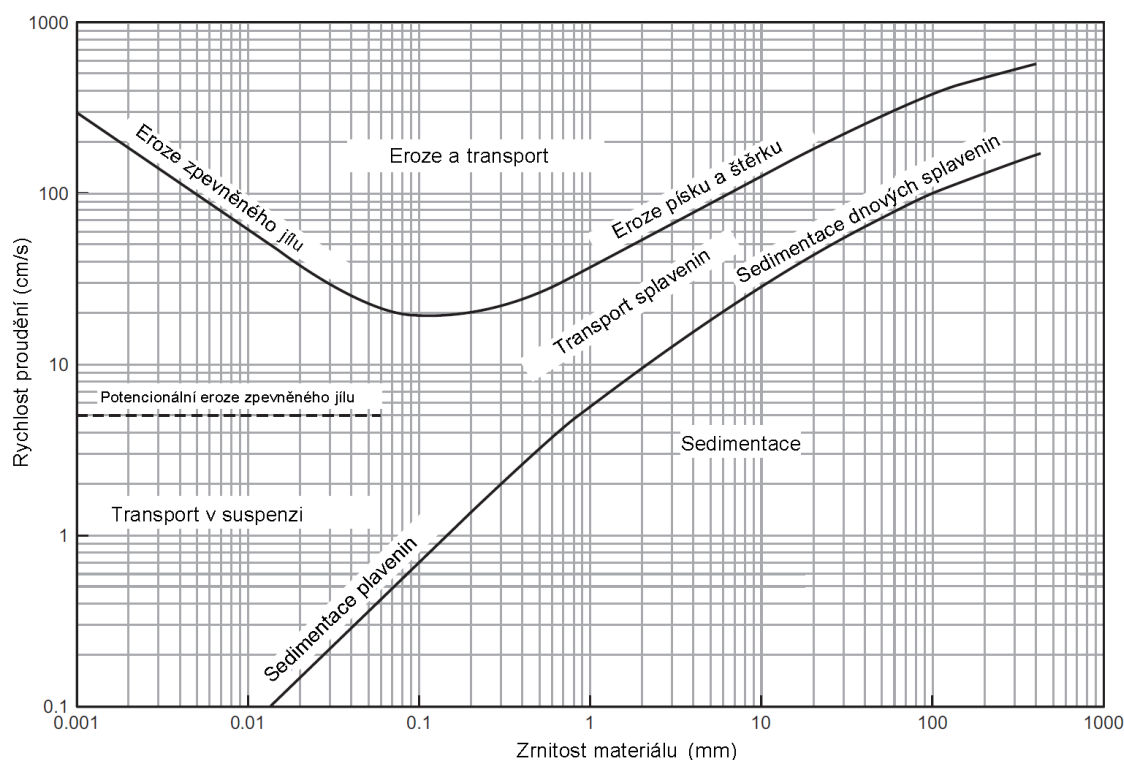
Tangenciální napětí dna se vypočítá:

$$\tau_{cr} = \rho_s \cdot g \cdot R \cdot I \quad (5)$$

kde R ... hydraulický radius
 I ... okamžitý sklon toku.

Přesáhne-li Shieldsovo číslo kritickou hodnotu, dochází k odnosu částic.

Jiný způsob vyjádření podmínek, za kterých je materiál unášen představuje Hjulströmův diagram (obr. 3.6). Ten ukazuje vztah mezi rychlostí proudění a zrnitostí materiálu a jejich působení na pohyb sedimentů v proudu. Zrnitost ukládaných částic tedy může být indikátorem rychlosti proudění v čase sedimentace. Křivka eroze se okolo hodnoty 0,1 mm na ose X stáčí nepředpokládaným opačným směrem – proud potřebný k erozi materiálu o zrnitosti 0,01 mm by měl být pomalejší, než proud potřebný k erozi materiálu se zrnitostí 0,1 mm. Je to způsobeno vlastnostmi jílovitých částic, které, jsou-li stlačeny, mají mnohem větší kohezitu, než částice hrubší (NICHOLS, 2009). Důležitost této vlastnosti je zjevná – kdyby neexistovala, byl by jíl erodovaný téměř jakýmkoli pohybem vody, čímž by byl účinek vodní eroze několikanásobný.



Obr. 3.6 Hjulströmův diagram (upraveno podle NICHOLS, 2009)

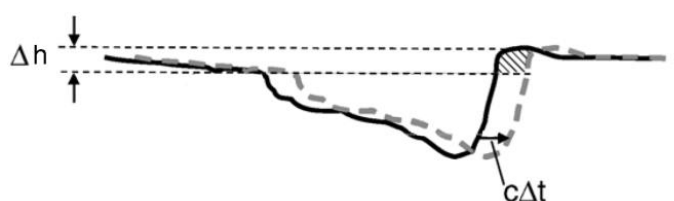
3.1.4 Břehová eroze

Působením erozně-akumulačních procesů dochází k přeměně meandrů v čase a prostoru. Na obrázku 3.6 je 6 možných typů vývoje meandrů podle PETTS, FOSTER, 1985, běžně dochází také ke kombinování více typů. Atributy, které ovlivňují dynamiku a druh vývoje jsou: průtokový režim (s důrazem na povodňové stavy), druh proudění, režim splavenin, vegetační charakter břehů, šířka, sklon a zakřivení koryta, charakter příčných profilů a také přítomnost říčního dřeva. Změně podléhají všechny základní morfologické parametry meandrů: šířka a hloubka koryta, podélný sklon, příčný profil.



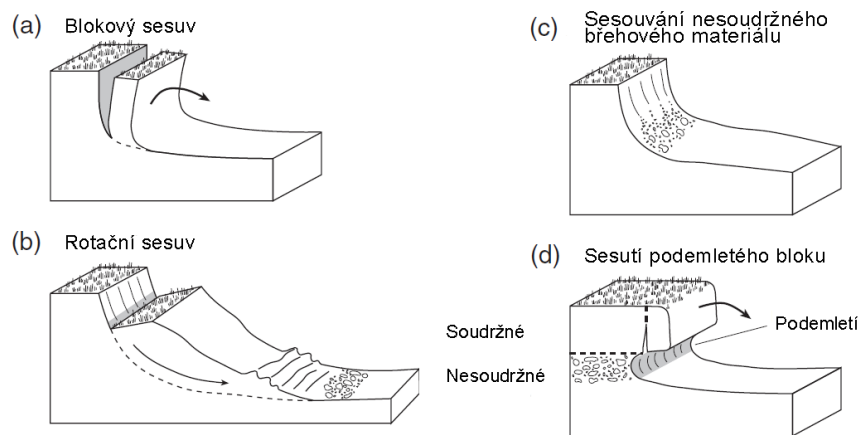
Obr. 3.7 Změny meandrů v čase (podle PETTS, FOSTER, 1985)

Migrace meandrů podle obrázku 3.7 je možná, pouze pokud je vyrovnaná eroze konkávního a sedimentace konvexního břehu. Dochází tak k odnosu povrchu vyššího břehu a rozšiřování nižšího břehu (obr. 3.8), což ovlivňuje rozlivy povodňových průtoků (méně časté zaplavování části nivy na konkávním břehu). Rozšiřování meandrů je častá v případě odškrcení některého z meandrů výše proti proudu, když zvýšená energie toku působí na zvýšení sinuosity. V případě, že se vodní tok nenachází v energetické stabilitě, je koryto přizpůsobováno – zvyšující se energie průtoku zrychluje erozi konkávního břehu a dochází k rozšiřování koryta a naopak. Empiricky bylo změřeno, že 80-90% odneseného materiálu je ukládáno nedaleko od místa eroze (LAUER, PARKER, 2008).



Obr. 3.8 Proces migrace koryta za rovnováhy eroze a sedimentace – Δh je změna výšky konvexního a konkávního břehu, $c\Delta t$ znázorňuje rychlost migrace za jednotku času (upraveno podle LAUER, PARKER, 2008)

Eroze konkávních břehů probíhá různými způsoby. Hlavní typy sesouvání jsou ilustrovány na obrázku 3.9: **(a) blokový sesuv** břehu vzniká nejčastěji, sesouvaný břeh je nízký, příkrý, tvořený soudržným materiálem. Odlučná plocha je běžně planární. Příčinou jsou vertikální pukliny v břehu. **(b) rotační sesuv** - Pokud je úhel břehu k hladině toku méně strmý, je odlučná plocha zakřivená a sahá hlouběji pod hladinu. Tento druh sesuvu je také častý během opadnutí povodně – vodou přesycený břeh při opadávání vody již



Obr. 3.9 Typy kolapsu břehu (upraveno podle CHARLTON, 2008)

není držen tlakem vody a zhroutí se do koryta toku. (c) k **sesouvání nesoudržného břehového materiálu** dochází průběžným působením proudění. Nejsou najednou odnášeny větší kusy břehu. (d) **sesutí podemletého bloku** je způsobeno naložením vrstvy soudržného materiálu na nesoudržný. Nesoudržný materiál je odnášen rychleji, a když gravitační síla podemletého břehu přesáhne sílu, která drží materiál pohromadě, břeh kolabuje. Tento způsob uložení půdy je v nivě meandrujícího toku velmi častý – jedná se o bývalé dno migrujícího koryta, které po opuštění pokryla různě silná vrstva povodňových hlín, případně se jedná o historický meandr. Soudržnost podemletého bloku výrazně ovlivňuje množství a druh vegetace (např. obr. 3.10). V případě přítomnosti vzrostlých stromů v místě podemletého břehu se břeh nesouvá, nýbrž pomalu klesá pod vahou stromu, přesto ale držen jeho kořeny. Ve finální fázi vývoje tohoto druhu eroze může být kmen stromu ve vodorovné poloze nad/v/pod hladinou vodního toku. Sesutí velké části břehu může zvláště u menších vodních toků způsobit změnu vývoje koryta odkloněním proudnice dále od konkávního břehu (nejčastěji u typu 3.9d).

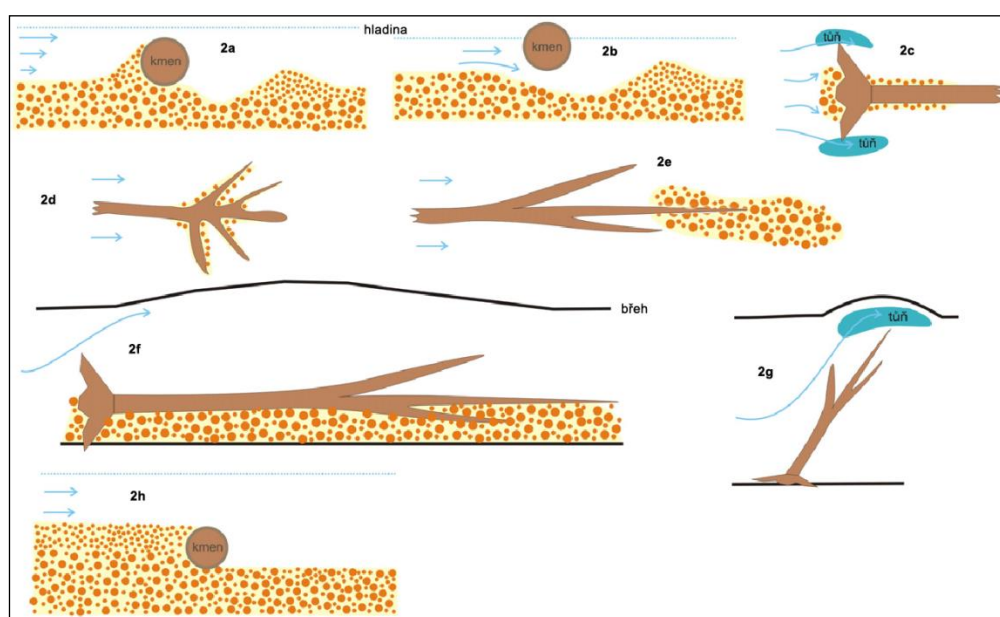
3.1.5 Působení vegetace na fluvialní procesy

Vegetace, která se jakýmkoli způsobem dostane do koryta vodního toku se nazývá **říční dřevo**. Zájem o tento segment fluvialních systémů byl v ČR ještě před 15 lety nulový. Od té doby se dostává do povědomí odborné veřejnosti a dnes je v této oblasti i ustálené názvosloví (především díky pracovníkům Geografického ústavu Masarykovy univerzity).

Působení říčního dřeva je nejvýznamnější na středně velkých tocích (MÁČKA, KREJČÍ, 2006a). Na malých tocích jsou významné jen při povodňových průtocích, protože padající stromy koryto často překlenou. Na velkých vodních tocích je pak působení stromu znatelné, avšak většinou nepodstatné pro celkový vývoj toku. Přisun říčního dřeva může mít na svědomí řada činitelů: **vodní eroze**, **vítr**, oheň, sesuvy, dřevní škůdci (včetně působení bobra), nemoci, kompetice v rámci fytoceózy, stáří, člověk

(STEVENS, 1997). Vlivy dřeva na vodní tok lze rozdělit na (a) **morfologické**: erozně-akumulační procesy, chod splavenin, stabilizace břehů; (b) **biologické**: stanovištní a druhová diverzita, okysličování vody; (c) **hydraulické**: drsnost koryta, směr proudění, disipace proudění; (d) **oběh látek**: potrava pro živočichy, ukládání minerálních sedimentů, spiralizace živin (MÁČKA, KREJČÍ, 2006a). Říční dřevo zaniká čtyřmi způsoby: odstranění člověkem (v ČR nejčastější), odplavení dále po proudu, pohřbení sedimenty, rozklad. Odplavení velkých kusů říčního dřeva (*LWD – large woody debris*) je často možné jen při povodňových průtocích, kdy je mnohonásobně větší energie toku LWD při nich může být transportována na značnou vzdálenost. Pohřbení sedimenty hrozí nejvíce těm kusům LWD, které se nacházejí kolmo ve směru proudnice na jesebním břehu (obr. 4.2 a, h). Rozklad dřeva ve vodě probíhá pomaleji než v suchém prostředí, přesto říční dřevo zaniká i tímto způsobem, před tím však bývá obvykle přemístěno proudem, takže rozklad nastane na jiném místě, než kde se dřevo dostalo do kontaktu s řekou.

Říční dřevo ovlivňuje geomorfologii od dnových mikroforem až po celkovou podobu koryta. Projevy působení není možno jednoduše shrnout, protože se místně a individuálně liší (MÁČKA, KREJČÍ, 2006b). Je však možno vysledovat všeobecné zákonitosti. Tou základní je změna místního proudění. Strom spadlý do koryta orientovaný po proudu chrání břeh před další erozí a stabilizuje jej (obr. 4.2f), zatímco kmen orientovaný kolmo k proudu odklání proudění směrem do stran a tak podporuje laterální erozi (obr. 4.2g). Zvyšuje tak dynamiku změn koryta. Největší rozšiřování koryta nastává při obtékání LWD z obou stran. Voda podtékající překážku svým prouděním prohlubuje koryto (obr. 4.2b). Kontakt říčního dřeva se dnem zvyšuje ukládání splavenin, které zpevňuje a stabilizuje (obr. 4.2h). Kmen ležící na dně a kolmý k proudnici, způsobuje před sebou akumulaci a za sebou erozi materiálu (obr. 4.2a). Dalším možným jevem LWD je zachytávání menších kusů dřeva, případně splávi, kdy i jeden kus LWD může být základem pro tvorbu dřevních akumulací.

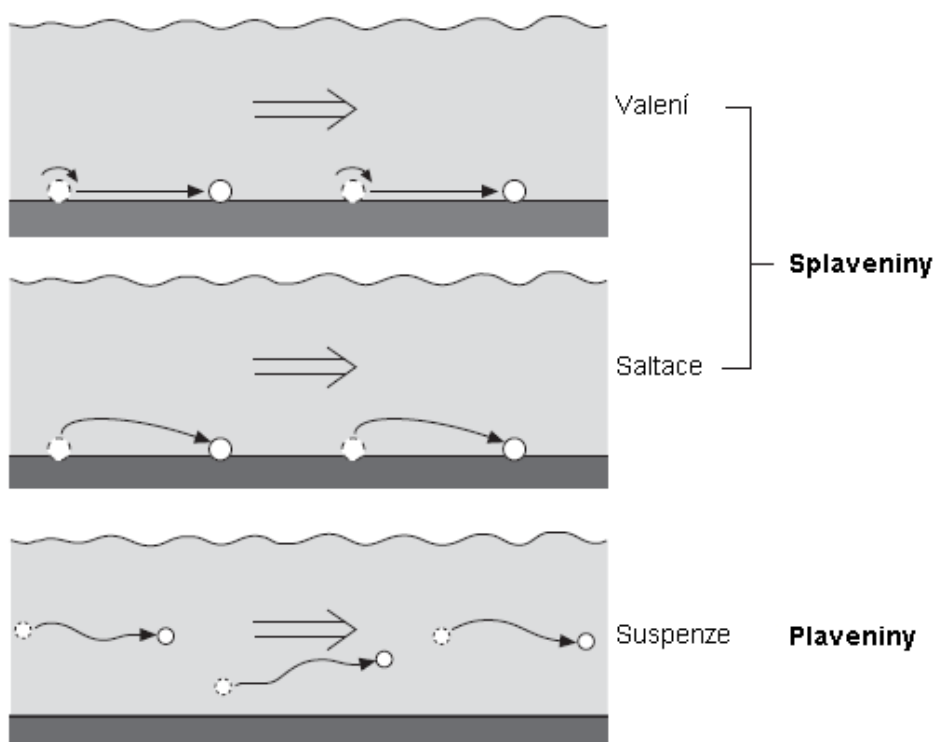


Obr. 3.11 Vliv říčního dřeva na morfologii koryta (upraveno podle KREJČÍ, 2006)

3.2 Sedimentace

3.2.1 Klasifikace sedimentů

Částice jakékoli velikosti může být transportována třemi různými způsoby podle síly proudu a velikosti částice (viz Hjulströmův diagram, obr. 3.6). **Valení** sedimentů je pohyb, při kterém zůstává částice neustále v kontaktu s povrchem dna. Při **saltaci** se částice přemísťuje sérií nepravidelných skoků, kdy síla působící na částici dočasně překoná hranici potřebnou k transportu. Po jejím poklesnutí částice usedá zpět na dno. K pohybu **suspenzí** dochází, když unášecí síla nepřetržitě překovává hranici potřebnou k transportu částice. **Splaveniny** jsou částice, které se pouze valí nebo saltují v proudu. Pohyb je nepravidelný a přerušovaný, jeho obnovení nastává při překonání kritické hodnoty tangencionálního napětí dna. Splaveniny v korytě se určují specifickým průtokem splavenin. Ten je vyjádřen množstvím, které projde korytem o šířce 1 m za 1 s ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$). Jemné částice nepřetržitě se pohybující v proudu (suspenze) bez kontaktu se dnem se nazývají **plaveniny** (NICHOLS, 2009).



Obr. 3.12 Druhy pohybu sedimentů (podle NICHOLS, 2009)

Mezi plaveninami a splaveninami není přesně daná hranice, závisí totiž na unášecí síle proudu a rozlišuje ji velikost efektivního zrna (d_e , výpočet rovnice 6). Stejná částice může být transportována v jednom úseku v režimu splavenin a při zvýšení energie toku může přecházet do režimu plavenin. Kromě toho částice podléhají také obrušování a rozpadání, což může mít také vliv na povahu transportu (UHMANNOVÁ, 2012).

Tab. 3.1 Wentworthova škála zrnitosti (NICHOLS, 2009)

Průměr zrna větší než [mm]	Φ	název
256	-8	Balvany
128	-7	Valouny
64	-6	
32	-5	
16	-4	
8	-3	Oblázky
4	-2	Granule
2	-1	Velmi hrubý písek
1	0	Hrubý písek
0,5	1	Střední písek
0,25	2	Jemný písek
0,125	3	Velmi jemný písek
0,0630	4	Hrubý prach (slit)
0,0310	5	Střední prach
0,0156	6	Jemný prach
0,0078	7	Velmi jemný prach
0,0039	8	Jíl

Rovnice efektivního zrna:

$$d_e = \frac{\sum d_i p_i}{\sum p_i} \quad (6)$$

kde

d_e ... průměr efektivního zrna

d_i ... aritmetický průměr jedné zrnitostní frakce

p_i ... procentuální obsah dané frakce z celkové hmotnosti vzorku.

Rovnice efektivního zrna se používá tam, kde je potřeba vyjádřit charakteristiku splavenin jednou veličinou. K určení velikosti splavenin je používán síťový průměr (d_s) – je to střední šířka nejmenšího otvoru ze soustavy sít, kterým ještě může částice projít. Pro následnou klasifikaci do zrnitostních frakcí jsou používány různé škály. Často používanou je Wentworthova stupnice (tabulka 3.1). Jednotlivé frakce reprezentuje Φ (f_i):

$$\phi = -\log_2 d \quad (7)$$

kde d ... průměr zrna.

Charakteristiku sedimentů lze také vyjádřit zrnitostní křivkou – je to součtová křivka vyjadřující kumulativní procentuální zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí znázorněné na semilogaritmické stupnici. Z průběhu křivky lze odvodit homogenitu materiálu. Jejím znakem je číslo nestejnozrnnosti C_u (UHMANNOVÁ, 2012):

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (8)$$

kde d_{60} ... průměr zrna v 60 % zrnitostní křivky

d_{10} ... průměr zrna v 10 % zrnitostní křivky.

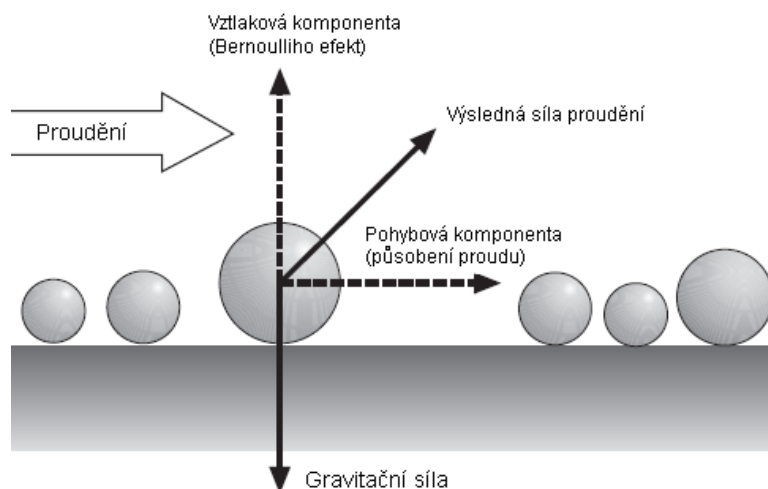
Z výsledku lze klasifikovat splaveniny jako: stejnozrnné ($C_u < 5$);

středně nestejnozrnné ($5 \leq C_u \leq 15$);

nestejnozrnné ($C_u > 15$).

3.2.2 Počátek pohybu

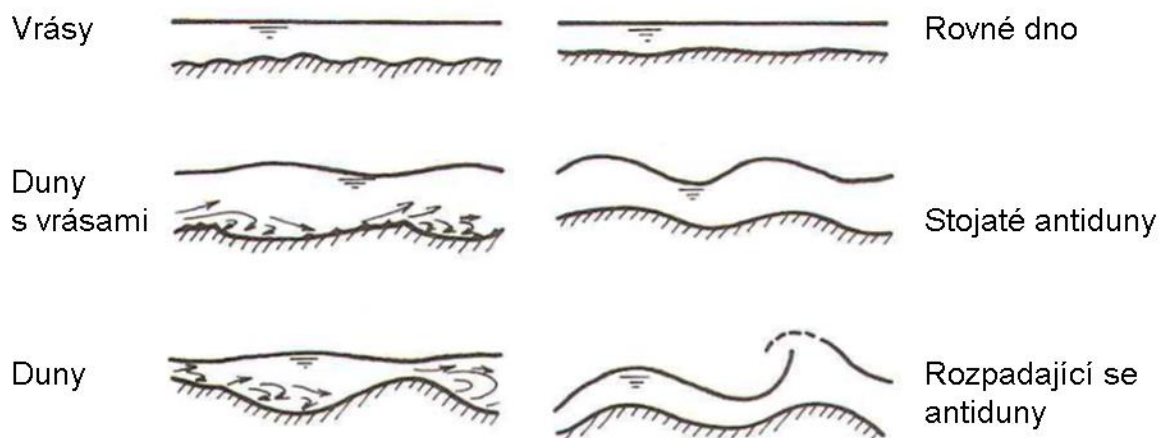
Počátek pohybu částic nastává při překročení mezních hodnot působení sil, které na ně působí. Pohyb sedimentů valením je výsledkem překročení unášecí síly proudu (viz rovnice 4 a obr. 3.6). Saltace nastává při náhlém zvýšení rychlosti proudění nad částicí v důsledku turbulentního proudění. Zvýší se krátkodobě hydrodynamická vztlačková síla, která na ni působí (tzv. Bernoulliho efekt) a překoná gravitační sílu. Při zvednutí zrna se přidá hydrodynamická tlaková síla a zrno se pohybuje kupředu. Při postupném slábnutí Bernoulliho efektu začne převažovat opět gravitační síla, zrno postupně padá zpět ke dnu a pohyb dočasně ustává (NICHOLS, 2009). Při trvalé převaze vztlačkové a dopředné složky síly nad gravitační přechází zrno ze splaveninového režimu do plaveninového.



Obr. 3.13 Síly působící na zrno (podle NICHOLS, 2009)

3.2.3 Dnové útvary

Pohyb splavenin v korytě vytváří na jeho dně specifické útvary, které jsou výsledkem změn charakteristiky proudu a zrnitostního složení materiálu. Tyto útvary zpětně působí na proud a ovlivňují množství materiálu v pohybu (SKLENÁŘ, 2007). Kromě základních tvarů se vyskytují i přechodné typy. Se změnou útvarů dna se mění také charakter hladiny.

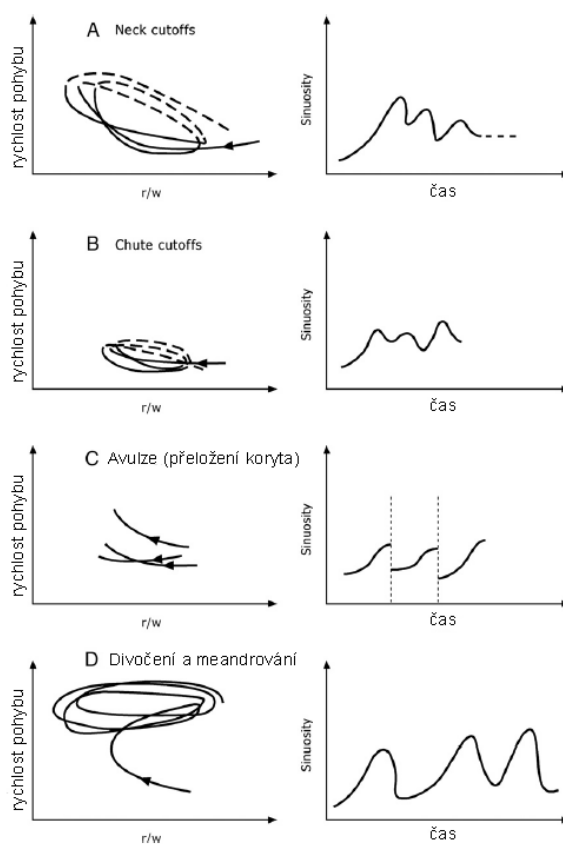


Obr. 3.14 Dnové útvary (upraveno podle SKLENÁŘ, 2007)

Rovné dno vzniká tam, kde není překročena kritická hodnota tangenciálního napětí dna. Nedochozí zde ani k pohybu splavenin a dno zůstává rovné. **Vrásy** vznikají na tocích s velmi nízkou intenzitou pohybu splavenin o velikosti částic $\Phi > 0,737$ (tj. menší než 0,6 mm). Vlnová délka vrás λ je v řádu desítek cm. Vrásy mají nesymetrický trojúhelníkový tvar s mírně skloněným hřbetem a strmým čelem. V průběhu času se přesouvají směrem po proudu a neovlivňují tvar hladiny. Jejich vznik ovlivňuje drsnost dna a ovlivňuje pohyb splavenin. **Duny** jsou nejrozšířenější útvar dna na tocích s písčítým dnem, vyskytují se i na šterkových tocích. Tvoří se při větších průtocích vody a splavenin než vrásy. Při menších průtocích se na svazích dun mohou tvořit vrásy. Vlnová délka vrás λ může být v řádu až 102 m. Duny mají nesymetrický tvar s mírným hřbetem a strmým čelem. V průběhu času se duny pohybují směrem po proudu, při povodních mohou být odplaveny. Slabě ovlivňují hladinu toku, nejnižší hloubka je na hřebenu vlny, kde je nejvyšší rychlost vody, s větší hloubkou rychlost klesá. Tvar hladiny a dna není sfázován. **Antiduny** se vyskytují na písčítých i šterkovitých tocích. Vyznačují se mírnou asymetrií. Nejběžnější druh antidun postupuje proti proudu, ale mohou se pohybovat i po proudu nebo zůstat na místě. Hladina je výrazně sfázována se dnem – výskyt vln na hladině indikuje přítomnost antidun (SKLENÁŘ, 2007).

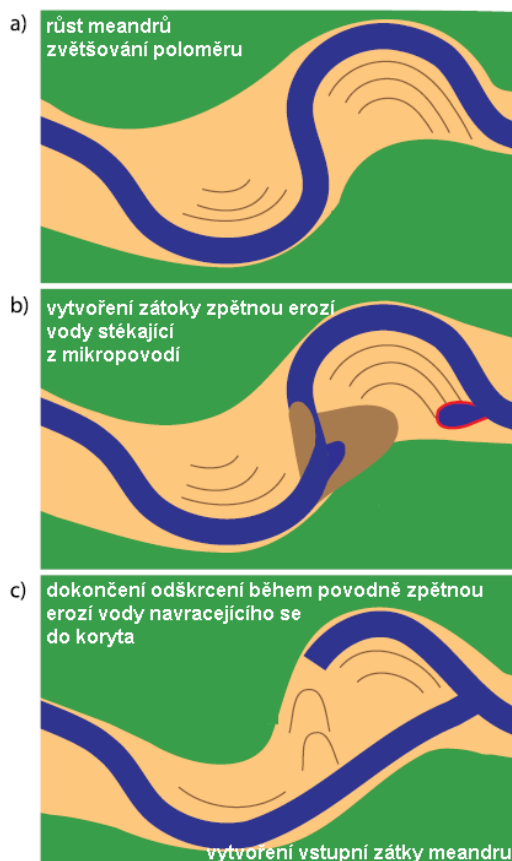
3.3 Odškrcení meandru a jeho následný vývoj

Při protržení šíje meandru dochází k jeho odškrcení. Jedno ze zdůvodnění jevu je, že odškrcování je součástí sebeorganizačního systému a dochází k němu v okamžiku dosažení kritického stavu toku, kdy se chová chaoticky (HOOKE, 2004). Děje se tak nejčastěji za povodňového průtoku. Délka odškrcených meandrů (slepých ramen) se pohybuje od $\approx 7w$ až do $\approx 40w$ (w je průměrná šířka toku) (STØLUM, 1996). V místě odškrcení dochází k jednorázovému uvolnění velkého množství materiálu, ke zkrácení délky toku, zvýšení sklonu, změnám erozně-akumulačních procesů a snížení sinuosity. Po odškrcení se rapidně zmenšuje poloměr zakřivení a výrazně se zrychluje pohyb břehů a tvorba nového koryta. Dynamika pohybu zvolna klesá, jak se opět zvětšuje poloměr zakřivení meandru (obr. 3.15 A, B). Kolísání parametrů (např. sinusoita), které při odškrcování vykazují změny, korelují s frekvencí odškrcování, což ukazuje na velkou sebeorganizovanost tohoto jevu (STØLUM, 1996). CONSTANTINE, DUNNE, 2008, popsali na základě terénního výzkumu vztahy mezi sinusoitou, délkou odškrcených meandrů a frekvencí odškrcení. Délka odškrcených úseků exponenciálně roste s rostoucí sinusoitou, zároveň s rostoucí sinusoitou klesá frekvence odškrcení. Jinými slovy – sinusoita roste, protože nedochází k odškrcení, a pakliže k němu dojde, odškrcený úsek je tím delší, čím delší bylo období bez odškrcení.



Obr. 3.15 Hypotetické trajektorie chování meandrů s různými druhy odškrcení, r/w – podíl poloměru zakřivení a průměrné šířky koryta (podle HOOKE, 2007)

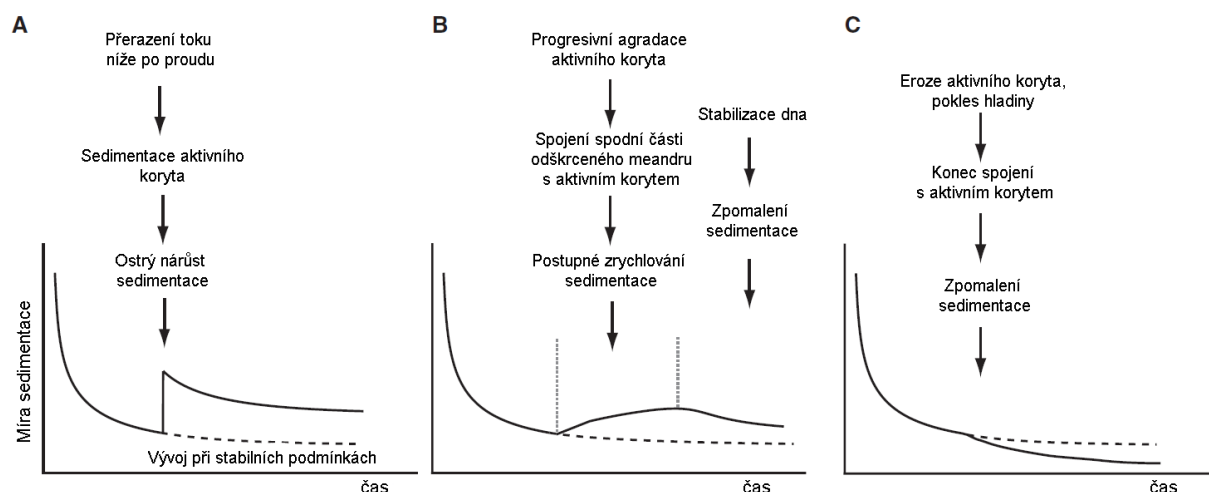
Podle charakteru koryta toku a jeho okolí jsou rozlišovány dva typy odškrcení (CHARLTON, 2008): **Odškrcení skrz šíji meandru** (*neck cutoff*) nastane, pokud je šířka šíje v té době menší, než průměrná šířka koryta. K zužování šíje dochází proti sobě působící laterální erozí dvou protějších meandrů. Protržení je rychlý jev, ke kterému dochází při zvýšeném průtoku, kdy šíje neodolá tlaku vody a zhroutí se. Druhý typ **chute cutoff** není v české terminologii rozlišen, mohl by být považován za podtyp avulze (náhlé přeložení říčního koryta erozí většinou v důsledku povodní). V zahraniční literatuře se lze s termínem *chute cutoff* běžně setkat (např.: BRAUDRICK, 2011; CAPOREALE, 2005; CONSTANTINE et al., 2010a, 2010b; CHARLTON, 2008; HOOKE, 2007; MICHALKOVÁ, PIÉGAY et al. 2010). K *chute cutoff* dochází při vytvoření lokálního mikropovodí, kam stéká voda z nivy. V profilu mikropovodí se utvoří zpětnou erozí zátoka, která se postupně prodlužuje a při povodňovém průtoku se vytvoří nové koryto (obr. 3.16). Spouštěcím elementem *chute cutoff* může být také vytvoření akumulace říčního dřeva v korytě (CONSTANTINE et al., 2010a).



Obr. 3.16 Proces odškrcení *chute cutoff* (upraveno podle VAN DIJK, 2012)

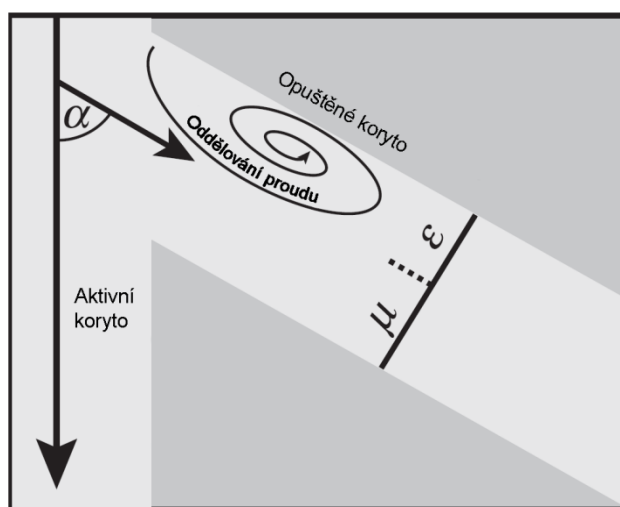
Vývoj meandrů po odškrcení závisí na jejich geometrii a spojení s aktivním korytem. Jejich interakce s aktivním korytem není pravidelná a četnost protékání je závislá na geomorfologických změnách (obr. 3.17). Nejvyšší míra sedimentace je těsně po odškrcení, s postupujícím časem klesá. S vývojem aluviálních zátek a se zvětšujícím se

rozdílem výšky dna se frekvence interakcí s aktivním korytem snižuje. S hydraulickým oddělením od aktivního koryta vzniká meandrové jezero. V případě napojení odškrčeného meandru na aktivní koryto jen spodním koncem (aluviální zátka se vyvíjí rychleji ve vstupní větvi), se při vyšších průtocích, kdy je opuštěné koryto protékáno, zvyšuje tangenciální napětí dna do takové míry, že může docházet k erozi v opuštěném korytě (CITTERIO, PIÉGAY 2009).



Obr. 3.17 Rychlost sedimentace odškrčených meandrů a možnosti jejího ovlivnění (podle CITTERIO, PIÉGAY, 2009)

Jedním z nejdůležitějších parametrů, který určuje další vývoj opuštěného koryta je úhel odškrčení α (obr. 3.18). Má přímý vliv na podíl průtoku, který směřuje do odškrčeného meandru. Průtok vstupující do meandru se dělí na dvě části: ϵ je zóna separace proudění, ze které voda nepokračuje dále, ukládá zde sedimenty a podílí se na tvorbě vstupní aluviální zátky a zužování vstupu do opuštěného koryta. μ je zóna, ze které voda pokračuje dále do odškrčeného meandru. Poměr obou zón lze vypočítat po dle rovnice 9 dle CONSTANTINE et al., 2010b.

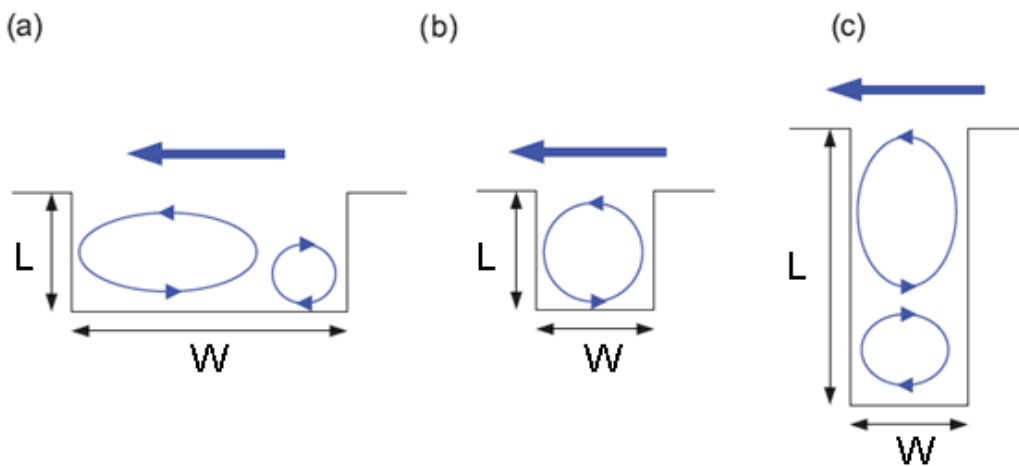


Obr. 3.18 Úhel odškrčení (podle CONSTANTINE et al., 2010b)

$$\mu = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{1}{q^2} - \frac{2\cos(\frac{3\alpha}{4})}{q}} \right)^{-1} \quad (9)$$

kde μ ... podíl zóny, ze které voda pokračuje dále (zóna separace je doplněk do jedné; $\varepsilon = 1 - \mu$)
 α ... úhel odškrčení
 q ... podíl průtoku původním korytem a celkovým průtokem.

Se zvyšujícím se úhlem odškrčení α se snižuje podíl zóny, ze které voda pokračuje dále (μ) a do odškrčeného meandru se dostává stále menší průtok a tím i menší množství plavenin a splavenin a rychlost zamedňování se snižuje. Při velkém úhlu odškrčení α se vstupní aluviální zátka vyvíjí rychleji, než u výstupního konce (CONSTANTINE et al., 2010b). Po vyvinutí aluviální zátky zcela převládne zóna separace proudění ε . Cirkulace proudění se nadále vyvíjí podle poměru šířky a délky počátečního nebo koncového úseku opuštěného koryta. Pokud je $L/W < 0,5$, platí případ (a) – od hlavní vertikální cirkulační buňky se odděluje menší vedlejší směrem proti proudu aktivního koryta; pokud je $0,5 < L/W < 2$, platí případ (b) – tvoří se jen jedna vertikální cirkulační buňka; pokud $L/W > 2$, platí případ (c) – vedlejší vertikální cirkulační buňka se tvoří poblíž aluviální zátky (obr. 3.19)..



Obr. 3.19 Schéma horizontálního proudění v na začátku a konci opuštěného koryta po vývoji aluviálních zátek; W – šířka; L – délka (upraveno podle LE COZ, MICHÁKOVÁ et al., 2010)

4 CHARAKTERISTIKA A HISTORICKÝ VÝVOJ ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

4.1 Vymezení a charakteristika zájmového území

Širší zájmové území zahrnuje hlavní koryto Moravy s přilehlými břehy v úseku od jezu Hynkov po Kenickou lávku, užší zájmové území se nachází ve druhé polovině tohoto úseku – začíná 650 m pod jezem a končí 150 m před lávkou a zahrnuje kromě aktivního koryta i staré koryto Kenického meandru. Pojmenování Kenického meandru vzniklo zkomolením názvu okolního lesa *Gross Kinsky*, který byl v majetku rodu Kinských. Název lze doložit z lesní hospodářské mapy z roku 1829. Avšak na o pět let mladší mapě Stablního katastru (1834) je již vyznačen název *Gross Kenitzky*.

Kenický meandr se nachází severo-severozápadně od Olomouce, přibližně 1 km severovýchodně od obce Hynkov (místní část obce Příkazy). Pravý břeh a koryto Moravy spadá do k. ú. Sřeň, levý břeh do k. ú. Štěpánov u Olomouce. Podle kilometráže Povodí Moravy se šíje meandru nachází na říčním kilometru 250,3. Území je chráněno v rámci CHKO Litovelské Pomoraví, dále také ve formě dvou maloplošně chráněných území – neregulované koryto řeky a přilehlá společenstva přibřežních bylin a dřevin jako NPR Ramena řeky Moravy, les tvrdého luhu s původní druhovou skladbou západně od hlavního koryta Morava až po Mlýnský potok, spolu s ostrovem vzniklým protržením šíje je chráněn ve formě PR Kenický. Celé území také spadá do soustavy Natura 2000 jako Ptačí oblast a Evropsky významná lokalita a je také chráněno podle Ramsarské úmluvy o mokřadech.

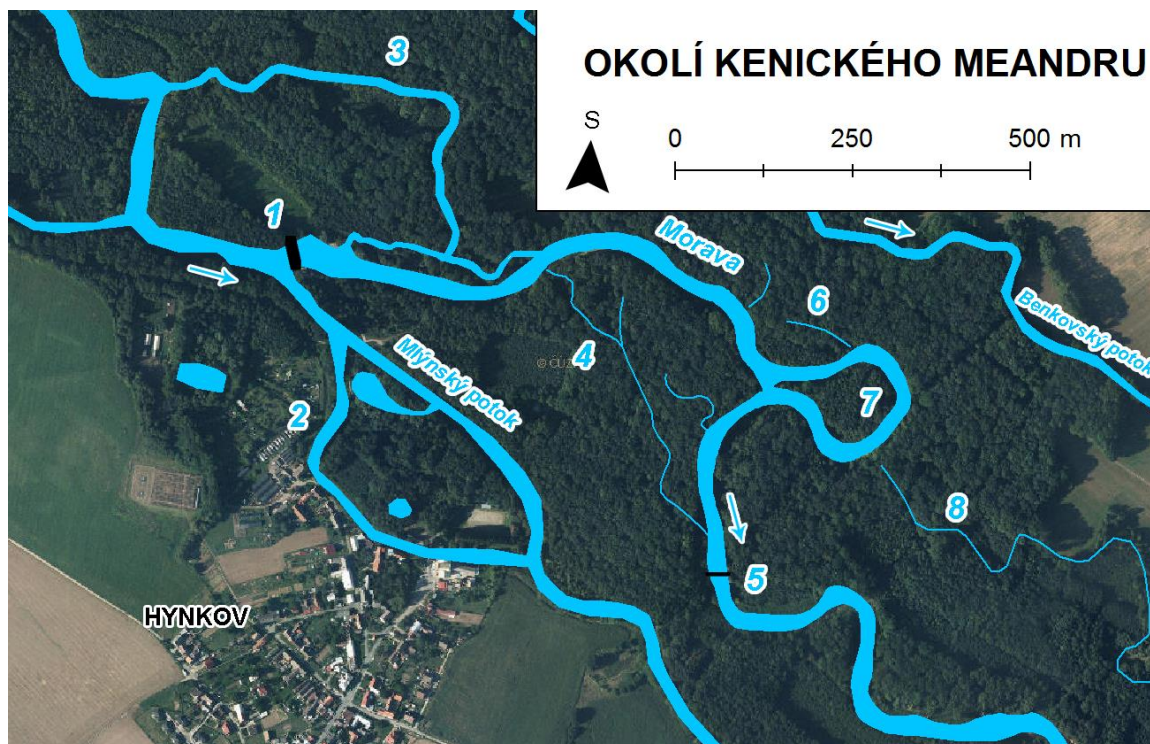
Geomorfologický celá oblast Litovelského Pomoraví spadá do podcelku Středomoravská niva, který je součástí Hornomoravského úvalu. Reliéf v okolí Kenického meandru je rovinatý, niva má nadmořskou výšku 221-225 m, koryta vodních toků a občasně protékaných smuh mají minima v 218,5 m n. m. Nivu tvoří souvrství štěrkopísku překryté povodňovými sedimenty. Mocnost sedimentů dosahuje v Hornomoravském úvalu většinou přes 10 m, v oblasti okolo Hynkova to je však jen 4,5-4,8 m (DEMEK, 1965).

