

DYNAMIKA PODZEMNÍCH VOD V POMORAVSKÉ NIVĚ

THE DYNAMICS OF GROUNDWATER LEVEL IN THE MORAVA RIVER FLOODPLAIN
(CZECH REPUBLIC)LADISLAV MENŠÍK¹ ✉ - PETR VAHALÍK¹ - VÍTEŽSLAV HYBLER¹ - EVA KOSTKOVÁ¹ - PAVEL HADAŠ² - ALOIS PRAX¹ - JIŘÍ KULHAVÝ¹¹Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Zemědělská 3, CZ - 613 00 Brno²Zpracování dat, Ořechovka 1727, CZ - 696 62 Strážnice

✉ e-mail: ladislav.mensik@mendelu.cz

ABSTRACT

Increasingly perceptible climatic extremes combined with the specific soil and hydrogeological conditions of the Morava River floodplain (Czech Republic) affect the groundwater dynamics in the right-bank alluvium. Following the last hydraulic engineering measures carried out in the Morava River floodplain in the second half of the 20th century, the groundwater regime has been subjected to frequent changes, which have had a negative impact on floodplain forests. The aim of the presented study is to verify the possibilities of GIS methods application in evaluating the current annual groundwater dynamics in the model area of the Morava River floodplain in the year 2013. Results obtained confirmed the possibility of applying the given method in monitoring the ongoing trend of groundwater level decrease in the study area in relation to the specific climatic and hydrological conditions in the river basin. The research still continues. Using a larger data set from 2014, the groundwater level evaluation is further refined.

Klíčová slova: podzemní vody, aplikace GIS, aluvium řeky Moravy, lužní lesy, Česká republika

Key words: groundwaters, GIS applications, Morava River alluvium, alluvial forests, Czech Republic

ÚVOD

Lužní lesy v České republice pokrývají dnes přibližně 33 000 hektarů. Většina z nich se nachází v oblasti soutoku řek Moravy a Dyje, v Litovelském Pomoraví, v aluviu Labe a Odry (BUČEK, ŠTYKAR 2002; KLIMO et al. 2013; MACHAR 2013). Nejširší nivy s nejrozvinutějším nivním fenoménem jsou v povodí řeky Moravy. Lužní lesy patří k cenným biocenózám s významnou biodiverzitou, která je závislá na specifických hydrogeologických podmínkách ve vazbě na přirozenou dynamiku vlhkostního režimu půd (KLIMO et al. 2008). Fluviální procesy dlouhodobě ovlivňují geomorfologický vývoj krajiny, charakter hydrologických podmínek a výskyt specifických biocenóz (KLIMO, HAGER 2001; MOLDER, SCHNEIDER 2011; MADĚRA et al. 2012).

Hydrogeologický profil současných nivních sedimentů je závislý na historickém průběhu povodňových situací, které dané sedimenty přinášely (KOUŘIL 1970; HAVLÍČEK, SMOLÍKOVÁ 1994; KOŽANÁ et al. 2014). Specifické půdní a hydrogeologické poměry údolní nivy řeky Moravy v úseku od Hodonína po Lanžhot ovlivňují výrazným způsobem dynamiku podzemních vod v pravobřežní nivě (PENKA et al. 1985; HAVLÍČEK 2001). Hydrologické poměry jsou určovány především rozkolísanými průtoky vody v řece Moravě a částečně i v řece Kyjovce (HADAŠ, PRAX 2001; KLIMO et al. 2013) a v průběhu roku není v souladu maximum atmosférických srážek s maximem průtoku vody v řece Moravě a Kyjovce (HADAŠ 2003). Specifikem zájmové oblasti je poměrně značná rozsáhlost povodí a obecně vyšší suma srážek v pramenných oblastech toků (ČERMÁK, PRAX 2001). Výrazně se uplatňují

specifické hydrogeologické poměry, které umožňují propojení říční vody Moravy a dalších recipientů s podzemní vodou ve šterkopískových pleistocenních sedimentech. Zároveň je toto území zásobárnou kvartérních pitných vod (PENKA et al. 1991). Zájmové území bylo předmětem vodohospodářských úprav dlouhodobě (HRIB et al. 2004).

Po vodohospodářských úpravách v sedmdesátých letech 20. století doznaly hydrologické poměry výrazné změny (PENKA et al. 1991; VESELÝ 2004). Byly provedeny vodohospodářské úpravy ve smyslu směrové diverzity a příčného profilu toku včetně tvrdé prohrádky dna řeky ke zlepšení poměrů protipovodňové ochrany přílehlých pozemků.

Výsledkem provedených úprav bylo: velké snížení rozkolísavosti hladiny podzemních vod, celkový znatelný pokles úrovně podzemních vod, snížení radiálního přírůstu stromů, schnoucí vrcholy korun stromů, omezení dřívě pravidelných každoročních inundací, které přinášely do lužního lesa povodňové kaly a živiny, dále rozšíření druhů bylin vázaných na sušší podmínky, ubývání a mizení druhů vázaných na trvale vlhkou a mokrou rhizosféru a vysoko položenou hladinu podzemních vod, snížení vitality bylinného patra, snížení počtů jedinců, úplné vymizení některých druhů, pokles nadzemní, podzemní biomasy a listové plochy keřů aj. (VAŠÍČEK 1991; KLIMO, KULHAVÝ 1999; KULHAVÝ et al. 1999; KULHAVÝ, GRUNDA 2000; PRAX P. et al. 2005).

V závěru osmdesátých let 20. století si lesníci jako první uvědomili možné katastrofální důsledky vodohospodářských úprav na lužní lesy. V devadesátých letech ve spolupráci s hydrology a dalšími odborníky připravili projekty na přivedení vody zpět do nitra lužních

lesů (VYBÍRAL 2007). V letech 1991–1999 byla ve všech významnějších komplexech lužních lesů vybudována složitá soustava vodních kanálů, stavidel, propustků a hradítek. Tato revitalizační opatření spočívala v obnovení podélného i příčného propojení původních kanálů a starých říčních ramen řek Dyje a Moravy. Dále pak v úpravě stavidlových objektů páteřních toků řeky Dyje a Moravy (VAŠÍČEK 2000), což umožňovalo ovlivňovat vodu v periodických i trvalých tůních, hladinu podzemní vody i její přirozené kolísání ve vegetačním období. V letech se po mnoha letech opět objevily biotopy mokřadů s trvalým či periodickým zaplavením. Výrazně se zlepšila i vitalita lesních porostů. Cílem předmětného výzkumu bylo posoudit aktuální režim podzemních vod pomocí GIS metod v modelovém území Mikulčického lesa, kde dosud nebyla provedena revitalizační opatření.

MATERIÁL A METODIKA

Zájmová oblast

Výzkum probíhal na modelovém území 85 ha lužních lesů v nadmořské výšce od 156 do 166 m n. m. mezi řekou Kyjovkou a Moravou nedaleko obce Mikulčice, viz obr. 1. Modelové území hraničí ze severní a západní strany s polními pozemky a z jižní strany s loukami. Hydrologicky je území ovlivněno řekou Moravou, Kyjovkou a v západní části obtéká komplex lužního lesa řeka Spáravka. Průměrná roční teplota se pohybuje v rozmezí 9–10 °C, průměrný roční srážkový úhrn v rozmezí 500–550 mm (HADAŠ 2003). Půdy jsou tvořeny fluvialními sedimenty. Půdním typem modelového území je fluvizem oglejená, na části se nachází písčité duna s černozemí arenickou (NĚMEČEK et al. 2011) s kvalitní vrstvou mullového humusu.

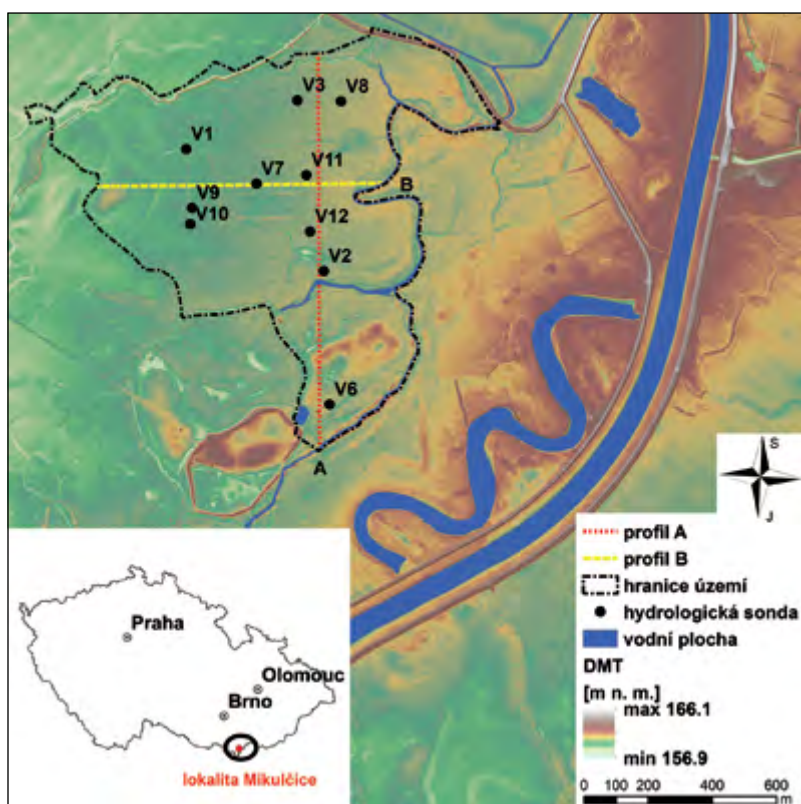
Vegetaci tvoří skupiny typů geobiocénů habro-jilmových jaseňin (*Ulmifraxineta carpini*). Hlavními dřevinami jsou dub letní (*Quercus robur* L.), jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.), jasan úzkolistý (*Fraxinus angustifolia* Vahl.), jilm vaz (*Ulmus laevis* Pall.), jilm habrolistý (*Ulmus carpiniifolia* Gled.), habr obecný (*Carpinus betulus* L.), lípa srdčitá (*Tilia cordata* Mill.) a javor babyka (*Acer campestre* L.).