Možnost přirozeného vývoje a volnost morfologických procesů utváří koryto Moravy v přírodě blízkém stavu. Je zde velké množství říčního dřeva (především LWD, které mají na tvary v korytě největší vliv) a říčních lavic, které ovlivňují proudění a dochází k neustálému vývoji koryta. Tvarová a hloubková variabilita dna je příčinou diferenciací rychlosti a energie proudění, která řídí erozi a sedimentaci. Vzhledem k množství vody, která korytem většinu roku protéká, je koryto velké a hlavně přehloubené (MÁČKA, KREJČÍ, 2006c). Výhodou je možnost odvádět lépe povodňové průtoky, na druhou stranu dochází ke snižování podzemních vod ohrožující vodní režim lužních lesů.

4.1.1 Předchozí výzkum lokality

Kenický meandr byl v minulosti předmětem zájmu odborníků mnoha oborů – například botaniků, geografů, ekologů, krajinných inženýrů, geomorfologů. První komplexní multidisciplinární práci z roku 1978 zabývající se Litovelským Pomoravím řešil kolektiv autorů V. Bednář, V. Panoš a O. Štěřba: *Význam řeky Moravy a přilehlých moravských lesů v Hornomoravském úvalu z hlediska životního prostředí (návrh chráněné krajinné oblasti Litovelské Pomoraví)*. Kromě výzkumu pracovníků Správy CHKO po jeho založení se na oblast zaměřil v roce 2000 Z. Máčka ve své práci *Studium a hodnocení vývoje říční sítě v Národní přírodní rezervaci Ramena řeky Moravy od Hynkovského jezů po ústí Cholinky*. Režim plavenin a splavenin a říčního dřeva řešil M. Šindlar ve studiích *Analýza transportu splavenin hlavním korytem Moravy a novou aktivní nivou v úseku Střeň–Chomoutov* a *Problematika plavené dřevní hmoty (splávi) v CHKO Litovelské Pomoraví* z roku 2003. Přímo Kenického meandru se týká několikrát zmiňovaná studie autorské dvojice MÁČKA, KREJČÍ, 2006c. Jejich dalšími pracemi z oblasti Kenického meandru jsou i články řešící téma říčního dřeva MÁČKA, KREJČÍ 2006a, 2006b, ale také samostatné práce L. Krejčího (KREJČÍ 2006, 2010). Okrajově se oblastí zabývá také souhrnná publikace O. Štěřby o ekologii říční krajiny: *Říční krajina a její ekosystémy* (ŠTĚRBA, 2008) nebo diplomová práce J. Zelinky (2008).

4.1.2 Hydrologické poměry



Obr. 4.1 Okolí Kenického meandru: 1 – jez Hynkov; 2 – náhon k hynkovskému mlýnu; 3 – smuha Hraniční Morava; 4 – Kenická smuha; 5 – Kenická lávka; 6 – pozůstatky koryta z 19. stol.; 7 – Kenický meandr; 8 – Štěpánovská smuha; podklad ortofoto ČÚZK.

Řeka Morava je vodní tok druhého řádu pramenící na svahu Kralického Sněžníku 1 370 m n. m. a po 354 km ústí do Dunaje poblíž Devína ve výšce 135 m n. m. Plocha povodí je 26 658 km². Režim řeky je oderského typu s maximálními průtoky na jaře při tání sněhu a s minimy na přelomu léta a podzimu.

V CHKO Litovelské Pomoraví protéká Morava v úseku 277-237 ř. km. Regulace koryta jsou provedeny pouze v okolí sídel (Mohelnice, Moravičany, Litovel a Olomouc). Neregulované úseky jsou navíc chráněny v maloplošných chráněných územích, např. PP Kurfürstovo rameno, NPR Ramena řeky Moravy, PR Panenský les. Na území CHKO řeka protéká několika trvalými nebo občasnými rameny, která meandrují a tvoří tak meandrující anastomózní říční vzor. Díky rozvětvené síti vodotečí a občasným zaplavováním nivy vznikly cenné a bohaté ekosystémy lužních lesů závislé na tomto vodním režimu, bez nějž nemohou existovat.

Přibližně 700 m severně od Hynkova se na pár desítek metrů všechna stálá ramena Moravy spojují v tzv. hynkovský hydrografický uzal. Ten je zakončen Hynkovským jezem, který byl v současné podobě vybudován v roce 1918 a v roce 1929 rekonstruován (jediná vodoteč, která jez obtéká je dříve trvale průtočná smuha Hraniční Morava). Jez se nachází na 251,1 ř. km. Jedná se o kombinovaný jez – levá část jezu je betonovo-kamenná, v pravé části se nachází stavidlová propust, kterou lze průtok částečně regulovat. Objekt slouží k optimálnímu rozdělení průtoků do Moravy a Střední Moravy (Mlýnského potoka) manipulacemi se stavidlem jezu. Dlouhodobý průměrný roční přítok k jezu je 20,83 m³s⁻¹. Na jezu je od roku 2001 umístěna automatická měřicí stanice (výška hladiny, průtok a teplota vody) ve správě Odboru ochrany Magistrátu města Olomouce. Dle aktuálního manipulačního řádu jezu dochází k nalepšování průtoků do Střední Moravy na úkor hlavního koryta.

Tab. 4.1 Rozdělení průtoků do Moravy a do Střední Moravy v závislosti přítoku a otevření stavidla jezu Hynkov (dle manipulačního řádu z roku 2005):

Kóta hladiny nad jezem	Přítok k jezu	Průtok do Střední Moravy	Průtok do Moravy	Otevření stavidla
m n. m.	m³s⁻¹	m³s⁻¹	m³s⁻¹	
221,30 (práh)	0,2	0,2	0	30 cm (volná hladina)
221,40	0,45	0,25	0,2	
221,50	0,9	0,4	0,5	
221,60	1,6	0,7	0,9	
221,70	2,7	1,0	1,7	30 cm
221,80	3,3	1,3	2,0	
221,90	3,9	1,6	2,3	
222,00	4,5	2,0	2,5	

222,10	5,4	2,7	2,7	
222,20	6,9	4,0	2,9	
222,30	8,1	5,0	3,1	
222,40	9,6	6,3	3,3	
222,50	11,5	8,0	3,5	
222,60	13,4	9,8	3,6	
222,64	14,6	10,9	3,7	30 cm, voda začíná přepadat přes pevnou hranu jezu
222,70	16,9	12,5	4,4	30 cm
222,80	21,4	15,0	6,4	30 cm + voda stoupá, stavidlo se vyhradí na 50 cm
222,75	21,4	13,8	7,6	50 cm
222,80	23,7	15,0	8,7	
222,90	29,2	17,5	11,7	50 cm + voda stoupá, vyhradí se zcela
222,84	29,2	15,7	13,5	zcela vyhrazeno
222,90	34,0	17,5	16,5	
223,00	42,9	20,0	22,9	
223,50			50,0	začátek rozlivů na Střední Moravě
223,76 (břeh)				

4.2 Vývoj břehové linie

Koryto meandrujícího toku se neustále mění. Po ukončení protékání koryta začíná ihned proces zazemňování. Přísun sedimentů obstarává kromě mateřské řeky i splach materiálu z okolí při silných srážkách, napadání organické hmoty (listí, říční dřevo), velkou mírou se na sedimentaci podílí také odnos částic z nivy při návratu vody do koryta během povodní. Fragments koryta jsou v terénu i po dlouhé době po zazemnění jasně viditelné jako terénní hrany a sníženiny. Hydraulicky jsou stále spojené s vodním tokem, proto při zvýšených vodních stavech do nich natéká voda ze zvodnělého aluvia. Historický průběh vodních toků lze určit například z půdních vzorků, které jsou v místě bývalého koryta vždy mladší než vzorky ve stejné hloubce mimo něj. Metoda je to přesná, ale finančně a technicky náročná. Mnohem jednodušší (i když méně přesná) a používanější metoda je zkoumání historických mapových zdrojů a leteckých snímků (např. GREŠKOVÁ, 2002; CONSTANTINE, DUNNE 2008; CAMPOREALE et al.,

2009; CITTERIE, PIÉGAY, 2009; MICHELI, LARSEN, 2010; CONSTANTINE et al. 2010b; DIERAS, 2013). Lze tak určit s uspokojivou přesností průběh a charakter vodních toků od doby, kdy byly sestrojeny první mapy velkého měřítka v souřadnicovém systému – na našem území tedy od 1. pol. 19. stol.

Tab. 4.2 Seznam historických mapových zdrojů a leteckých snímků

Název mapy	Měřítko	Rok	Zdroj
Müllerova mapa Moravy	cca 1 : 180 000	1716	http://oldmaps.geolab.cz/
I. vojenské mapování	1 : 28 800	1764-8	http://oldmaps.geolab.cz/
II. vojenské mapování	1 : 28 800	1837-8	http://oldmaps.geolab.cz/
Stabilní katastr	1 : 2 880	1834	http://archivnimapy.cuzk.cz/
III. vojenské mapování	1 : 25 000	1874	http://oldmaps.geolab.cz/
Hospodářská mapa revíru Střeň	1 : 7 200	1894	MÁČKA – KREJČÍ 2006c
III. vojenské mapování – reambulace	1 : 25 000	1930	http://archivnimapy.cuzk.cz/
Letecký snímek 1938	1 : 22 500	1938	Správa CHKO Litovelské Pomoraví
Letecký snímek 1954	1 : 25 000	1954	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 1971	1 : 40 000	1971	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 1985	1 : 27 500	1985	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 1994	1 : 26 710	1994	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 2003	1 : 23 000	2003	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 2006	1 : 23 000	2006	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 2012	25 cm/px	2012	WMS ČÚZK
Letecký snímek 12/2012	3 cm/px	2012	KGI (pořízen vedoucím práce)
Letecký snímek 4/2013	1,8 cm/px	2013	KGI (pořízen vedoucím práce)
Letecký snímek 2/2014	7 cm/px	2014	KGI (pořízen vedoucím práce)

4.2.1 Historické mapové zdroje

Historické mapy, které vycházejí z Fabriciovy mapy Moravy (1569) a Komenského mapa (1627), anastomózu Moravy mezi Litovlí a Olomoucí nezachycují. Dvě ramena řeky pouze obklopují Olomouc. První mapou, kde je zachyceno i koryto Střední Moravy je Müllerova mapa Moravy z roku 1716. Obě ramena jsou znázorněna jako velmi křivolaká bez výraznějšího propojení mezi sebou. Pro určení přesného průběhu řeky mapa není při absenci souřadnicového systému vhodná.

Mapy I. vojenského mapování (1764-1768) zachycují v okolí Hynkova náznak spojování všech ramen a jejich opětovné rozdělení. Dominantní se zdá být nejvýchodnější rameno, které se nachází přibližně v místech Štěpánovské smuhy, je zde patrná Střední Morava i s náhonem k hynkovskému mlýnu (v místě oddělení Střední Moravy je zachycen ostrov v řece – buď velká náplavová lavice, nebo akumulace říčního dřeva). Třetí rameno obtéká Hynkov od západu a na pozdějších mapách se nevyskytuje. Jeho pozůstatkem může být malá bezejmenná svodnice protékající Hynkovem a ústící do Cholinky. Žádné z ramen nevykazuje výraznější znaky meandrování.

Stav území z 1. pol. 19. stol. je zaznamenán na mapách II. vojenského mapování. Ty vznikly na základě měřického operátu Stablního katastru (1824-1836). Tyto mapy jsou již konstruovány na matematických a geodetických základech a zájmové území bylo mapováno v r. 1834 (k.ú. Skrbeň, Střeň a Štěpánov). Střední Morava je na mapě stejně široká jako hlavní koryto, dominantní je zde také náhon k hynkovskému mlýnu, pod ním rameno výrazně meandruje. Západní rameno z mapy I. vojenského mapování zde není, ale lze najít tenkou linii vodního toku v oblasti dnešní bezejmenné svodnice. Hlavní koryto má naprosto odlišný průběh oproti současnosti. Pod jezem Hynkov rameno silně meandrovalo (celkem 3 meandry, z toho jeden dvojitý). V oblasti jižně od bývalé šíje Kenického meandru se nacházela větší vodní plocha, od které se rameno dále dělilo na dvě části. Větší a meandrující koryto na východ (dnešní Štěpánovská smuha). Druhé menší a přímější více jižním směrem, odpovídající dnešnímu průběhu koryta. Oblast na mapě II. vojenského mapování byla pokusně georeferencována v dostačující kvalitě pro určení přibližného průběhu (kvůli měřítku mapy a malé kvalitě obrazového materiálu dosáhla RMSE 10,5 m). Porovnání mapy II. vojenského mapování a současnosti na podkladu III. vojenského mapování (reambulace) je na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Hlavní koryto Moravy od Hynkovského jezu na mapě II. vojenského mapování (červeně, r. 1834) a současný průběh (modře) na podkladu mapy III. vojenského mapování (1874)

Podobná síť ramen jako na mapě II. vojenského mapování je i na původní mapě III. vojenského mapování, jejíž vydání se datuje do r. 1874. Hlavním korytem je patrně Střední Morava (označená v mapě popiskem *March Fluss*). V oblasti dnešního Kenického meandru byl proveden průpich několika meandrů zakreslených už na mapě II. vojenského mapování. Původní koryta jsou však zakreslena jako stále průtočná. Během 70. let 19. stol. došlo u těchto meandrů k definitivnímu napřímení. Také přestává být dominantní dnešní Štěpánovská smuha, jejíž meandry zůstaly do současnosti ve stavu z konce 19. stol. – to také naznačuje spíše náhlé ukončení protékání než postupné opuštění koryta.

Napřímení toku pod jezem zaznamenává už Hospodářská mapa revíru Střeň z roku 1878. Vzniklý přebytek energie řeky se projevil velmi rychlým zahlabováním a boční erozí. Dokladem je aktualizace mapy červenou tužkou z roku 1894. Aktualizace ukazuje rychlý boční vývoj nových zákrutů, rozsáhlých bočních lavic a zákrut budoucího Kenického meandru, jehož osa se přesunula z původního azimutu cca 45° na 90°. Je zde zakresleno také vyústění Kenické smuhy do hlavního koryta. V rámci Střední Moravy je stále dominantní náhon k mlýnu v Hynkově. Zaznamenáno je také odstavení jednoho meandru, jehož slepé rameno se dodnes zachovalo.



Obr. 4.3 Výřez Hospodářské mapy revíru Střeň (1878), aktualizace z r. 1894 červeně (zdroj: MÁČKA, KREJČÍ 2006c)

4.2.2 Analýza leteckých snímků od roku 1938

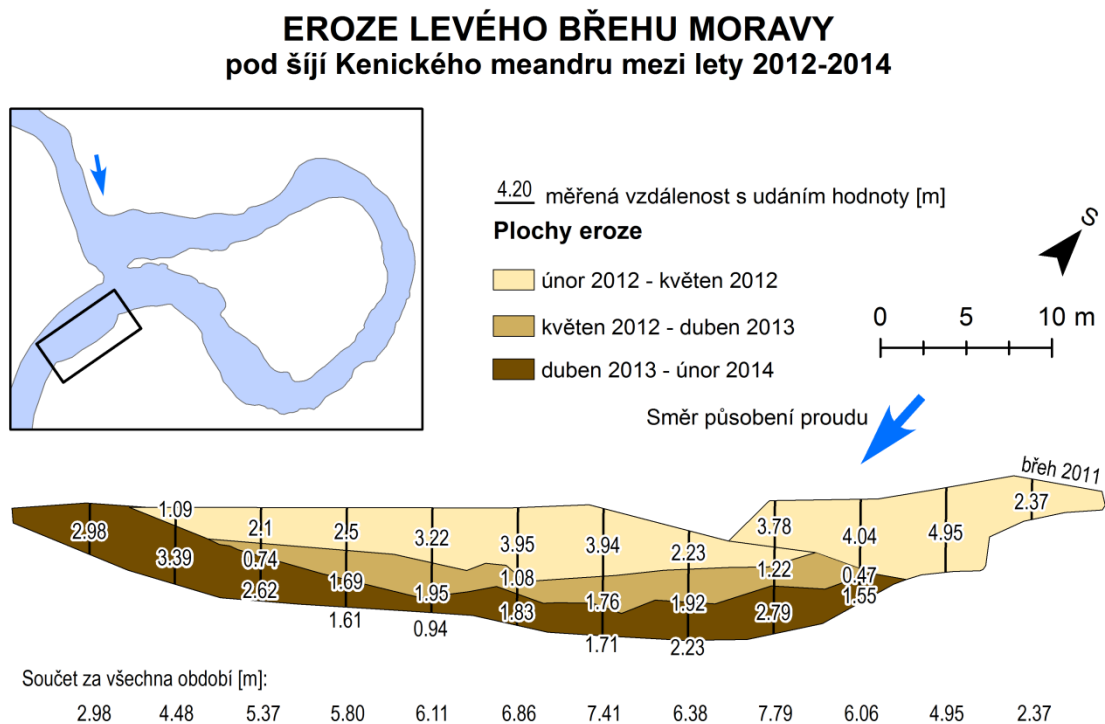
První dostupný snímek je z roku 1938. V toku Střední Moravy není poprvé vidět dominanci náhonu k mlýnu, což může souviset s částečným napřímením toku. Dobře viditelná je Kenická smuha, naproti tomu Štěpánovská smuha protékající není a lze ji najít jen s obtížemi – od tohoto období již nevykazuje známky vývoje a pomalu se zazemňuje. Zákrut z Hospodářské mapy revíru Střeň je již vyvinut v Kenický meandr – došlo k jeho prodloužení, vývoji zatím široké šíje (v nejužším místě 45 m, v místě odškrvení 54 m)

a změny osy na azimut 110°. Jesepní lavice jsou rozsáhlé a bez vegetace – znak rychlého vývoje a migrace koryta.

Další snímek z roku 1954 ukazuje další vývoj – dochází ke zvětšování poloměru zakřivení Kenického meandru a zužování šíje. Okolní vodoteče jsou ustálené a dochází jen k dalšímu vývoji bez vnějších zásahů. Jedinou výjimkou je napřínění Střední Moravy mezi začátkem a koncem náhonu do mlýna na konci 60. let; z původního koryta zůstala vodní plocha vedle současného a byl zrušen malý jez rozdělující průtok – pozůstatky po něm ve formě peřejky jsou znatelné dodnes.

Na leteckém snímku z roku 1971 je znatelné nové narovnané koryto Střední Moravy, napojené zatím jen spodním koncem. Po této akci začalo pravděpodobně k nalepšování průtoků ve Střední Moravě skrze jez Hynkov. Někdy v této době došlo také k vymýcení asi 1,3 ha pro lesní školku (dnes již zrušenou) mezi hlavním korytem a Střední Moravou.

Nejvýraznější zásah do prostřední okolo Moravy se nachází na snímku z roku 1985 – došlo k vykácení téměř celého vnitřního břehu meandru a pásu lesa na levém břehu. Poloměr zakřivení se v tomto období stále zvolna zvětšoval a šíje se zužovala. Stejný vývoj je možné vysledovat i na snímku z roku 1994. V roce 2003 byl meandr vyvinutý do současné podoby, šířka šíje byla již jen několik metrů a o 3 roky později již byla ve stavu, ve kterém vydržela jen s malými změnami do protržení v roce 2012.



Obr. 4.4 Eroze břehové linie v důsledku změny proudění protržením šíje meandru

Tato událost byla vyvrcholením celého přibližně 135 let trvajících vývoje Kenického meandru a zároveň tím započala fáze jeho zanikání a nový vývoj koryta Moravy. Se změnou proudění po protržení začala proudnice působit na levý břeh pod šíjí (dříve

jesepní). Úhel svírající s břehem okolo 50° vyvolal značnou laterální erozi levého břehu v délce přibližně 70 m. Obrázek 4.4 zobrazuje geodeticky zaměřené linie této části břehu od protržení do února 2014.

Letecké snímky z let 1938 až 2006 byly georeferencovány nad ortofotem ČÚZK z roku 2012 afinní transformací s minimálně 4 dvojicemi bodů, u nichž byla jistota neměnné polohy. Jednalo se především o rohy dobře zřetelných staveb (mlýn, jez, nádraží) nebo křížení linií (cesta s vodním tokem, železnice). Georeferencování bylo ukončeno, pokud se podařilo dosáhnout $RMSE < 0,5$ m. Výsledný snímek byl rektifikován převzorkováním metodou nejbližšího souseda a uložen bezztrátovou kompresí. Na tomto podkladu probíhala vektorizace břehových linií (linie z roku 2012 a 2014 vznikla kombinací leteckých snímků a geodetického zaměření břehů). Vzhledem k tomu, že se celý úsek Moravy nachází v lužním lese, linie břehu je často zastíněna stromy. V těchto místech byla proto vedena deduktivně nedaleko středů korun první řady stromů na břehu. Linie břehů byly převedeny na polygony a nástrojem *Polygon to Centerline* vytvořeny středové linie. Z nich byla vypočítána délka koryta a sinusoita za jednotlivá období. Kombinací linií se dvou po sobě jdoucích období byly odvozeny polygony eroze a akumulace. Následně byla vytvořena průměrná středová linie pro všechna období a linie s rozstupem 50 m, kolmá na průměrnou středovou linii. Podle nich byly erozní a akumulární (tj. migrační) polygony rozřezány na jednotlivé úseky podle staničení. Nakonec byly v atributové tabulce vypočteny parametry jednotlivých polygonů – průměrná roční erodovaná/akumulovaná plocha nivy, průměrná míra migrace. Ta se vypočítá jako podíl plochy (eroze nebo akumulace) a poloviny jejího obvodu (podle MICHELI, LARSEN, 2010) a vyjadřuje střední míru migrace v dané ploše.

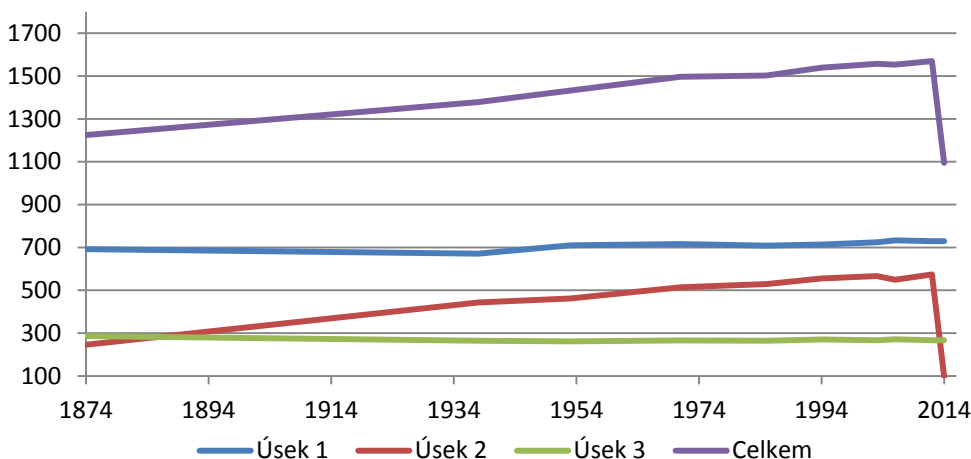
Pro podrobnější členění byl úsek zájmu (od jezu Hynkov po Kenickou lávku) rozdělen na tři části – část před Kenickým meandrem, samotný meandr a část za ním. Pro ty byla stanovena délka a sinusoita zvlášť. Do výpočtů byla také zahrnuta středová linie toku z roku 1874 těsně po napřímení. Z tabulky 4.3 a grafů 4.1 a 4.2 je patrné výrazný nárůst délky a sinusoity (osa y grafu 4.2 má logaritmické měřítko) úseku 2. V průběhu let také znatelně vzrostla délka úseku nad meandrem, naopak v úseku 3 se sinusoita mírně snižovala. Po odškrcení meandru klesla délka toku téměř 6x a sinusoita ze 7,259 na 1,243 (celková sinusoita klesla „jen“ z 2,115 na 1,475). Propad obou veličin v roce 2006 způsobuje jen tříletý odstup od předchozího snímku, kdy změny břehů nebyly tak výrazné, aby se neprojevila odchylka interpretace polohy břehů a následné vedení středové linie toku – při rozšiřování koryta v zákrutu nesouměrnou erozí břehů může délka toku stagnovat, ale středová linie se zkracuje kvůli menšímu poloměru zakřivení. Růst sinusoity v prvním časovém období do roku 1938 určitě nebyl lineární, ale spíše exponenciální s maximálními přírůstky délky v počátečních letech a s postupným zpomalováním růstu.

Tab. 4.3 Délky a sinusoita Moravy od jezu Hynkov po Kenickou lávku (úseky: A – jez-profil 1; B – profil 1-profil 11; C – profil 11-lávka; přehled profilů viz obr. 5.1):

Rok		1874	1938	1953	1971	1985	1994	2003	2006	2012	2014
Délka úseků [m]	A	692	671	710	716	709	713	724	733	730	730
	B	246	443	462	514	529	555	566	549	574	98
	C	286	264	261	266	265	270	267	271	267	267
	Σ	1 224	1 379	1 432	1 497	1 503	1 539	1 557	1 554	1 570	1 094
Sinusoita	A	1.013	1.039	1.098	1.109	1.097	1.104	1.120	1.135	1.129	1.129
	B	1.530	5.606	5.844	6.506	6.700	7.030	7.168	6.954	7.259	1.243
	C	1.378	1.087	1.074	1.093	1.089	1.112	1.097	1.116	1.096	1.096
	Σ	1.491	1.858	1.930	2.017	2.025	2.074	2.098	2.094	2.115	1.475

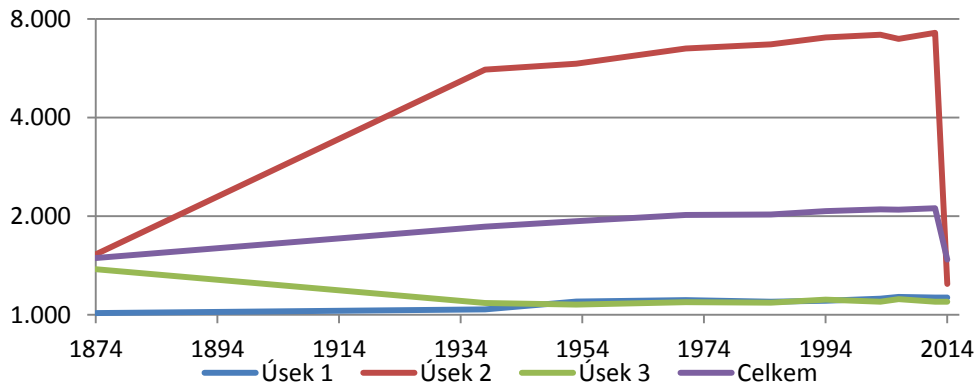
Graf. 4.1 Délka koryta v letech 1938-2014 mezi jezem Hynkov a Kenickou lávkou (úseky: A – jez-profil 1; B – profil 1-profil 11; C – profil 11-lávka)

Délka úseku [m]



Graf. 4.2 Sinusoita koryta v letech 1938-2014 mezi jezem Hynkov a Kenickou lávkou (úseky: A – jez-profil 1; B – profil 1-profil 11; C – profil 11-lávka)

Sinusoita

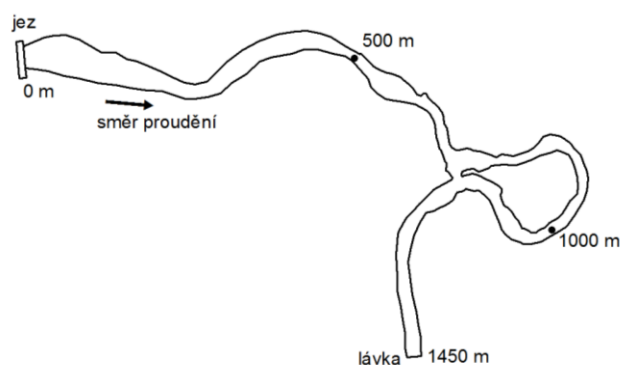
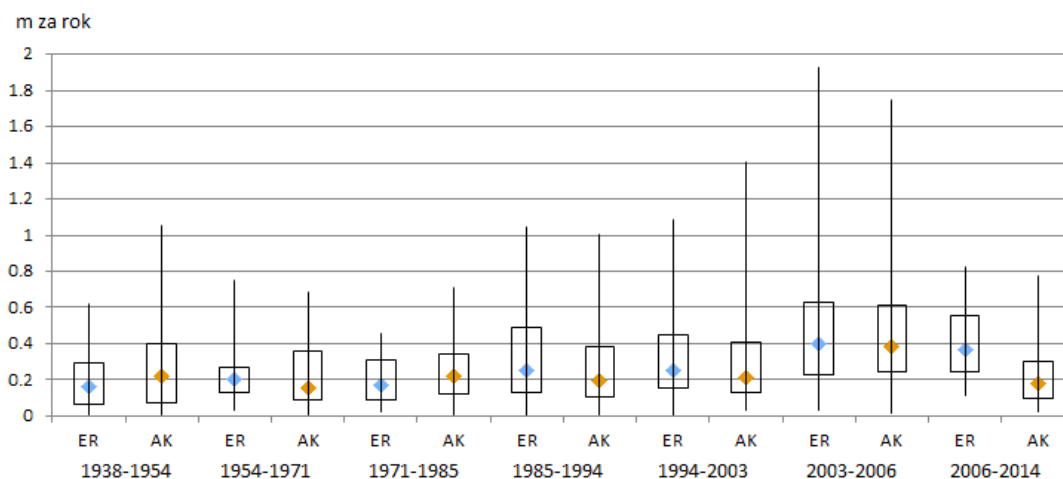


Tab. 4.4 Plochy eroze (ER) a akumulace (AK) v jednotlivých obdobích 1938-2014:

Období	Plocha ER [m ²]			Průměrná míra migrace ER [m]	Plocha AK [m ²]			Průměrná míra migrace AK [m]	Rozdíl ER – AK	
	za období	roční průměr	% celkové ER		za období	roční průměr	% celkové AK		za období	roční průměr
1938-1954	6 823,91	426,49	16,73	3,25	8 770,75	548,17	21,68	4,06	-1 946,84	-121,68
1954-1971	8 370,84	492,40	20,52	3,92	8 499,60	499,98	21,01	11,63	-128,76	-7,57
1971-1985	4 392,28	313,73	10,77	2,96	8 145,19	581,80	20,14	3,64	-3 752,91	-268,07
1985-1994	5 913,94	657,10	14,50	2,94	5 405,49	600,61	13,36	2,52	508,45	56,49
1994-2003	6 907,16	767,46	16,93	2,50	4 784,69	531,63	11,83	2,68	2 122,47	235,83
2003-2006	3 636,61	1 212,20	8,92	1,62	2 840,34	946,78	7,02	1,41	796,26	265,42
2006-2014	4 746,22	593,28	11,64	2,31	2 004,36	250,55	4,96	1,88	2 741,85	342,73
CELKEM	40 790,95	536,72	100,00		40 450,43	532,24	100,00		340,51	4,48

Tabulka 4.4 zobrazuje souhrnné výsledky výpočtů ploch a míry migrace erozních (ER) a akumulčních (AK) polygonů. Od roku 1938 do roku 2014 byla v úseku od jezu Hynkov po Kenickou lávku eroze a akumulace přibližně v rovnováze. Rozdíl ER a AK přepočtený na roční průměr nedosahuje ani v období nejvýraznějšího rozdílu mezi ER a AK jednoho procenta. Jedná se tedy o velmi pomalý nárůst. Během vývoje bylo celkem přetvořeno přibližně 4,05 ha nivy. Celkově byl trend změn břehů akumulací klesající, tempo eroze naproti tomu kolísalo. V období 1938-1954 převládá akumulace díky zužování koryta pod jezem. V následujícím období se akumulční aktivita přesouvá především k břehům poblíž šíje a na jesep Kenického meandru. V období 1971-1985 pokračovala akumulace na jesepním břehu meandru. K významnému posunu koryta došlo také v oblasti zákrutu, který meandru předchází. Jak se zužovala šíje meandru, došlo k vývoji vnějších jesepních břehů především v období 1985-1994. V období po roce 1994 akumulace slábla, výrazněji postihla ještě jesepní břeh meandru mezi lety 2006-2014.

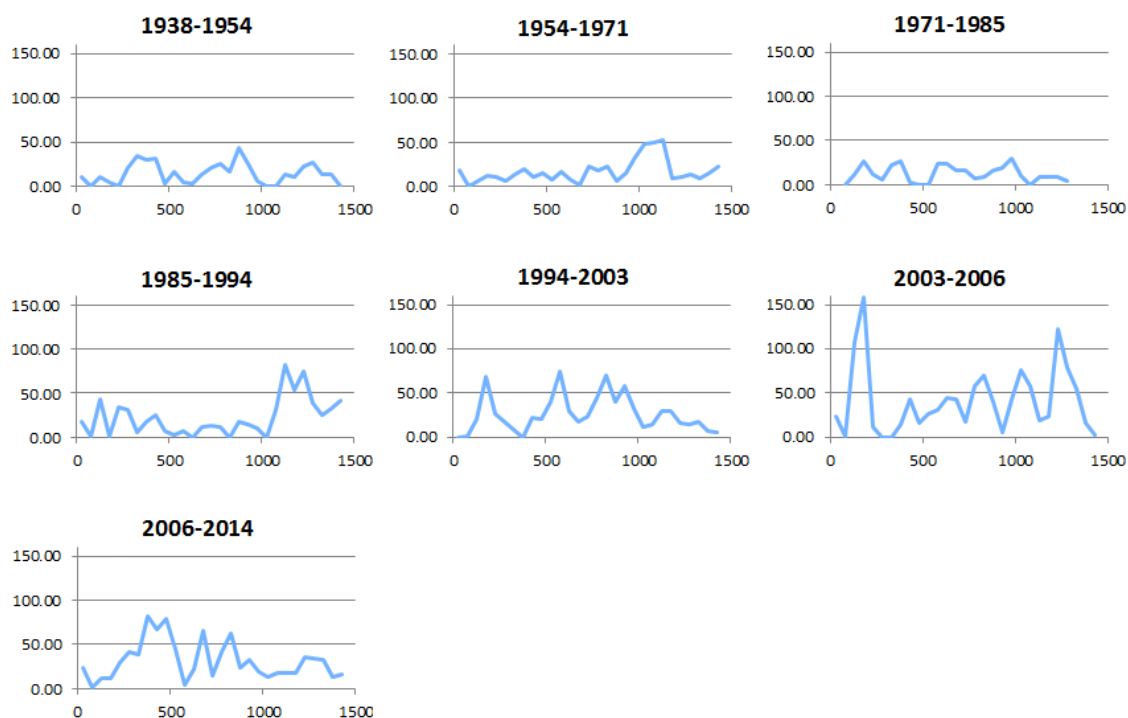
Graf. 4.3 Porovnání roční míry migrace erozí (ER) a akumulací (AK) mezi jezem Hynkov a Kenickou lávkou v letech 1938-2014



Obr. 4.5 Staničení použité v grafech charakteristik eroze a akumulace podle úseků

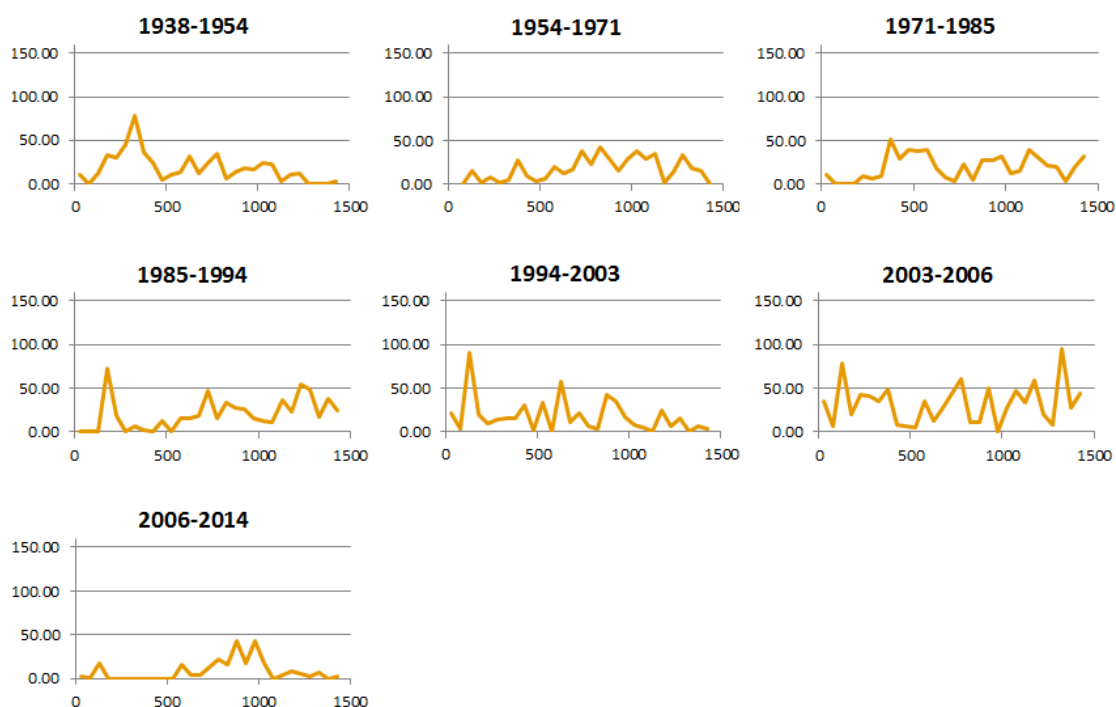
Eroze v období 1938-1954 se nejvíce podílela na zakřivení zákrutu nad meandrem a na významném rozšíření koryta v severní části meandru. V období 1954-1971 tato aktivi-

Graf. 4.4 Roční úbytek nivy erozí (v m²) podle úseků od jezu Hynkov po Kenickou lávku v letech 1938-2014



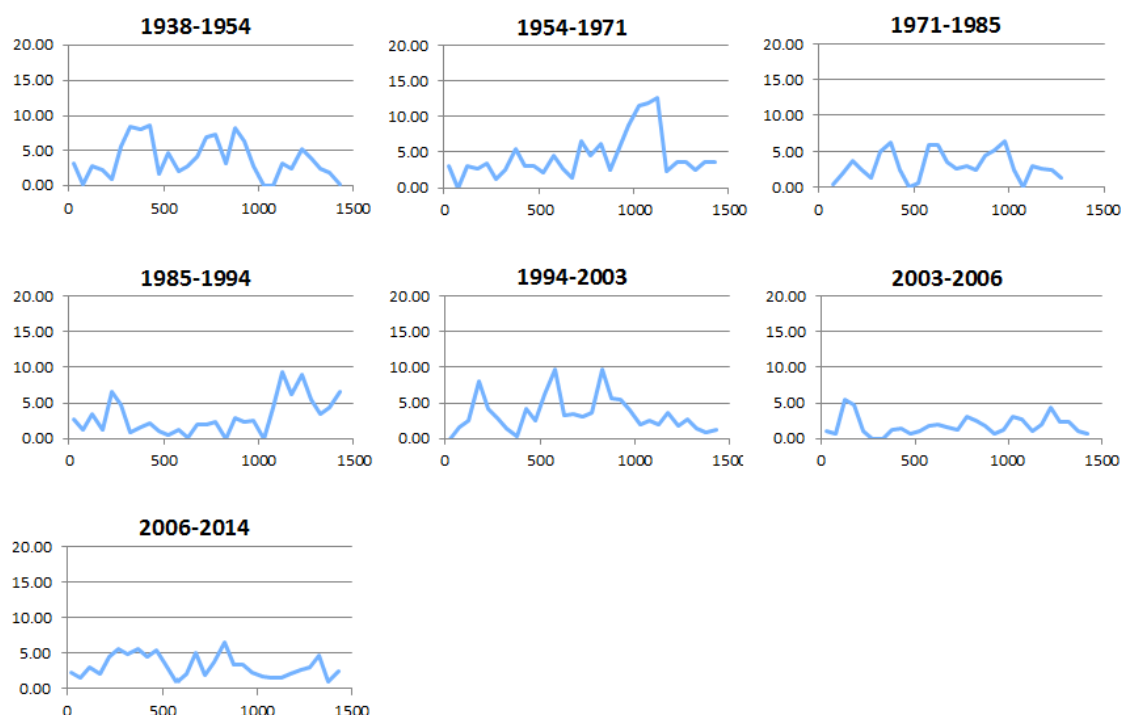
ta zeslábla a nejvíce se na erozním působení podílí rozšiřování meandru především v jižní části erozí výsepního břehu. V dalším období je eroze utlumenější, nicméně stále probíhá rozšiřování poloměru zakřivení meandru, nyní v severní části. Období 1985-1994 vykazuje erozi v menší míře pod jezem a ve větší míře v jižní části meandru, kde dochází

Graf. 4.5 Roční přírůstek nivy akumulací (v m²) podle úseků od jezu Hynkov po Kenickou lávku v letech 1938-2014



k jeho zvětšování do šířky a k významné erozi šíje z jihu. K migraci koryta západním směrem dochází také v úseku od meandru po Kenickou lávku. V období 1994-2003 dosavadní směr působení eroze zpomaluje, naopak zrychluje rozšiřování severní části koryta Kenického meandru a zužování šíje ze severu (v tomto období se začíná tvořit velká akumulace říčního dřeva poblíž severní části šíje, která blokuje proudění a dochází k rozšiřování koryta). Více se také zakřivuje zákrut nad meandrem. Krátké období 2003-2006 vykazuje nejvyšší hodnoty migrace v přepočtu na rok, obzvláště eroze. Na erozi se v tomto období podílí rozšíření koryta těsně pod jezem, eroze části **jesepního** břehu meandru, rozšiřování koryta severně od šíje (z obou stran – vývoj dřevní akumulace) a eroze šíje jižně. Příčina se objeví při pohledu na tabulku 4.7 – v tomto krátkém intervalu došlo ke dvěma větším povodním (průtok téměř Q_5 , resp. Q_1-Q_5) v roce 2005 a 2006. Poslední období 2006-2014 se z hlediska eroze projevilo nejvíce rozšířením koryta v zákrutu před meandrem, a také levého břehu meandru v severní části, samozřejmě se také projevila plocha protržené šíje a následná eroze levého břehu.

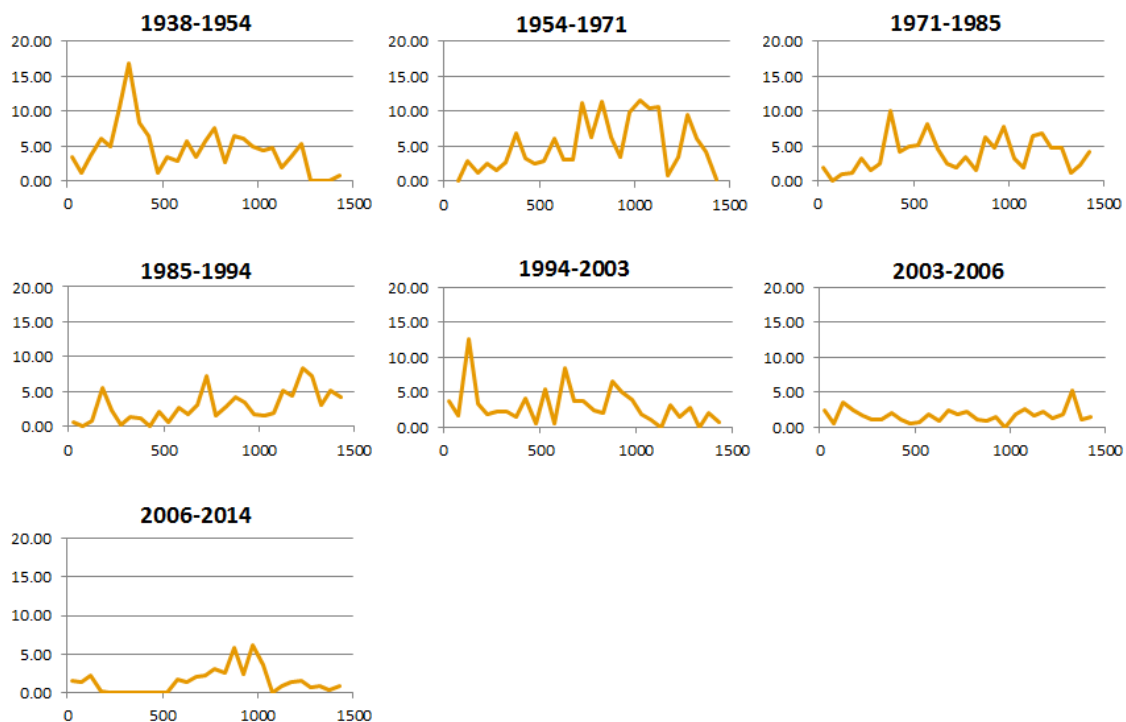
Graf. 4.6 Průměrná míra migrace erozí (v m) podle úseků od jezu Hynkov po Kenickou lávku v letech 1938-2014



Z krabicového grafu roční míry ER a AK (4.3) je možné vysledovat pozvolné zpomalování migrace akumulací (až na výjimku v krátkém období 2003-2006) a velmi mírný růst migrace erozí. Maximální hodnoty roční míry migrace se i v extrémním úseku 2003-2006 pohybují pod 2 m za rok. Z obrázku 4.4 je patrné, že pakliže by byl zvolený menší časový úsek, kde se odehrály velké změny (např. odškrcení meandru, velká povodeň...), byla by maxima daleko vyšší – například místo na obr. 4.4 by vykazovalo hodnotu 2,7 m ročně.

Grafy 4.4-4.7 zobrazují průměrné roční změny nivy ER a AK a průměrnou míru migrace v souvislosti s jejich polohou v zájmovém území. Vzdálenosti od jezu byly odvozeny od průměrné středové linie. Staničení proto není úplně přesné ani v jednom období, hodnoty jsou však porovnatelné.

Graf. 4.7 Průměrná míra migrace akumulací (v m) podle úseků od jezu Hynkov po Kenickou lávku v letech 1938-2014



4.3 Přehled průtoků od roku 2001

Četnost a síla povodní je hlavním faktorem určujícím dynamiku vývoje koryta. První kvantifikované záznamy o povodních na řece Moravě lze dohledat z 20. let 20. stol. První volně dostupný záznam o povodňovém průtoku v profilu Olomouc Nové Sady je z roku 1920. Největší zaznamenaná povodeň proběhla v červenci 1997, kdy Morava na profilu Moravičany kulminovala na $625 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Q_{700}) a na profilu Olomouc-Nové Sady na $760 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Q_{500}). V tabulce 4.5 jsou uvedeny největší zaznamenané povodně na profilu Olomouc Nové Sady. Celkem za 80 let měření bylo dosaženo $1 \times Q_{500}$, $4 \times Q_{10}$ - Q_{50} , $2 \times <Q_{10}$, $3 \times Q_5$ - Q_{10} , $3 \times <Q_5$ a $5 \times >Q_1$. Mnoho dalších povodňových průtoků, převážně okolo Q_1 pravděpodobně chybí, ale ty největší povodně tabulka zaznamenává.