Digitální model terénu (DMT)

K tvorbě digitálního modelu území studované lokality byla použita lidarová data pořizovaná Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním v roce 2013. Konkrétně bylo použito bodové mračno surových dat, z něhož byl vyfiltrován reliéf představující podklad pro datový model reliéfu 5G. Digitální model reliéfu 5G (DMR 5G) představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskretních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Bodové mračno lidarových dat bylo prostorově interpolováno do digitálního modelu terénu (DTM) s prostorovým rozlišením 1 metr pomocí konverzního nástroje Las Dataset to Raster v software ArcGIS 10.2. (ESRI). Interpolační parametry pro odhad hodnoty nadmořské výšky konkrétních pixelů byly nastaveny na průměrnou hodnotu v případě výskytu více bodů na ploše pixelu a v případě absence bodu na ploše pixelu je volena interpolační metoda „Natural Neighbor“ dle (KARAN et al. 2013).

Podzemní vody – hydrologické sondy

Pozice jednotlivých hydrologických sond (celkem 10) a nadmořské výšky byla zaměřena geodetickým polygonovým pořadem (obr. 1).



Obr. 1.

Zájmová oblast výzkumu, transekty a hydrologické sondy v zájmovém území

Fig. 1.

Research area of interest, transects and hydrological probes (lokalita – locality; profil A – profile A; profil B – profile B; hranice území – area of interest; hydrologická sonda – hydrological probe; vodní plocha – body of water; DMT – digital terrain model)

Tento pořad byl připojen do souřadnicové sítě S-JTSK (systém jednotné trigonometrické sítě katastrální) pomocí GPS (global positioning system) s využitím RTK (Real Time Kinematic) metody zvyšující přesnost měření dle (HAN 1997). Dosažená přesnost měření je pod limitní hodnotou 2,5 cm v horizontálním i vertikálním směru.

V průběhu roku 2013 měřena úroveň hladiny podzemní vody v dvou-týdenních intervalech pomocí hladinoměru OAL 10 /NPK Europe Mfg. s. r. o./.

Povrchové vody

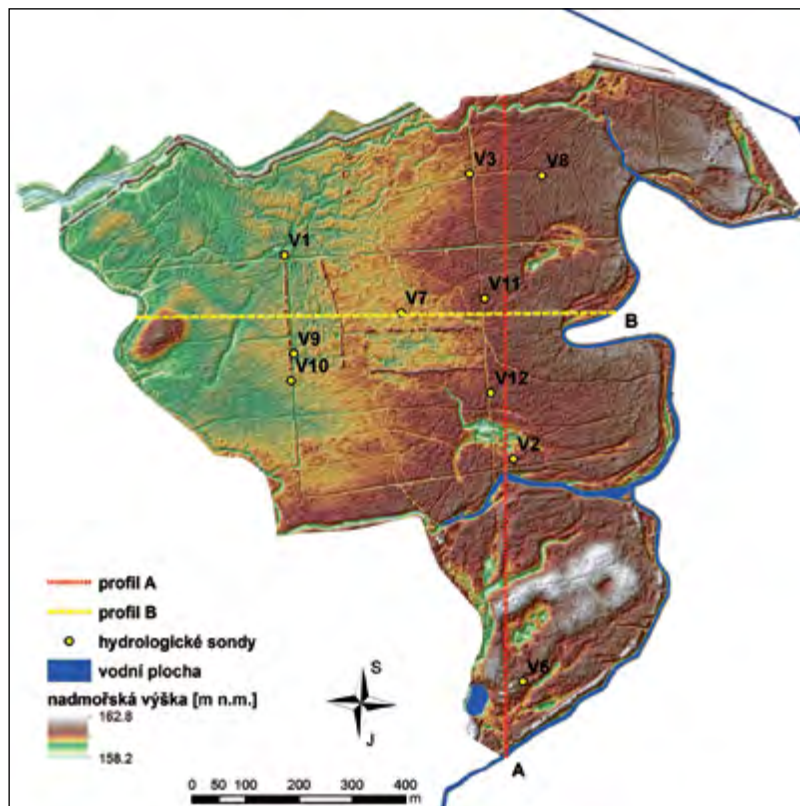
Hodnocení průtokového režimu povrchových vod v zájmovém území bylo provedeno dle měření v limnigrafických stanicích ČHMÚ Strážnice-Morava, Lanžhot-Morava a Kyjov-Kyjovka. Údaje o hodinových průtocích a vodních stavech byly převzaty z webových stránek ČHMÚ. Vzhledem k chybějícím datům o průtokovém režimu místních toků (řeka Kyjovka, Spářavka – Teplý járek) oblasti Mikulčického a Tvrdonického luhu, bylo zahájeno vlastní měření vodního stavu v profilu lávky pod Těšicemi (Kyjovka) a v místě vstupu Teplého járu do Mikulčického luhu. K měření vodního stavu je použit tlakový senzor s baterií, umístěný v perforované (ve spodní části) ocelové nerezové pažnici. Vše je v 15minutových intervalech ukládáno do datalogeru ALA (Amet, Velké Bílovice). Měření výšky hladiny a teploty vody v řece Kyjovce a ve Spářavce – Teplém járu reprezentuje průtokové podmínky v severní části Mikulčického luhu, tzv. dynamiku a množství povrchových vod vstupující do zájmového území.

Model hladiny podzemních vod

Model hladiny podzemních vod studovaného území je analyzován na základě naměřených hodnot z 10 hydrologických sond /V1-V10/ (jarní a podzimní průměr roku 2013). Bodové hodnoty byly dle YAO at al. (2014) prostorově interpolovány metodou minimální křivosti (SPLINE type Tension), která mezi množstvím ostatních interpolačních technik vytváří spojitě zvlněný povrch s minimalizací externalit, jako jsou deprese, hřbety apod. Prostorovým rozlišením modelových rastrů je 1 metr. Studovaným územím byly následně navrženy dva transekty, tak aby procházely nejvyšší koncentrací pozic hydrologických sond. Těmito transekty byly vyneseny příčné řezy rastrových vrstev digitálního modelu terénu a modelu hladiny podzemní vody.

VÝSLEDKY

V průběhu roku 2013 byl v zájmovém území sledován pohyb podzemního toku vody. Členitý mikrorelief terénu vytvořený sedimenty řeky Moravy byl zdokumentován digitálním modelem terénu s využitím dat leteckého laserového skenování. Pozice deseti hydrologických sond, na nichž probíhala pravidelná měření, byla zaměřena geodetickým polygonovým pořadem. Zájmové území se vyznačuje charakteristickým sklonem terénu, který se snižuje s přibývajícím vzdáleností od toku Moravy (od východu k západu; obr. 1). Výškový rozdíl mikroreliefu je téměř 5 m. Stagující povrchová voda se objevuje pouze ve výraznější depresi v blízkosti sondy V2, kde se vyskytuje zbytek bývalého ramene řeky (obr. 2).



Obr. 2.

Podrobný digitální model terénu zájmového území

Fig. 2.

Detailed digital terrain model (DMT) of the area of interest (profil A – profile A; profil B – profile B; hydrologické sondy – hydrological probes; vodní plocha – body of water; nadmořská výška – altitude)

Obr. 3 znázorňuje průběh izolinií hladiny podzemní vody v zájmovém území za jarního stavu v roce 2013, kdy maximální úroveň dosahovala nadmořské výšky 158,8 m a minimální hodnota byla o 1,5 m níže. Průběh izolinií hladiny podzemní vody je dán kromě celkového přirozeného sklonu území také půdními a hydrogeologickými podmínkami profilu zdejších sedimentů. Významný podíl na režimu podzemních vod má trvale zavodněné slepé rameno Spářavky, které zasahuje do vzdálenosti až 520 m od hlavního toku.

Průběh hladiny podzemní vody v jarním a podzimním období je uveden na obr. 4. Výškový rozdíl mezi oběma obdobími je max. 1,0 m. Odlišný průběh má pouze střední část transektu mezi vrty V2 a V11, kde zvláště na jaře dochází k přechodnému zvýšení vodní hladiny. Tuto anomálii je možno vysvětlit přítomností stále zvodněného slepého ramene toku Spářavky a výraznou změnou půdního profilu, kde částečně rozplavená písčité duna přechází do zrnitostně těžkého půdního profilu povodňových kalů. Při terénním měření byly zjištěny hodnoty koeficientu propustnosti cca $4,0 \text{ m} \cdot \text{den}^{-1}$ a v profilu povodňových kalů $0,001\text{--}0,4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Rozdíl v úrovni hladiny podzemní vody mezi jarním a podzimním stavem je patrný z obr. 4. Ve vrtu V7 byla naměřena stejná úroveň hladiny spodní vody na jaře i na podzim, což bylo ovlivněno větší mocností málo propustných jílovitých půdních profilů. Celkový spád vodní hladiny se pohybuje na transektu B kolem hodnoty 1 ‰ .