Tab. 4.5 Povodně před rokem 2001 podle hlásného profilu Olomouc Nové Sady (pravděpodobně neúplný seznam):

Měsíc	Rok	Dosažený průtok při kulminaci	Měsíc	Rok	Dosažený průtok při kulminaci
11	1920	<Q ₁₀	7	1966	>Q ₁
10	1930	Q ₁₀ -Q ₅₀	3	1981	Q ₁₀ -Q ₅₀
3	1937	Q ₅ -Q ₁₀	6	1986	>Q ₁
9	1938	<Q ₅	1	1987	Q ₅ -Q ₁₀
3	1941	Q ₁₀ -Q ₅₀	5	1996	>Q ₁
2	1946	Q ₁₀ -Q ₅₀	7	1997	Q ₅₀₀
3	1947	<Q ₅	3	1999	<Q ₅
7	1958	>Q ₁	3	2000	Q ₅ -Q ₁₀
5	1962	>Q ₁			
3	1965	<Q ₁₀			

Po katastrofálních povodních v roce 1997 začal být kladen důraz na existenci a dostupnost aktuálních hydrologických dat. Jako součást protipovodňových opatření na ochranu Olomouce byla na hynkovském jezu zřízena v roce 2001 automatizovaná sonda měřící výšku hladiny, průtoky a teplotu vody. Sondu spravuje Odbor ochrany Magistrátu města Olomouce. Od té doby jsou k dispozici data o průtoku hynkovským hydrografickým uzlem a podle manipulačního řádu jezu Hynkov lze odvodit, jak je rozdělován průtok do Střední Moravy a do hlavního ramene. Tab 4.6 zobrazuje extrémní průtoky a stavy pro vyhlášení stupňů povodňové aktivity podle manipulačního řádu.

Tab. 4.6 Extrémní n-leté a m-denní průtoky pro jez Hynkov, průtoky pro vyhlášení SPA:

n-let	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
m ³ s ⁻¹	115	227	281	418	483

m-dní	Q ³⁰	Q ⁹⁰	Q ¹⁸⁰	Q ²⁷⁰	Q ³³⁰	Q ³⁵⁵	Q ³⁶⁴
m ³ s ⁻¹	44,94	25,58	15,31	9,505	6,165	4,365	3,053

SPA	I	II	III
m n. m.	223.4	223.6	223.9
m ³ s ⁻¹	95,76	128,6	187,7

Tab. 4.7 Povodňové stavy zaznamenané pro profil jezu Hynkov od 4/2001 do 7/2014:

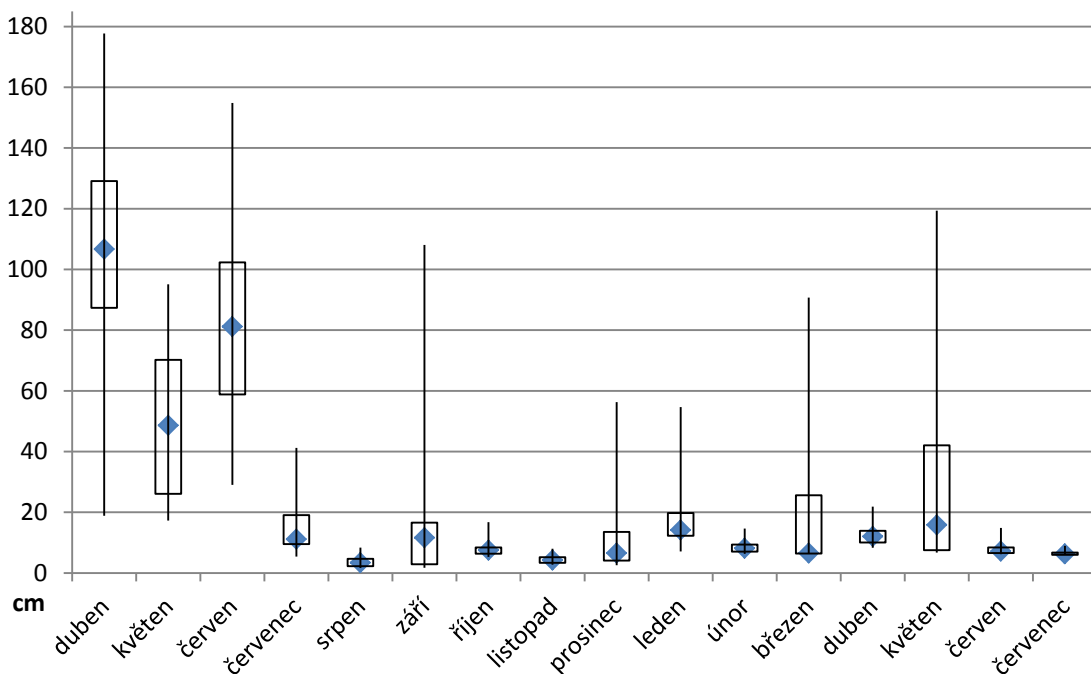
Hydrologický rok	Σ dní povodní	Datum povodně	SPA	Q _n průtok	Kulminační průtok [m ³ s ⁻¹]
2001 (od dubna)	0	-	-	-	max. 92 (21.-22. 7.)
2002	16	22.1.-23.1.	SPA I	< Q ₁	113
		28.1.-2.2.	SPA II	> Q ₁	160
		13.2.-16.2.	SPA II	> Q ₁	160
		27.2.-2.3.	SPA II	> Q ₁	128
2003	8	31.12.	SPA I	< Q ₁	95
		3.1.-6.1.	SPA III	Q ₁ -Q ₅	197
		28.1.-29.1.	SPA I	2x Q ₁	2x 108
		13.3.	SPA I	< Q ₁	103
2004	4	6.2.-9.2.	SPA II	> Q ₁	162
2005	10	18.3.-22.3.	SPA III	< Q ₅	217
		27.3.-31.3.	SPA I	Q ₁	116
2006	15	28.3.-7.4.	SPA III	Q ₁ -Q ₅	195
		1.5.-4.5.	SPA II	> Q ₁	134
2007	0	-	-	-	max. 81 (5.3.)
2008	0	-	-	-	max. 88 (2.-3.3.)
2009	2	6.3.-7.3.	SPA I	< Q ₁	103
2010	14	1.3.-2.3.	SPA I	< Q ₁	102
		27.3.-28.3.	SPA I		95,76
		25.5.-27.5.	SPA I	< Q ₁	108
		1.6.-6.6.	SPA II	Q ₁ -Q ₅	182
		2.9.	SPA I	< Q ₁	100
2011	6	15.1.-18.1.	SPA II	> Q ₁	134
		23.7.-24.7.	SPA I	< Q ₁	102
2012	4	26.2.	SPA I	Q ₁	118
		29.2.-2.3. *)	SPA I	Q ₁	121
2013	0	-	-	-	max. 41,3 (20.4.)
2014 (do července)	0	-	-	-	max. 20,3 (24.3.)

*) při této povodni došlo k protržení šíje Kenického meandru

Tabulka 4.7 zobrazuje přehled zaznamenaných povodní. Průměrný počet povodňových dní v roce je 5,64. V případě neuvažování let, kdy povodňového průtoku nebylo dosaženo to je 8,7 dní. Největší povodně z této třináctileté časové řady se vyskytly téměř za sebou – v roce 2003, 2005 a 2006. Od té doby celkem stabilně se zužující šíje Kenického meandru téměř zastavila svůj vývoj a k jejímu zhroucení došlo až o 6 let později. Zmíněné tři povodně mohou mít vliv na stagnaci šíje – „pravidelným“ protékáním koryta většími než normálními průtoky byla převažující erozí zvýšena (přízpusobena) kapacita koryta na tyto průtoky. Následovaly 4 roky, kdy největší průtoky byly ve srovnání s předešlým obdobím velmi malé. V korytě uzpůsobeném na větší kapacitu, tak neprobíhal další vývoj a docházelo spíše k jeho zanášení než k erozi (případně došlo k erozi hloubkové). Teprve až když se stav koryta dorovnal zpět, došlo k dalšímu rozrušování šíje a následné úplné destrukci.

Tabulka 4.7 také znázorňuje, jak suchý následující rok a devět měsíců byl. Za tu dobu se průtok ani nedostal na hranici 30 denního průtoku (v tomto roce ani na hodnotu 90 denního). I když rok nebo dva bez dosažení Q_1 není pro tento profil vzácné, v ostatních případech se maximální roční průtok přibližoval ke Q_1 . Pro další vývoj úseku bude klíčové, v jakém období a jak intenzivní bude následující povodeň. Ta zkoriguje směr vývoje, který byl dán odškrcením meandru a ať bude její intenzita jakákoli, proběhnou v okolí šíje a ve starém korytě intenzivní změny.

Graf 4.8 Krabicový graf výšky hladiny na profilu 2 [cm]:

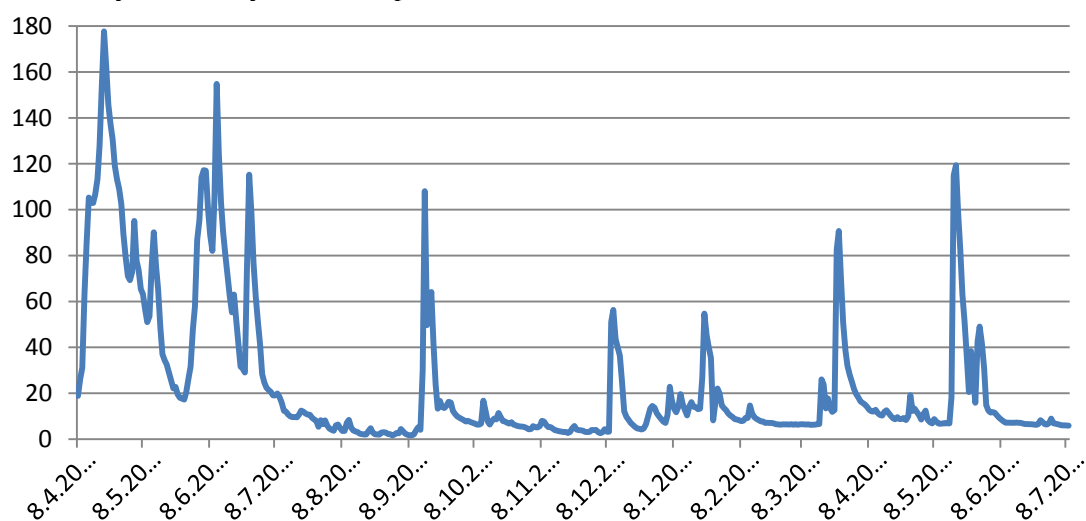


Tab. 4.8 Měsíční průměry výšky hladiny na profilu 2 [cm]:

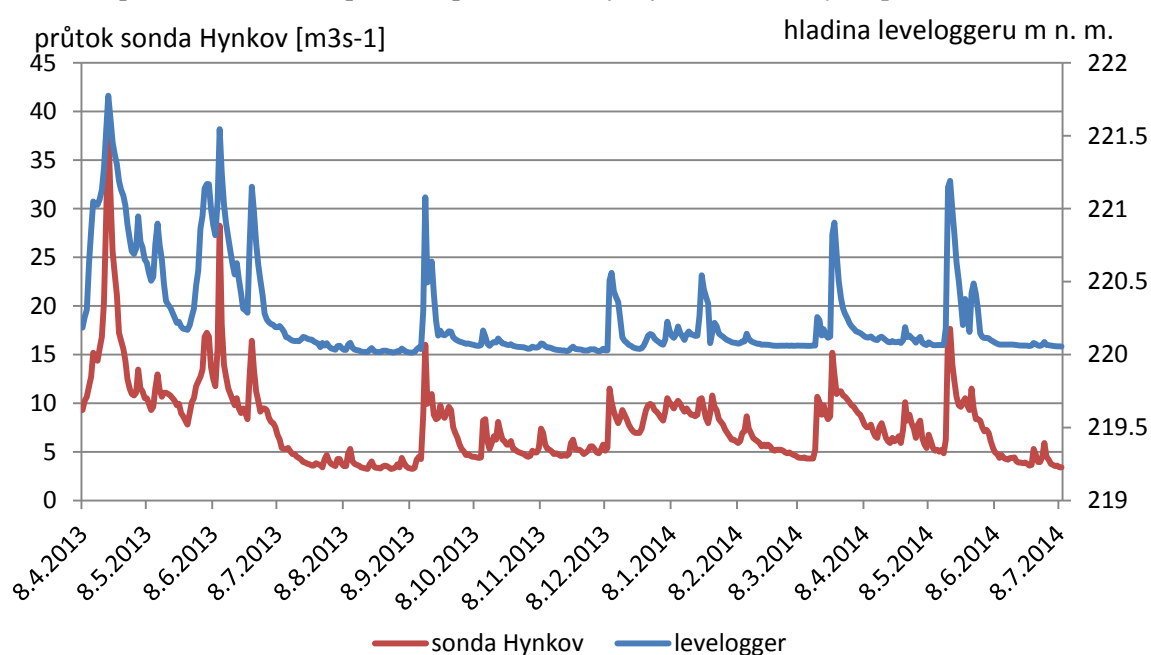
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
2013	N/A	N/A	N/A	104,5	48,6	81,1	13,5	3,7	18,3	7,9	4,5	13,5
2014	18,1	8,5	20,6	12,6	31,4	8,1	6,6	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

V dubnu 2013 byl ve starém korytě poblíž profilu 2 (viz obr. 5.1) umístěn levelogger, který v pravidelných intervalech měří výšku hladiny a teplotu vody (podrobně v kapitole Metody). Díky známé nadmořské výšce profilu a datům z leveloggeru lze určit četnost protékání koryta meandru spolu s hloubkou vody v místě profilu 2 (data jsou zatím dostupná za 15 měsíců). Úpravou dat do struktury totožnou s daty ze sondy Hynkov (denní průměry, minima a maxima), lze tato data vzájemně porovnat (graf 4.9). Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu pro data sondy a leveloggeru jsou: Průměr – 0,8976; Minimum – 0,8825; Maximum – 0,9063. Hodnoty vyjadřují silnou pozitivní korelační závislost. Silná závislost ukazuje na nepřítomnost překážky mezi hlavním korytem a meandrem. Příčinou, že korelační koeficient není ještě vyšší je nalepšování průtoků do Střední Moravy.

Graf. 4.9 Výška hladiny nad dnem profilu 2 [cm]:

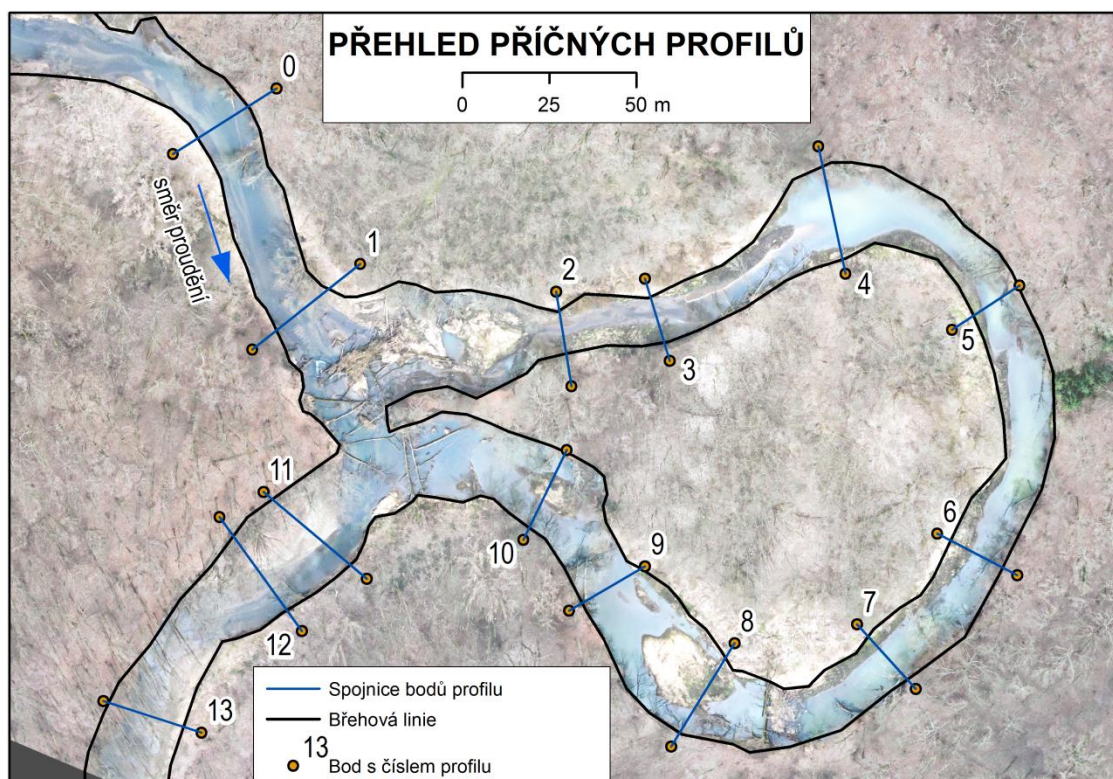


Graf 4.10 porovnání denních průměrů průtoku sondy Hynkov a hladiny na profilu 2



5 MONITORING PŘÍČNÝCH PROFILŮ KORYTA MEZI LETY 2011-2014

Byly zaměřeny celkem čtyři sady příčných profilů. První z prosince 2011 a druhá z května 2012 v rámci bakalářské práce (pouze profily 1-11 z obrázku 5.1). Další sady profilů byly rozšířeny o profily 0, 12, 13 a byly zaměřeny v průběhu května až června 2013 a června až července 2014. Bohužel kvůli působení vnějších vlivů docházelo k opakovaným ztrátám stabilizace krajních bodů. Ty se proto měnily, a i když byly často umístěny na přibližně stejné místo a zaměřeny, nezabránilo to odchylkám od předchozích měření. Naštěstí jsou tyto odchylky dobře identifikovatelné, i když hůře kvantifikovatelné. Jednotlivé ztráty jsou uvedeny v popisu profilů. Poblíž proudnice každého profilu byly v dubnu 2014 odebrány vzorky reprezentativního materiálu dna, které byly přetříděny metodou sítování do frakcí až po průměr 0,25 mm. Průměrná hmotnost vzorku po vysušení byla 1074 g, celkem bylo odebráno přes 15 kg suchého materiálu. Poloha profilů je zobrazena na obr. 5.1. Ke každému profilu je uveden, kromě grafu průběhu výšek a skladby sedimentů, také krabicový graf nadmořských výšek. Ten byl vytvořen z výšek profilů s rozestupy 1 m. Podle krabicových grafů lze ve velkém množství případů odhadnout tvar profilu.



Obr 5.1 Přehledová mapa příčných profilů Kenického meandru (podklad: letecký snímek z února 2014 pořízený vedoucím práce)

Všechny sady profilů jsou uvedeny v příloze 4 a tabulka s absolutními hodnotami hmotnosti frakcí sedimentů v příloze 1.

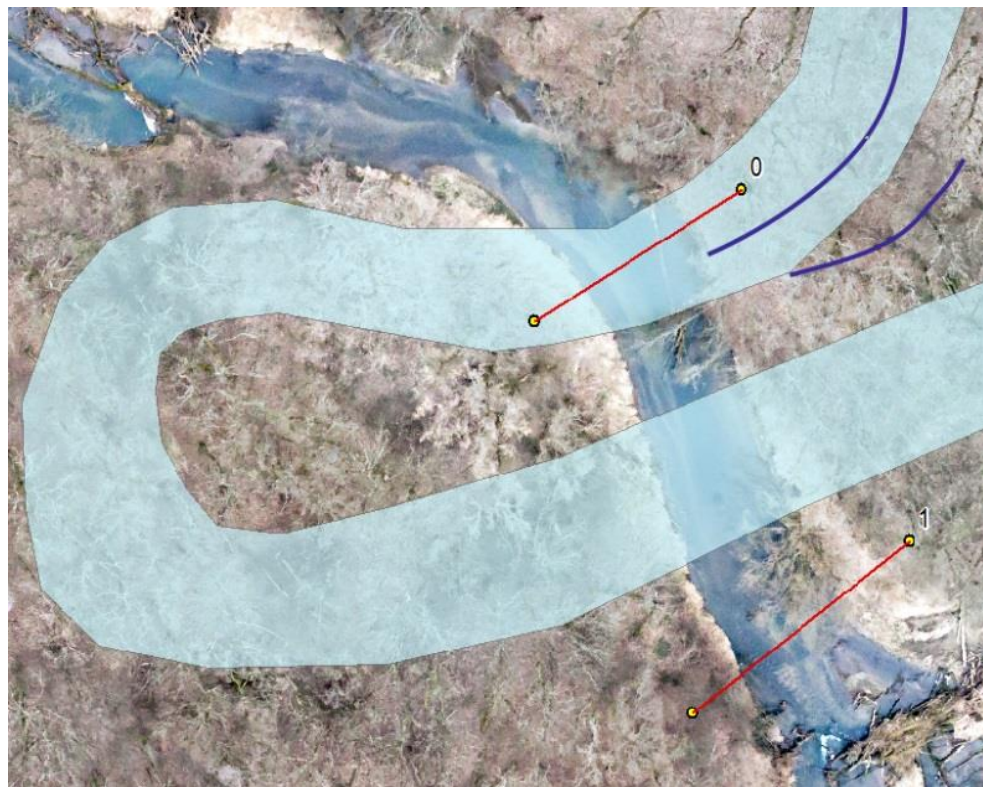
Tabulka 5.1 Vzdálenosti mezi profily středem koryta

Počáteční bod úseku	Koncový bod úseku	Vzdálenost [m]
jez Hynkov	profil 0	691,5
profil 0	profil 1	58,9
profil 1	profil 2 (vtok do meandru)	81,0
profil 1	profil 11 (novým korytem)	81,5
profil 2	profil 3	27,7
profil 3	profil 4	59,4
profil 4	profil 5	58,4
profil 5	profil 6	77,9
profil 6	profil 7	40,1
profil 7	profil 8	59,8
profil 8	profil 9	41,3
profil 9	profil 10	33,8
profil 10	profil 11 (výtok z meandru)	77,4
profil 11	profil 12	18,9
profil 12	profil 13	53,1
profil 13	Kenická lávka	190,3
Celkem		
profil 0	profil 13 (meandrem)	687,8
profil 0	profil 13 (šíjí)	212,5
jez Hynkov	Kenická lávka (meandrem)	1569,6
jez Hynkov	Kenická lávka (šíjí)	1094,3

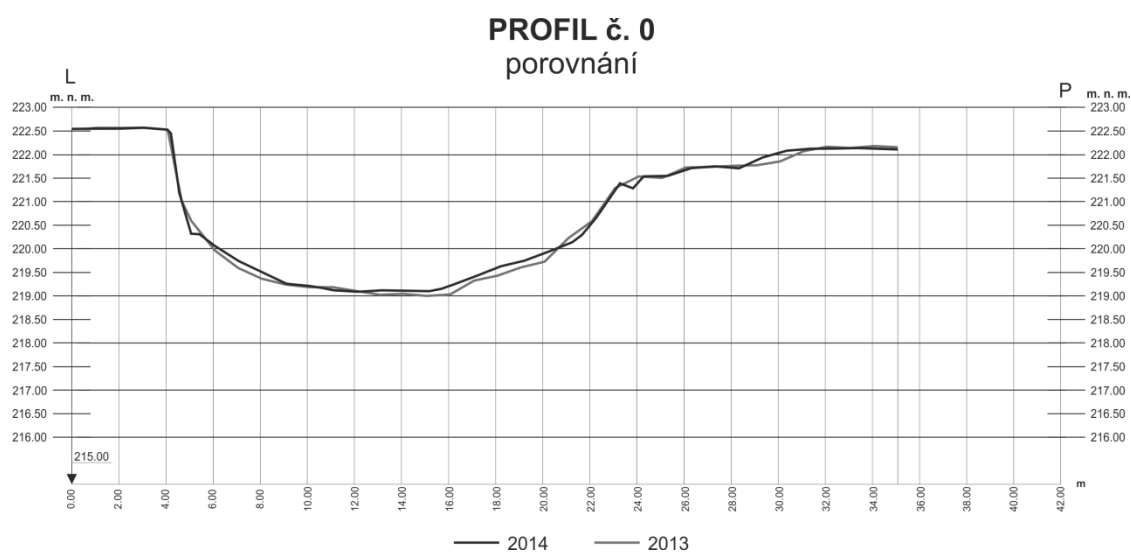
5.1 Profil 0

Profil 0 se nachází necelých 700 m po proudu od jezu Hynkov na konci posledního zákrutu řeky před Kenickým meandrem. Přibližně 110 m nad profilem začíná rozsáhlá centrální lavice, dlouhá okolo 60 m s velkým množstvím říčního dřeva, která rozděluje proud na dvě poměrně mělké větve. Po jejich spojení se koryto prohlubuje až k profilu 0, za ním navazuje zase mělčí úsek. Levý břeh je vysoký a strmý s břehovou nátrží a vzrostlými stromy, které jej stabilizují. Poblíž profilu se na levém břehu nachází výrazná terénní deprese, která je pravděpodobně pozůstatkem koryta z 1. pol. 19. století, kdy v těchto místech protékalo historické koryto (viz obr. 5.2). Potvrzuje to i Digitální katastrální mapa (k. ú. Štěpánov u Olomouce) – v těchto místech vede hranice parcely,

kteřá ohraničuje historické koryto z r. 1830. Pravý břeh je nižší a pozvolný, tvořený velmi mladou nivou pocházející z posledních desetiletí vývoje. Vegetace je zastoupena převážně kopřivami, netýkavkami a svízelem. K nejbližším dřevinám to je od břehu cca 13 m. Přes rozdílnost obou břehů má zde koryto téměř pravidelný tvar.

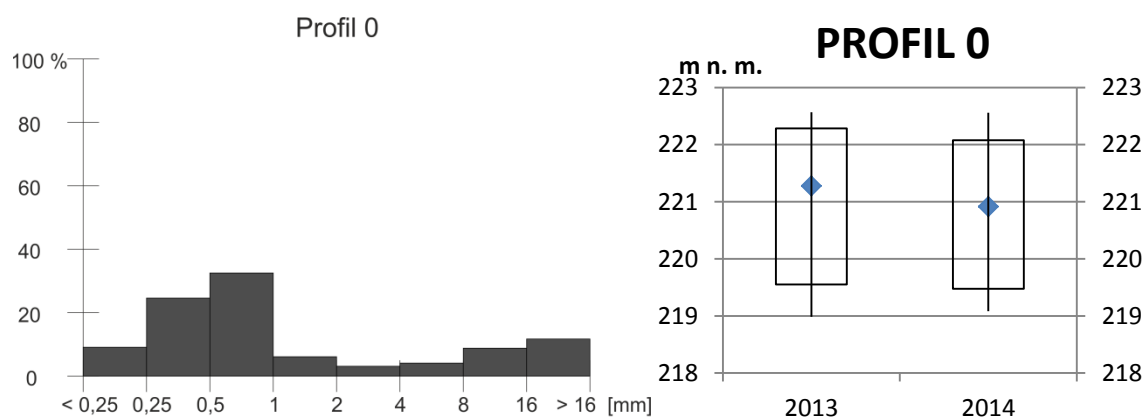


Obr. 5.2 Terénní hrany poblíž profilu 0 (tmavě modře) a průběh Moravy podle mapy II. vojenského mapování (světle modře)



Graf 5.1 Porovnání zaměření profilu 0 v jednotlivých letech

Příčinou je proudnice procházející přibližně středem. Nárazový levý břeh je zde chráněn velkým kusem LWD, který je téměř celý pod hladinou i při nejnižších vodních stavech a drobnými akumulacemi o rozsahu pár m² v jeho bezprostředním okolí. Říční dřevo tak mírní sílu proudění, což se výrazně projevuje na zrnitosti materiálu dna. Ten ve třech čtvrtinách omočeného obvodu od pravého břehu odpovídá rozložení frakcí v odebraném vzorku (graf 5.2). V čtvrtině omočeného obvodu u levého břehu je pevné písčité dno překryto velmi jemnými částicemi dočasně usazenými díky přítomnosti říčního dřeva.



Graf 5.2 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 0

b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 0

Změny koryta v profilu 0 jsou téměř nulové z důvodu absence velkých průtoků. Proto lze vysledovat pouze nepatrné zvýšení dna způsobené ukončením pohybu splavenin v tomto hlubším úseku se slabším prouděním. Po opětovném zvýšení průtoku na dlouhodobý průměr by tento materiál měl být odplaven.

5.2 Profil 1

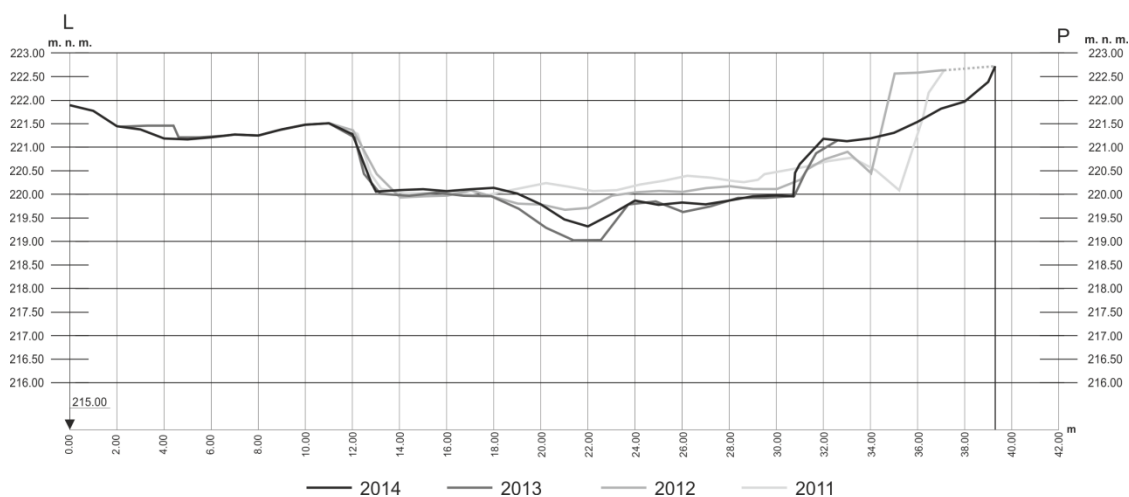
Tabulka 5.1 Ztráty stabilizací bodů profilu 1

Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Levý	2011-2012	povodeň	linie ve stejné přímce, profil prodloužen na levém břehu
Pravý	2012-2013	člověk	posun linie na pravém břehu několik m proti proudu, profil více kolmý na nový směr toku

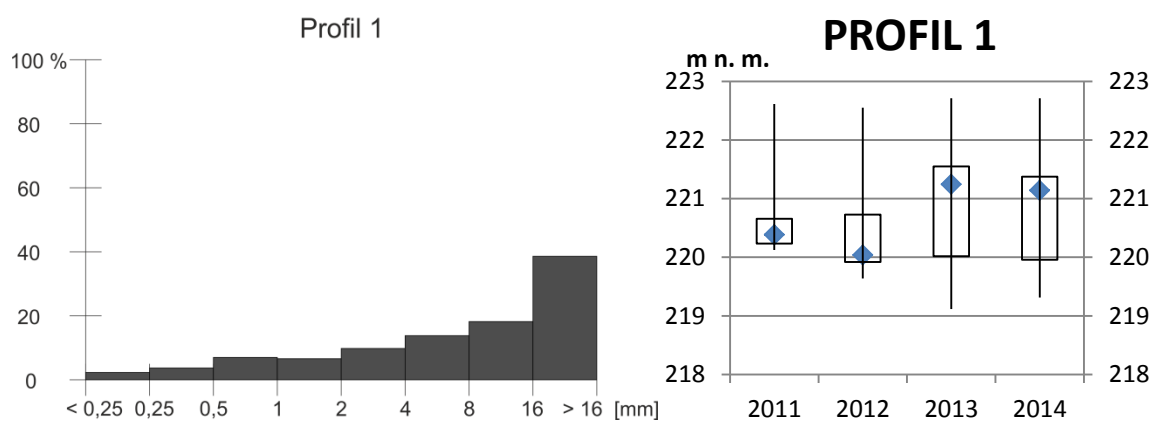
Profil 1 se nachází 40 m před bývalou šíjí Kenického meandru, těsně před místem, kde se nyní koryto větví. Těsně nad profilem 1 se prudce zvyšuje sklon a začíná peřejnatý úsek skrz velké množství LWD a nové koryto meandru. Levý břeh je z velké části pozvolný, ke konci strmý a tvoří jej mladá niva stabilizovaná vegetací. Pravý břeh je porostlý mohutnými stromy a má podobný průběh jako levý, ale plocha nivy leží o necelý

metr výše. Koryto je symetrické, v posledních letech prošlo znatelnými změnami. Dno je díky silnému proudění převážně šterkovité, mezi valouny se zachytává i menší množství písčitých částic. Před protřžením šíje meandru v roce 2012 se proudnice nacházela těsně u levého břehu a bylo zde nejhlubší místo profilu. Dno nebylo členité, směrem k pravému břehu pozvolna stoupalo a u pravého břehu jej pokrývalo množství jemných jílovitých a písčitých sedimentů. Po odškrcení Kenického meandru proudění zesílilo a proudnice se přesunula ke středu koryta. Během 15 měsíců od odškrcení byly odneseny jemné sedimenty o mocnosti 0,3-0,5 m a zpětnou erozí byla vytvořena metrová prohloubenina v oblasti proudnice směrem k bývalé šíji. Mezi sběrem dat v roce 2013 a 2014 se hloubka prohloubeniny sice zmenšila, ale protáhla se více směrem proti proudu – byl tak vyrovnán sklon.

PROFIL č. 1 porovnání



Graf 5.3 Porovnání zaměření profilu 1 v jednotlivých letech (v pravé části nelze přímo porovnávat roky 2011, 2012 s 2013, 2014 kvůli zdlížděnému průběhu)

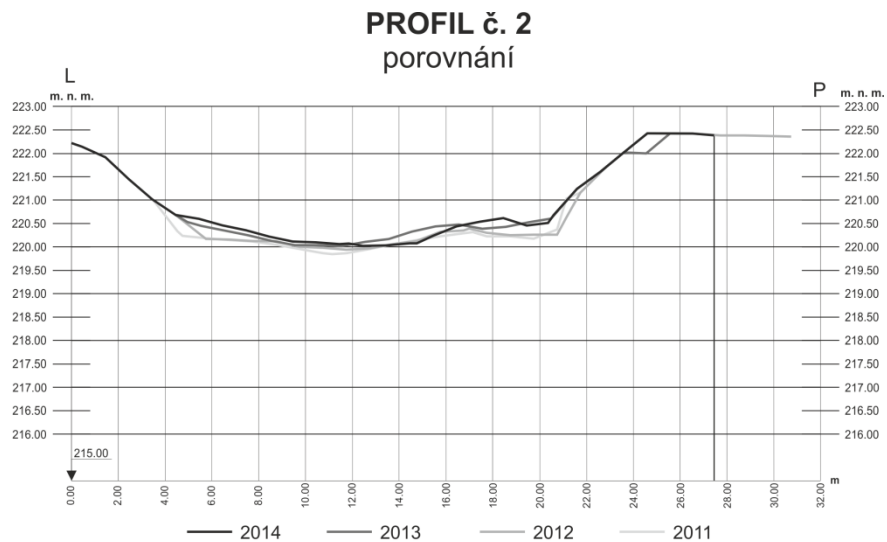


Graf 5.4 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 1
b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 1

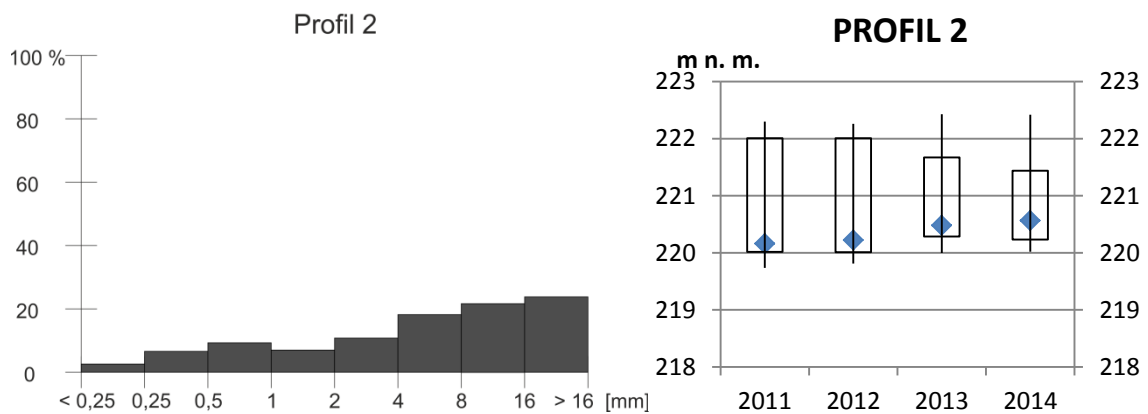
5.3 Profil 2

Tabulka 5.2 Ztráty stabilizací bodů profilu 2

Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Levý	2012-2013	hniloba	nové body téměř na stejných pozicích, linie profilu téměř neovlivněna
Pravý	2012-2013	pád stromu	



Graf 5.5 Porovnání zaměření profilu 2 v jednotlivých letech



Graf 5.6 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 2
b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 2

Profil 2 je prvním profilem ve starém korytě meandru. Nachází se přibližně 40 m za bývalou šíjí, těsně za vyvíjející se vstupní zátkou. Levý břeh je středně strmý s vegetací a vzrostlými keři. Pravý břeh tvoří mírně stoupající šterková náplavová lavice, za kterou se sklon strmě zvyšuje. Před odškrcením šíje se proudnice nacházela přibližně 11 m od levého bodu profilu, dno bylo šterkové se silnou vrstvou jemného materiálu u levého břehu. Díky velmi nízkým průtokům v posledních 16 měsících bylo proudění v profilu 2 utlumeno velmi náhle, což se projevilo na zachování zrnitostního složení dna,

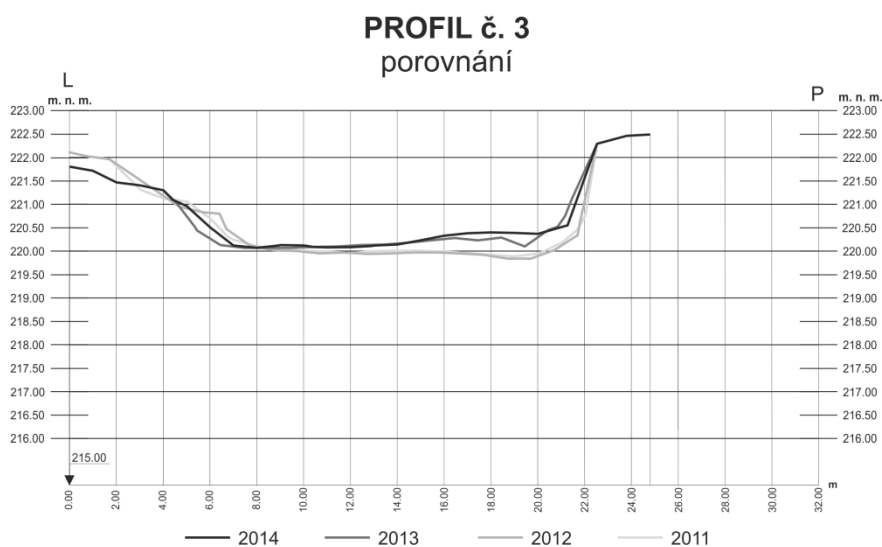
kteří je velmi podobné, jako v případě profilu 1, kde se intenzita proudění po odškrcení téměř nezměnila.

V roce 2011 zde byly podstatně jiné podmínky než nyní – vysoká rychlost proudění a hloubka vody více než půl metru se o tři roky později změnila a téměř suché koryto, kde bahnitá část levého břehu a šterková lavice na pravém břehu byly pokryty tenkou vrstvou jílovitých částic (splach z okolí) a zcela zarostly vegetací. Šířka aktivního koryta bez vegetace tak klesla z původních 16 m na dnešních 6 m.

5.4 Profil 3

Tabulka 5.3 Ztráty stabilizací bodů profilu 3

Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Levý	2012-2013	přemístění	profil byl z důvodu husté vegetace a nemožnosti dalšího zaměření přemístěn přibližně 3 m proti proudu, nelze přímo porovnávat zaměření z let 2011, 2012 a 2013,2014
Pravý	2012-2013	přemístění	
Levý	2013-2014	neznámá	kolík stabilizace nebyl nalezen, nový na téměř stejném místě bez vlivu na linii profilu

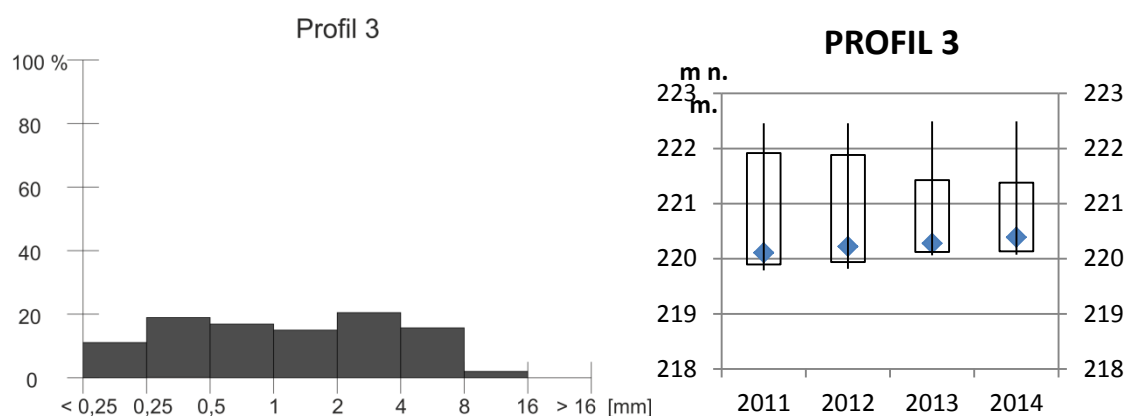


Graf 5.7 Porovnání zaměření profilu 3 v jednotlivých letech

Profil 3 je umístěn přibližně 30 m po proudu od profilu 2. V linii profilu koryto začíná pozvolna přecházet v rozsáhlou tůň. Levý břeh je velmi podobný profilu 2, pravý břeh je ale podstatně strmější, vysoký přes 2 m s břehovou nátrží, stabilizovaný mladými stromy. Tvar je mírně asymetrický daný proudnicí, která se nachází (nacházela) přibližně 12 m od levého bodu profilu. Dno má u levého břehu jílovotopísčitý nános a u pravého břehu hlinitý nános (vypadávající materiál z břehové nátrže), středová část koryta je z jemného

šterkopísku, ale i zde se za poslední rok vytvořila tenká vrstva jílovitých částic. To potvrzuje i zastoupení zrnitostních frakcí ve vzorku sedimentů. Nánosy pocházejí ještě z doby protékání koryta meandru, kdy zde proud ztrácel energii.

V roce 2011 zde končil úsek s rychlým prouděním, v současnosti zde voda při nízkých stavech stojí. Ukončení protékání koryta se zde projevilo také rozšiřující se vegetací v korytě a u levého břehu zvýšenou sedimentací.



Graf 5.8 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 3

b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 3

5.5 Profil 4

Tabulka 5.4 Ztráty stabilizací bodů profilu 4

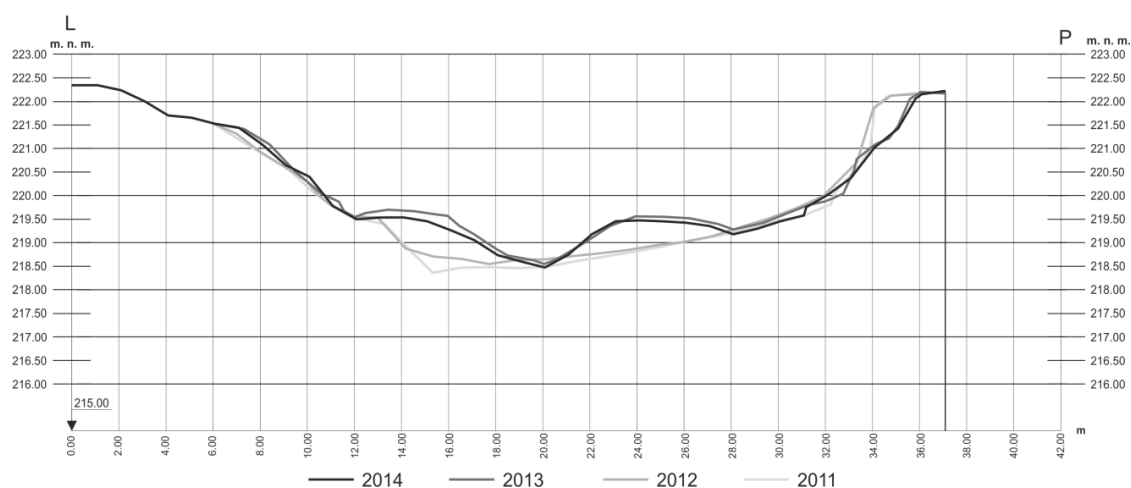
Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Pravý	2012-2013	pád stromu	kolík stabilizace zničen pod spadlým stromem (pokácení bobrem), nový bod stabilizován, minimální vliv na linii profilu

Linie profilu 4 je jedna z nejdelších, protože se zde lokálně rozšiřuje koryto a tvoří malou zátoku, zároveň se začíná stáčet jižním směrem. Levý břeh je mírný, je tu podobná terénní hrana jako u profilu 0. Podle mapy II. vojenského mapování to může být historická břehová linie z 19. století. Pravý břeh téměř kolmý s břehovou nátrží, Mezi zaměřením v roce 2012 a 2013 tu byl bobrem pokácen strom, pod jehož vahou se část břehu sesunula, proto je na grafu 5.13 vidět snížení sklonu pravého břehu. Tvar profilu je asymetrický. Celé dno je pokryto jílovitými částicemi s výrazným zastoupením organických prvků (tlející listí). Proudění tu zcela ustává, proto zde sedimentují i ty nejjemnější částice, které se dosud držely rozptýlené v suspenzi, hrubší materiál se zde nevyskytuje, jelikož byl již deponován dříve.

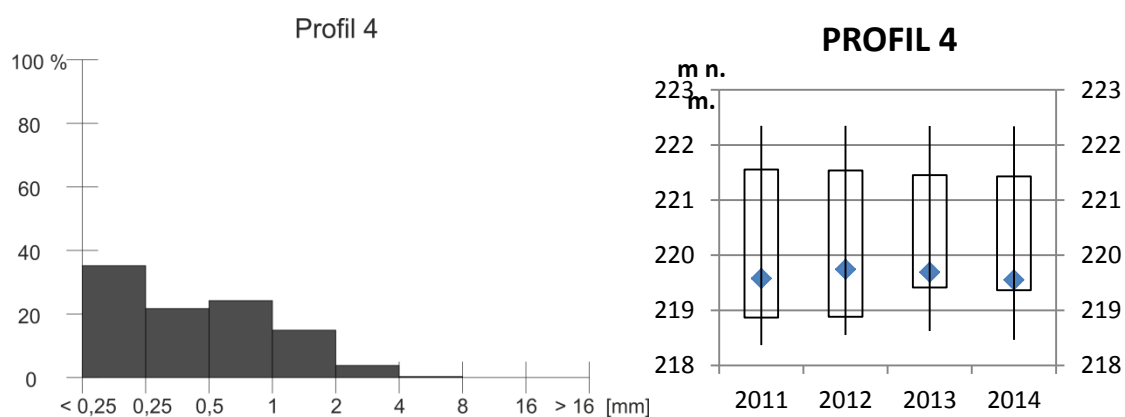
V roce 2011 zde bylo slabé proudění, proudnice byla vzdálena zhruba 8 m od pravého břehu. Tvořilo se zde také významné zpětné proudění a také probíhala sedimentace.

Po protržení šije ustalo už tak slabé proudění a během krátké doby tu bylo uloženo místy až 30 cm nových sedimentů. O rok později to bylo dalších 40-80 cm jemných částic. V oblasti profilu 4 se také nejvíce projeví budoucí četnost protékání opuštěného koryta meandru. V případě přítoku jen několika cm na úrovni profilu 2, zde sedimentace téměř nebude probíhat. Při vyšším přítoku, kdy dojde k většímu přísunu splavenin a plavenin bude sedimentace značná, naopak při povodňových vodních stavech lze očekávat erozi dna, kdy síla proudění překoná kritickou hranici, která je u jemných částic nízká.

PROFIL č. 4 porovnání



Graf 5.9 Porovnání zaměření profilu 4 v jednotlivých letech



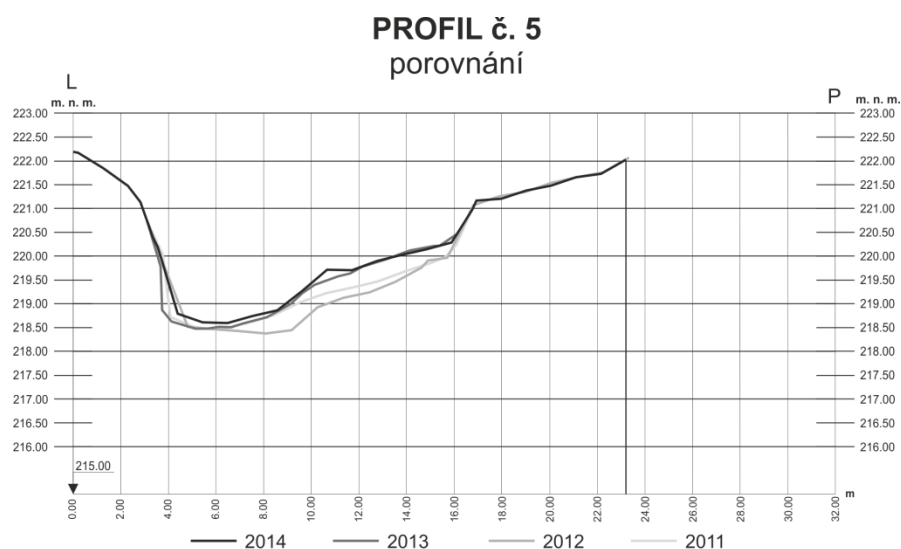
Graf 5.10 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 4

b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 4

5.6 Profil 5

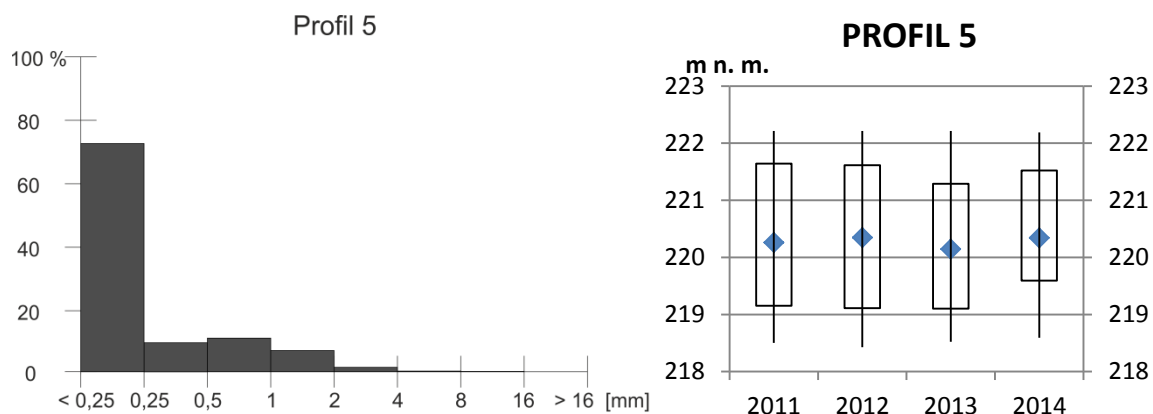
Tabulka 5.5 Ztráty stabilizací bodů profilu 5

Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Levý	2013-2014	hniloba	obnoven na stejném místě



Graf 5.11 Porovnání zaměření profilu 5 v jednotlivých letech

Široké koryto v oblasti profilu 4 se následujících 55 m k profilu 5 prudce zužuje, přičemž hloubka zůstává téměř stejná (značná). Šířka koryta je tu okolo 15 m. Levý břeh je výsepní, strmě klesá až k maximální hloubce. Je zpevněn vzrostlými stromy. Pravý břeh je jesepní, mírnější, tvořící jednu terasu sedimentů vzniklých během vývoje meandru a porostlou bylinnou vegetací. Poblíž profilu se nachází větší množství říčního dřeva včetně několika kusů LWD.



Graf 5.12 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 5

b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 5

V roce 2011 byl úsek v okolí profilu 5 ukázkovým příkladem meandrujícího koryta – tvar břehů, dna i proudnice poblíž levého nárazového břehu. Konec protékání se zde projevil velmi výraznou sedimentací po celém omočeném obvodu. Proto má největší zastoupení v síťovaném vzorku nejjemnější frakce.

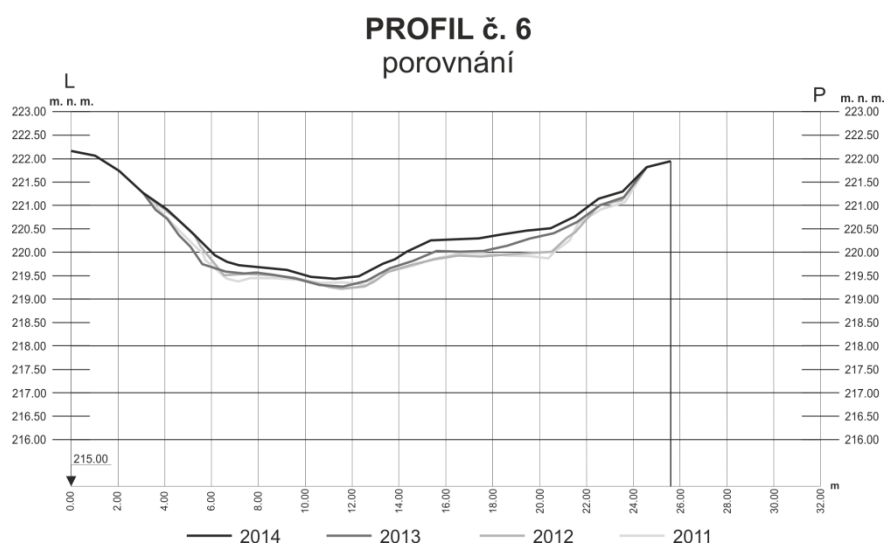
5.7 Profil 6

Tabulka 5.6 Ztráty stabilizací bodů profilu 6

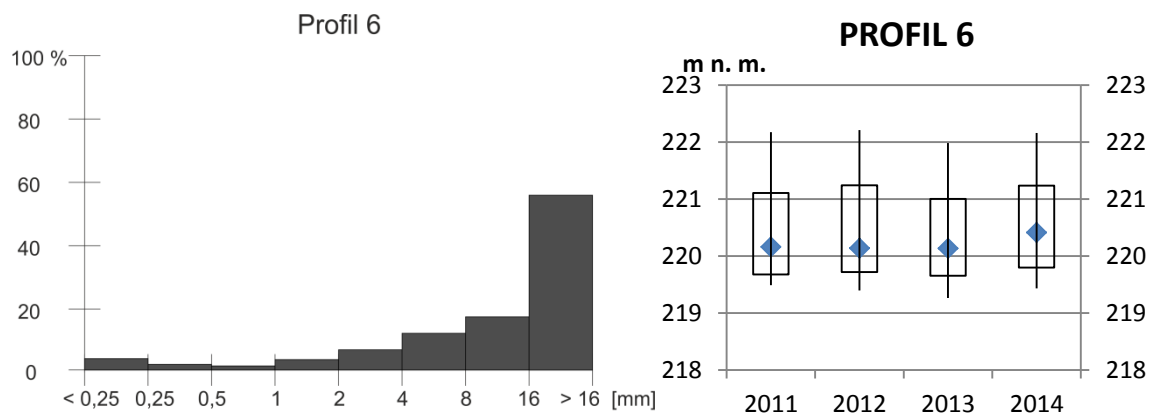
Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Pravý	2012-2013	hniloba	obnoven na stejném místě

Po necelých 80 m byl vytvořen profil 6. Úsek koryta předcházející tomuto profilu je velmi podobný předcházejícímu profilu, avšak přibližně 10 m před a 20 m za profilem 6 se koryto mění na krátký přejezdný úsek. Levý břeh má střední sklon tvořený zborceným břehem nivy. Pravý břeh je tvořen sedimenty, které jsou uspořádány do několika teras, které jsou, nyní i včetně té nejnižší položené, porostlé vegetací. Proudění tu bylo rychlé s velkým sklonem. Tomu přispívala i podélná orientace několika kusů LWD na dně, které přispívá ke stabilizaci boční podvodní lavice a vytvořila v rámci koryta jakýsi opevněný kanál. Proudnice se nacházela přibližně 11 m od levého bodu profilu. Materiál dna odpovídá charakteru dřívějšího proudění – poměr frakcí sedimentů jemnějších než 2 mm je téměř zanedbatelný.

Po protržení šije v roce 2012 se začalo koryto v oblasti profilu 6 zazemňovat. Sedimentace je nejzřetelnější na nejnižší terase pravého břehu – postranní štěrkopískové lavici.



Graf 5.13 Porovnání zaměření profilu 6 v jednotlivých letech

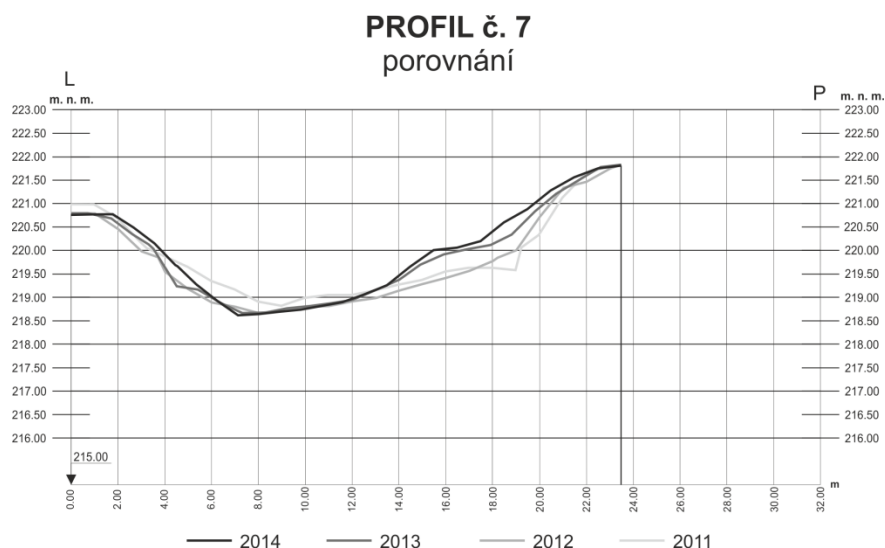


Graf 5.14 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 6
b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 6

5.8 Profil 7

Tabulka 5.7 Ztráty stabilizací bodů profilu 7

Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Levý	2011-2012	povodeň	obnoven na stejném místě
Pravý	2012-2013	hniloba	obnoven téměř na stejném místě, bez vlivu na linii profilu

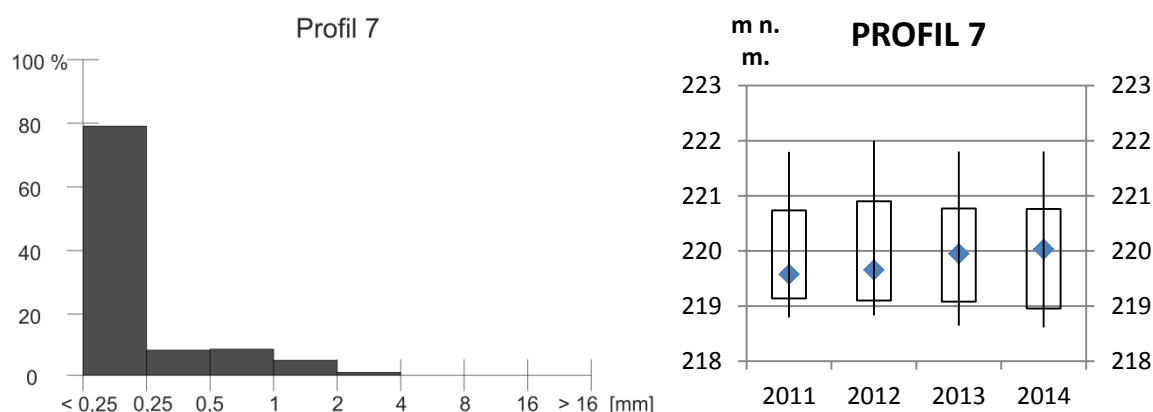


Graf 5.15 Porovnání zaměření profilu 7 v jednotlivých letech

Profil 7 se nachází na úrovni nátoky do Štěpánovské smuhy – levý bod se nachází na jejím dně. V oblasti nátoky do smuhy je koryto bahnitě se středním sklonem, ale jinak je v tomto úseku břeh vysoký přes 2 m, kolmý s břehovou nátrží. Pravý břeh má totožný charakter, jako v předchozích profilech a tvoří jej sedimenty z dřívějšího vývoje meandru porostlé bylinnou vegetací. V případě, že by levý bod byl umístěn na úrovni nivy, byla by

patrná velká podobnost s profilem 5. Povrch dna je tvořen z velké části jemnými sedimenty, kromě oblasti poblíž bývalé proudnice, kde se na dně nachází písek. Tato skutečnost není ve vzorku sedimentů zachycená, protože vzorek nebylo možno odebrat z nejhlubšího místa, ale jen z pravé části profilu.

Při jarní povodni v roce 2012, která způsobila protržení šíje meandru, byly znovu erodovány jemné částice na dně (na porovnání zaměřených profilů lze rozeznat mírné prohloubení koryta). Od té doby se mocnost sedimentů opět zvyšuje, zvláště u pravého břehu.



Graf 5.16 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 7
b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 7

5.9 Profil 8

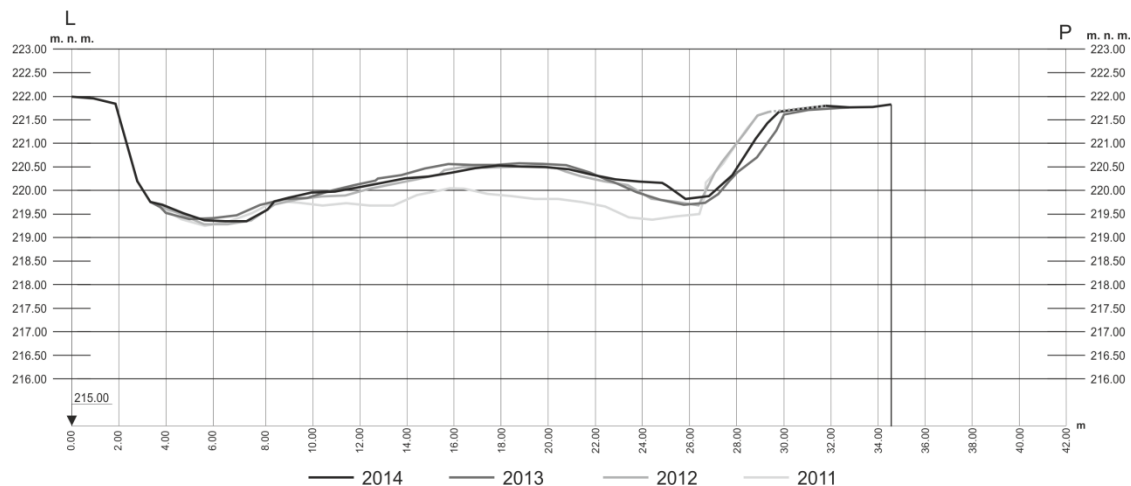
Tabulka 5.8 Ztráty stabilizací bodů profilu 8

Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Pravý	2012-2013	hniloba	obnoven téměř na stejném místě, bez vlivu na linii profilu

Za profilem 7 se v úseku 60 m Kenický meandr stáčí opět více ostře doprava a koryto se zde výrazně rozšiřuje. Necelých 20 m před profilem 8 leží přes celou šířku koryta mohutný spadlý strom. Ten zachytává plovoucí objekty, především odpadky a malé kusy říčního dřeva. Podle pravidel vlivu říčního dřeva na morfologii koryta by pod tímto stromem mělo být koryto lokálně značně prohloubené. Před povodní v roce 2012 se zde proud rozděloval do dvou větví s přibližně stejným prouděním, oddělený podlouhlou centrální lavicí. Střední část linie profilu 8 vede právě přes tuto lavici. Levý břeh je 2 m vysoký, velmi strmý s nátrží, nachází se u něj také jeden kus LWD s malou dřevní akumulací, pravý břeh je podobně strmý, je ale tvořen sedimenty, proto se na něm nenachází břehová nátrž. Tvar profilu je nepravidelný, s dvěma lokálními minimy

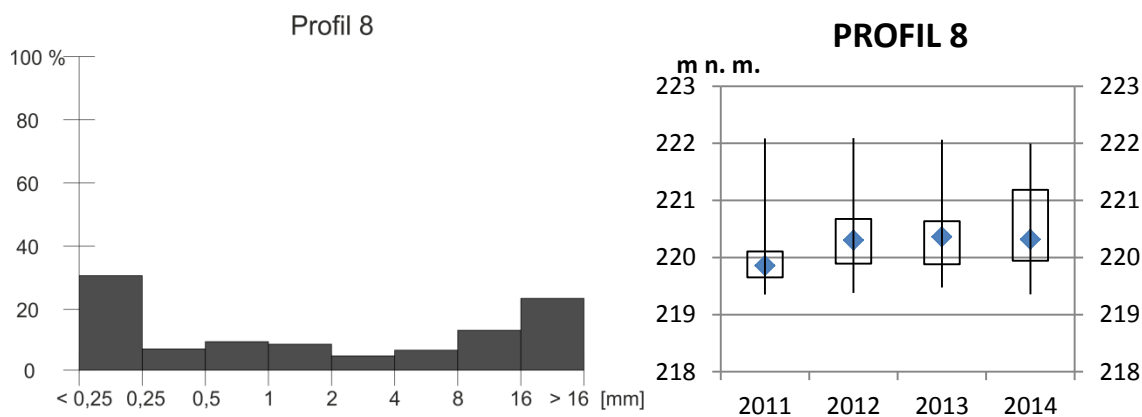
(podle rozdělení proudění). Podíl frakcí materiálu na dně je přibližně vyrovnaný (při rozdělení frakcí < 0,25 a > 16 mm na další intervaly).

PROFIL č. 8 porovnání



Graf 5.17 Porovnání zaměření profilu 8 v jednotlivých letech

Po povodni 2012 bylo na centrální lavici přineseno značné množství sedimentů (o mocnosti až 0,5 m) a částečně pokrylo i pravou příbřežní část koryta, takže proudění zde téměř ustalo (zcela zaniklo během roku 2013) a proudnice se přesunula k levému břehu. Centrální lavice je taky od roku 2013 stabilizována vegetací, která se rozrůstá směrem do koryta, tak jak ustupuje voda.

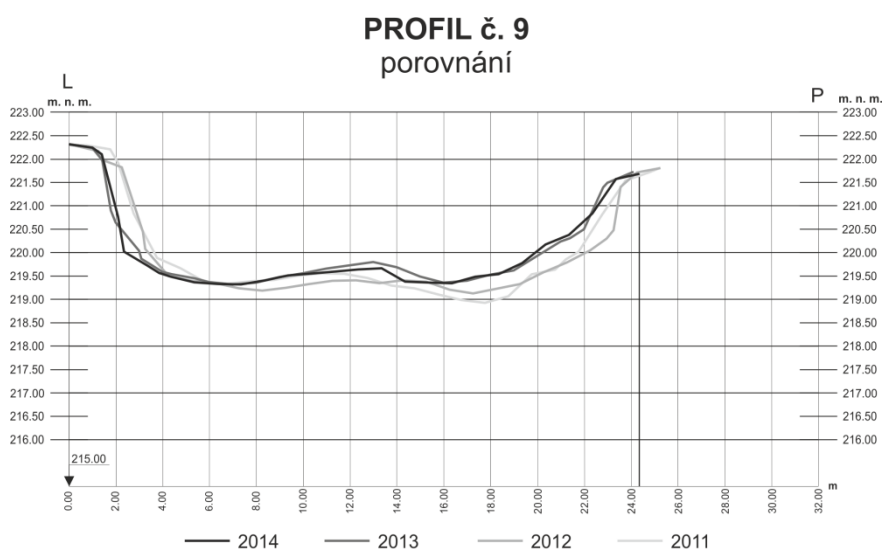


Graf 5.18 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 8
b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 8

5.10 Profil 9

Tabulka 5.9 Ztráty stabilizací bodů profilu 9

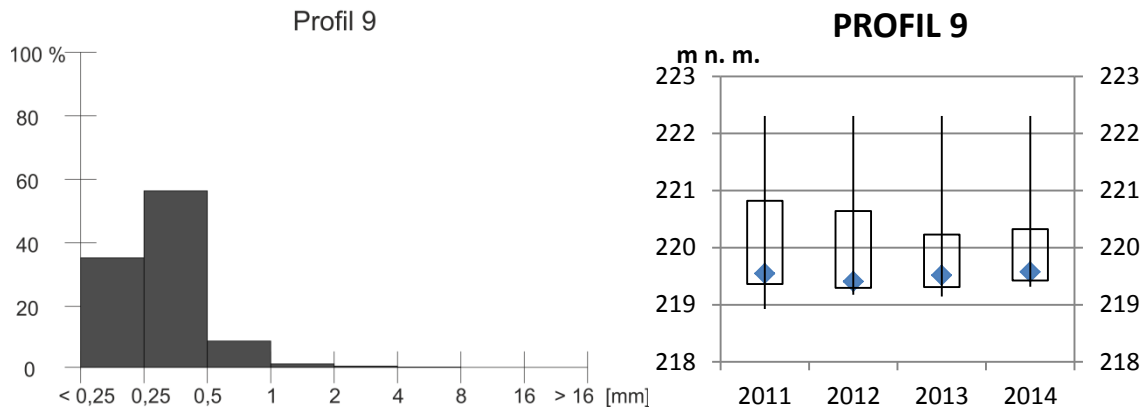
Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Levý	2012-2013	hniloba	obnoven na stejném místě
Pravý	2012-2013	neznámá, pravděpodobně hniloba	obnoven téměř na stejném místě, bez vlivu na linii profilu



Graf 5.19 Porovnání zaměření profilu 9 v jednotlivých letech

Úsek se širokým korytem od profilu 8 pokračuje zhruba 40 m až k profilu 9, kde je u levého břehu několik velkých kusů LWD. Levý i pravý břeh jsou velmi strmé, vysoké 2 resp. 1,5 m.

V roce 2011 se proudnice nacházela poblíž pravého břehu – rozdělení průtoku na dvě větve poblíž profilu 8 se spojovalo nedaleko profilu 9 (lokální maximum uprostřed profilu je pokračování lavice z profilu 8 pod hladinou). Po povodni 2012, kdy byla pravá větev prakticky odstavena, se proudnice přesunula k levé straně. To zapříčinilo větší usazování v pravé a centrální části koryta a dočasnou erozi v části levé. Později proudění ustávalo i v levé části koryta a nyní je celé dno pokryto vrstvou jemných částic. Jejich nesilnější vrstva se nachází u pravého břehu, kde byl také odebrán vzorek sedimentů.

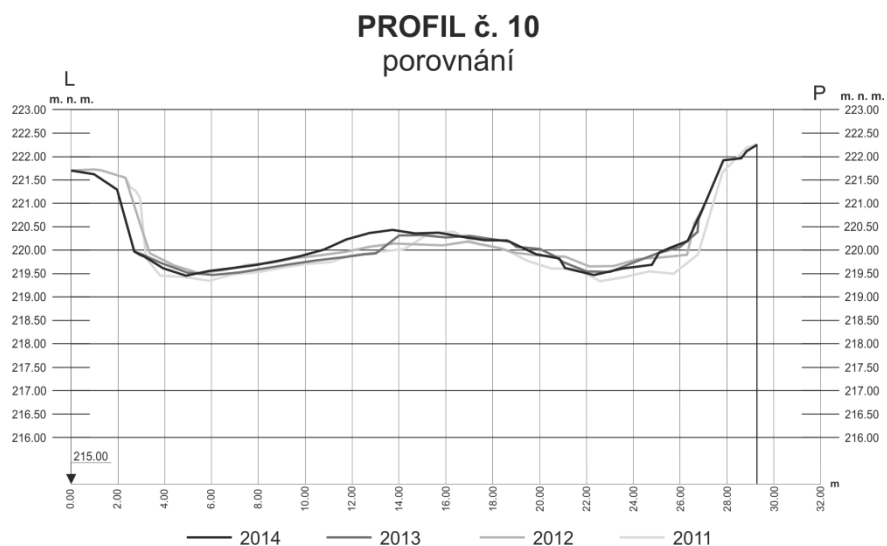


Graf 5.20 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 9
b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 9

5.11 Profil 10

Tabulka 5.10 Ztráty stabilizací bodů profilu 10

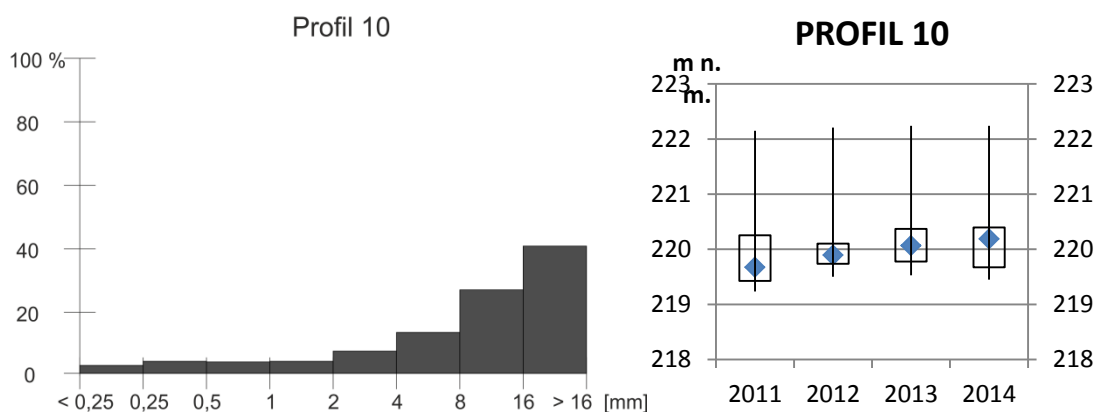
Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Levý	2012-2013	hniloba	obnoven na stejném místě
Pravý	2013-2014	hniloba	obnoven na stejném místě



Graf 5.21 Porovnání zaměření profilu 10 v jednotlivých letech

Profil 10 je posledním před bývalou šíjí (cca 50 před ní). Oba břehy mají velký sklon, levý břeh je podemletý. Profil je téměř souměrný s centrální lavicí, která je stabilizovaná vegetací. Lavice rozdělovala koryto na dvě odlišné části – dynamickou levou část se šterkopískovým, kde se nacházela proudnice a pravou část téměř bez proudění s bahnitým

dnem. Po povodni 2012, kdy voda odnesla část centrální lavice, se začal na tomto místě opět hromadit materiál a to i v oblasti pod pravým břehem. Od roku 2014 je na stále se zvyšující lavici přítomna také vegetace. Pod levým břehem v místě bývalé proudnice je stále šterkopískové dno, i když pokryté tenkou a nevýznamnou vrstvou jemnějších částic.



Graf 5.22 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 1é

b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 10

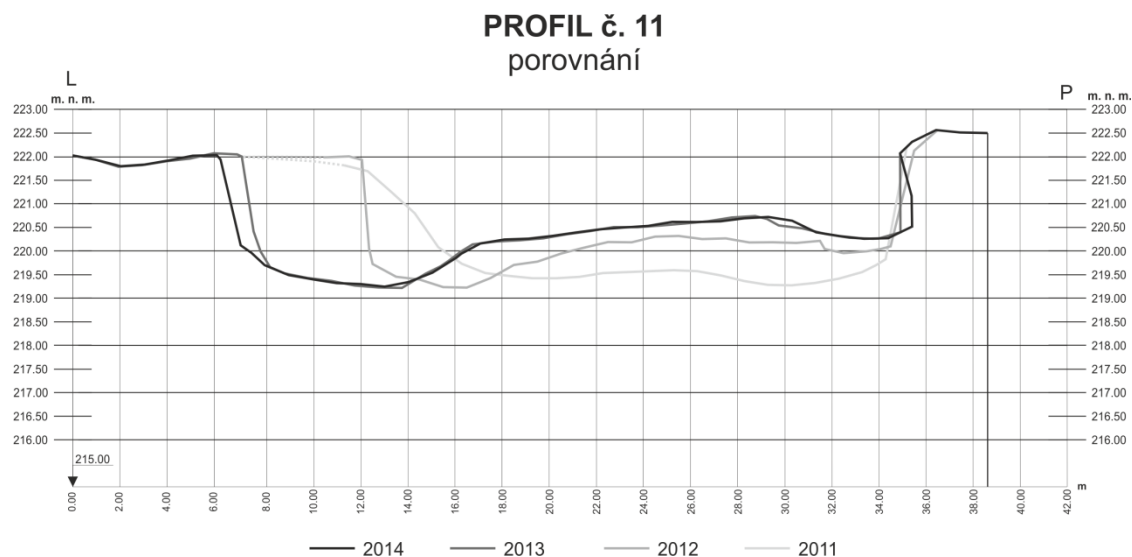
5.12 Profil 11

Tabulka 5.11 Ztráty stabilizací bodů profilu 11

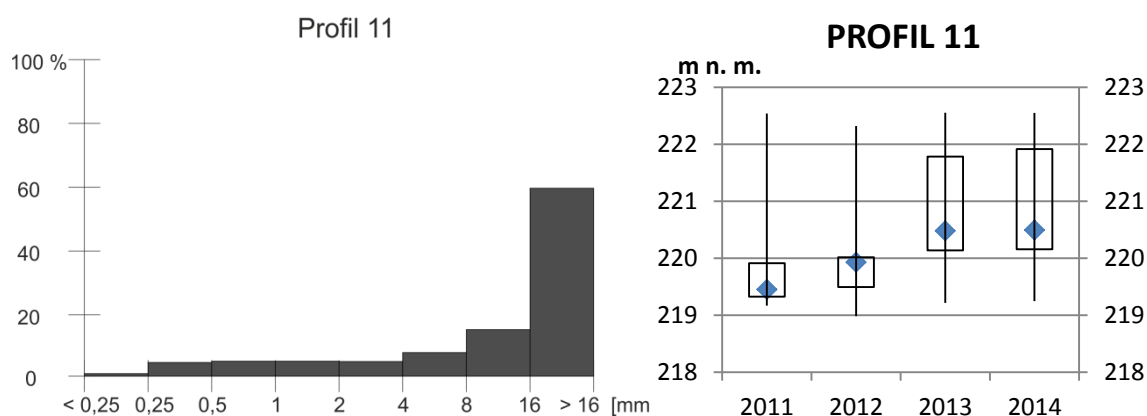
Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Levý	2011-2012	eroze	obnoven o něco dále na téměř stejné přímce, minimální vliv
Levý	2012-2013	eroze	obnoven o něco dále na stejné přímce, ještě před úplným zničením původního bodu
Pravý	2012-2013	člověk	obnoven o něco vedle na méně nápadném místě

Profil 11 se nachází přibližně 35 m po proudu za bývalou šíjí Kenického meandru. Je to profil, který od roku 2011 prošel za tři roky bouřlivým vývojem. Před odškrcením meandru zde byl středně strmý levý břeh vysoký 2 m porostlý vegetací, který přecházel v relativně rovné koryto s největší hloubkou a proudnicí těsně se přimykajícím k pravému břehu. Pravý břeh byl téměř svislý a vysoký téměř 3 m porostlý stromy zvolna se hroutícími do koryta. Povodeň v roce 2012 za sebou zanechala velké změny – především se proudnice přesunula na úplně opačnou stranu, těsně k levému břehu. Původní pozvolný levý břeh byl za necelé dva měsíce odnesen a koryto se rozšířilo o téměř 4 m. Z podstatné části původního dna vznikla rozsáhlá pravostranná šterkopíková lavice, která obsahuje valouny o průměru až 10 cm. Zde se úroveň terénu zvýšila v průměru o 50 cm. Materiál pochází pravděpodobně z původní šíje meandru. Jelikož je levý břeh nezpevněný dřevinami, pokračovala eroze dále. Mezi květnem 2012 a červnem 2013 ustoupil břeh o dalších 4,5 metru, protékaná část koryta se rozšířila a lavice na

pravé straně se zvýšila o dalších průměrně 30 cm. Po tomto období následoval rok bez větších průtoků, proto se vývoj tohoto profilu zbrzdil. Levý břeh pouze zmírnil svůj sklon (i tak ve vrcholové části ustoupil o další metr) a na nově vzniklé šterkové lavici se uchytila vegetace.



Graf 5.23 Porovnání zaměření profilu 11 v jednotlivých letech



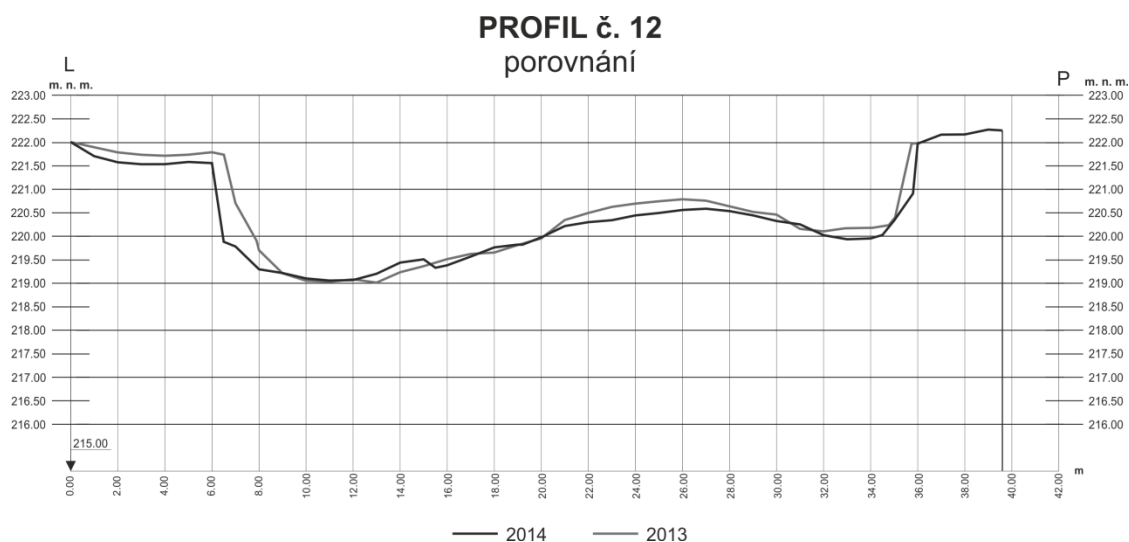
Graf 5.24 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 11

b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 11

5.13 Profil 12

Tabulka 5.12 Ztráty stabilizací bodů profilu 12

Břeh	Období ztráty	Příčina	Vliv nového bodu na linii profilu
Pravý	2013-2014	člověk	obnoven poblíž s velmi malým vlivem na linii profilu

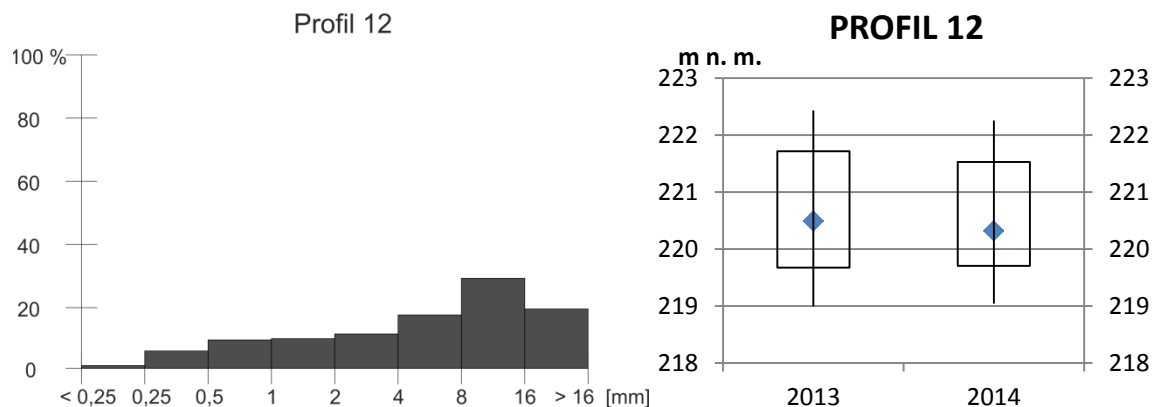


Graf 5.25 Porovnání zaměření profilu 12 v jednotlivých letech

Profil 12 byl stabilizován necelých 20 m za profilem 11 v roce 2013 v reakci na silné změny pod protrženou šíjí meandru. Záměrně byla vybrána linie pod místem, kde jez levého břehu do koryta nakloněn strom téměř ve vodorovné poloze, který svými větvemi ovlivňuje proudění těsně nad profilem. Břehy a dno mají téměř stejnou charakteristiku jako v případě profilu 11, podobný bude i vývoj před rokem 2013 (i když nezdokumentovaný). Lavice u pravého břehu je však zde spíše písčité než štěrková, na okraji lavice ve vodě jsou dokonce velmi jemné písčité, až jílovité částice, kvůli větvím stromu v korytě, odklánějící proudění. Také vzorek sedimentů má nižší zastoupení nejhrubější frakce. Na křivce profilu v roce 2014 je mezi 13 a 15 metrem vidět „boule“, což je místo za dotykem větve, kde jsou ukládány splaveniny.

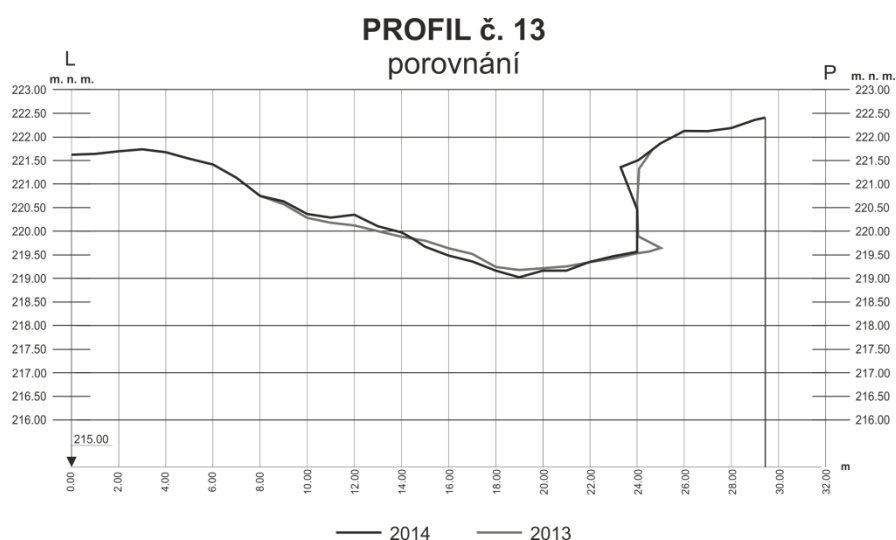


Obr. 5.3 Strom u profilu 12 ovlivňující proudění v zimě 2014



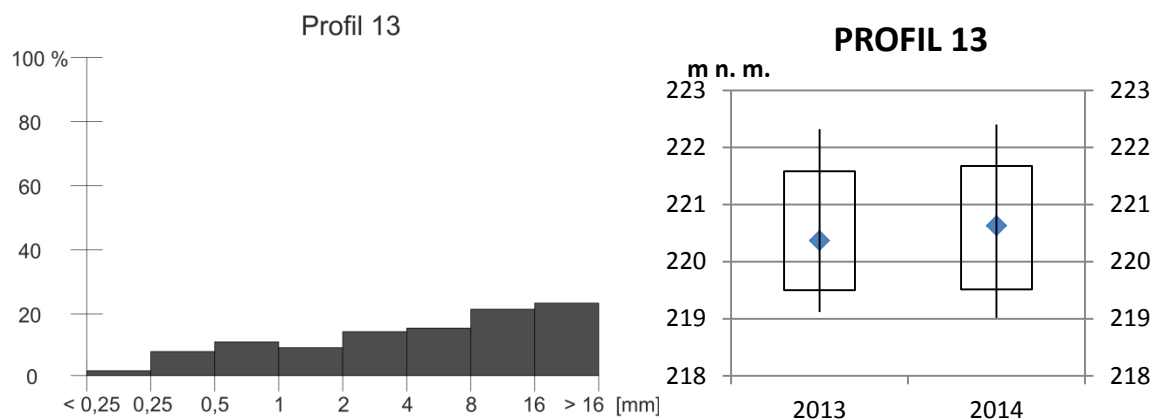
Graf 5.26 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 12
b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 12

5.14 Profil 13



Graf 5.27 Porovnání zaměření profilu 13 v jednotlivých letech

Profil 13 je umístěn nejvíce po proudu. Za profilem 12 se proudnice odklání od levého břehu, přechází doprostřed koryta ve formě brodu a následně se, za přítomnosti několika kusů říčního dřeva a LWD, přimyká k pravému břehu. Zde se přestává projevovat přímá změna typu koryta vyvolaná protržením šije. Levý břeh je mírně skloněný pokrytý staršími usazeninami a stabilizovaný vegetací. Plynule přechází v konec úzké a nedlouhé boční šterkové lavice. Pravý břeh je velmi strmý s přibližně půlmetrovým převisem zeminy a podtržením břehu. Na úrovni nivy rostou na pravém břehu velmi staré stromy. Tvar profilu je výrazně asymetrický s proudnicí u pravého břehu. Materiál dna je proměnlivý, kdy se v krycí vrstvě nachází hrubozrnný materiál vyplněný jemnějšími písčitémi sedimenty.



Graf 5.28 a) Procentuální zastoupení hmotnosti frakcí vzorku dnového materiálu profilu 13

b) Krabicový graf nadmořských výšek profilu 13

Mezi lety 2013 a 2014 nebyly zaznamenány výraznější změny (v grafu porovnání 5.27 nebyl jeden rok zaznamenán převis, další rok podtržení břehu – oba prvky však existovaly po celou dobu). Při povodňových průtocích však tento profil potenciálně ke změnám má.

6 BUDOUCÍ VÝVOJ LOKALITY

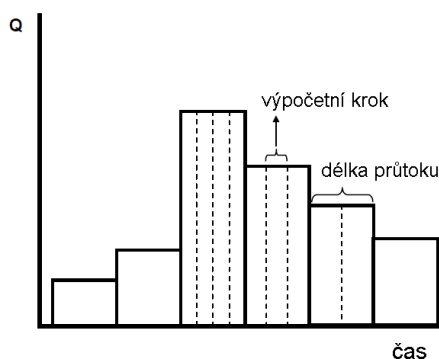
6.1 Postup modelování v HEC-RAS

HEC-RAS nebo-li Hydrologic Engineering Center – River Analysis System je jednodimenzionální hydrodynamický model, který lze využít k modelování ustáleného a neustáleného proudění, transportu sedimentů nebo jakosti vody. Model je vyvíjen US Army Corps of Engineering a je spolu s dokumentací volně ke stažení na webových stránkách centra. Nejnovější verze je 4.1.0 z ledna 2010. Hydrologic Engineering Center vyvíjí i další software zaměřený na hydrologické modelování: srážko-odtokový model HEC-HMS, model pro stanovení škod po povodních HEC-FDA apod. HEC-RAS je rozšířený model s kvalitně popsanou dokumentací, proto byla vybrána jeho analýza transportu sedimentů pro modelování vývoje příčných profilů Kenického meandru.

6.1.1 Vstupní soubory

Každý projekt v software HEC-RAS je složen z několika souborů stejného názvu se specifickou příponou označující druh souboru. Všechny soubory jsou uloženy jako textové, je proto možné je otevřít v libovolném textovém editoru a ručně měnit jejich hodnoty. Základním je **soubor projektu** *.prj – v něm jsou definovány ostatní vstupní a výstupní soubory projektu, fyzikální jednotky, ve kterých model počítá a další parametry potřebné pro chod projektu (např. časový úsek simulace). Druhým základním souborem, jenž musí být vytvořen pro provedení jakékoli simulace v HEC-RAS je **soubor geometrie** (*geometry file*) s příponou *.g0n – n ve všech příponách souboru značí pořadové číslo souboru. K projektu lze přiřadit více souborů stejného typu, model však dokáže pracovat jen s jedním. Soubor geometrie koryta obsahuje seznam modelovaných úseků, jejich návaznost, souřadnice jejich lomových bodů, ke každému úseku jejich příčné profily (polohu, výšku bodů profilu, Manningovo číslo a vzdálenost k dalšímu profilu). Ostatní soubory jsou nepovinné, respektive pro každý druh analýzy jsou potřeba jiné. Následující soubory jsou povinné pro analýzu transportu sedimentů.