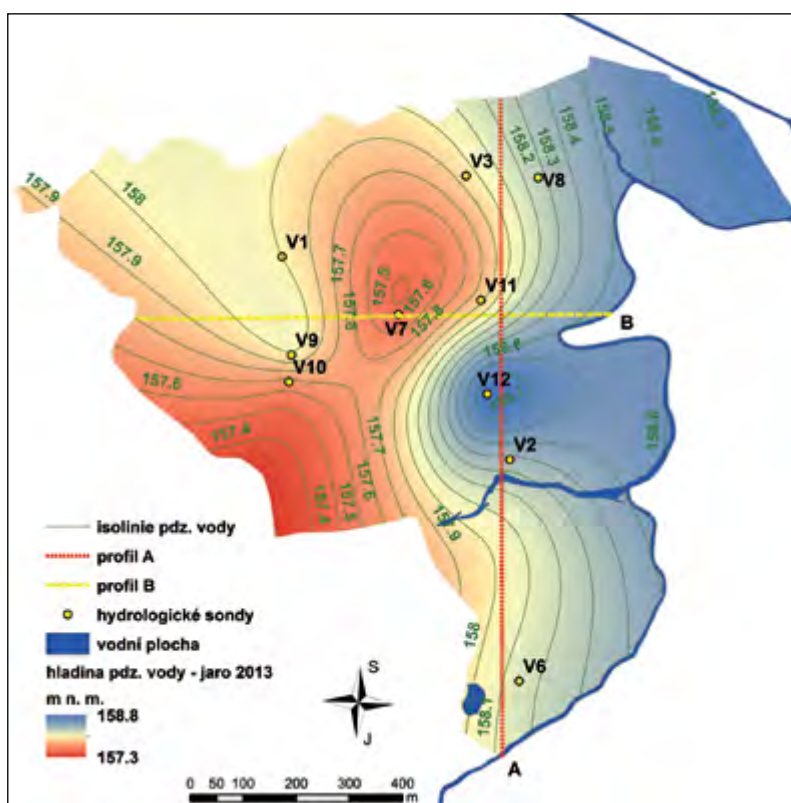
Hydrologicky byl rok 2013 poněkud odlišný od normálu (obr. 5). Vysoké průtoky v řece Moravě a vyšší množství atmosférických srážek v jarním období a počátkem léta znamenaly výskyt stagující vody v depresích v blízkosti řeky. Zlom nastal až v druhé polovině roku při snížení průtoků v řece a celkově nižších úhrnech srážek.

DISKUSE

Široké údolní nivy dolních toků řek zůstávají v pozornosti člověka jednak jako potenciální zdroje relativně kvalitní vodárensky využitelné podzemní vody a jednak jako většinou kvalitní půdní fond využitelný v zemědělství i lesním hospodářství (KLIMO et al. 2008, 2013). Limitujícím faktorem pro maximální produkční využití kvalitní půdy bývá obvykle velká rozkolísanost průtoků v recipientech a na nich pak závislé úrovně hladiny podzemní vody v okolních nivách. V návaznosti na občasná srážkové deficity v tomto regionu není vyloučen vlhkostní stres ovlivňující celkovou produkci ve výše zmíněných hospodářských činnostech (HYBLER et al. 2013).

Z literatury je možno dokumentovat obdobné situace v řadě oblastí prakticky po celém světě. Bilanci vody a vzájemným vztahem povrchové a podzemní vody se v oblasti North German Lowlands na řece Havele zabývali KRAUSE et al. (2007a, b). WEBB, LEAKE (2006) řešili historický vývoj změn pobřežní vegetace v území Southwestern United States vlivem prováděných vodohospodářských úprav od roku 1880 po současnost. Predikci změn úrovně hladiny podzemní vody v případě přeložení ochranné hráze v údolí Labe nedaleko Magdeburgu řešil MOHRLOK (2003). V Holandsku se problematikou ohrázení údolních poloh zabývali také MIDDELKOOP (1997) a MIDDELKOOP et al. (2001). Možnostmi využití dálkového průzkumu (ETM data) pro hodnocení změn vlhkostního režimu lužních na jižní Moravě studovali TEWARI et al. (2003).

V nivách jihomoravských řek dochází občas také ke krátkodobým záplavám niv, tedy prakticky k výstupu podzemní vody nad půdní po-



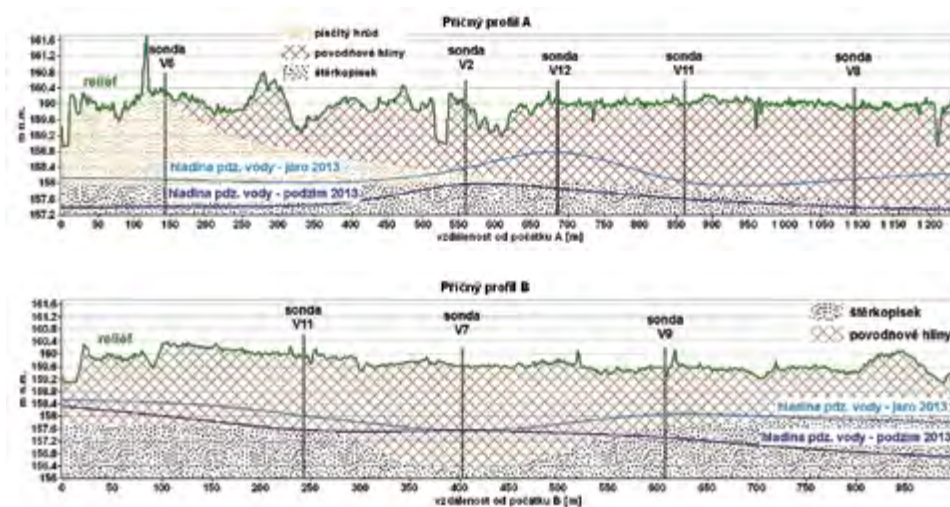
Obr. 3. Průběh izolinií hladiny podzemní vody v zájmovém území – jarní stav v roce 2013