Soubor **kvazi neustáleného proudění** (*quasi unsteady flow*) s příponou *.q0n. V souboru se nastavují okrajové podmínky proudění – horní okrajová podmínka definovaná časovou řadou průtoků (*flow series*). Časová řada průtoků je založena na sérii ustáleného proudění, které je rozděleno do zadaného množství výpočetních kroků (*computation increment*). Po spuštění simulace vypočítá model změny pro daný výpočetní krok a ty pak vstupují do dalšího kroku. Při nízkých průtocích, kdy nejsou očekávány změny koryta, je dobré nastavit větší výpočetní krok, naopak při vyšších průtocích je vhodné stanovit menší výpočetní kroky. Ty vedou k větší stabilitě modelu, ačkoli výpočetní čas bude delší (BRUNNER 2010b).



Obr. 6.1 Graf kvazi neustáleného proudění (BRUNNER, 2010b)

Dolní okrajová podmínka může být definována sklonem hladiny (*normal depth*), časovou řadou hloubek (*stage series*) nebo konsumpční křivkou (*rating curve*). Horní okrajová podmínka se vždy přiřazuje profilu nejvýše po proudu, dolní okrajová podmínka se přiřazuje nejnižšímu profilu. Dále lze volitelně přidat libovolný počet mezilehlých profilů, kterým lze určit boční časovou řadu průtoků (*lateral flow series*) nebo stálý boční přítok (*uniform lateral flow*). Díky těmto dvěma parametrům lze uvažovat i přísun vody z okolního terénu např. při přívalových srážkách. Jelikož v některých funkcích určujících míru sedimentace je jednou z proměnných teplota, je potřeba vytvořit i časovou řadu teplot ve stejně dlouhém období, jako je časová řada průtoků.

Soubor sedimentů (*sediment file*) má příponu *.s0n. Definují se v něm křivky zrnitosti podle Wentworthovy škály pro vzorky sedimentů. Tyto vzorky jsou přiřazovány jednotlivým příčným profilům. Pro simulaci velmi důležité je také výběr transportní funkce (*transport function*), výběr metody třídění (*sorting method*) a sedimentační rychlost (*fall velocity method*). Podrobný popis jednotlivých metod a funkcí se nachází v Reference Manual pro HEC-RAS (BRUNNER, 2010b). Výběr vhodné transportní funkce se řídí podle jejich doporučených okrajových podmínek (tab 6.1).

Tab. 6.1 Okrajové podmínky transportních funkcí pro výpočet analýzy sedimentů (d – průměr zrna, d_m – střední průměr zrna, v – rychlost, h – hloubka, i – sklon, W – šířka koryta, T – teplota)

Funkce	d [mm]	d_m [mm]	v [m/s]	h [m]	i	W [m]	T [°C]
Ackers-White	0,04-7	N/A	0,021-2,164	0,3-0,427	0,00006-0,037	0,07-1,22	7,7-31,6
Englund-Hansen	N/A	0,19-0,93	0,198-1,932	0,058-0,405	0,000055-0,019	N/A	7,2-33,8
Laursen	N/A	0,08-0,7	0,021-2,865	0,009-16,459	0,0000021-0,0018	19,2-1109,4	0-33,8
Meyer-Peter-Müller	0,4-29	N/A	0,366-2,865	0,009-1,189	0,0004-0,020	0,15-2,01	N/A
Toffaletti	0,062-4	0,095-	0,213-	0,021-	0,000002-	19,2-	0-33,8

		0,76	2,377	17,282	0,019	1109,4	
Yang	0,15-7	N/A	0,244- 1,951	0,012- 15,240	0,000043- 0,029	0,13- 533,4	0-34,4
Wilcock	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

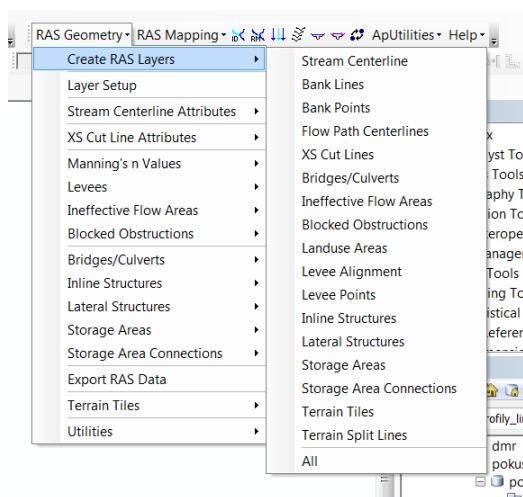
Pro výběr metody třídění jsou dvě možnosti: Exner 5 a Active Layer. První uvažuje tři vrstvy sedimentů – krycí, podpovrchové a neaktivní. Active Layer počítá se dvěma vrstvami – aktivní a neaktivní (BRUNNER, 2010b). K výběru pro výpočet sedimentační rychlosti je na výběr Rubeyho metoda je založena na analytickém přístupu, Toffaletiho metoda využívá empirické křivky sedimentační rychlosti závislá na teplotě a velikosti částice, Van Rijnova metoda aproximace křivky pro částice s různým tvarovým součinitelem a poslední metoda Report 12, která je podobná Van Rijnově a používá sedimentační rychlost pro iterativní výpočet nového Reynoldsova čísla (BRUNNER, 2010b).

Poslední věcí vyžadovanou pro úplný soubor sedimentů je stanovení okrajových podmínek sedimentů. Horní okrajová podmínka je nastavena automaticky jako *Equilibrium Load* (v každém časovém kroku je počítána kapacita transportu sedimentů jako přítok splavenin, v profilu nedochází ke změnám). Lze však přidat další profily, kterým lze přiřadit okrajové podmínky *Rating Curve* (určuje přítok splavenin na základě průtoku) a *Sediment Load Series* (určuje spolu s *Rating Curve* také časovou řadu přítoku sedimentů).

Výpočetní soubor s příponou *.p0n nastavuje podmínky, tolerance, výstupy a spuštění výpočtu.

6.1.2 Příprava a vkládání dat

Příprava dat pro model probíhala zčásti v prostředí ArcGIS for Desktop a extenzi HEC-GeoRAS, zčásti v modelu HEC-RAS a zčásti také přímou editací projektových souborů. Všechna data byla vkládána a editována zvlášť pro aktivní koryto Moravy (profily 0, 1 a 11-13) a zvlášť pro Kenický meandr (profily 2-10), protože HEC-RAS v současné verzi neprovádí analýzu sedimentů pro více paralelních koryt. Pro tvorbu souboru geometrie byla vybrána aktuální středová linie, linie břehů a linie příčných profilů a jejich geometrie byla nakopírována do odpovídajících předem vytvořených vrstev extenzi Geo-RAS. Ještě před tím však bylo potřeba zkontrolovat orientaci linií v datové struktuře tak, aby středová linie a linie břehů směřovala po proudu a aby linie profilů směřovala vždy z levého břehu na pravý. Po těchto úpravách a vyplnění požadovaných atributů byly geometrické soubory exportovány do výměnného formátu *.sdf. Z důvodu chybějícího DMR v požadované přesnosti a nemožnosti jeho vytvoření bylo upuštěno od vytváření 3D křivek profilů a ty byly později vyneseny přímo v HEC-RAS.



Obr. 6.2 Toolbar extenze GeoRAS a menu tvorby vrstev

Před samotným importem souboru geometrie z ArcGIS do HEC-RAS bylo nutné přenastavit ve Windows oddělovač desetinných míst na tečku a nastavit jednotky fyzikálních veličin z výchozího amerického systému na jednotky SI. Po vytvoření a uložení nového projektu bylo možné importovat geometrická data. V průvodci lze provést některá nastavení (fyzikální jednotky, úseky řek, staničení, vynechání určitých vrstev apod.) a následně data importovat.

Následovalo vyplnění staničení všech profilů a jejich nadmořských výšek, Manningova čísla pro koryto, levou a pravou inundaci. Manningovo číslo se běžně určují podle katalogů řek nebo tabulek s popisem. K jeho určení byla použita tabulka v Reference Manual pro HEC-RAS (BRUNNER, 2010b) a Katalog drsností pro české řeky od VUT Brno (SMELÍK, 2012). Pro koryto se Manningovo číslo pohybovalo od 0,036 do 0,048 podle členitosti profilu, charakteru proudění a množství říčního dřeva. Pro inundaci v závislosti na pokryvu bylo Manningovo číslo 0,1 pro místa se stromy a 0,06 pro místa s bylinnou vegetací. Délka břehů a středové linie k dalšímu profilu a také vzdálenost okraje koryta od konce profilu byly vyplněny automaticky z břehové čáry. Po uložení souboru geometrie by následovalo vyplnění souboru sedimentů, ale při otevírání okna se vždy (pokud se v projektu nacházel soubor s importovanou geometrií z ArcGIS) objevila chybová hláška:

```
Run-time error '9': Subscript out of range
```

Okno pro zadávání parametrů souboru sedimentů se sice zobrazilo, ale nereagovalo a bylo proto nutné celý HEC-RAS vypnout a následně ve Správci úloh ukončit pohrobka programu proces *ras.exe*.

Po prohledání různých internetových fór a manuálu nebylo nalezeno řešení chyby, jako možná příčina byly označovány záporné souřadnice v systému S-JTSK EastNorth. Chybu bylo proto nutné obejít. Byl vytvořen nový projekt s prázdným souborem geometrie. Ruční editací tohoto souboru v textovém editoru (přepsání hlavičky a překopírování geometrie z předchozího souboru) a uložení vzniknul funkční soubor geometrie, ke kterému již šlo otevřít soubor sedimentů.

V souboru sedimentů byly nejprve zadány křivky zrnitosti pro všechny vzorky sedimentů a pak přiřazeny profilům. Dále byly profilům určeny body, za kterými už nedochází ke změnám koryta a místní erozní báze (maximální hloubka eroze). Výběr transportní funkce se řídil doporučeními v tabulce 6.1: pro aktivní koryto byla vybrána funkce Meyer-Peter-Müller (nesplňuje sice parametr hloubky, ale jako jediná splňuje parametr průměru zrna), pro koryto meandru byla vybrána funkce Yang (celkově menší zrnitost sedimentů v meandru). Metoda třídění byla zvolena *Exner 5* pro obě části zájmové oblasti, pro výpočet sedimentační rychlosti byl zvolen Rubeyho přístup, kvůli vhodnosti pro bahnité, písčité i štěrkovité částice (BRUNNER,2010b), který je i v defaultním nastavení modelu. Jako okrajová podmínka byla ponechána defaultní *Equilibrium Load*.

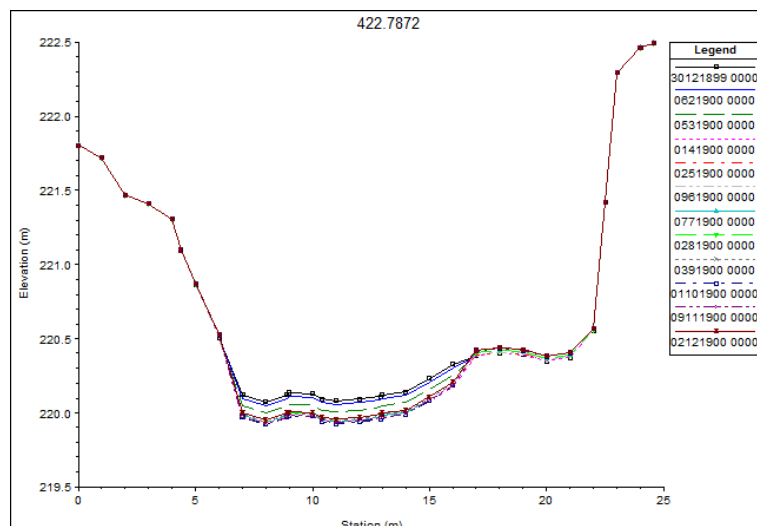
Posledním potřebným souborem pro provedení analýzy sedimentů je soubor kvazi neustáleného proudění. Byly sestaveny celkem dva tyto soubory. První soubor představující horní okrajovou podmínku jako suché období bez povodní na základě měřených dat z roku 2013. Druhý soubor představuje jarní povodeň z roku 2012, během které došlo k protržení šíje. *Computation inkrement* byl nastaven podle vodního stavu. Při nejvyšších byl 0,01, při nižších průtocích byl postupně zvyšován a pod $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ byl nastaven jako doba trvání průtoku (tj. jedna iterace za období). Jako dolní okrajová podmínka byl nastaven sklon hladiny (*normal depth*).

6.2 Výsledky

Po spuštění a proběhnutí analýzy lze nalézt příčné profily ve View => Sediment – XS Bed Change Plot, kde lze najít výsledek pro jednotlivé kroky kvazi neustáleného proudění. V záložce View lze také prohlížet stejné výsledky jako u Analýzy ustáleného proudění (např. rozlivy, výšku hladiny).

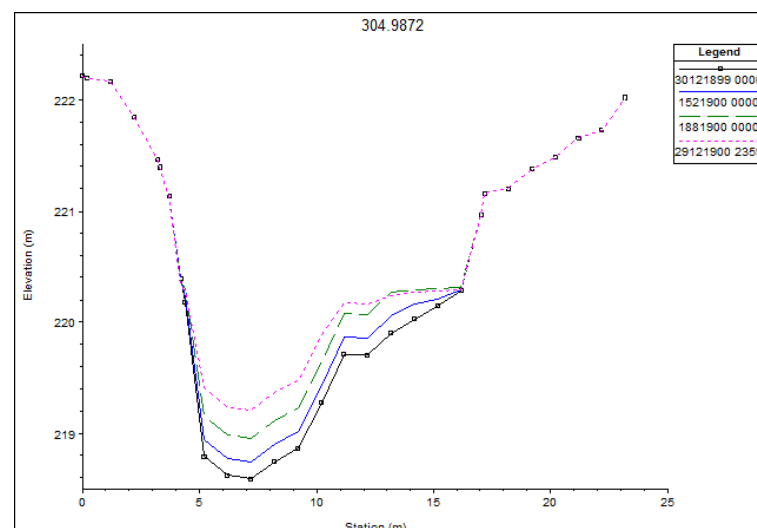
6.2.1 Vstupní řada průtoků odpovídající roku 2013

Časová řada vytvořená podle průtoků zaznamenaných v roce 2013 byla nejprve spuštěna pro oblast meandru. Jelikož nebylo uvažováno, že se průtoky skrz šíji a do meandru dělí, má tato simulace v meandru představovat spíše průměrný než suchý rok. Jelikož je profil 2 vstupním profilem do analýzy, nevykazuje žádné změny. Profil 3 při jarním zvýšení hladiny se ve své nejhlubší části zahlubuje o 10-15 cm a ve zbytku období se střídá eroze s akumulací v závislosti na průtocích



Obr. 6.3 Vývoj profilu 3

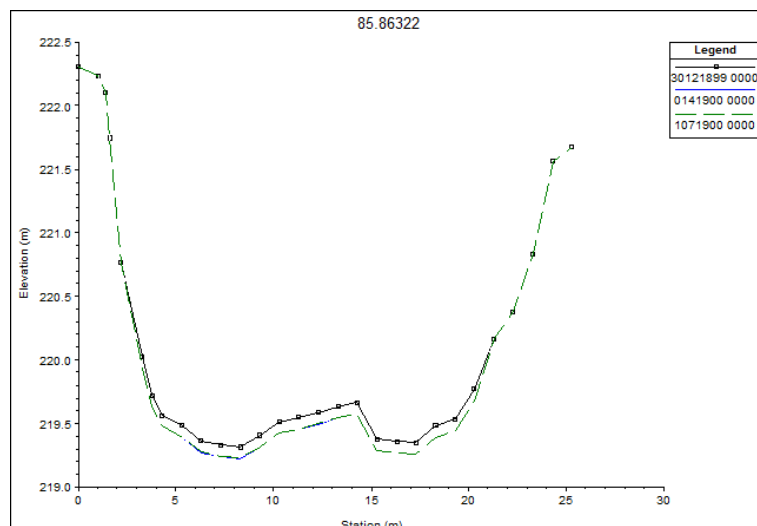
Profil 4 se na počátku zahlubuje o několik cm a poté pomalu sedimentuje a na konci období se dostává nad svou počáteční výšku. Profil 5 na počátku časové řady výrazně sedimentuje, střední část stagnuje a opět sedimentuje, s celkovým rozdílem cca 50 cm.



Obr. 6.4 Vývoj profilu 5

Profily 6 a 7 nevykazují významné změny, pouze velmi mírně sedimentují, profil 8 se při jarním vysokém stavu zahlubuje o několik cm a zbytek modelovaného období sedimentuje zpět přibližně do výchozího stavu. Profil 9 s jarním zvýšením průtoků výrazně eroduje své jemnozrné dno (přibližně o 10 cm). Poslední profil ve starém korytě s číslem 10 vykazuje téměř nezatelnou dynamiku.

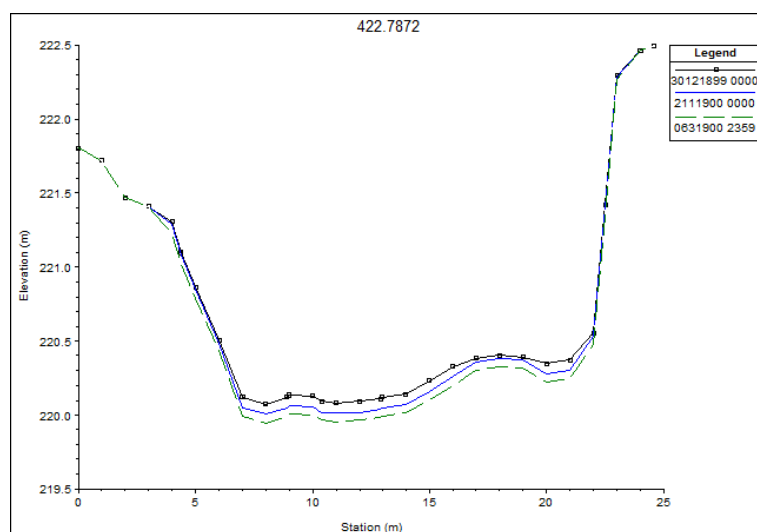
Profily nacházející se v aktivním korytě mění svou výšku jen v jednotkách centimetrů, vizualizace by byla bezvýznamná. Zde se projevuje slabina 1D modelu – tyto profily v době nízkých průtoků skutečně mění svou výšku jen minimálně (viz graf 5.23 a 5.25), avšak stále působí laterální eroze, kterou HEC-RAS nemodeluje.



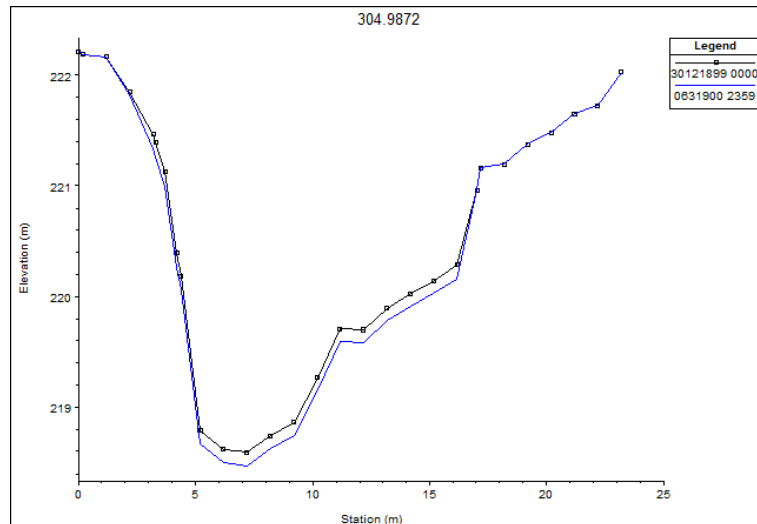
Obr. 6.5 Vývoj profilu 9

6.2.2 Vstupní řada průtoků odpovídající povodni v roce 2012

Výsledky simulace povodně, která způsobila odškrcení Kenického meandru dopadly podle očekávání. Na profilu 2 došlo jen k minimálnímu zahloubení, oproti tomu na profilu 3 se simulovaná povodeň podepsala odnosem až 20 cm materiálů (reálně by to bylo pravděpodobně méně, protože pod tenkou vrstvou jemných sedimentů se nachází dno se stejnou charakteristikou, jako u profilu 2. Výsledky profilu 4 ukazují na erozi v řádu jednotek cm. Pravděpodobně by realita byla opačná než u profilu 3 – eroze by byla větší, protože jemné sedimenty zde mají větší mocnost.

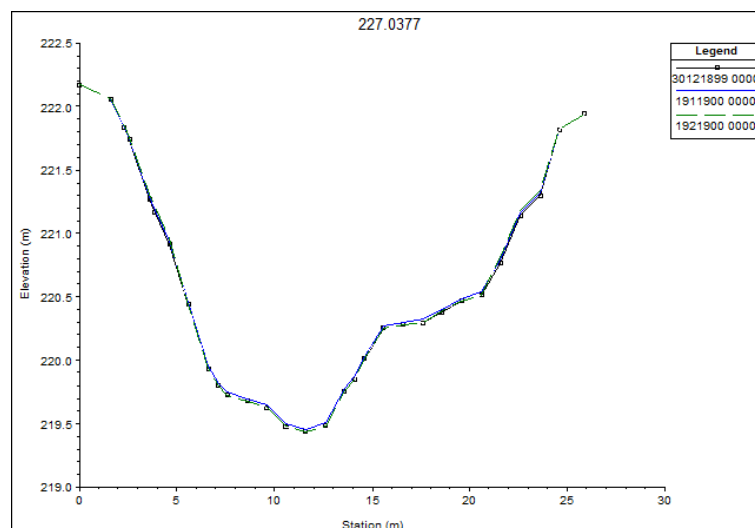


Obr. 6.6 Vývoj profilu 3

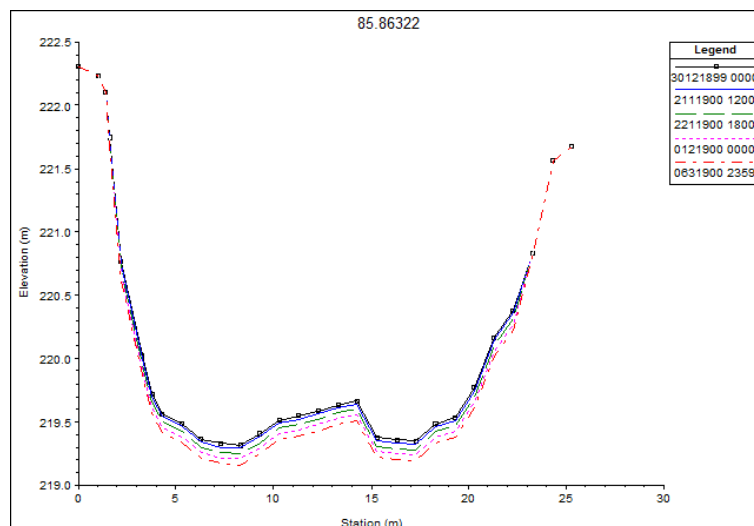


Obr. 6.7 Vývoj profilu 5

Profil 5 vykazuje vyšší míru eroze, převážně v pravé části koryta. Ta se skládá většinou z jemných sedimentů, takže jejich odplavení očekávané. Profil 6 je v místě bývalé peřejky, dno tu je velmi hrubé a nenachází se tu téměř žádné jemné sedimenty. Výstup ze simulace je tedy korektní, dokonce je predikována mírná sedimentace v závěrečné fázi časové řady.



Obr. 6.8 Vývoj profilu 6



Obr. 6.9 Vývoj profilu 9

Výsledkem modelování vývoje profilu 7 a 8 byl minimální vývoj, pravděpodobně to je špatný předpoklad: na profilu 7 lze očekávat při průchodu povodně erozi, kvůli břehům z jemných částic, naproti tomu na profilu 8 lze očekávat sedimentaci v oblasti boční lavice pravého břehu a to obzvláště v závěrečné fázi povodně.

Výstup profilu 9 znázorňuje silnou erozi, až 20 cm po celém omočeném obvodu. Je to chyba, za kterou může odběr vzorku sedimentů v pravé části koryta, kde se nachází jen jemnozrný materiál. V levé části koryta je dno pokryto pískem. Je proto pravděpodobné, že by zde eroze byla podstatně menší. Profil 10 vyšel ze simulace prakticky nezměněn, jen s mírnou akumulací materiálu v závěrečné fázi povodně.

Změny v aktivním korytě jsou stejně jako v případě předchozí časové řady průtoků jen v jednotkách centimetrů. Opět zde chybí působení laterální eroze, kterou model neuvažuje. V případě alespoň dvojnásobného množství příčných profilů by bylo možné odhadovat postup zpětné eroze.

6.3 Budoucí vývoj lokality

Šíje Kenického meandru byla protržena v nejužším místě. Průchod šíjí se rychle rozšířil až na 18 m. Vzhledem k nízkým průtokům v následujícím období k dalšímu rozšiřování nedošlo, proto je Morava v tomto úseku velmi zúžená. Při nejbližší povodni se dá proto očekávat rozšíření koryta v tomto místě. Další erozi šíje brání velké množství LWD, které do koryta napadalo a jejich kmeny kolmo na proud jej odklánění směrem ke dnu. Proto je v místě šíje dno až 5 m pod úrovní nivy. Zpětná eroze v tomto místě během dvou let dosáhla částečně k profilu 1 (zahloubení je zatím přibližně 0,5 m) a její postup se bude neustále zpomalovat až do prvního povodňového stavu. Zahloubení koryta před šíjí má za následek horší přísun vody do Kenického meandru. Zpětná eroze se bude postupně šířit, dokud nedosáhne místní erozní báze, což je hynkovský jez. Případně ji může zastavit panelový brod asi 500 m pod jezem, ale spíše to bude dočasné, záležet bude na

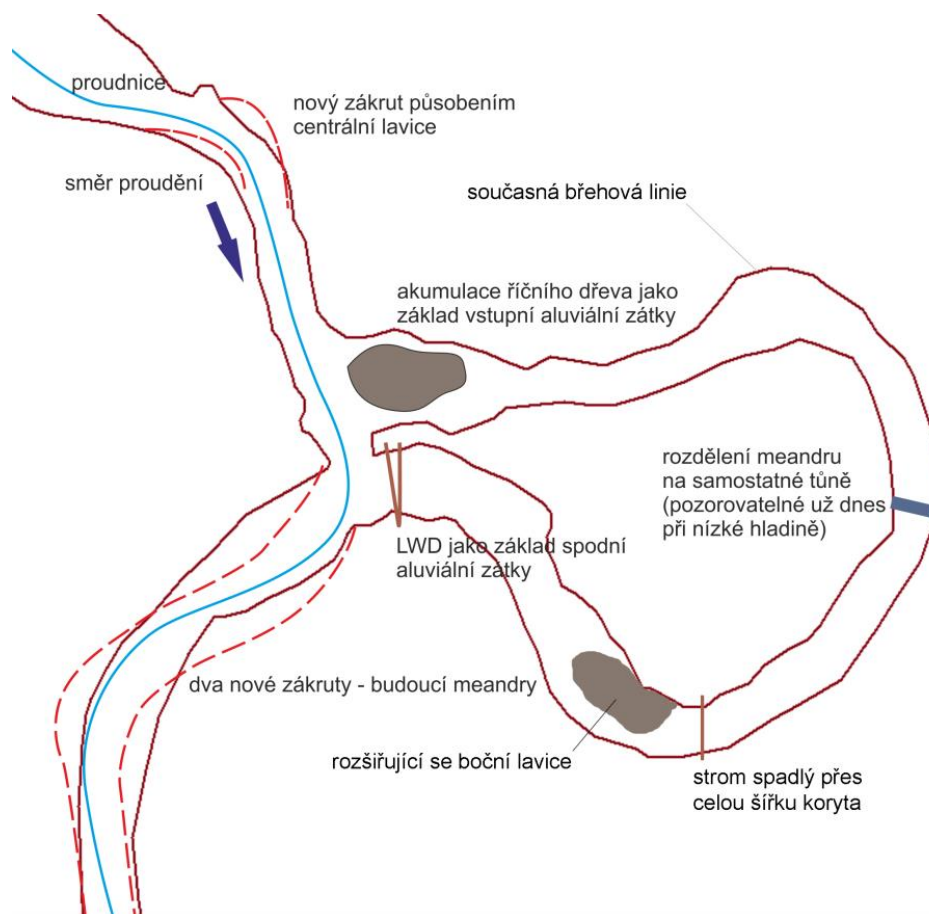
povodňových průtocích. Těsně po protržení procházelo proudění převážně přes okraj velké akumulace říčního dřeva. Zpětná eroze zapříčinila odklon proudnice z tohoto místa blíže k pravému břehu, takže v současnosti již na proudění vliv nemá. V případě, že by dál v tomto místě působila hloubková eroze, což není moc pravděpodobné, mohla by být část akumulace podemleta a zhroutit se. V případě, že by se v místech bývalé šíje zaseklo velké množství dřeva, mohlo by to krátkodobě odklonit větší část proudu zpět do meandru, dokud by průchod v šíji nebyl rozšířen do té míry, že by to hypotetickou akumulaci buď odplavilo anebo by přestala mít na proudění větší vliv.

Erozi postižený levý břeh pod šíjí by měl být při velkých průtocích dále silně erodován. Tvoří jej nesoudržné povodňové hlíny, ve kterých roste jen bylinná vegetace. První stromy se nacházejí 10 m od současného břehu. Až k nim bude eroze rychle postupovat, poté bude zpomalena díky větší soudržnosti zeminy s kořeny. Ve vzdálené budoucnosti se tento nový zákrut vyvine v meandr s osou o azimutu přibližně 150° (ačkoli ta bude zpočátku silně ovlivněna přísunem dřevní hmoty ze břehů). Na šterkové lavici při pravém břehu bude při povodních deponován jemnozrnný materiál a současný šterkový povrch bude překryt jemnějšími sedimenty, na kterých se brzo uchytí vegetace. Dále po proudu v místě před profilem 13 přechází proudění brodovým úsekem směrem k pravému břehu. Byla by zde očekávána eroze podobné intenzity jako o něco výše na levém břehu. Zatím se tak neděje. Jednak je v těchto místech malá dřevní akumulace, která proudění rozbíjí a také jsou zde hned na kraji vzrostlé stromy stabilizující břeh. Ten se navíc neskládá z nesoudržné hlíny, ale z pevného, tvrdého jílu. Laterální eroze proto bude v těchto místech postupovat velmi pomalu, dá se spíše při povodních očekávat hloubková eroze, neboť koryto je zde poměrně úzké.

Budoucí vývoj meandru závisí na četnosti a síle protékání. Při malých průtocích v hlavním korytě, bude sedimentace v meandru zpomalena v důsledku malého přísunu sedimentů. Při velkých průtocích kvůli proudění nebude sedimentace probíhat vůbec (v některých místech lze spíše čekat erozi, jak určila simulace). Nejvyšší míra sedimentace se dá očekávat při normálních průtocích, kdy bude přísouváno dostatečné množství sedimentů a zároveň nebude proudění v meandru moc silné. Nejvýraznější zazemňování lze čekat v okolí profilů 4, 5, 7 a částečně 9. Pomalé tempo zazemňování i v těch nejpříznivějších podmínkách lze očekávat u profilů 2, 6 a 10.

S vývojem aluviální zátky ve vstupní větvi meandru se z něj postupně stane poloslepé rameno napojené jen spodním koncem. Ten bude později taky oddělen od aktivního koryta (napomáhat tomu budou stromy padlé kolmo přes celou šířku koryta). Její vývoj bude probíhat déle kvůli přítomnosti tůň. Po vyvinutí i této zátky bude meandr stále hydraulicky spojen s řekou skrz podzemní vodu a jeho hladina bude kolísat v souladu s hlavním korytem. Postupným zazemňováním se zde přemění říční biotopy na mokřadní a bude tak zvýšena biodiverzita zájmového území a jeho ekologická hodnota.

Přibližně 150 m proti proudu od šíje se nachází místo, kde je potenciál ke změnám morfologie. V tomto místě se rozkládá uprostřed koryta rozsáhlá písková lavice o délce cca 60 m s množstvím LWD. Lavice rozděluje proud do dvou větví a zdatelně se tak rozšiřuje koryto. Díky tomu vtéká řeka do posledního zákrutu před Kenickým meandrem pod větším úhlem a působí větší silou na levý břeh. Časem se i zde může vyvinout výrazný zákrut, případně meandr.



Obr. 6.7 Náčrt budoucího vývoje

7 DISKUZE

Při terénním sběru dat je vždy nějaké nebezpečí opomenutí nebo chyby. Je potřeba neustále vše pečlivě kontrolovat a chyby hned na místě opravit nebo chybu zaznamenat a opravit ji postprocesně. Například při nivelování profilů došlo v roce 2013 k záměně čísel profilu 0 s 1 a navíc k záměně břehů. Ke všemu zmatení jsou si profily 0 a 1 velmi podobné, pokud se jeden z nich otočí o 180° horizontálně. V těchto případech podezření padá na chybu v měření a nepoužitelnost dat (a opakování měření). Náhodná chyba se eliminovat téměř nedá. V případě sběru dat v této práci ovlivňuje náhodnou chybu už jen poloha latě nebo výtyčky s odrazným hranolem – stačí položit lať na dno koryta do mezery mezi oblázky a vzniká hned odchylka několika cm. S těmito odchylkami je nutné především při kvantifikaci a interpretaci výsledků počítat.

Zdrojem odchylek v datech při digitalizování břehových linií z leteckých snímků je jejich nejednoznačný průběh na snímku. Zakrývají je koruny stromů a na některých snímcích ještě vrhají do koryta své stíny. Tato nejednoznačnost se projevila v kvantifikaci změn břehové linie mezi lety 2003-2006, kdy je relativní poměr velikosti chyby a změn během krátkého časového období daleko vyrovnanější, než když jsou porovnávány snímky s delšími časovými rozestupy. Další potencionální odchylky v datech vznikaly při georeferencování leteckých snímků – z tohoto důvodu byly již jednou referencované v bakalářské práci předělány, aby byla jejich přesnost co nejvyšší.

Prostor pro zdokonalení práce by se našel v možnosti porovnání průběhu historických povodní a jejich vliv na zájmový úsek. Část historických povodní byla zjištěna z veřejně dostupných informací o profilu Olomouc Nové Sady, ale jejich seznam rozhodně není úplný (jsou zde velké mezery mezi lety 1947-1958 a 1966-1981).

V kapitole 5 je téměř u každého z příčných profilů uvedena tabulka se ztrátami bodů. Tyto ztráty samozřejmě ovlivňují přesnost při porovnání, ale bohužel jim nejde zabránit. Co se týče počtu a polohy profilů, bylo by dobré jejich počet do budoucna zvýšit: více než potřebné je zřídit dva profily v místech vyvíjejících se aluviálních zátek (mezi profily 1 až 2 a 10 až 11), také pro lepší identifikaci zpětné eroze by byl vhodný nový profil mezi profily 0 a 1 a také několik desítek metrů za profilem 13. Aby jejich počet nebyl příliš velký, bylo by možné zrušit profil 3 – je velmi blízko profilu 2 se stejným charakterem koryta a už v minulosti došlo k jeho mírnému přesunutí, takže jeho časová řada není úplně dokonalá.

V analýze frakcí zrnitosti sedimentů má nejjemnější frakce jen rozměr $< 0,25$ mm. Zdá se to být příliš hrubé, když zrnitostní škála obsahuje ještě 6 tříd jemnějšího materiálu a průměr jílovitých částic začíná až na 0,0039 mm. Sítováním by šlo oddělit ještě jednu frakci ($< 0,165$), ale musí být k dispozici potřebné síto. A pokud by byl požadavek na určení ještě jemnějších frakcí, bylo by nutné použít jinou metodu (např. metodu difrakce laserového paprsku), které jsou finančně nákladné.

Nejvýznamnější potenciál ke zdokonalení výsledků má modelování v software HEC-RAS. Pro to by bylo ale nutné mít více přizpůsobena data pro tento model. Například by

bylo potřeba přesně stanovit průtoky pro jednotlivé vodní stavy na profilu 2, aby se dalo určit, jak se rozděluje průtok šíjí a starým korytem. Také by bylo potřeba vytvořit příčný profil přes bývalou šíjí, což je metodami použitými v této práci nemožné (bylo by to možné metodou ADCP, kdy by byl sonar zavěšen na laně přetaženém přes šíjí, ale i tak by to bylo složité, nemluvě o nutnosti jeho zapůjčení). Další položkou, která by model velmi zpřesnila (resp. by ho učinila přímo použitelným) je znalost výšky hladin za různých průtoků na spodním profilu a to včetně povodňových průtoků pro sestrojení konsumpční křivky. Vodní stavy by se musely určit ručně, protože umístění leveloggeru v oblasti profilu 13 bohužel nepřipadá v úvahu – trubku se senzorem není kam schovat ani před silou proudu a vším co nese, ale ani před lidmi, kteří místem prochází na prohlídku šíje. Poslední položkou, s potencionálem ke zdokonalení by bylo roztřídění sedimentů do jemnějších frakcí (viz odstavec výše), případně také určení chodu splavenin v korytě. V případě takového zpřesnění a rozšíření vstupních dat do modelu by objem potřebných prací rapidně vzrostl a pro jednoho člověka by se stal obtížně zvladatelným.

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce je dlouhodobě monitorovat stav odtrženého Kenického meandru v CHKO Litovelské Pomoraví ve vazbě s jeho nejbližším okolím. Bylo shromážděno množství primárních datových zdrojů – byly zaměřeny 4 sady příčných profilů z let 2011-2014 včetně určení polohy a údržba jejich okrajových bodů, změny břehových linií, senzory byla sbírána data o výšce hladiny, teplotě vody a atmosférickém tlaku, byly odebrány a klasifikovány vzorky sedimentů a zakreslen povrch dna.

Úvodní část si klade za cíl pomocí literární rešerše podrobně popsat teorii procesů, které působí v meandrujících tocích. Jsou zde definovány základní morfologické části meandru, charakterizováno primární a sekundární proudění a jeho vliv na břehy a dno. Jsou zde také popsány základní hydrologické rovnice a vztahy, které popisují, podle jakých podmínek vodní tok eroduje či akumuluje materiál. Dále je popsán vliv říčního dřeva na fluviální tvary koryta. Následující podkapitola se věnuje klasifikaci sedimentů podle druhů pohybu a zrnitosti, vysvětluje počátek pohybu a síly působící na částice. Na konci kapitoly se nachází podrobný popis procesu odškrcení meandru a jeho následný vývoj.

Kapitola 4 popisuje zájmové území a výsledek analýzy historických mapových zdrojů. Za posledních 150 let prodělala řeka Morava v zájmovém území velké změny. Až do konce 70. let 19. století se vyvíjel silně meandrující úsek severozápadně od dnešního Kenického meandru. Ten byl následně narovnan a výrazný přebytek energie způsobil dynamické změny. Na prvním dostupném leteckém snímku z roku 1938 je vidět velké změny v zakřivení, kdy se původní zákrut vyvíjí v meandr. V padesátých letech se již dá hovořit o meandru, který začíná zvětšovat svůj poloměr zakřivení a zároveň s pomalu se přibližujícími břehy jeho šíje. Během povodně v roce 2012 šíje meandru nevydržela nápor vody a zhroutila se. Díky změně proudění začal silně erodovat levý břeh v prostoru šíje, kde v následujících dvou letech, i přes značně slabé průtoky, voda odnesla 70 m dlouhý a v některých místech téměř 8 m široký pruh nivy. Od roku 1938 do roku 2014 byly v úseku od jezu Hynkov po Kenickou lávku postihnuty migrací řeky 4 ha nivy. Analýza leteckých snímků odhalila, že znatelný podíl na této ploše má i zákrut nacházející se 400 m pod jezem Hynkov. Sinusoita úseku se z původních 1,491 vyvinula až na 2,115 ve vrcholné fázi, aby po kolapsu šíje klesla na 1,475. Během dvou let po odškrcení se začíná, díky blokování nátoky do meandru rozsáhlou dřevní akumulací, vytvářet aluviální zátka, která separuje horní konec meandru od aktivního koryta. Poslední část kapitoly 4 se věnuje vodním stavům a povodním. V době řešení této práce byly průtoky v zájmovém území nejmenší za posledních minimálně 15 let.

Kapitola 5 porovnává křivky příčných profilů a zrnitostní frakce vzorků sedimentů, které byly u nich odebrány. Z porovnání je vidět, že i přes velmi slabé průtoky vykazuje koryto v místech profilů vývoj. V profilech v aktivním korytě působí laterální hloubková i zpětná eroze. Profily nacházející se v meandru by se daly rozdělit na dva typy - první typ

se nachází na místech bývalého silného proudění. V nich se dochovalo štěrkopískové dno, které bylo pokryto jen slabou vrstvou jemných usazenin, a nadále se již nezazemňují. Druhý typ se nachází na místech s velkou hloubkou, kde už dříve byly přítomny jemné sedimenty. Zde sedimentace pokračuje, i když kvůli slabému přísunu sedimentu z aktivního koryta, pomaleji.

Poslední kapitola se věnuje budoucímu vývoji meandru a postupu tvorby modelu v programu HEC-RAS. Do modelu vstupují data středové linie koryta, poloha a nivelace příčných profilů, břehové linie, výška a sklon hladiny a časová série průtoků. Byly uvažovány dvě varianty průtoků – jedna časová řada odpovídající změřeným průtokům z roku 2013 a druhá časová řada únor-duben 2012, kdy byla protržena šíje meandru.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] *Přednášky z předmětu Geoinformatika ve fyzické geografii KGI/GFG*. Univerzita Palackého v Olomouci, 2013.

BLANCKAERT, K.: *Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications*. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 116, F01003, 2011.

BLANSETT, K., MILLER, A.: *Modeling sediment transport in HEC-RAS*. WATERSHED CONCEPTS, 2007.

BRAUDRICK, CH. A. et al.: *Experimental evidence for the conditions necessary to sustain meandering in coarse-bedded rivers*. PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES 106, 2009, 16936-16941.

BRUNNER, G. W.: *HEC-RAS 4.1 User's Manual* [online]. US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Davis, 2010a. 790 s.

Dostupné z: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf

BRUNNER, G. W.: *HEC-RAS 4.1 Hydraulic Reference Manual* [online]. US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Davis, 2010b. 417 s.

Dostupné z: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf

CAMPOREALE, C. et al.: *On the long-term behavior of meandering rivers*. WATER RESOURCES RESEARCH 41, W12403, 2005.

CITTERIO, A., PIÉGAY, H.: *Overbank sedimentation rates in former channel lakes: characterization and control factors*. SEDIMENTOLOGY 56, 2009, 461-482.

CONSTANTINE, J. A., DUNNE, T.: *Meander cutoff and the controls on the production of oxbow lakes*. GEOLOGY 36, 2008, 23-26.

CONSTANTINE, J. A. et al.: *Controls on the alluviation of oxbow lakes by bed-material load along the Sacramento River, California*. SEDIMENTOLOGY 57, 2010a, 389-407.

CONSTANTINE, J. A. et al.: *A mechanism of chute cutoff along large meandering rivers with uniform floodplain topography*. GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA BULLETIN 122, 2010b, 855-869.

DEMEK, J.: *Obecná geomorfologie*. Academia, Praha, 1987, 480 s.

DEMEK, J.: *Geomorfologie českých zemí*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1965, 336 s.

DIERAS, P. L. et al.: *The role of oxbow lakes in the off-channel storage of bed material along the Ain River, France*. GEOMORPHOLOGY 188, 2013, 110-119.

DUAN, J. G., JULIEN, P. Y.: *Numerical simulation of the inception of channel meandering*. EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS 30, 2005, 1093-1110.

GREŠKOVÁ, A.: *Dynamika a transformácia nivy rieky Moravy študovaná pomocou historických máp a leteckých snímok*. GEOMORPHOLOGIA SLOVACA. 2002, č. 2, s. 40-44. ISSN 1335-9541.

HOOKE, J.: *Cutoffs galore!: occurrence and causes of multiple cutoffs on a meandering river*. GEOMORPHOLOGY 61, 2004, 225-238.

HOOKE, J.: *Complexity, self-organisation and variation in behaviour in meandering rivers*. GEOMORPHOLOGY 91, 2007, 236-258.

HUGGET, R. J.: *Fundamentals of geomorphology*. Oxon: Routledge, 2007. ISBN 0-203-94711-8.

CHARLTON, R.: *Fundamentals of fluvial geomorphology*. 1. vyd. Oxon: Routledge, 2008. ISBN 0-203-37108-9.

KASVI, E., VAAJA, M. et al.: *Morphological ganges on Sander point bars associated with flow structure at different discharges*. EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS 38, 2013, 577-590.

KREJČÍ, L.: *Fluviální tvary v NPR Ramena řeky Moravy*. Brno [online]. 2006. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Zdeněk Máčka. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/63828/prif_m

KREJČÍ, L.: *Struktura, dynamika a geomorfologické účinky dřevní hmoty v říčních korytech lesních vegetačních stupňů ČR* [online]. Brno, 2010. Disertační práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Zdeněk Máčka. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/63828/prif_d/

LAUER, J. W., PARKER, G.: *Net local removal of floodplain sediment by river meander migration*. GEOMORPHOLOGY 96, 2008, s. 123-149.

LE COZ, J., MICHALKOVÁ, M.: *Morphodynamics of the exit of a cutoff meander: experimental findings from field and laboratory studies*. EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS 35, 2010, 249-261.

LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M. G.: *River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight*. GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 282B, 1957, s. 40-84.

LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M. G.: *River Meanders*. GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA BULLETIN 71, 1960, s. 769-793.

MÁČKA, Z., KREJČÍ, L. Plavená dřevní hmota (splávi) v korytech vodních toků - případová studie z CHKO Litovelské Pomoraví. In: MĚKOTOVÁ, Jarmila a ŠTĚRBA, O. *Říční krajina 4: Sborník příspěvků z konference*. Olomouc, 2006a, s. 172-182. ISBN 80-244-1495-3.

MÁČKA, Z., KREJČÍ, L. Dřevní hmota v říčních korytech – zdroje, objem, distribuce a interakce s fluviálními tvary (případová studie z NPR Ramena řeky Moravy, CHKO Litovelské Pomoraví). In: *Geomorfologické výzkumy v roce 2006* [online]. 1. vyd.: Univerzita Palackého Olomouc - Česká asociace geomorfologů, 2006b. ISBN 80-244-1542-9. Dostupné z: http://woodinrivers.eu/_media/oprojektu/2006_olomouc_cag.pdf?id=oprojektu%3Avystupyprojektu&cache=cache

MÁČKA, Z., KREJČÍ, L., AGENTURA OCHRANY PŘÍRODY A KRAJINY ČESKÉ REPUBLIKY. *Prognóza geomorfologického vývoje řeky Moravy v úseku od jezu Hynkov po Kenickou lávku: NPR Ramena řeky Moravy, CHKO Litovelské Pomoraví*. Brno, 2006c.

MICHALKOVÁ, M., PIÉGAY, H. et al.: *Lateral erosion of the Sacramento River, California (1942-1999), and responses of channel and floodplain lake to human influences*. EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS 36, 2010, 257-272.

MICHELI, E. R., LARSEN, E. W.: *River channel cutoff dynamics, Sacramento River, California, USA*. RIVER RESEARCH AND APPLICATIONS 27, 2011, s. 328-344.

NICHOLS, G.: *Sedimentology and Stratigraphy*. 2. vyd. Wiley-Blackwell, 2009. ISBN 978-1-4051-9379-5.

PETRÁNEK, Jan. Zrnitost: Geologická encyklopedie. *On-line geologická encyklopedie* [online]. 2007. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?zrnitost>

PETTS, G., FOSTER, I.: *Rivers and landscape*. London: Edward Arnold, 1985. ISBN 0-7131-6433-6.

POVODÍ MORAVY, s.p.: *Manipulační řád pro jez Hynkov na řece Moravě v km 251,136*. Brno, 2005.

SKLENÁŘ, P.: *Vodní toky – Utvary ve dně* [online]. ČVUT, 2007. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/VTO/ke_stazeni/prednasky/3/3_2.pdf

SMELÍK, L.: *Katalog drsností* [online]. Brno: Ústav vodních staveb, VUT Brno, 2012. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/katalogdrsnosti/>

STEVENS, V.: *The Ecological Role of Coarse Woody Debris: An Overview of the Ecological Importance of CWD in BC Forests* [online]. British Columbia Ministry of Forest, 1997. Dostupné z: http://maps.wildrockies.org/ecosystem_defense/science_documents/stevens_1997.pdf

STØLUM, H.: *River Meandering as a Self-Organization Process*. SCIENCE 271, 1996, 1710-1713.

ŠTĚRBA, O. *Říční krajina a její ekosystémy*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2008. ISBN 978-80-244-2203-9.

UHMANOVÁ, H.: *BR 52 – Proudění v systémech říčních koryt* [online]. VUT Brno, 2012. Dostupné z: <http://vst.fce.vutbr.cz/wp-content/uploads/2012/01/>

VAN DIJK, W. M. et al.: *Experimental meandering river with chute cutoffs*. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 117, F03023, 2012.

SUMMARY

This thesis describes results of long-term monitoring in the Kenický meander. The area of interest is located in Protected Landscape Area Litovelské Pomoraví as part of National Natural Reservation Ramena řeky Moravy (Channels of Morava river) and Natural reservation Kenický. There was made four data collections of cross section profiles from autumn 2011, spring 2012, spring 2013 and summer 2014. Surveying was focused on water level, sedimentation, bank line, channel bars, bank failures and woody debris and accumulation. Fourteen cross section profiles of river was created by geodetic leveling survey.

First part of thesis is issue introduction of processes in meander channels. Meanders has several types of migration and development. Most important process of river evolution is neck cut-off of meander. Also this happened in Kenický meander in spring 2012. Morava has river natural channel pattern in the Litovelské Pomoraví and there is also woody debris in the channel. It enhances the ecological status of the river and ecosystem of river with high amounts of woody debris show higher habitat and species diversity.

In thesis was investigated historical line of water channels by historical maps and historical airborne photography in the area of interest. Also several current UAV photogrammetry images was taken by Dr. Miřijovský. After georeferencing of the historical photos was created historical bank lines of Morava river between 50's of 20th century and beginning od 21st century. Analysis of historical bankline shows quantified changes of Morava's channel. River was affected by humans in the late 19th century, when was cutted-off double meander before today's Kenický meander. Reaction of higher energy in river started evolution of Kenický meander. Sinusoity of this circa 1 500 m long reach was rising from 1.491 in 19th century to 2.115 before cut-off in 2012. Today is sinusoity 1.475 after cut-off

From obtained data by surveying was created sediment situation maps. This maps are available as annex of thesis. Comparison of transversal profiles shows immediate start of sedimentation (area and maximum depth of the profiles was less) in old river channel and horizontal and vertical erosion of channel after meander ex-neck. The most significant changes were recorded nearby profile no. 1 (depth erosion), 11 (both lateral and depth erosion) and 12 (lateral erosion). Significant sedimentation was reported in profile 4, 7 and 9. For transverse profile location see obr. 5.1.

Lateral bank erosion analysis is described at obr.4.4. During two years about 70 m length bankline was took away. River moved about 6 m to Southeast on average.

The last chapter is dedicated to Sediment transport analysis in HEC-RAS hydrology model. As a input the surveyed data, transversed profiles, sediment and sensor data of water level was used. Results is shown at chapter 6.2

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

- Příloha 1 Tabulka hmotnosti a procentuálního zastoupení frakcí ve vzorcích sedimentů
- Příloha 2 Grafy porovnání vzorků sedimentů dle podobnosti
- Příloha 3 Vývoj koryta řeky Moravy mezi lety 1837-2014
- Příloha 4 Sady příčných profilů z let 2011-2014

Volné přílohy

- Příloha 5 Mapa povrchu dna Kenického meandru
- Příloha 6 Mapa Akumulace Moravy od jezu Hynkov po Kenickou lávku
- Příloha 7 Mapa Eroze Moravy od jezu Hynkov po Kenickou lávku
- Příloha 8 CD

Příloha 1 Tabulka hmotnosti a procentuálního zastoupení frakcí ve vzorcích sedimentů

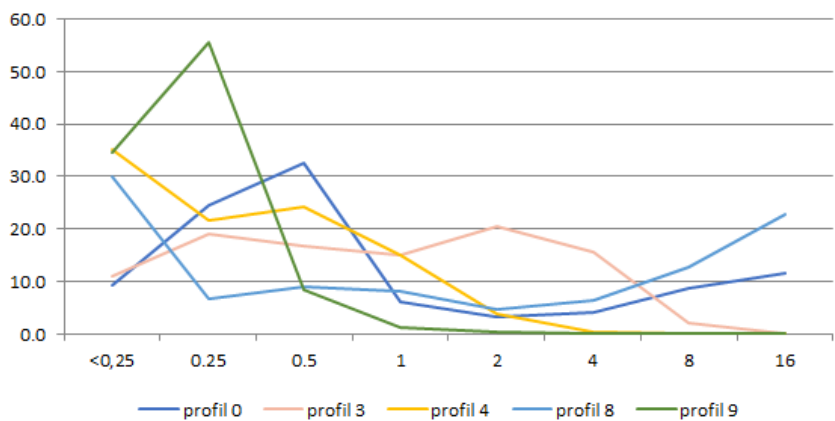
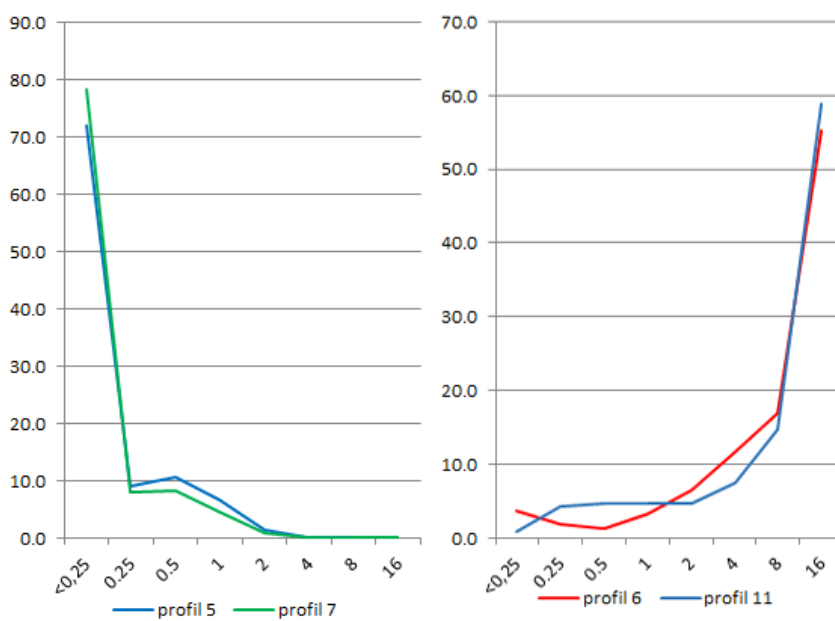
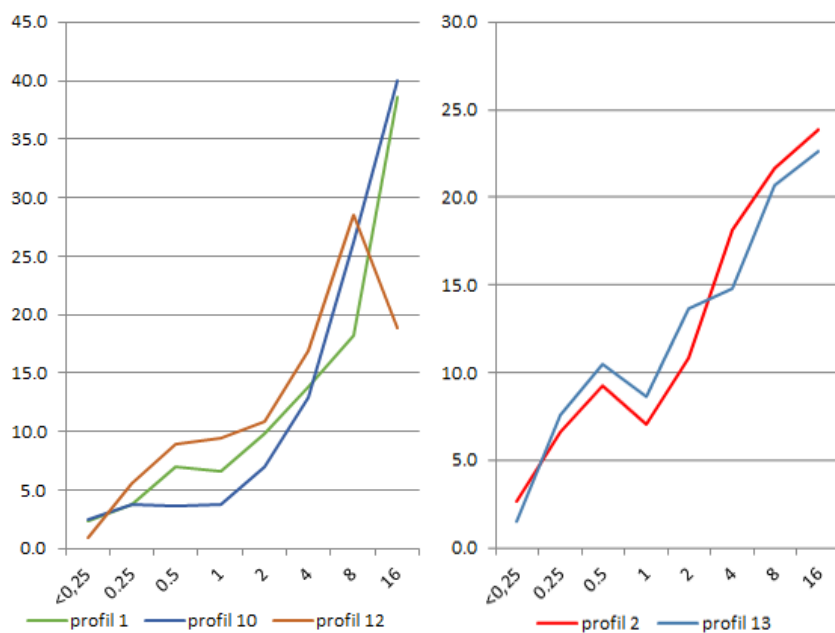
profil	0		1		2		3	
průměr síta [mm]	m [g]	%	m [g]	%	m [g]	%	m [g]	%
< 0,25	117.0	9.1	26.1	2.3	31.7	2.6	132.9	11.1
0,25	316.1	24.6	42.6	3.7	79.1	6.6	227.2	18.9
0,5	418.2	32.5	79.7	7.0	111.3	9.3	202.4	16.9
1	78.2	6.1	74.9	6.6	84.0	7.0	179.7	15.0
2	39.5	3.1	112.2	9.8	129.6	10.8	245.7	20.5
4	53.0	4.1	157.0	13.8	217.9	18.2	188.3	15.7
8	113.0	8.8	207.4	18.2	259.6	21.7	23.9	2.0
16	150.0	11.7	439.3	38.6	285.8	23.8	0.0	0.0
CELKEM	1285.0	100	1139.2	100	1199.0	100	1200.1	100

profil	4		5		6		7	
průměr síta [mm]	m [g]	%	m [g]	%	m [g]	%	m [g]	%
< 0,25	266.3	35.2	95.8	71.9	48.5	3.6	176.1	78.3
0,25	164.3	21.7	12.2	9.2	23.8	1.8	17.7	7.9
0,5	183.2	24.2	14.1	10.6	17.2	1.3	18.4	8.2
1	112.9	14.9	8.9	6.7	43.8	3.3	10.5	4.7
2	28.5	3.8	1.9	1.4	86.2	6.4	2.0	0.9
4	1.9	0.3	0.2	0.2	155.7	11.6	0.1	0.0
8	0.1	0.0	0.1	0.1	225.0	16.8	0.1	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	738.1	55.2	0.0	0.0
CELKEM	757.2	100	133.2	100	1338.3	100	224.9	100

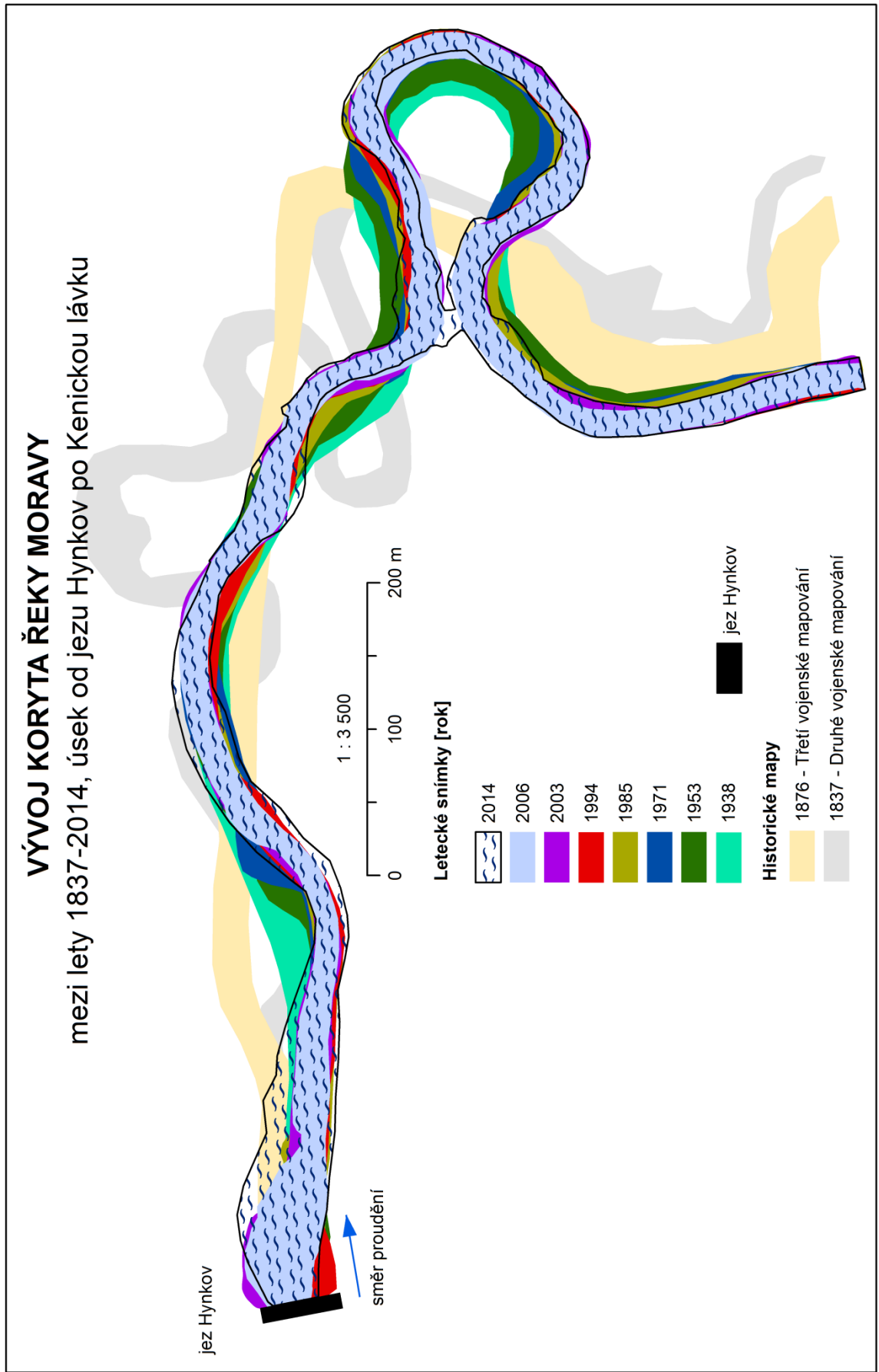
profil	8		9		10		11	
průměr síta [mm]	m [g]	%	m [g]	%	m [g]	%	m [g]	%
< 0,25	268.2	29.9	158.7	34.5	26.3	2.5	12.7	0.8
0,25	60.2	6.7	255.7	55.6	40.2	3.8	68.4	4.3
0,5	80.7	9.0	38.1	8.3	37.9	3.6	74.3	4.7
1	73.2	8.2	5.1	1.1	39.7	3.8	73.7	4.7
2	40.7	4.5	2.0	0.4	73.2	7.0	73.4	4.6
4	56.8	6.3	0.4	0.1	135.7	12.9	116.8	7.4
8	112.7	12.6	0.0	0.0	275.3	26.3	231.0	14.6
16	203.2	22.7	0.0	0.0	419.8	40.1	930.8	58.9
CELKEM	895.7	100	460.0	100	1048.1	100	1581.1	100

profil	12		13	
průměr síta [mm]	m [g]	%	m [g]	%
< 0,25	17.7	0.9	26.2	1.5
0,25	110.2	5.5	135.1	7.5
0,5	178.5	9.0	187.6	10.5
1	186.5	9.4	155.1	8.7
2	215.6	10.9	244.8	13.7
4	336.5	16.9	265.6	14.8
8	567.0	28.5	371.0	20.7
16	374.1	18.8	405.5	22.6
CELKEM	1986.0	100	1790.9	100

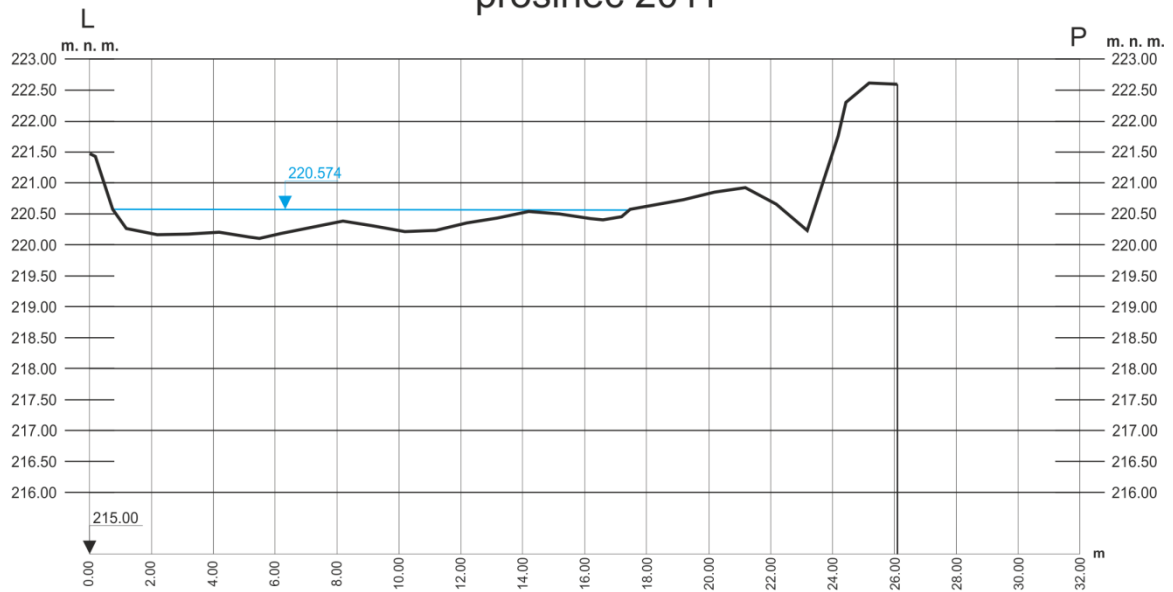
Příloha 2 Grafy porovnání vzorků sedimentů dle podobnosti



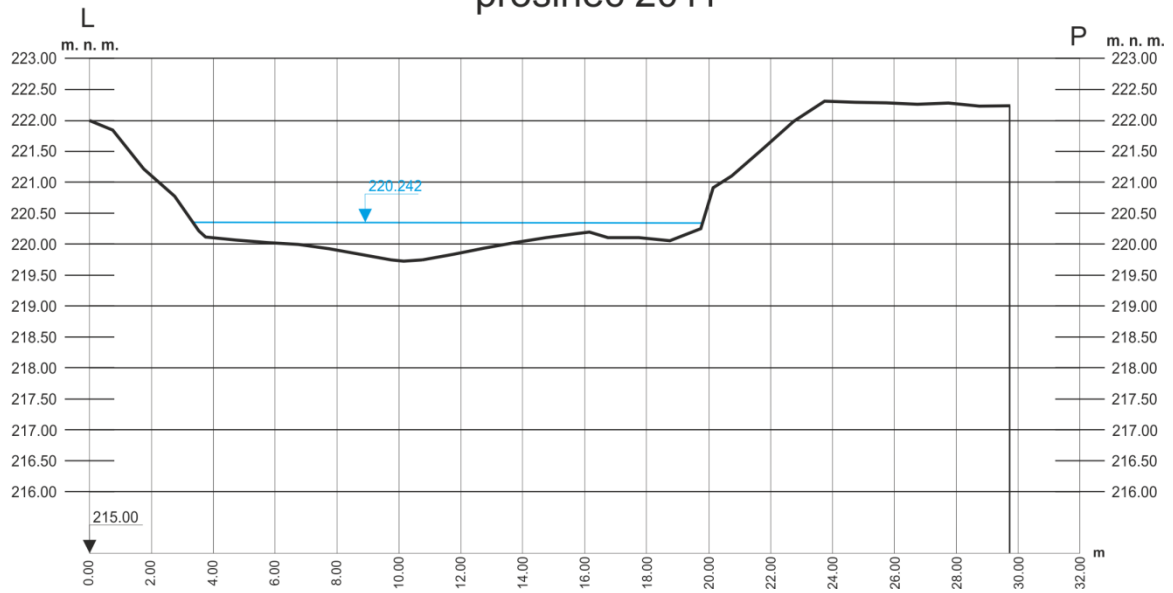
Příloha 3 Vývoj koryta řeky Moravy mezi lety 1837-2014