Fig. 3. The course of isolines of groundwater level in the area of interest – spring 2013 (isolinie podz. vody – isolines of groundwater; profil A – profile A; profil B – profile B; hydrologické sondy – hydrological probes; vodní plocha – body of water; hladina podz. vody – groundwater level; jaro 2013 – spring 2013)

vrch (PRAX, HADAŠ 1998; PALÁT et al. 2010). Obecně je známo, že lužní les je přirozeně adaptován na krátkodobé extrémy, tedy jak plošnou inundaci území, tak také hlubší pokles podzemní vody ležící mimo aktivní pásmo tzv. povodňových kalů, které umožňuje vznik kapilární obruby vztlínající z hladiny podzemní vody. V případě hlubšího poklesu podzemní vody do podloží štěrku a písků dochází v dlouhodobých letních přísušcích k poklesu půdní vlhkosti v kořenovém systému v povodňových hlínách až na bod vadnutí, a tedy ke krátkodobému vlhkosťmu stresu (PRAX et al. 2011). Z výsledků hodnotíme jako závažný stav poklesu hladiny podzemní vody na transektu A, kdy posun úrovně hladiny do podloží štěrkopísků znamená přerušování kapilárního nasycování vrstvy povodňových hlín a může způsobit případný vlhkosťný stres pro kořenový systém lesních porostů v nastávajícím jarním období, pokud by pokles hladiny podzemní vody zůstal na stávající úrovni.

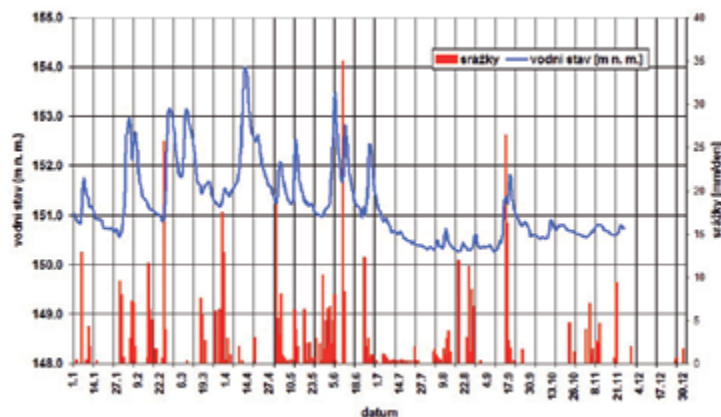
Ovlivnit tuto nepříznivou situaci pomáhají vodo hospodářské úpravy vodních toků včetně výstavby ochranných hrází. Tok řeky Moravy v okolí sledovaného Mikulčického lesa byl upraven na počátku sedmdesátých let 20. století. Tímto zásahem byly omezeny dříve téměř pravidelné každoroční jarní záplavy tohoto území (záplavy se nevykytovaly i proto, že nedocházelo v období 80.–90. let minulého století v povodí Moravy k výskytu extrémních srážkových epizod, ani rychle neodtával sníh v horských polohách). Došlo také k poklesu úrovně hladiny podzemní vody s tím, že její potřebná roční dynamika byla zachována, byť poněkud utlumená oproti historickému období pravidelných inundací (PENKA et al. 1985).

Poněkud atypický vývoj vlhkosťní situace v roce 2013 dokresluje průběh průtoků vody v řece Moravě, který byl v první půlce roku výrazně zvýšený a v závěru roku podlimitní. Celkově málo příznivou vlhkosťní situaci sledované lokality lužního lesa vidíme na obr. 3, kdy v průběhu



Obr. 4. Průběh hladiny podzemní vody v příčných profilech A a B v jarním a podzimním období roku 2013

Fig. 4. The course of the groundwater level in cross sections A and B in the spring and autumn of 2013 (příčný profil – cross sections; reliéf – relief; sonda – probe; písčité hrůd – sandy hill; povodňové hlíny – flood soil; štěrkopísek – gravel sand; hladina podz. vody – groundwater level; jaro – spring; podzim – autumn; vzdálenost od počátku – distance from the beginning)



Obr. 5. Vodní stav v řece Moravě (Morava-Lanžhot, ČHMÚ) a úhrny atmosférických srážek v období roku 2013 (vlastní měření, stanice Mikulčice)

Fig. 5. Water gauges in the Morava River (Morava-Lanžhot, Czech Hydrometeorological Institute) and the total precipitation during 2013 (own measurement, station Mikulčice) (srážky – precipitations; vodní stav – water level; datum – date)

sledovaného roku je úroveň hladiny podzemní vody značně zaklesnutá, což nekoresponduje s výsledky měření na většině území lužních lesů polesí Tvrdonice, kde hladina podzemní vody má výraznou dynamiku a prakticky vždy v jarním maximu se téměř dotýká půdního povrchu (PRAX et al. 2005), což lze pokládat za optimální stav. Bude tedy žádoucí věnovat pozornost řešení, které by optimalizovalo vlhkostní režim sledované lokality lužního lesa v budoucnu.

ZÁVĚR

Existence lužních lesů v nivě řeky Moravy je závislá na místních specifických hydrogeologických a pedologických podmínkách. V průběhu roku 2013 byl na sledovaném objektu v Mikulčickém lese měřen pohyb podzemních vod na síti zabudovaných pozorovacích vrtů, jejichž pozice i nadmořská výška byla zaměřena geodetickým polygonovým pořadem. Vlastní, dosti zvládnutý mikrorelief terénu byl znázorněn digitálním modelem území za použití lidarových dat pořízených Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním v roce 2013. Díky kombinaci takto zvolených metodických postupů byl získán nový pohled na tok podzemních vod v této části pravobřežní nivy řeky Moravy. Výrazně se zde uplatňuje také vertikální profil terénu, jehož sklon se snižuje se vzdáleností od toku řeky Moravy. Pro přirozený vývoj lužního ekosystému a jeho vlhkostního režimu je důležitá roční dynamika, tedy rozdíl mezi jarním maximem a podzimním minimem úrovně podzemní vody. Tohoto jevu, dokladovaného mnohými staršími pracemi v této oblasti, bylo zde dosaženo i v roce 2013.

Podrobným měřením bylo zjištěno, že mírné zvýšení hladiny podzemní vody v určité části transektu A bylo způsobeno zřejmě výraznou heterogenitou půdního prostředí. Jde zde o styk rozplavené písčité duny s jílovitými sedimenty povodňových kalů, tedy o materiály se značně rozdílnými hodnotami koeficientu propustnosti. V takových podmínkách dochází ke vzniku tlakových vod, které mohou být jednou z příčin nerovnosti úrovně vodní hladiny podzemní vody, jak je tomu také ve vrtu V7 transektu B.

Z provedeného sledování vyplývá, že průběh úrovně hladiny podzemní vody na podzim roku 2013 poklesl v celém profilu transektu A do podložních šterkopísků, což může mít za následek přerušení kapilární nasycenosti půdního profilu vodou. Je to jeden z důsledků po vodohospodářských úpravách v sedmdesátých letech 20. století, které člověk pro maximální exploataci úrodné nivy řeky Moravy způsobil.

Výsledky potvrzují možnost použití dané metody GIS pro hodnocení hladiny podzemních vod a přetrvávající trend poklesu úrovně podzemních vod v zájmové oblasti v závislosti na konkrétních klimatických a hydrologických podmínkách v povodí.

Poděkování:

Výzkum je řešen za finanční spoluúčasti projektu NAZV QJ1220033 „Optimalizace vodního režimu na modelovém území pomoravské nivy“.

LITERATURA

BUČEK A., ŠTYKAR J. 2002. Geobiocenologické mapování příbřežního pásma vodních toků v povodí Odry. *Beskydy*, 15: 17–24.

ČERMÁK J., PRAX A. 2001. Water balance of a Southern Moravian floodplain forest under natural and modified soil water regimes and its ecological consequences. *Annals of Forest Science*, 58: 15–29.

HADAŠ P., PRAX A. 2001. Stress factors of soil moisture regime in floodplain forests. *Ekológia (Bratislava)*, 20 (1): 143–162.

HADAŠ P. 2003. Temperature and humidity conditions of the floodplain forest with respect to stand microclimate and mesoclimate. *Ekológia (Bratislava)*, 22 (3): 19–46.

HAN S. 1997. Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time GPS kinematic positioning. *Journal of Geodesy*, 71 (6): 351–361.

HAVLÍČEK P., SMOLÍKOVÁ L. 1994. Vývoj jihomoravských niv. *Věstník Českého geologického ústavu*, 69 (1): 23–40.

HAVLÍČEK P. 2001. Geologická stavba okolí Mikulčic-Valů (34-24 Ho-
lič). *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2000*: 73–75.

HRIB M. et al. 2004. Lužní les v Dyjsko-moravské nivě. *Břeclav, Moravia*: 591 s.

HYBLER V., MENŠÍK L., BLAŽEK M., PRAX A., KULHAVÝ J. 2013. Voda v aluviích řek, důležitý fenomén rozvoje či útlumu hospodaření v říčních nivách. In: *Voda a krajina. Sborník příspěvků odborné konference*. 18. 9. 2013. Praha, ČVUT: 125–134.

KARAN E.P., SIVAKUMAR R., IRIZARRY J., GUHATHAKURTA S. 2013. Digital modeling of construction site terrain using remotely sensed data and geographic information systems analyses. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140 (3): 04013067.

KLIMO E., KULHAVÝ J. 1999. Present condition and revitalization of the important roles of floodplain forest ecosystems in the watershed of the Morava and Dyje Rivers (Southern Moravia). *Ekológia (Bratislava)*, 18 (1): 120–132.

KLIMO E., HAGER H. 2001. Floodplain forests in Europe: current situation and perspectives. *Leiden, Brill*: 267 s. EFI Research Report No. 10.

KLIMO E., HAGER H., MATIČ S., ANIČ I., KULHAVÝ J. (eds.) 2008. Floodplain forests of the temperate zone of Europe. *Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce*: 623 s.

KLIMO E., KULHAVÝ J., PRAX A., MENŠÍK L., HADAŠ P., MAUER O. 2013. Functioning of South Moravian floodplain forests (Czech Republic) in forest environment subject to natural and anthropogenic change. *International Journal of Forestry Research*, 2013: article ID 248749. Dostupné na: <http://www.hindawi.com/journals/ijfr/2013/248749/>

KOUŘIL Z. 1970. Podzemní vody údolí řeky Moravy. *Ground waters of the Morava river valley*. Brno, Geografický ústav ČSAV: 3 sv.