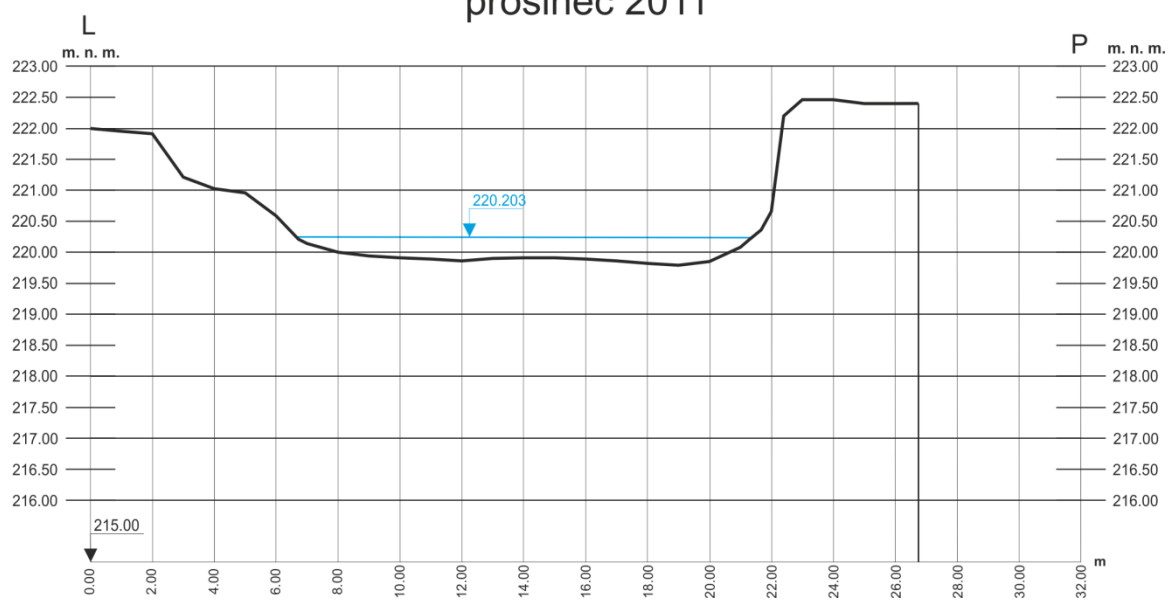
PROFIL č. 1 prosinec 2011



PROFIL č. 2 prosinec 2011

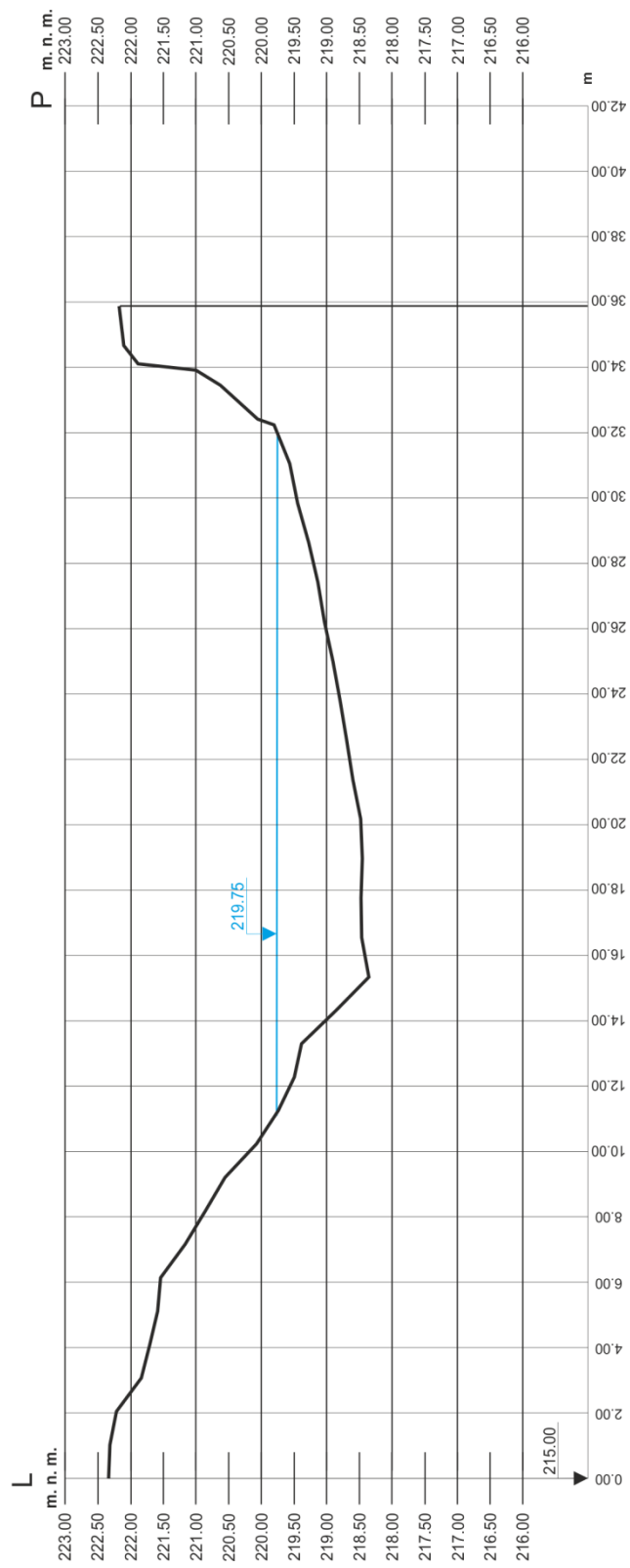


PROFIL č. 3 prosinec 2011

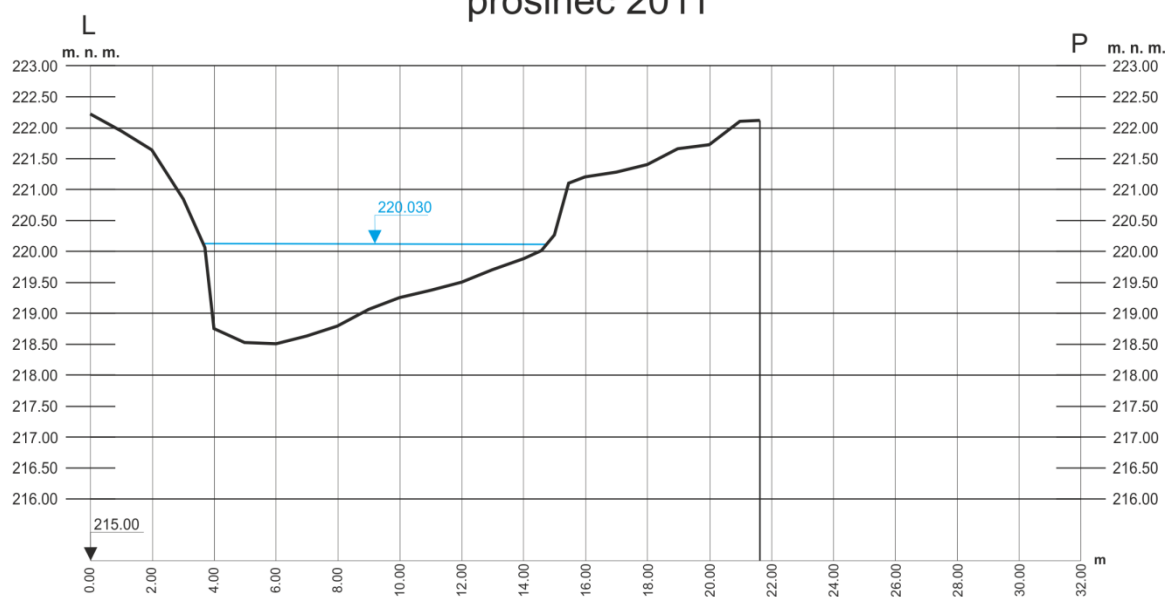


PROFIL č. 4

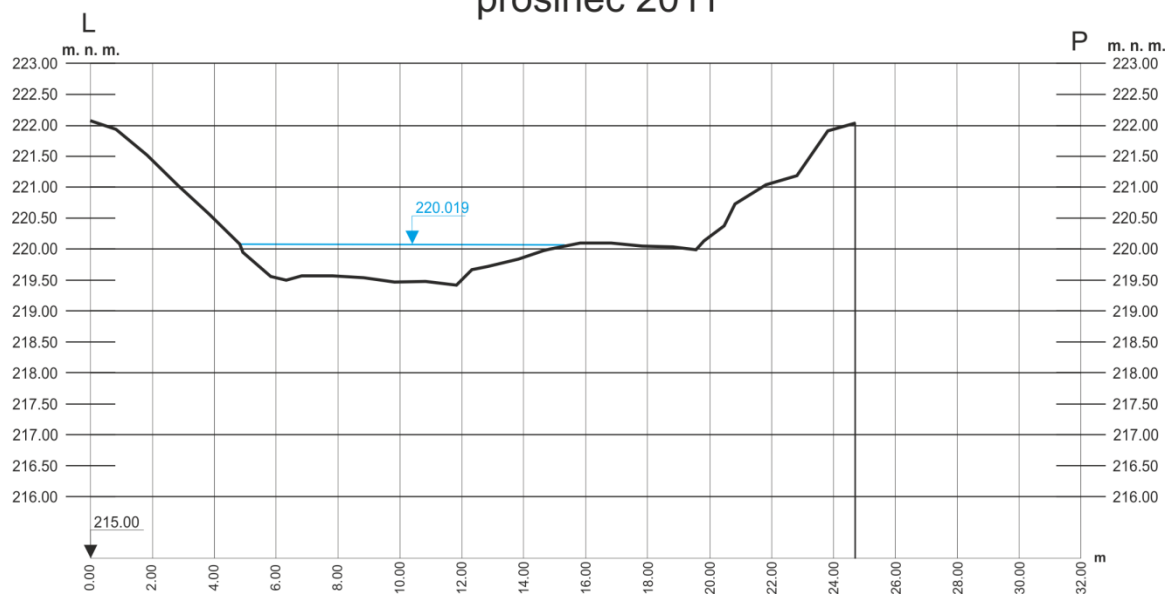
prosinec 2011



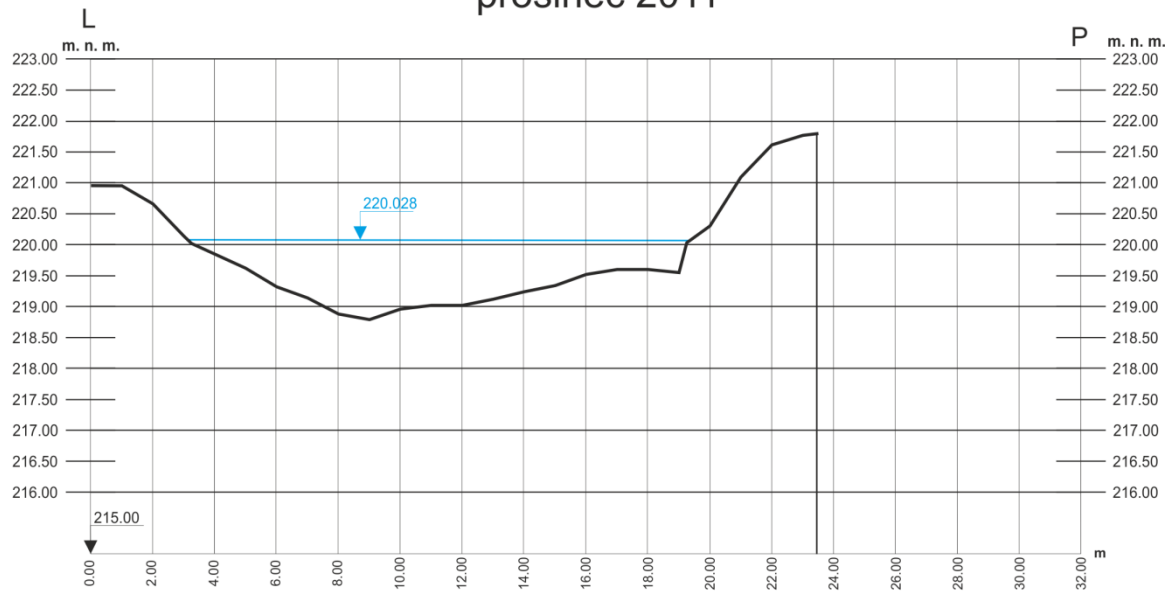
PROFIL č. 5 prosinec 2011



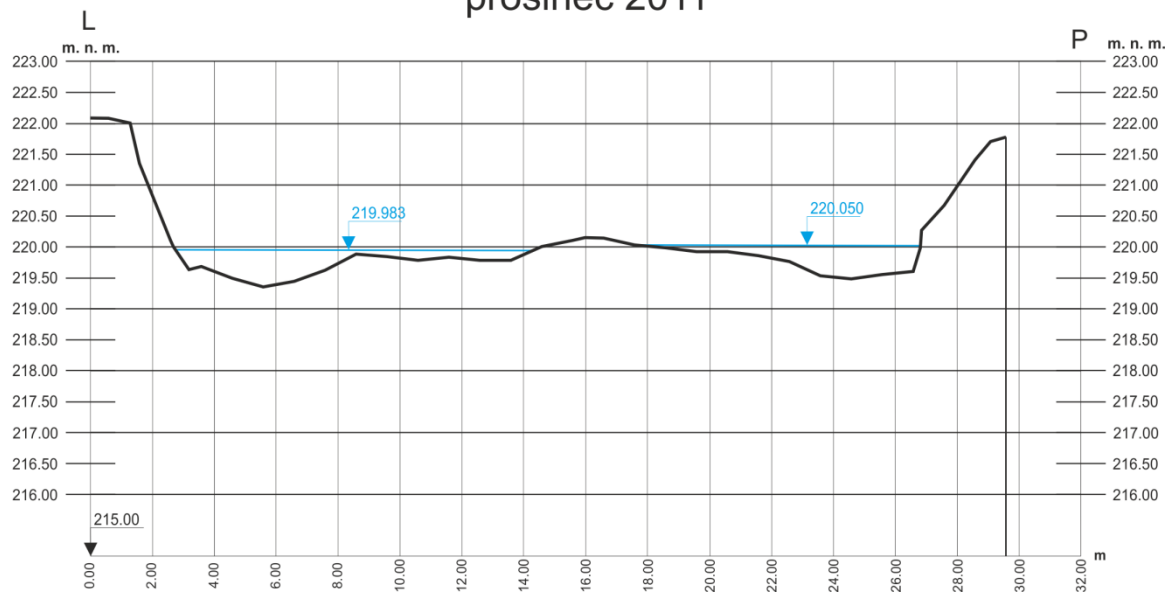
PROFIL č. 6 prosinec 2011



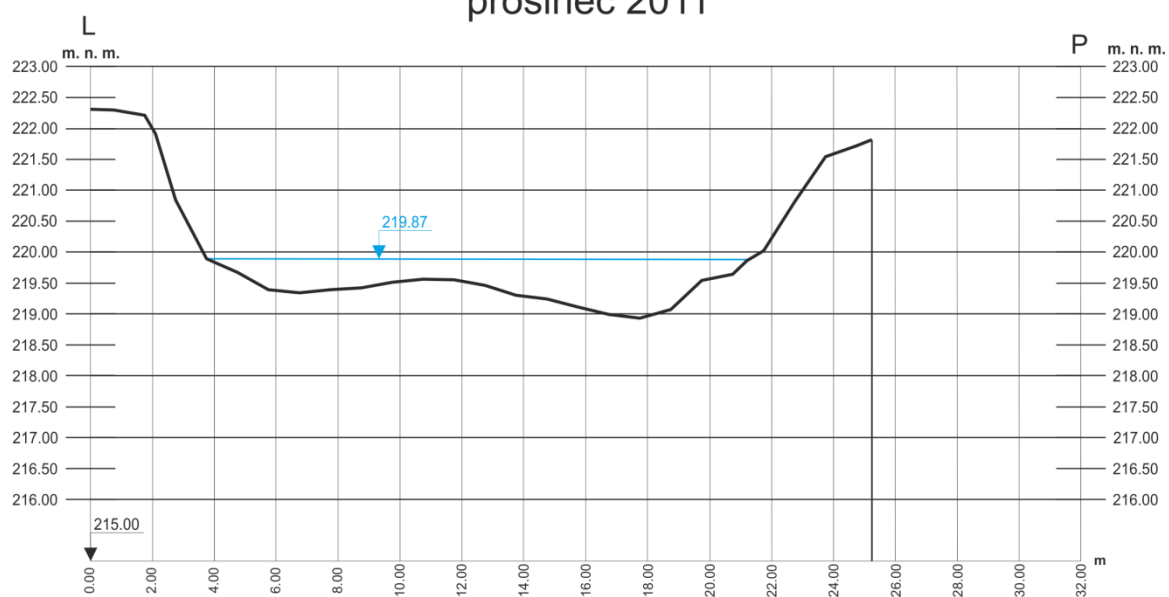
PROFIL č. 7 prosinec 2011



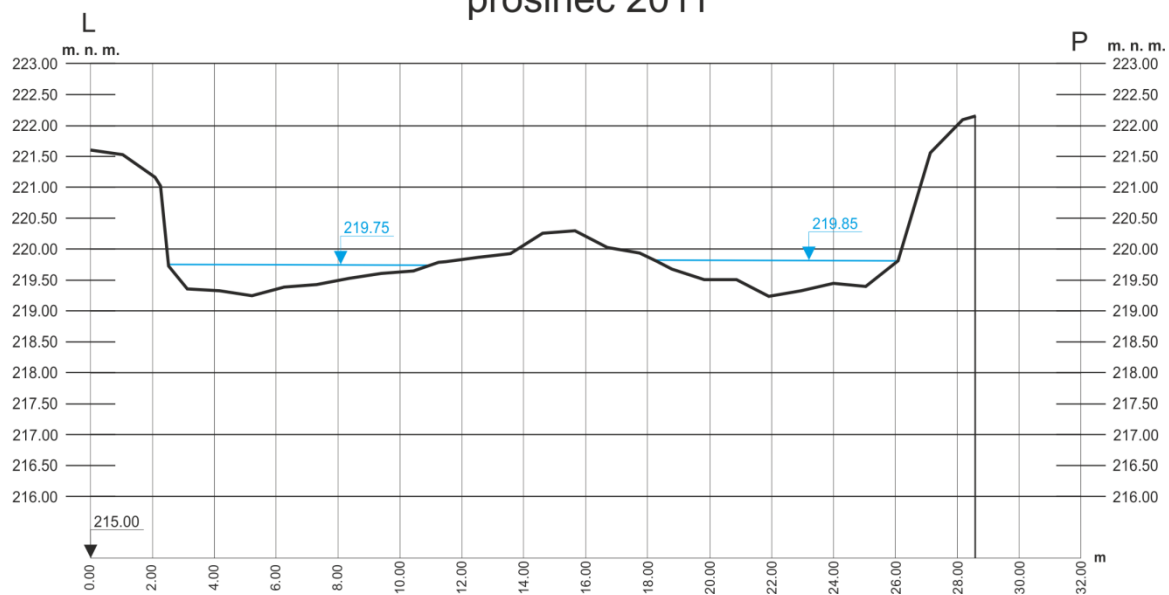
PROFIL č. 8 prosinec 2011



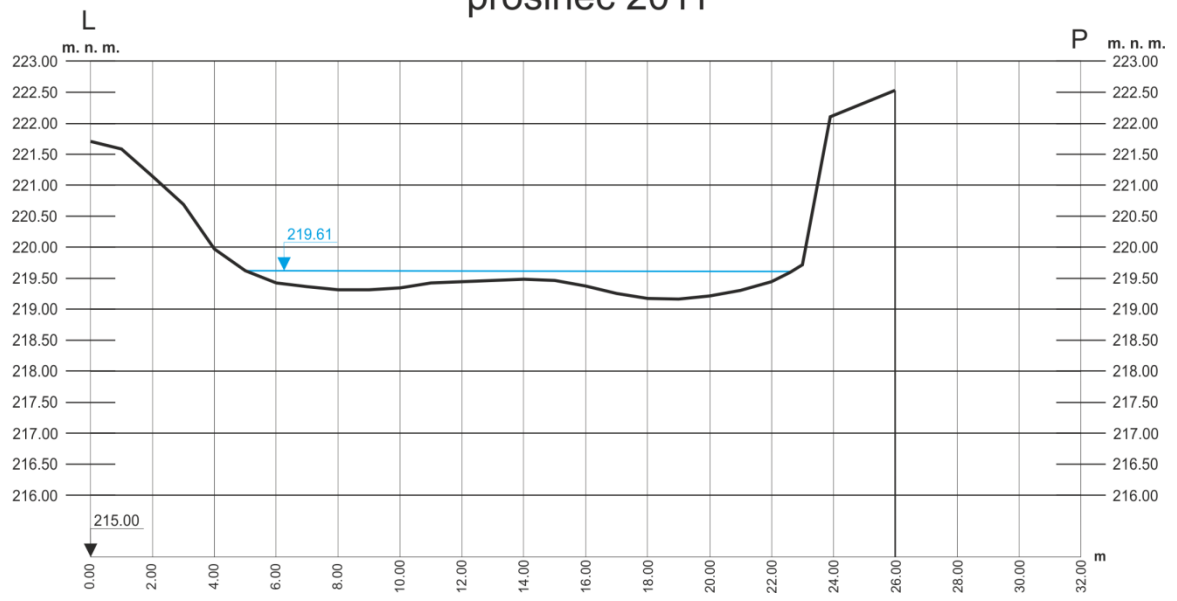
PROFIL č. 9 prosinec 2011



PROFIL č. 10 prosinec 2011

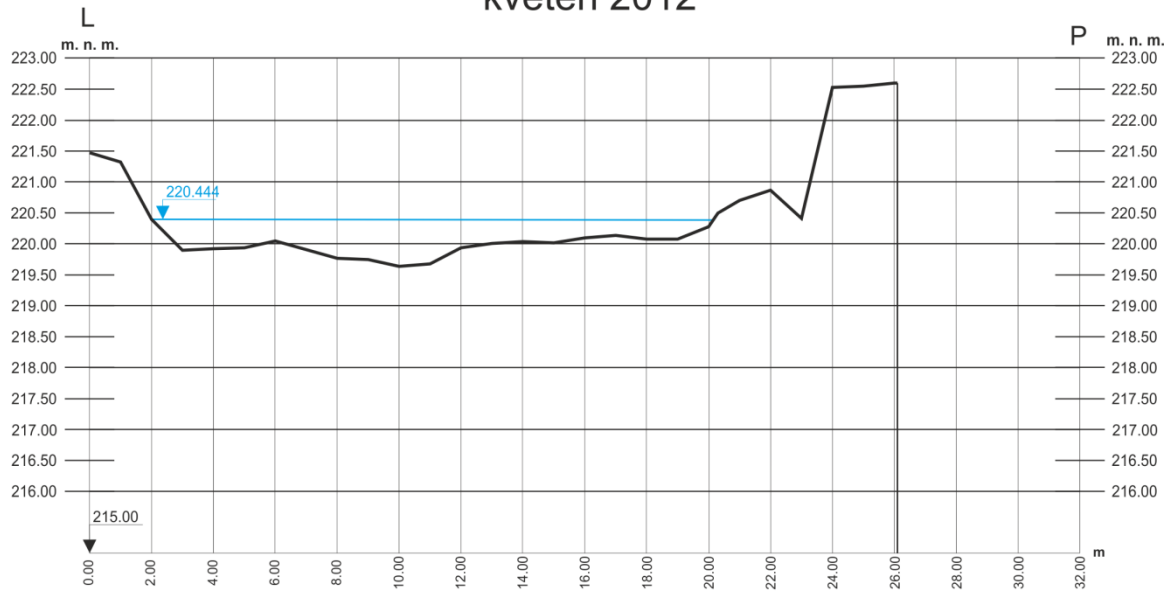


PROFIL č. 11 prosinec 2011

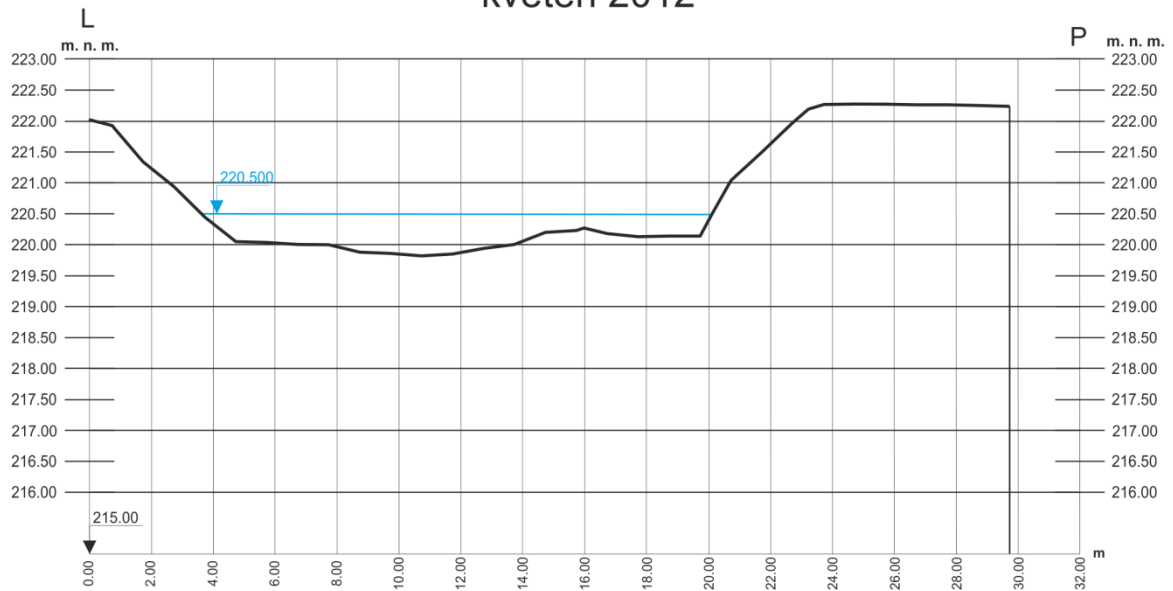


2012

PROFIL č. 1 květen 2012

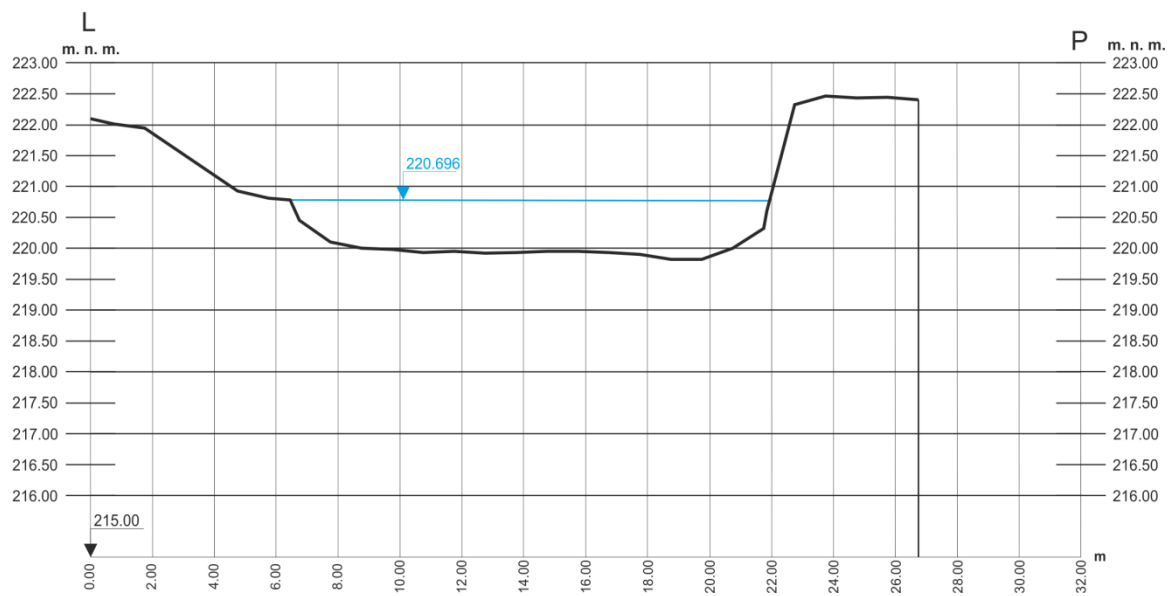


PROFIL č. 2 květen 2012



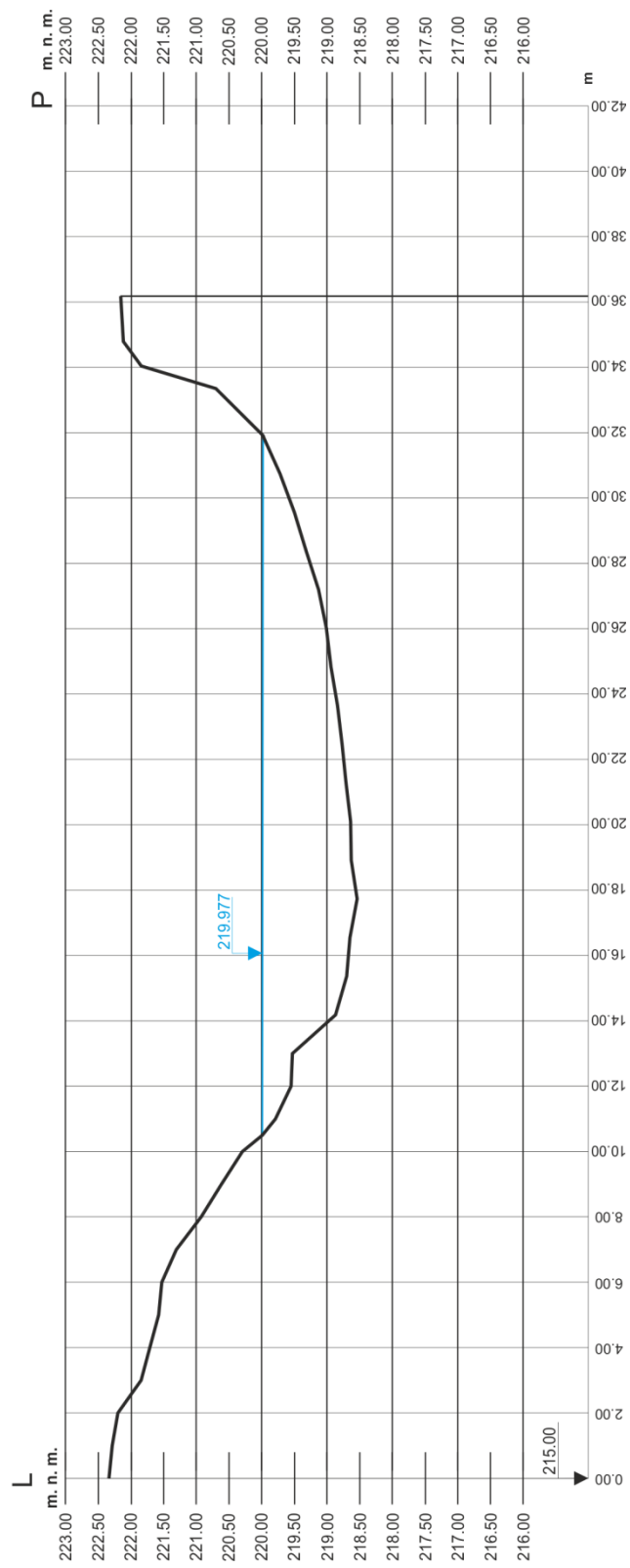
PROFIL č. 3

květen 2012

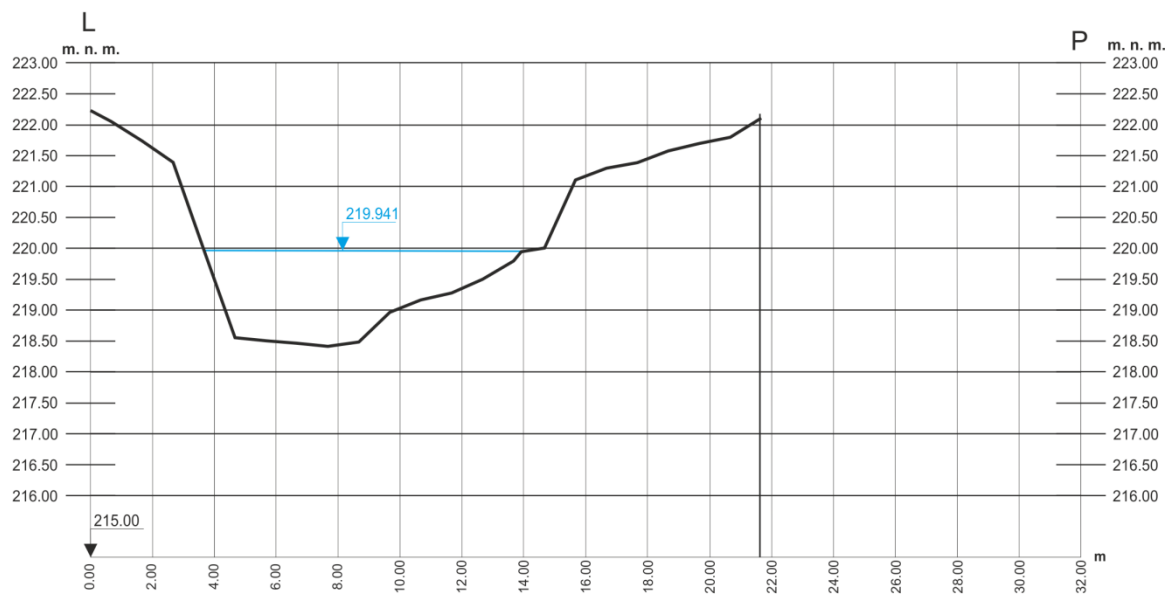


PROFIL č. 4

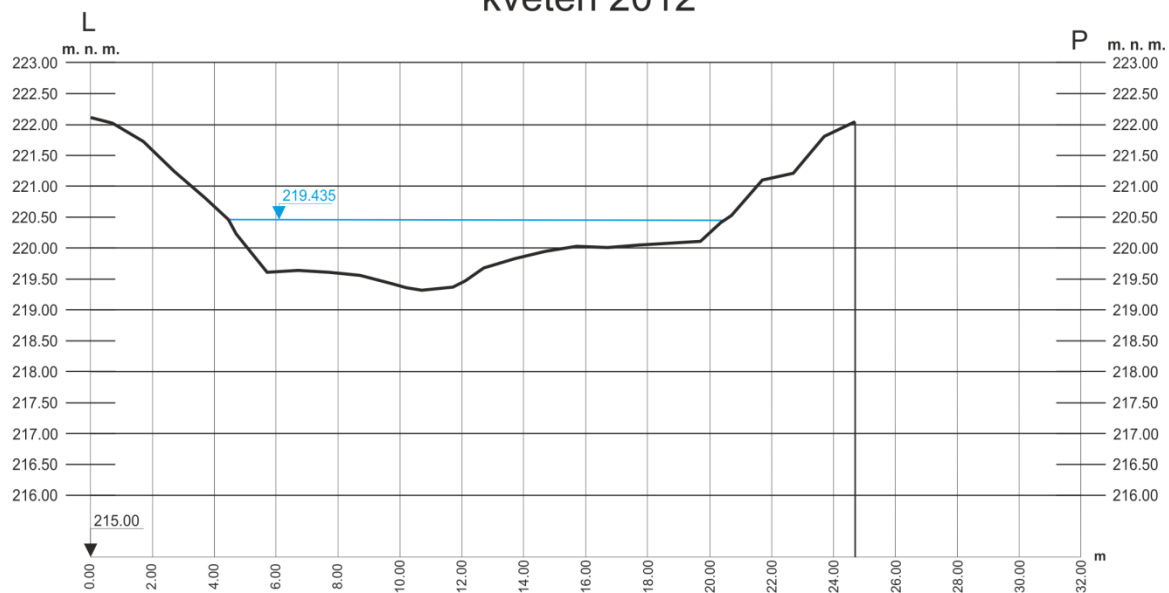
květen 2012



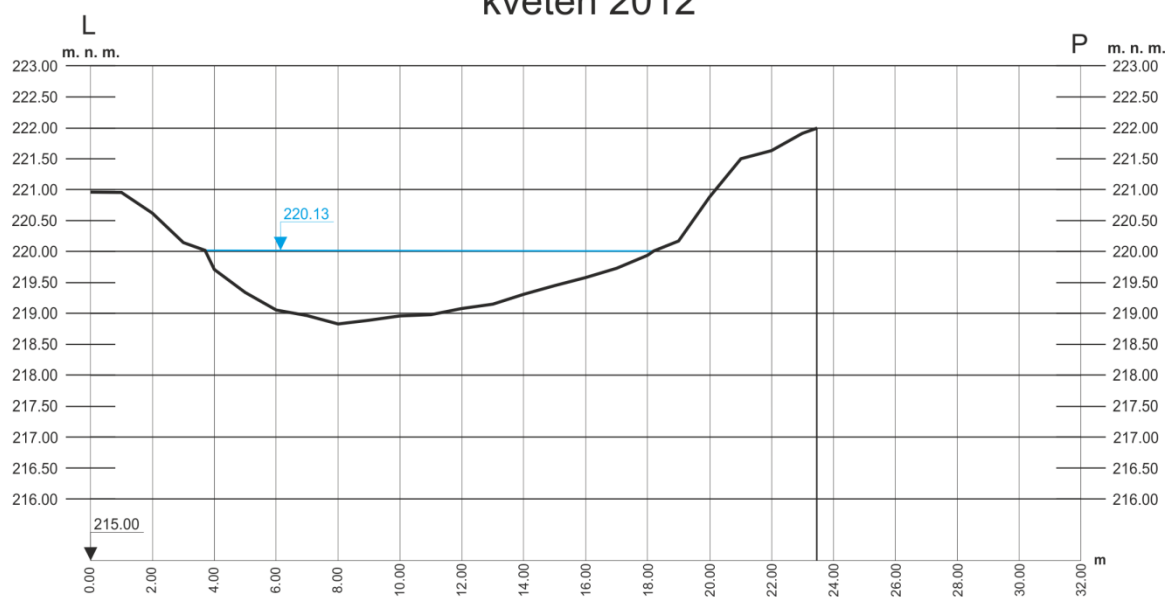
PROFIL č. 5 květen 2012



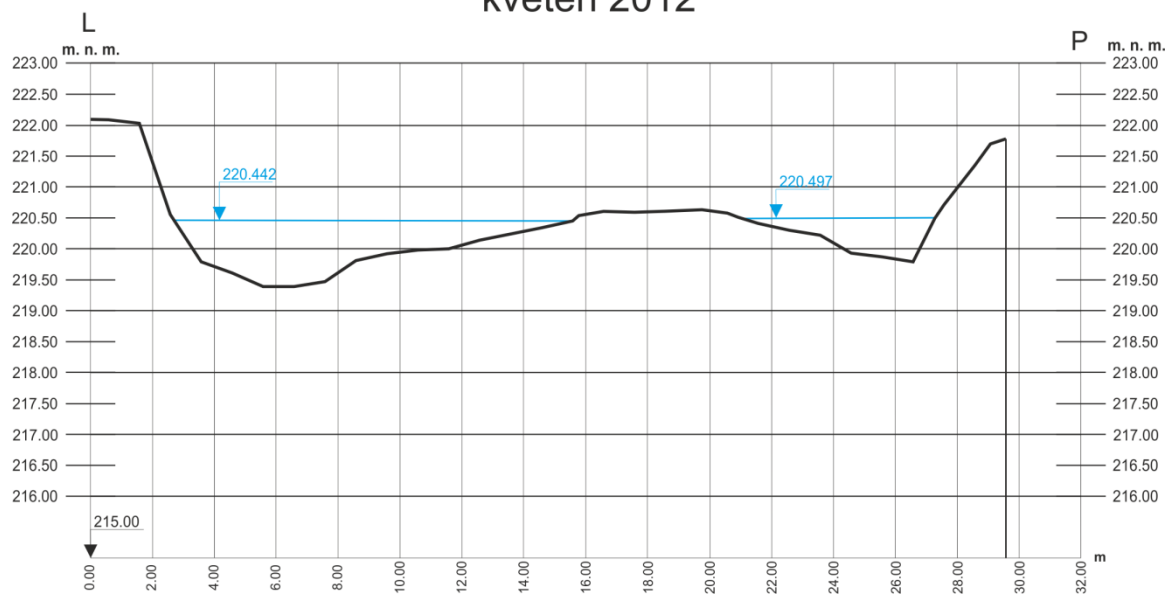
PROFIL č. 6 květen 2012



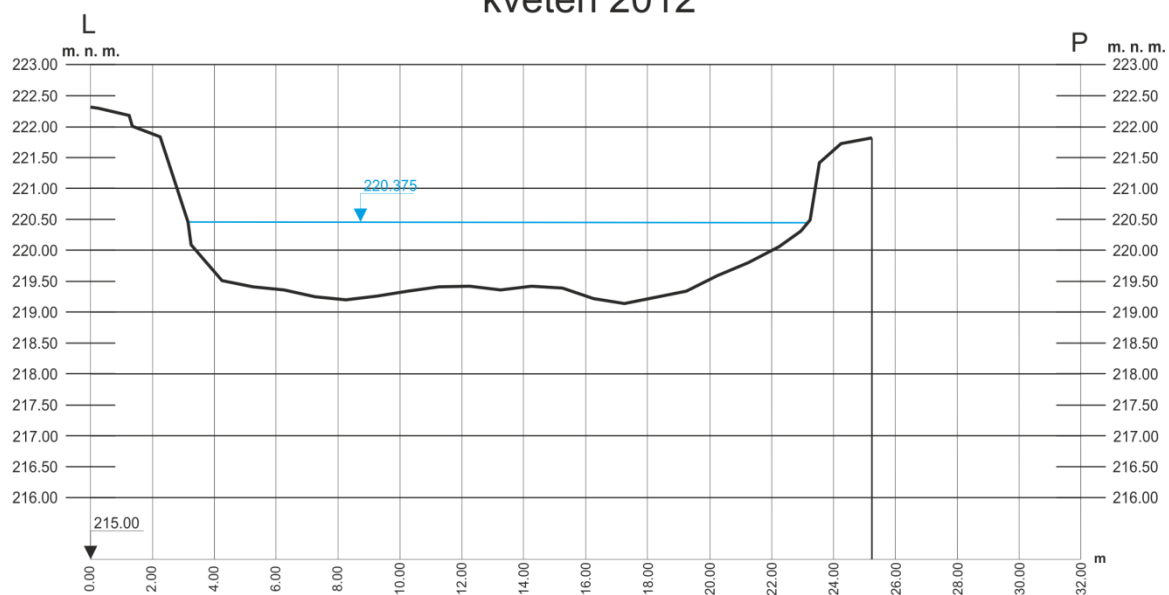
PROFIL č. 7 květen 2012



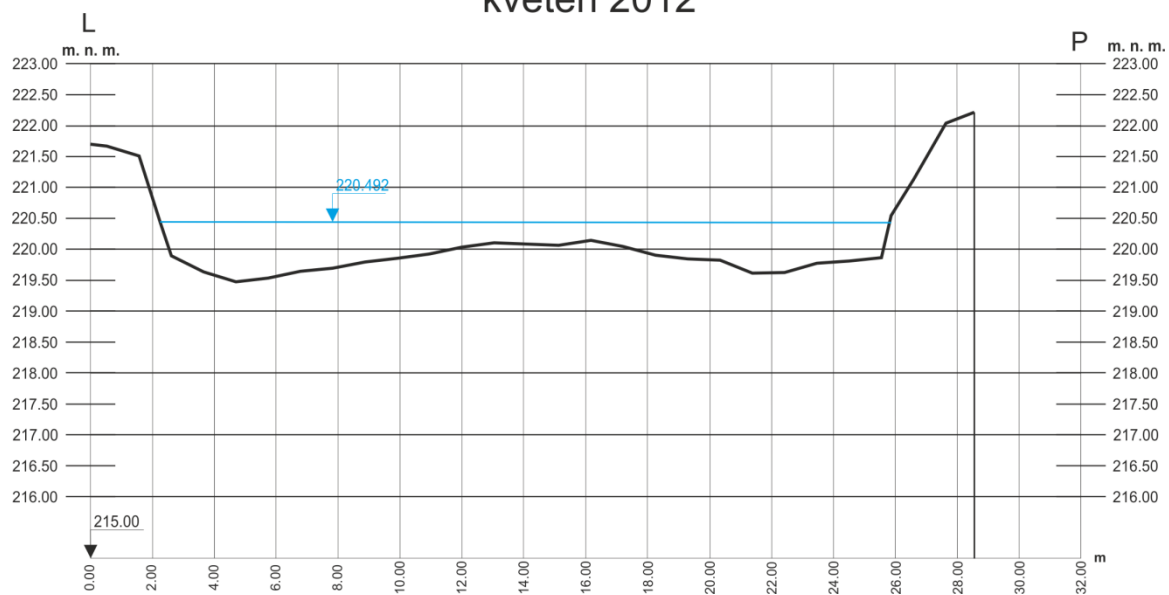
PROFIL č. 8 květen 2012



PROFIL č. 9 květen 2012

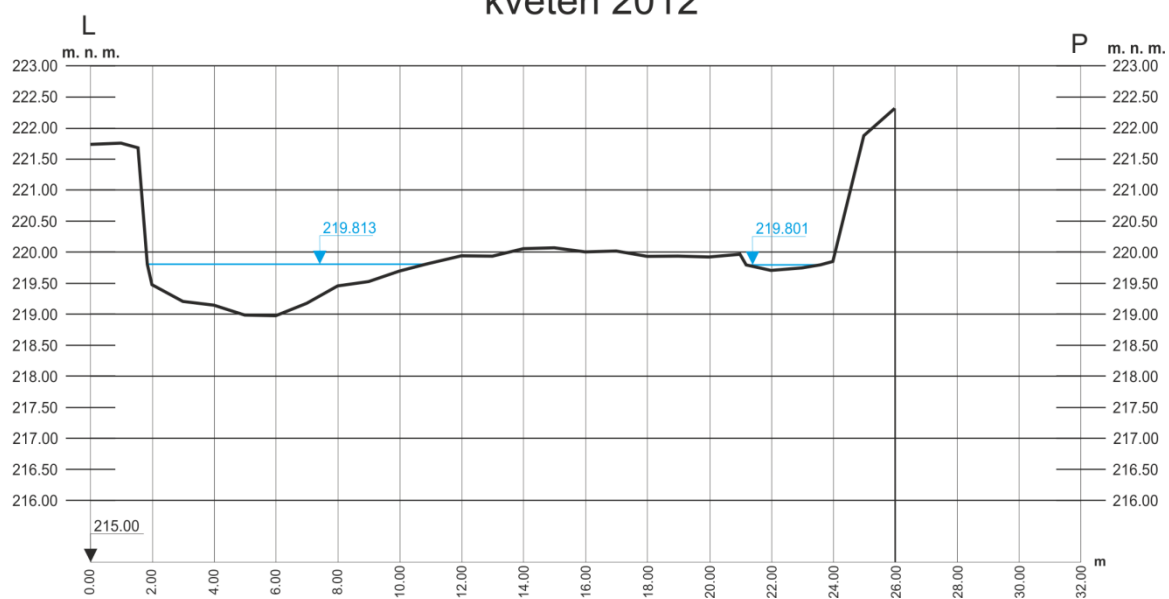


PROFIL č. 10 květen 2012

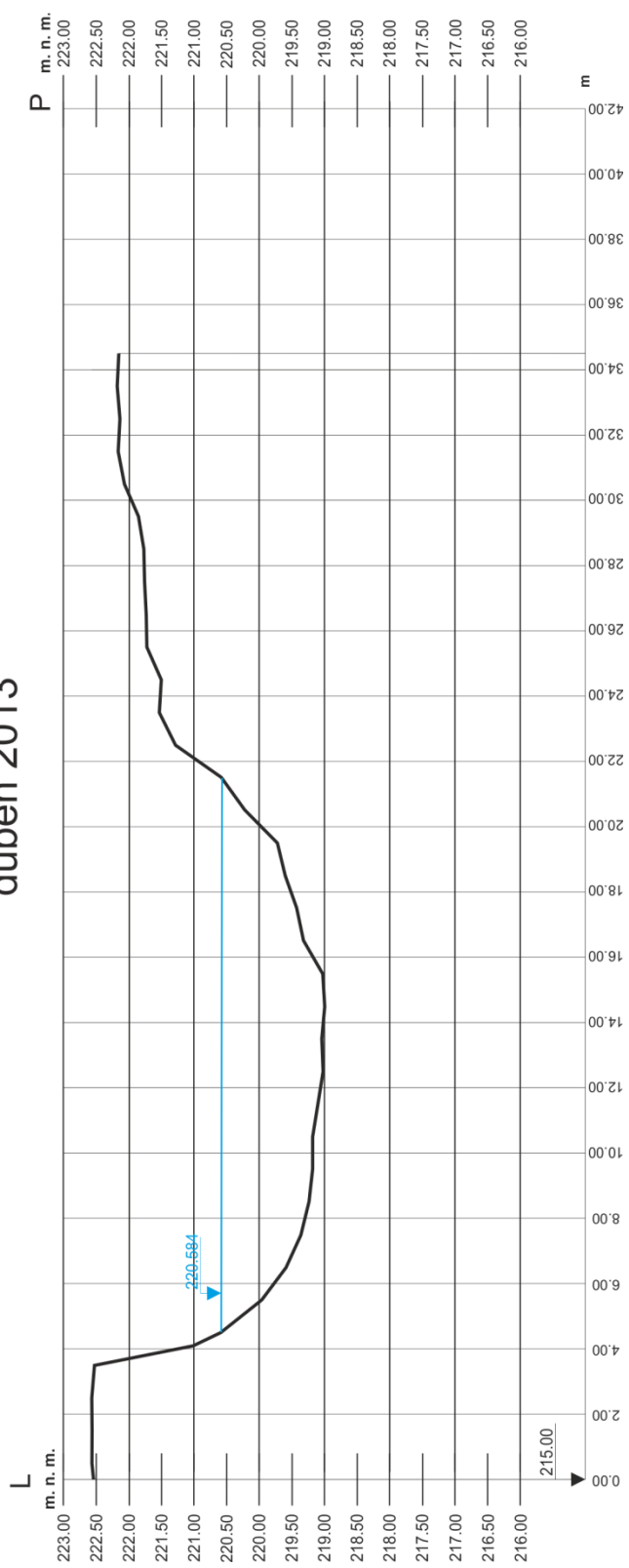


PROFIL č. 11

květen 2012

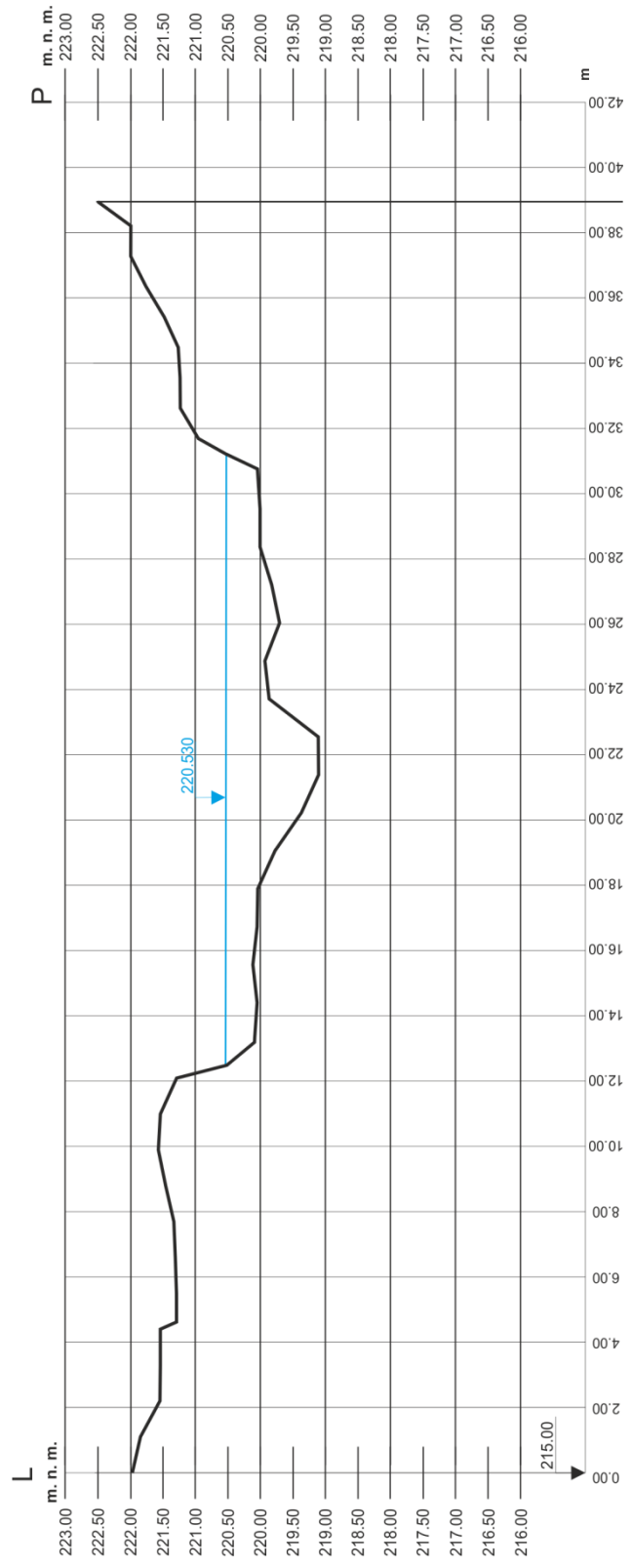


PROFIL č. 0 duben 2013

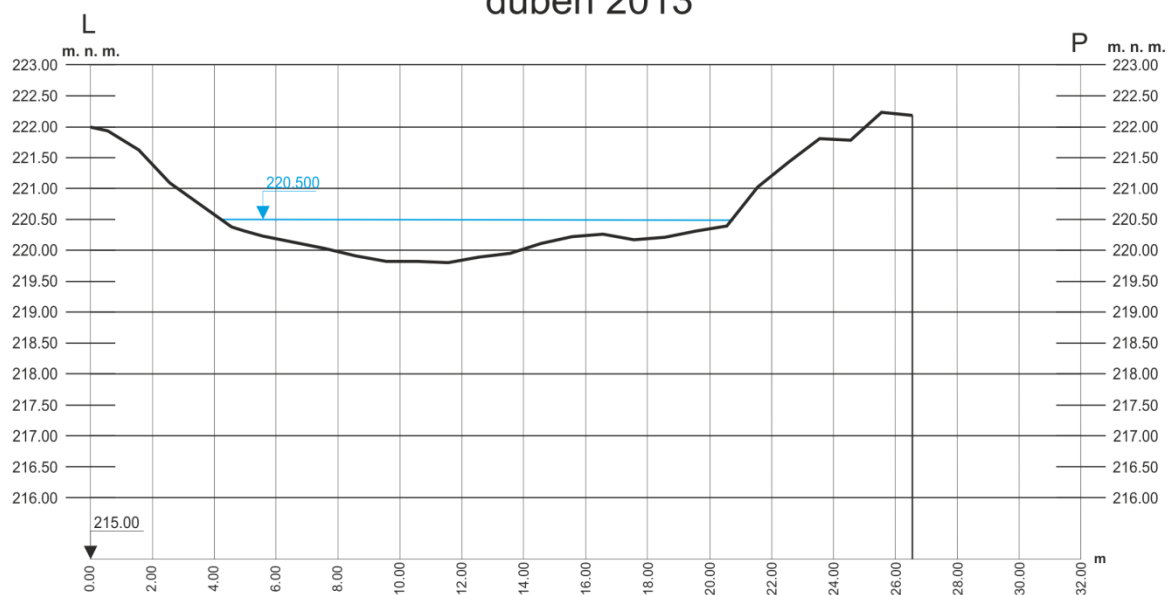


PROFIL Č. 1

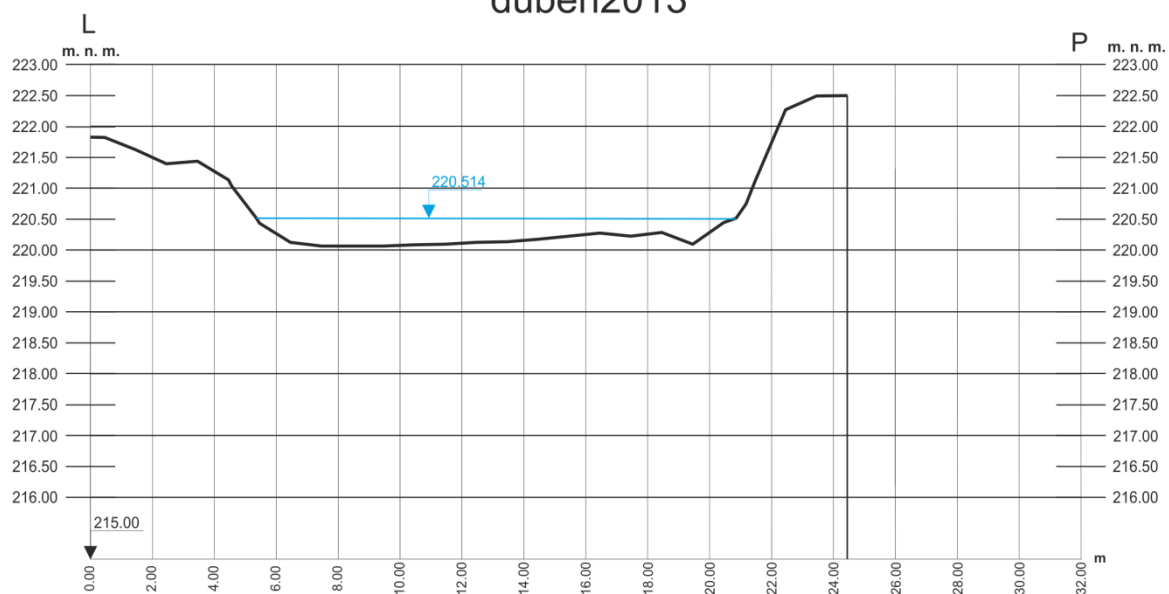
duben 2013



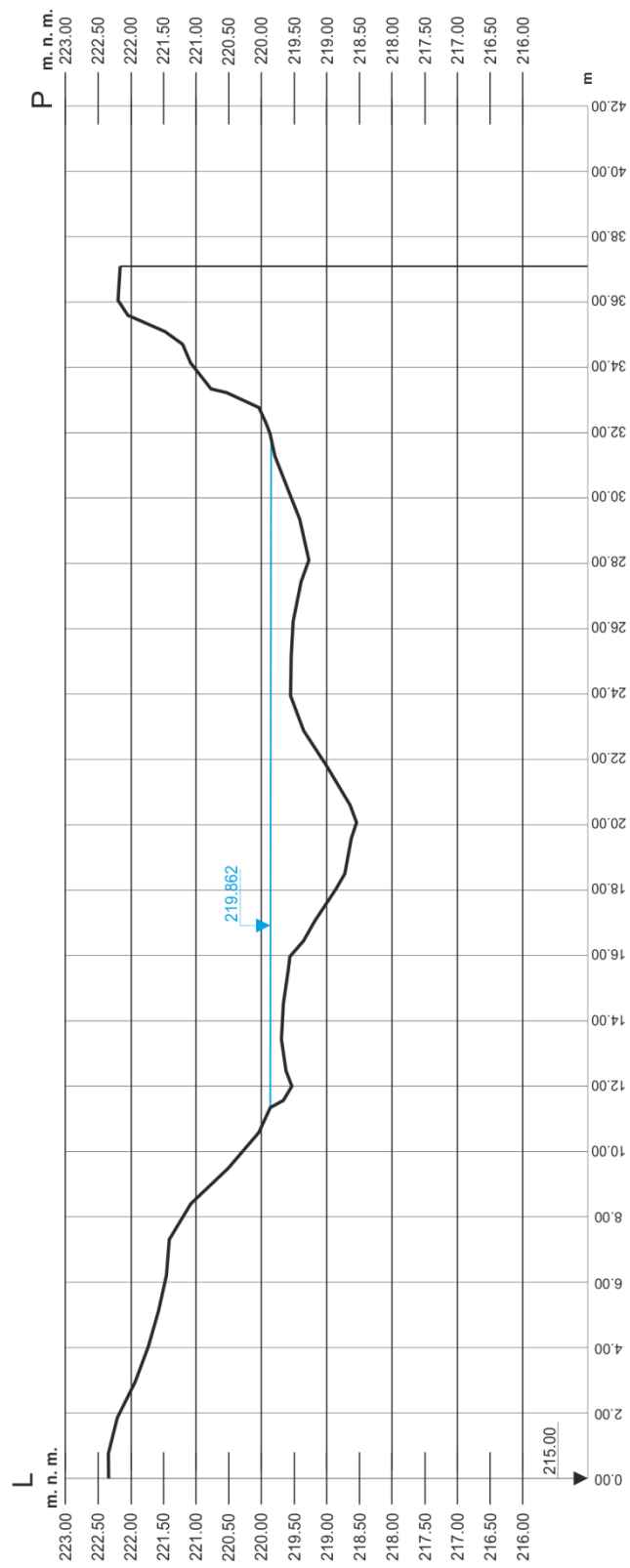
PROFIL č. 2 duben 2013



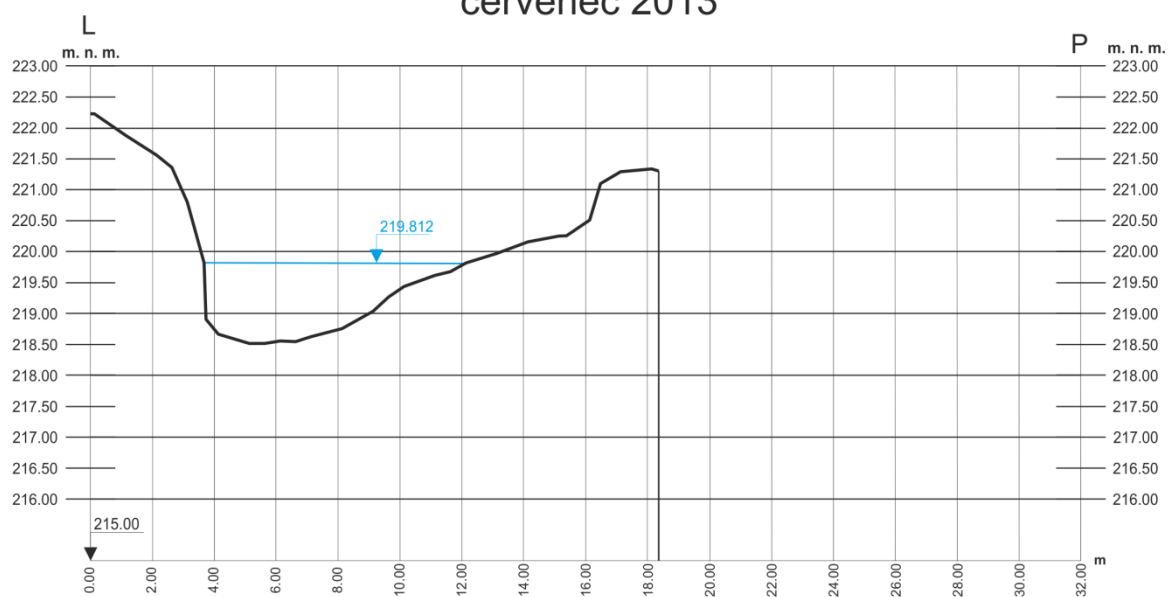
PROFIL č. 3 duben 2013



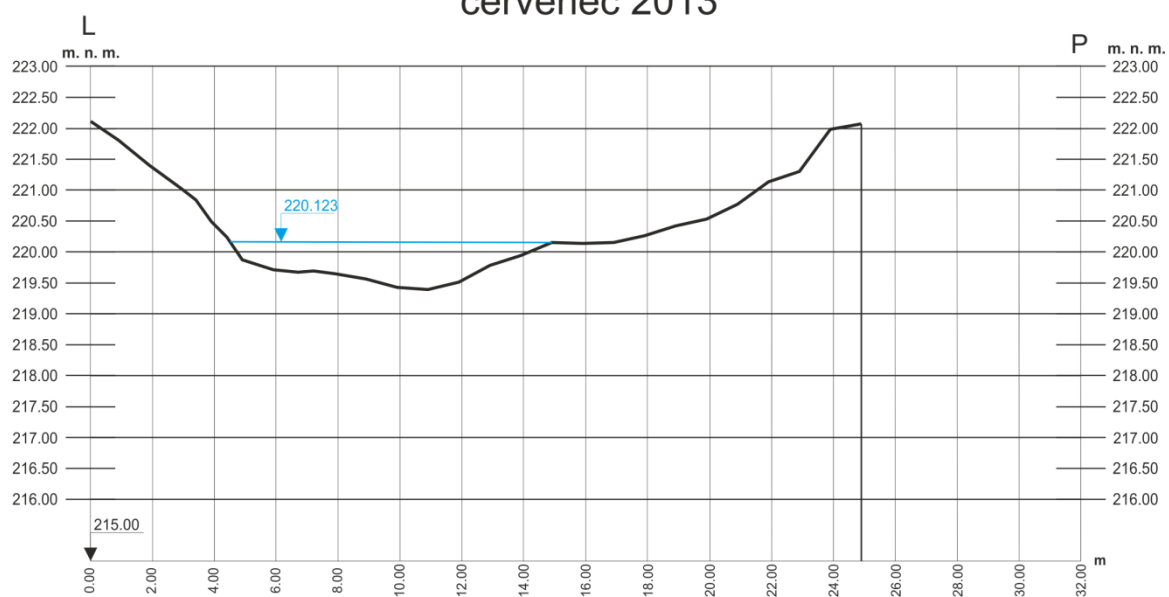
PROFIL č. 4 květen 2013



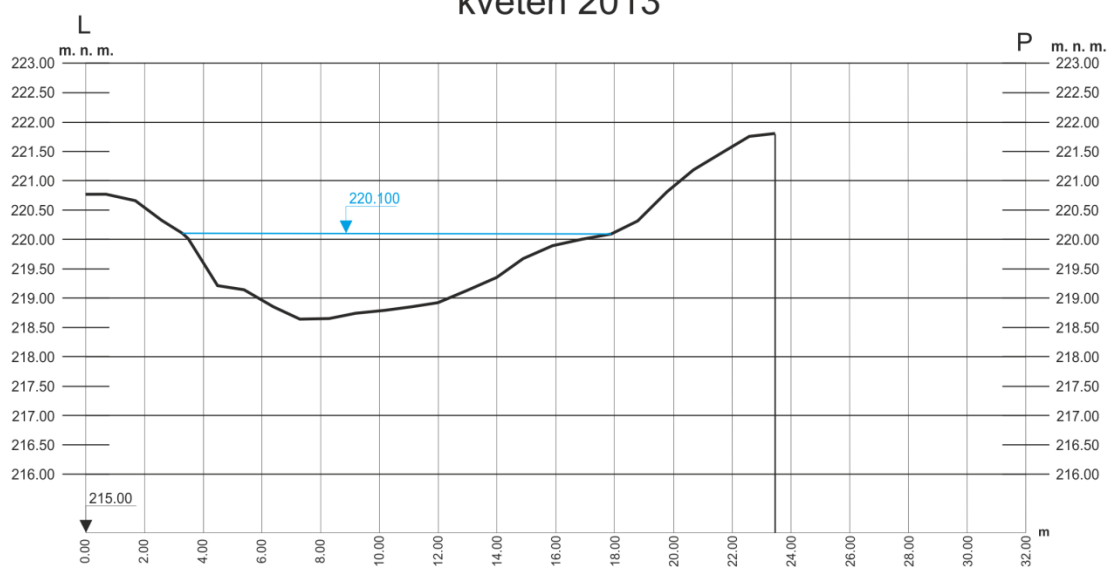
PROFIL č. 5 červenec 2013



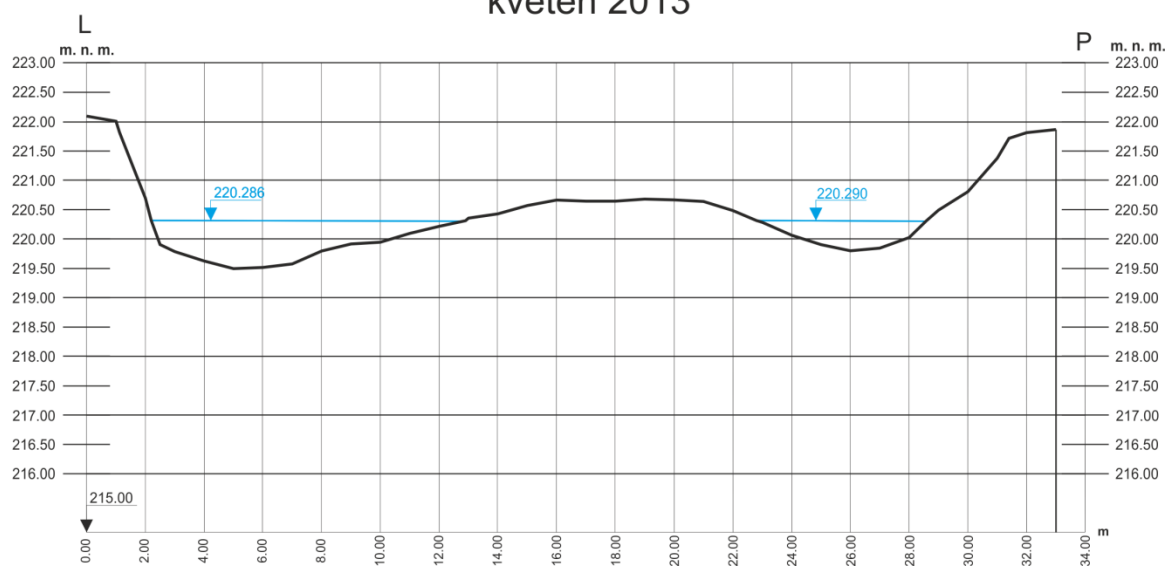
PROFIL č. 6 červenec 2013



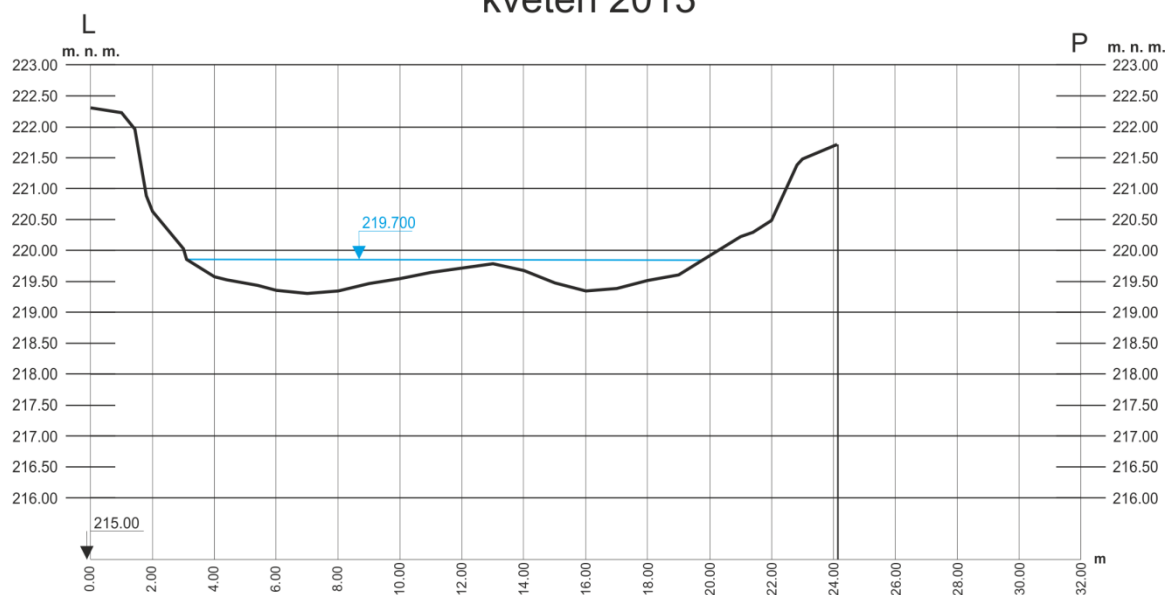
PROFIL č. 7 květen 2013



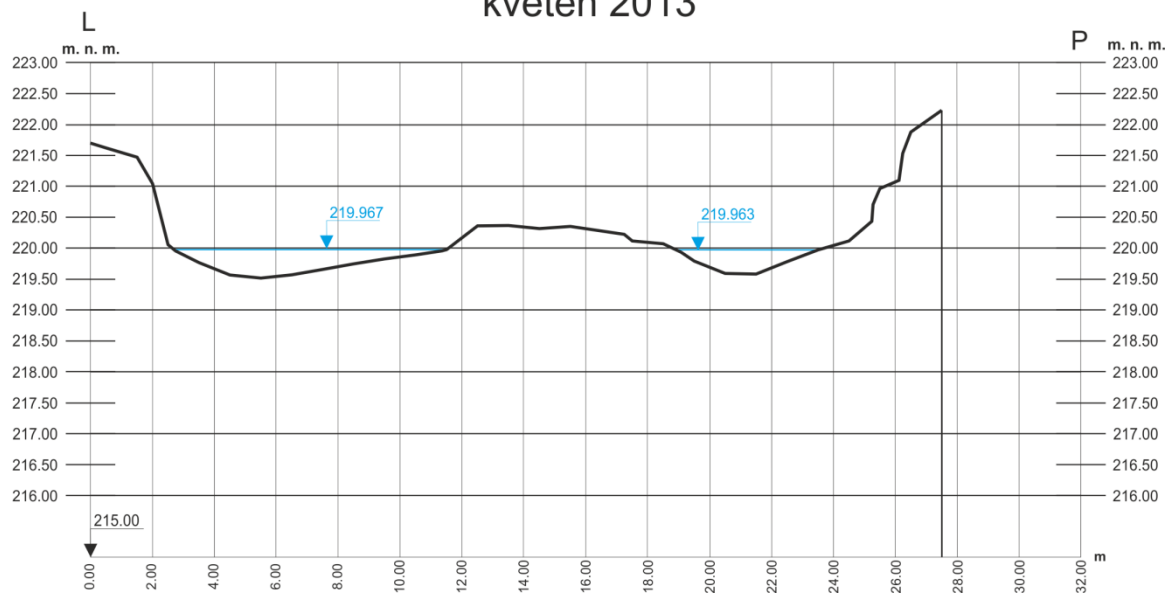
PROFIL č. 8 květen 2013



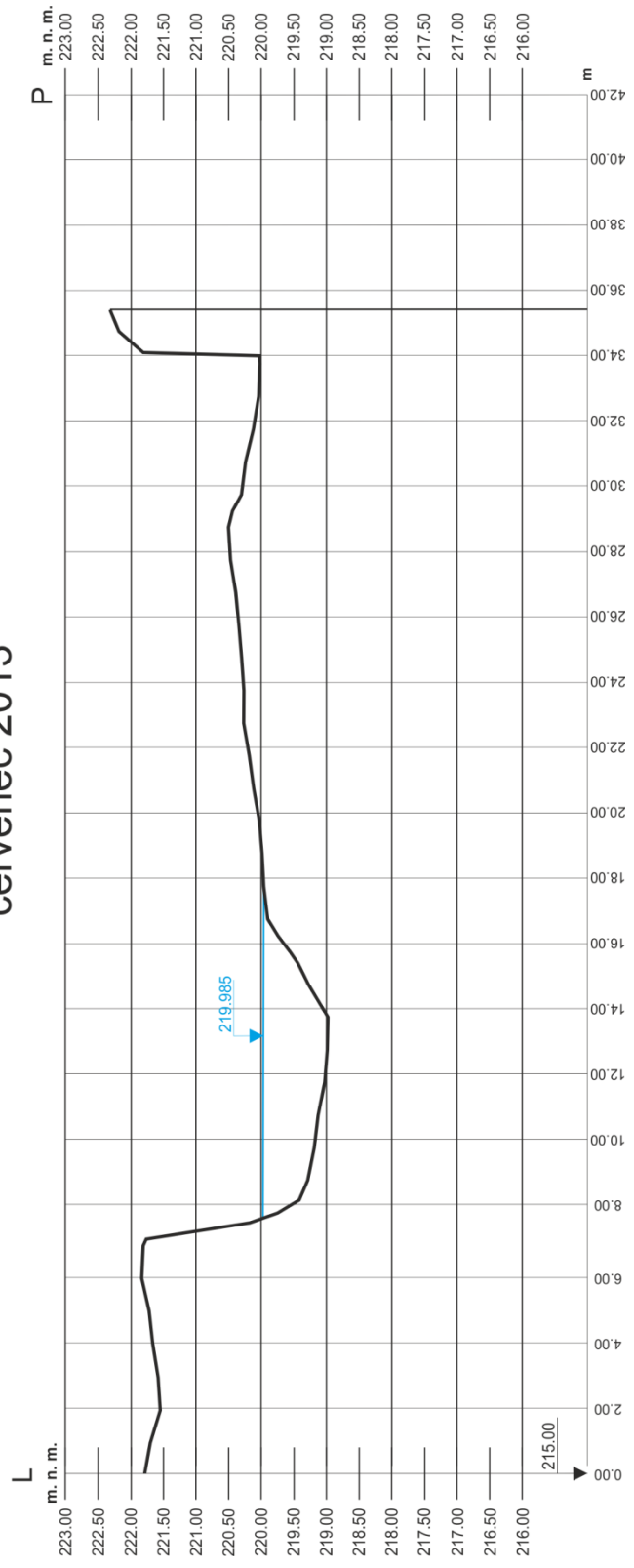
PROFIL č. 9 květen 2013



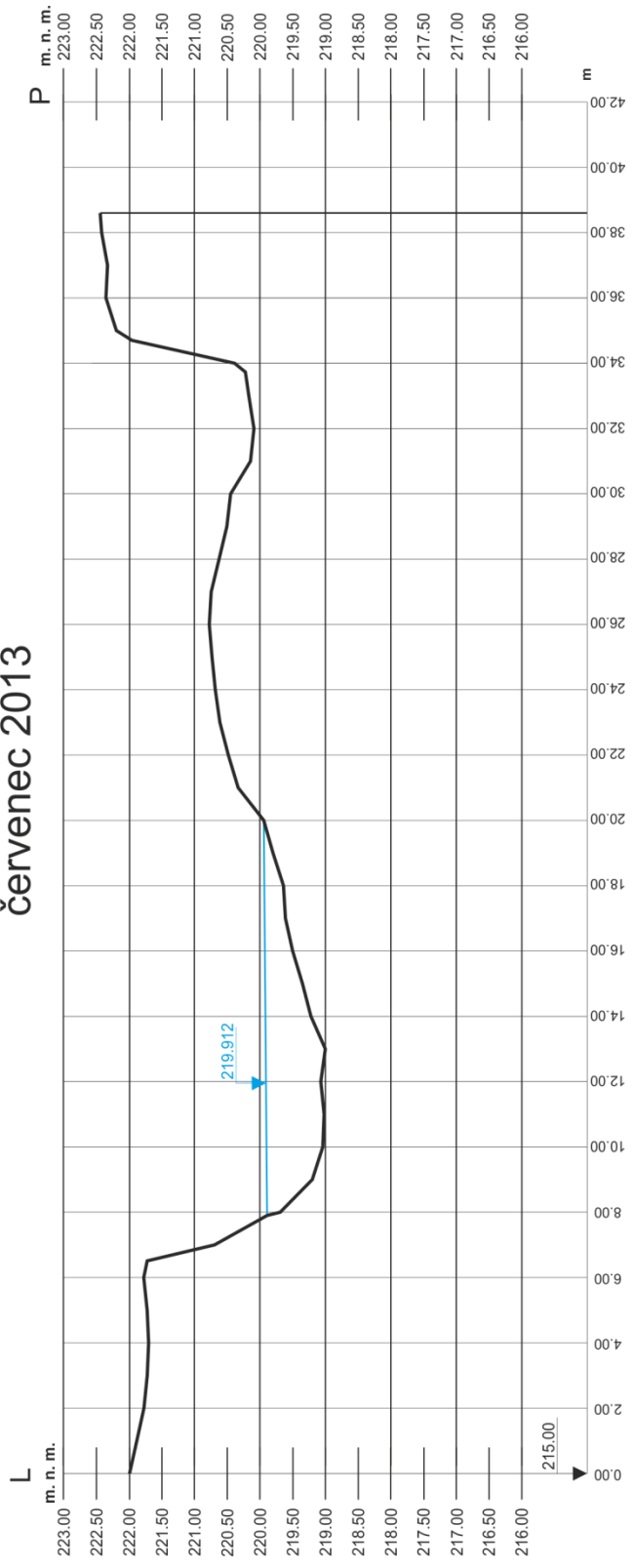
PROFIL č. 10 květen 2013



PROFIL č. 11 červenec 2013

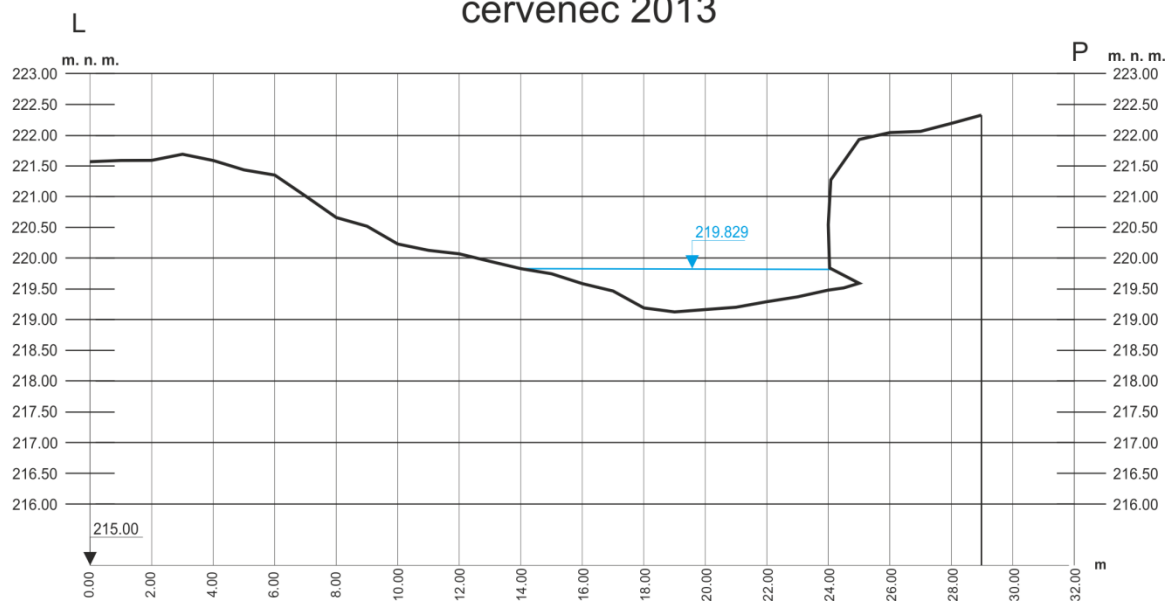


PROFIL č. 12 červenec 2013

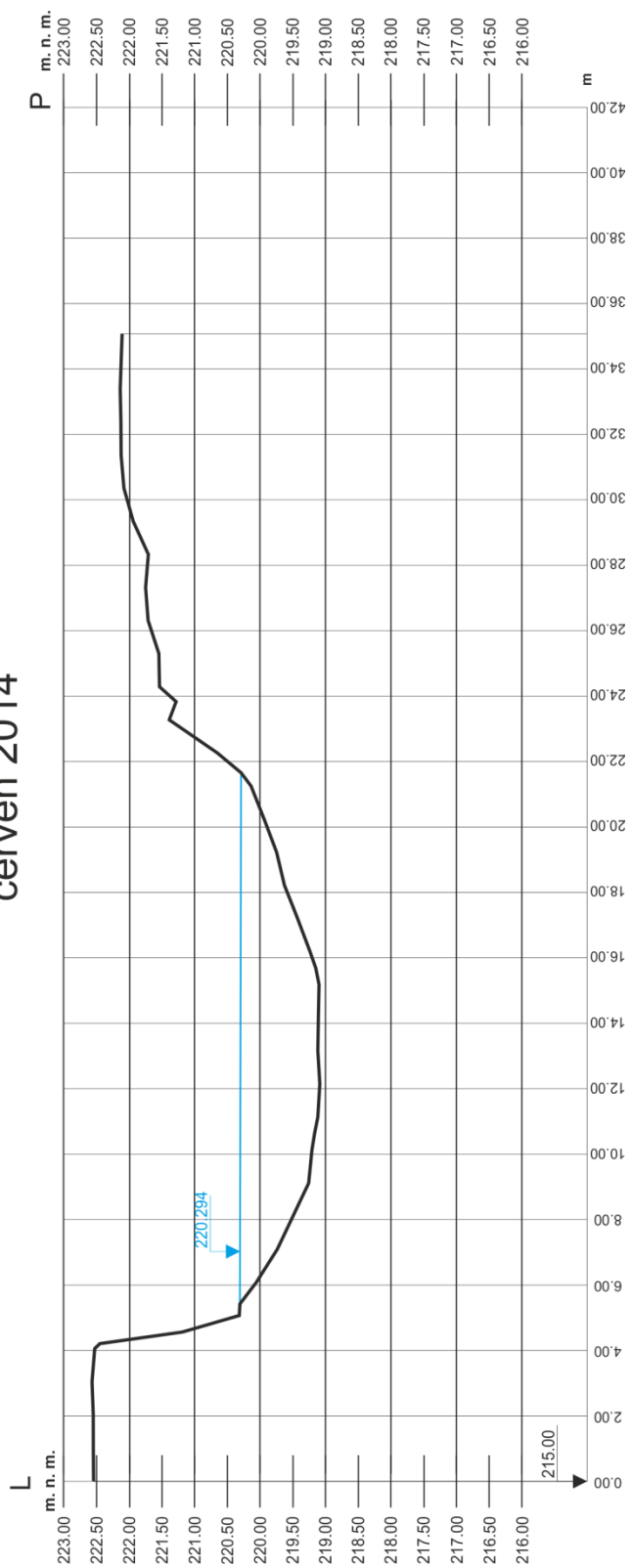


PROFIL č. 13

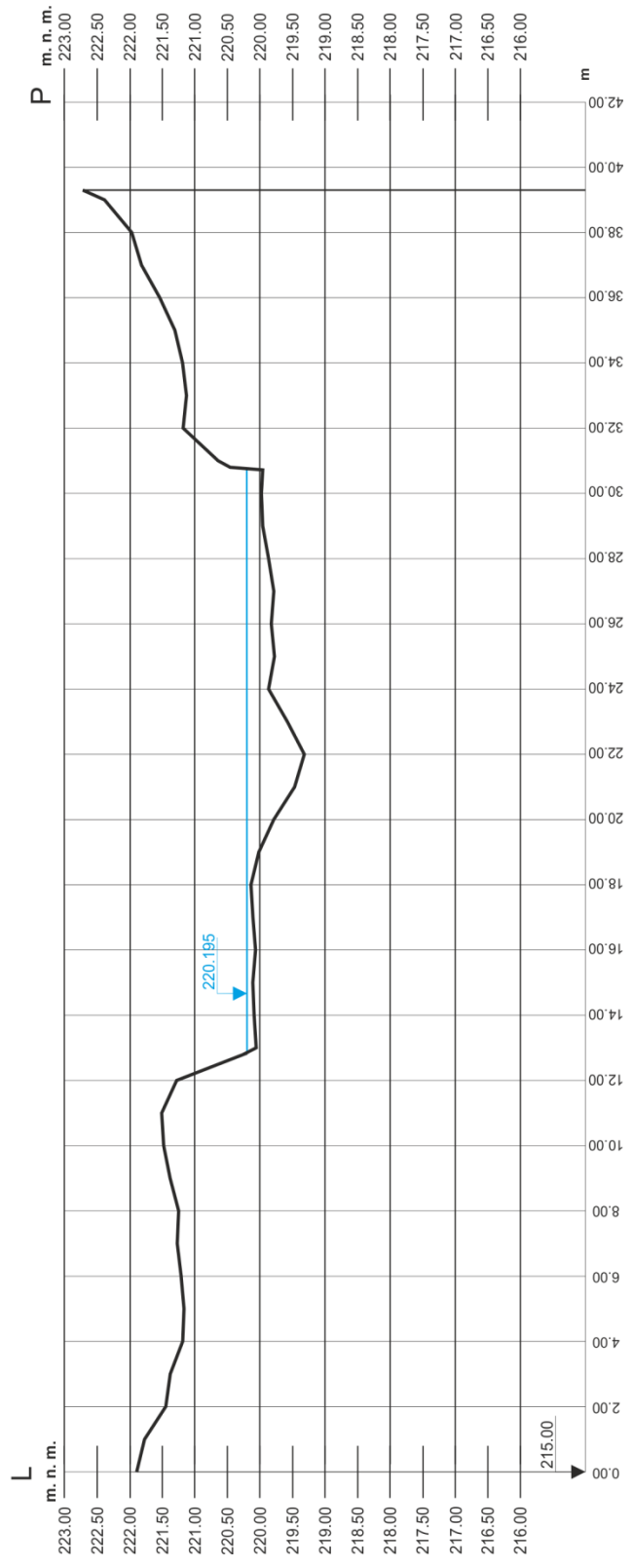
červenec 2013



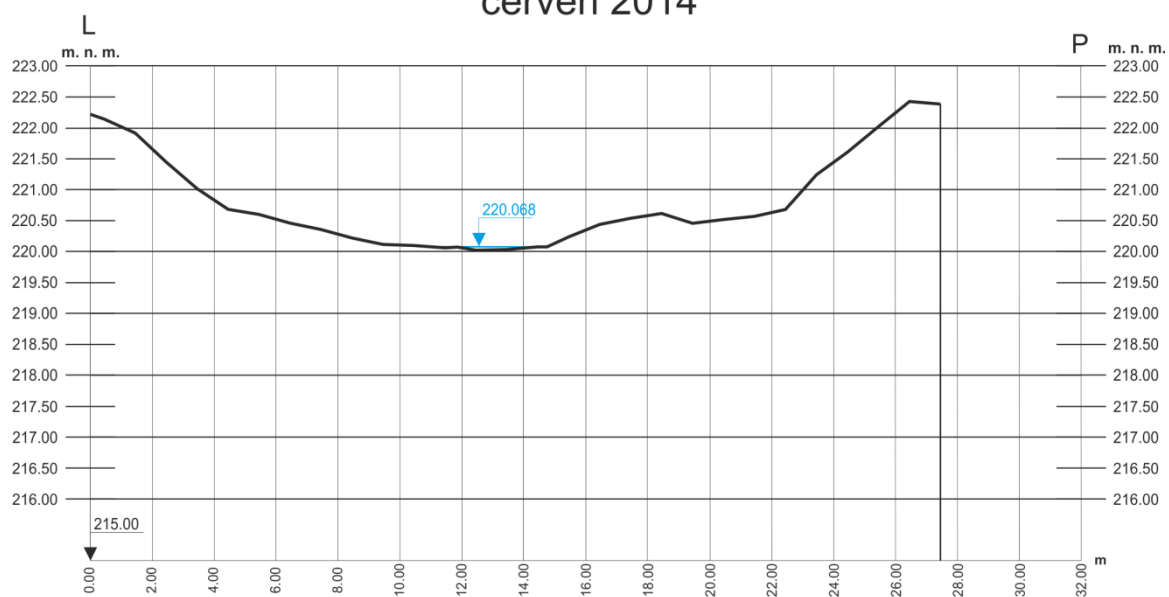
PROFIL č. 0 červen 2014



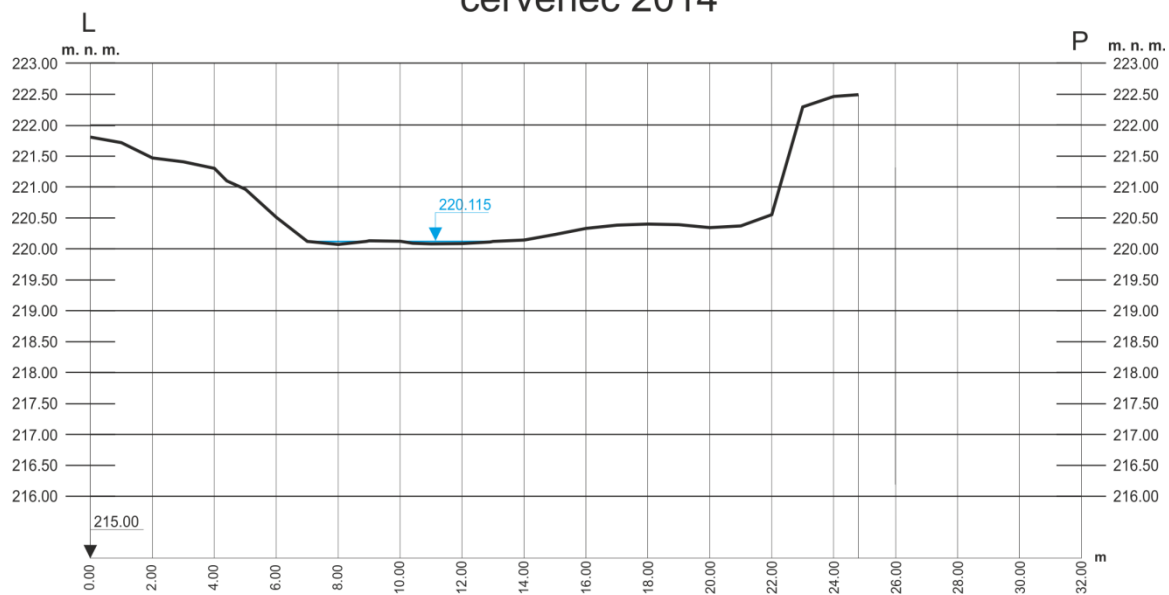
PROFIL č. 1 červen 2014



PROFIL č. 2 červen 2014

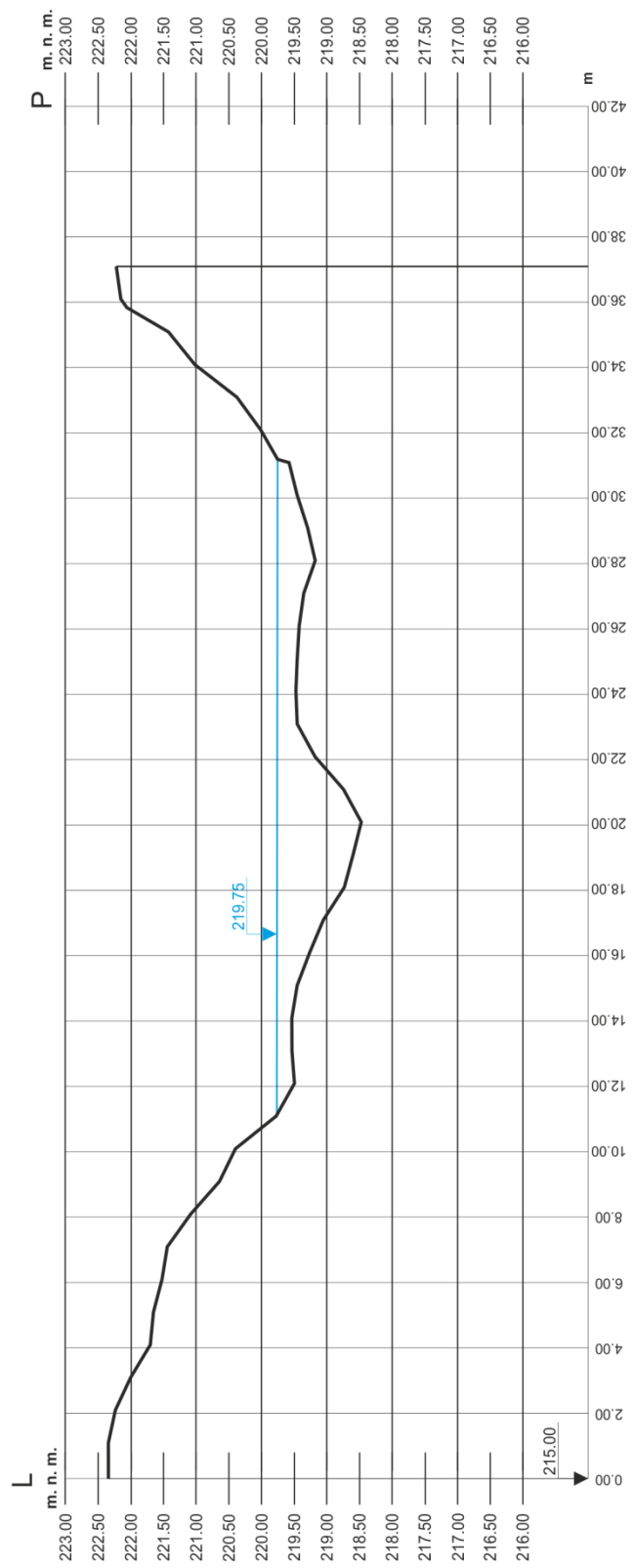


PROFIL č. 3 červenec 2014

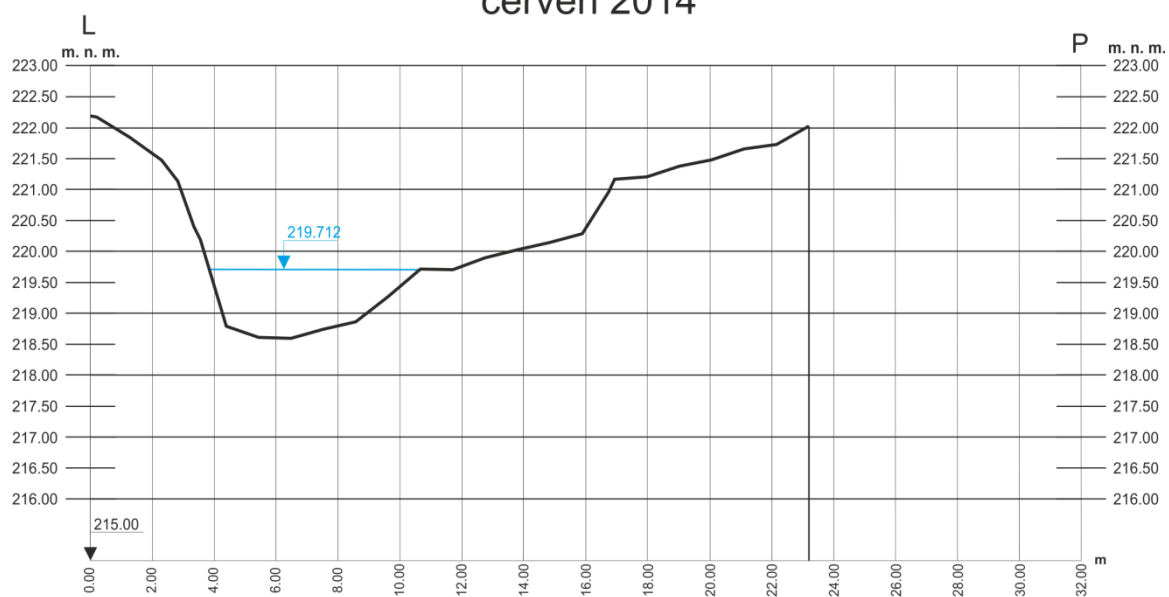


PROFIL č. 4

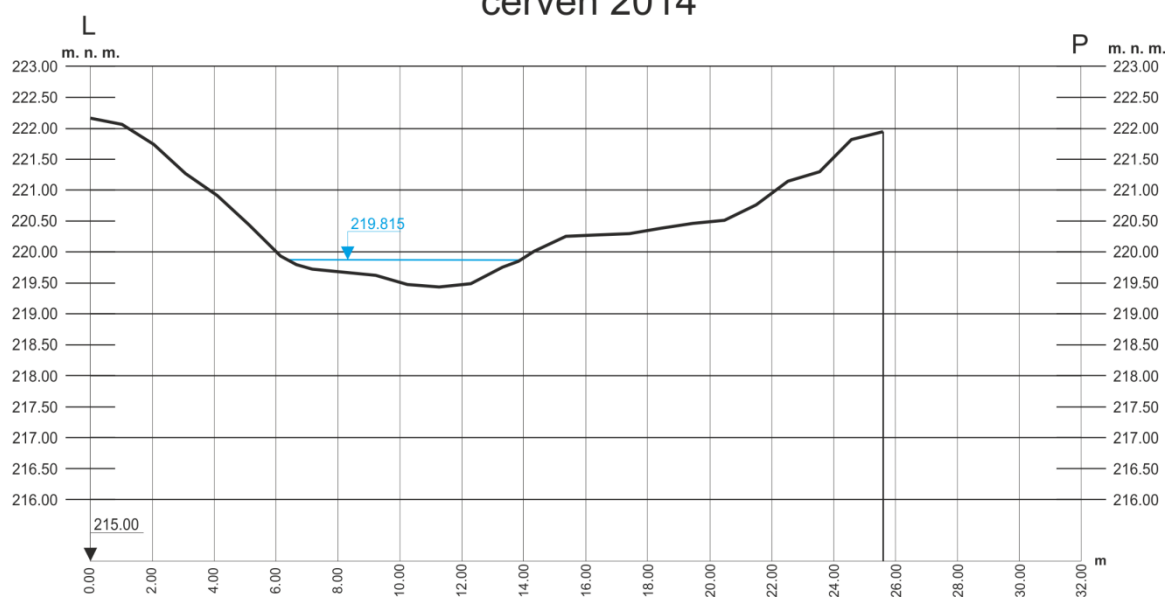
červen 2014



PROFIL č. 5 červen 2014

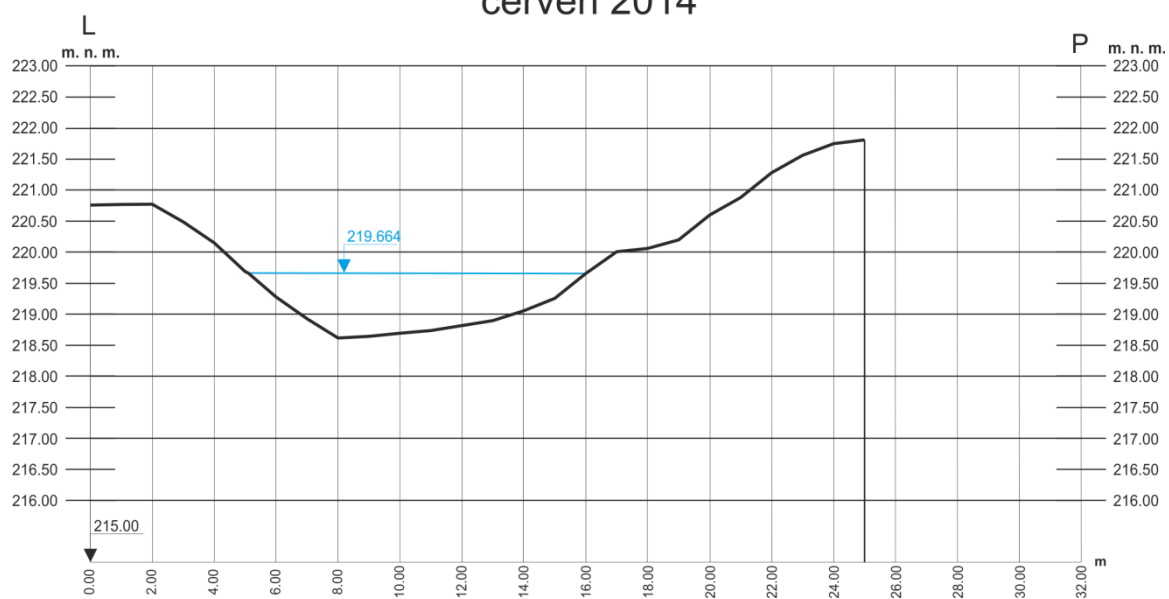


PROFIL č. 6 červen 2014



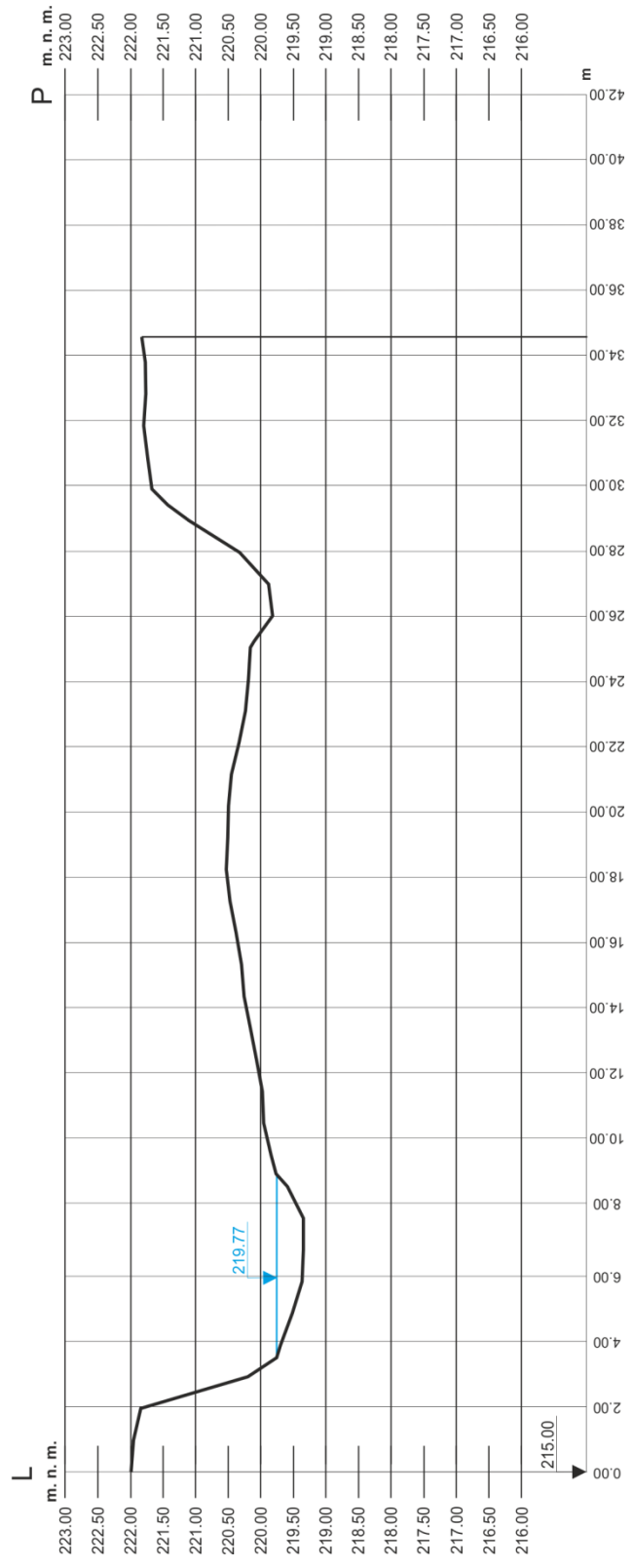
PROFIL č. 7

červen 2014

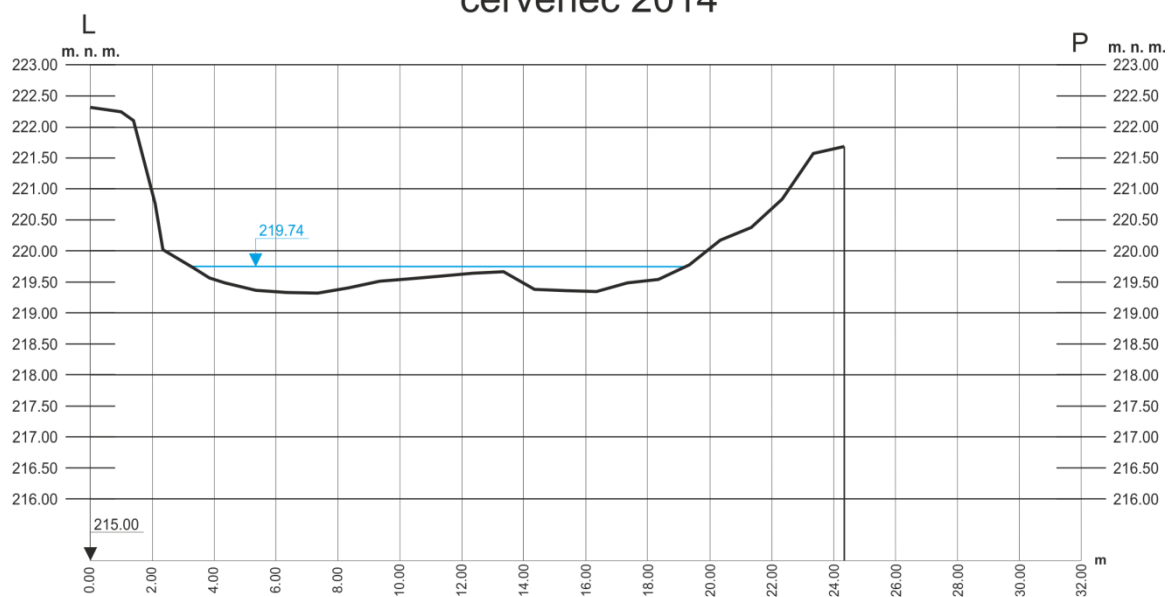


PROFIL č. 8

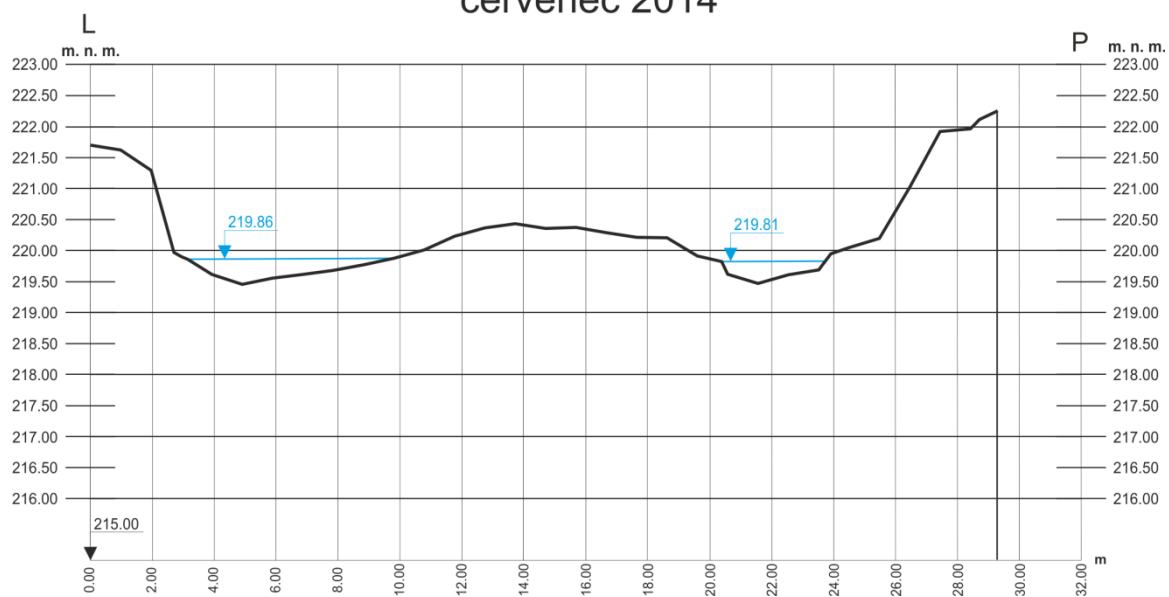
červenec 2014



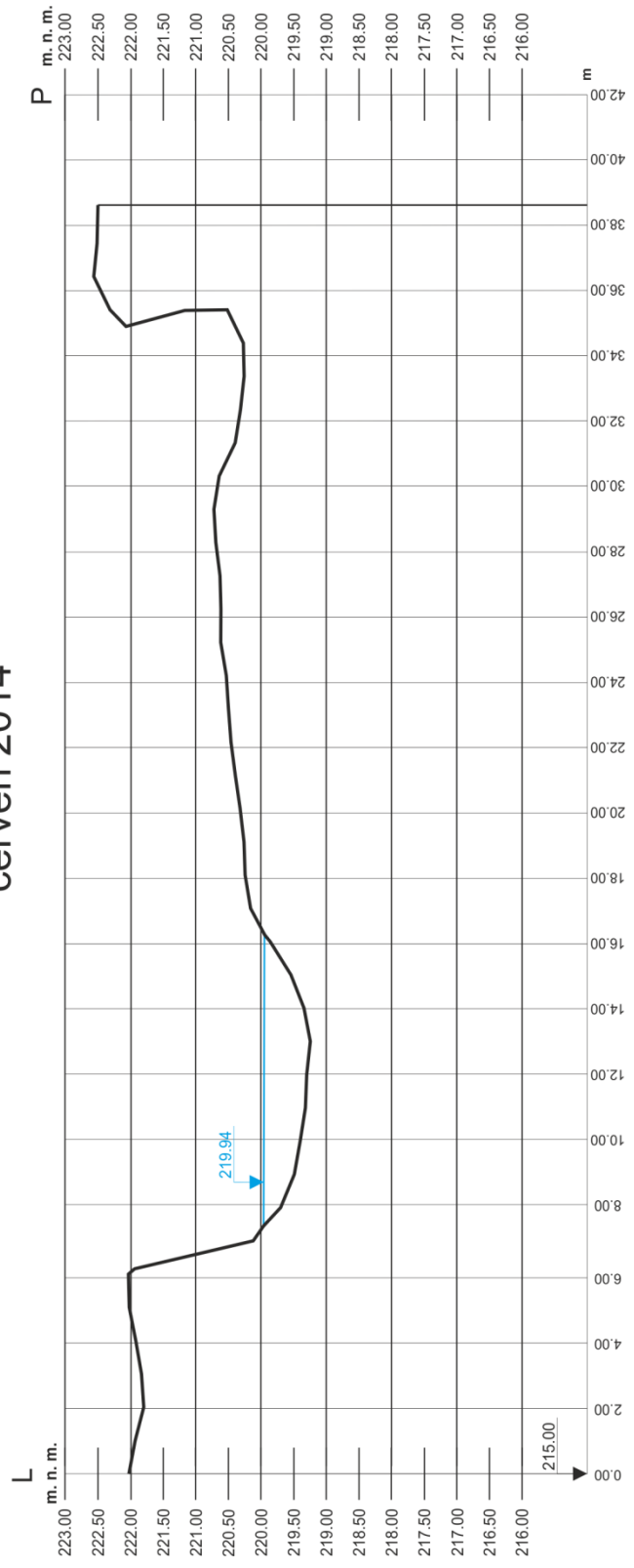
PROFIL č. 9 červenec 2014



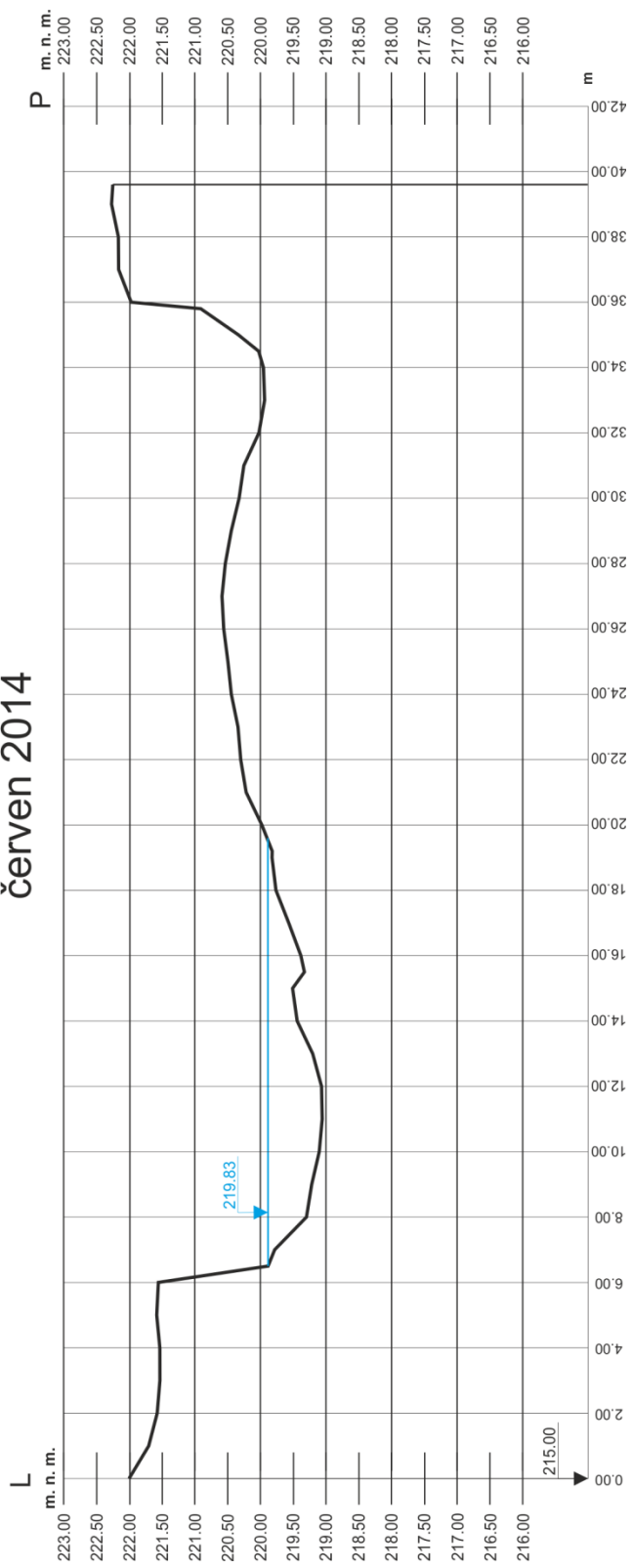
PROFIL č. 10 červenec 2014



PROFIL č. 11 červen 2014



PROFIL č. 12 červen 2014



PROFIL č. 13

červen 2014