KOŽANÁ B., MĚKOTOVÁ J., ŘÍHOVÁ V., SYNKOVÁ A., ŠTĚRBA O., UNUCKA J. 2014. Příspěvek k možnostem stanovení vlivu lužního lesa na tlumení povodňových vln s využitím 1D a 2D hydraulických modelů a GIS. *Zprávy lesnického výzkumu*, 59 (2): 96–103.

KRAUSE S., BRONSTERT A., ZEHE E. 2007a. Groundwater – surface water exchange fluxes in a pleistocene lowland catchment and the impacts on riparian zone water balance and nitrate conditions. In: *Webb B.W., De Boer D. (eds.): Water quality and sediment behaviour of the future: predictions for the 21st century*. Wallingford, International Association of Hydrologic Sciences: 98–107. IAHS publication, 314.

KRAUSE S., BRONSTERT A., ZEHE E. 2007b. Groundwater-surface water interactions in a North German lowland floodplain – implications for the river discharge dynamics and riparian water balance. *Journal of Hydrology*, 347: 404–417. DOI 10.1016/j.jhydrol.2007.09.028

KULHAVÝ J., KNAPPE S., RICHTER W., KLIMO E. 1999. Element fluxes in floodplain forest ecosystems affected by the long-term influence of air pollution. *Ekológia (Bratislava)*, 18 (1): 149–159.

KULHAVÝ J., GRUNDA B. 2000. Loss of inundation in floodplain forests: danger for their sustainable management. In: *Proceeding of poster abstract from international symposium Managing Forest Soil for Sustainable productivity*, 18–22 September 2000, Vila Real – Portugal: 219.

- MADĚRA P., HOLUŠA O., ŘEPKA R., DRESLEŘOVÁ J., RYCHTECKÁ P., PÁČKOVÁ P., BUČEK A., VAHALÍK P., KLIMÁNEK M., MIKITA T. 2012. Charakteristika stavu a vývoje nivních geobiocenóz moravských luhů. In: Kulhavý J., Menšík L. (eds.): Les a dřevo. Podpora funkčně integrovaného lesního hospodářství a využívání dřeva jako obnovitelné suroviny: Významné výsledky institucionálního výzkumu Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně v období 2005–2011. Brno, Mendelova univerzita v Brně: 83–86.
- MACHAR I. 2013. Applying landscape ecological principles in sustainable forest management of the floodplain forest in the temperate zone of Europe. *Ekológia (Bratislava)*, 32 (4): 369–375.
- MIDDELKOOP H. 1997. Embanked floodplains in the Netherlands. Geomorphological evolution over various time scales. Utrecht, Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap: 341 s. *Nederlandse geografische studies*, 224.
- MIDDELKOOP H., DAAMEN K., GELLENS D., GRABS W., KWADIJK J.C.J., LANG H., PARMET B.W.A.H., SCHÄDLER B., SCHULLA J., WILKE K. 2001. Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. *Climatic Change*, 49: 105–128. DOI 10.1023/A:1010784727448
- MOHRLOK U. 2003. Prediction of changes in groundwater dynamics caused by relocation of river embankments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 67–74.
- MOLDER A., SCHNEIDER E. 2011. On the beautiful diverse Danube? Danubian floodplain forest vegetation and flora under the influence of river eutrophication. *River Research and Applications*, 27: 881–894.
- NĚMEČEK J. et al. 2011. Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. Praha, ČZU: 94 s.
- PALÁT M., PRAX A., PALÁT M. (jr.), ROŽNOVSKÝ J. 2010. Causes and consequences of a flood wave on the lower reach of the Dyje river near Břeclav. *Soil and Water Research*, 5 (4): 121–127.
- PENKA M., VYSKOT M., KLIMO E., VAŠÍČEK F. 1985. Floodplain forest ecosystem. Before water management measures. Praha, Academia; Amsterdam, Elsevier: 466 s.
- PENKA M., VYSKOT M., KLIMO E., VAŠÍČEK F. 1991. Floodplain forests ecosystem. After water management measures. Amsterdam, Elsevier: 629 s.
- PRAX A., HADAŠ P. 1998. Lužní lesy na soutoku Moravy a Dyje při povodni 1997. In: Moucha, P. (ed.): Krajina, voda, povodeň. Sborník Správy chráněných krajinných oblastí České republiky. Praha, Správa Chráněných krajinných oblastí České republiky: 55–60.
- PRAX A., HYBLER V., ŠTIBINGER J., KLOUPAR M. 2011. Effects of natural cut-off meanders and revitalization channels on the moisture regime of floodplain forest. *Ekológia (Bratislava)*, 30 (3): 334–348.
- PRAX P., KLOUPAR M., PRAX A., HETEŠA J., SUKOP I. 2005. Optimalizace hydrologického režimu lužního ekosystému po antropických zásazích a její zpracování do zásad managementu na plesí Tvrdonice. Grantová služba LČR, Teplice. Závěrečná zpráva: 627s.
- TEWARI S., KULHAVÝ J., ROCK B.N., HADAŠ P. 2003. Remote monitoring of forest response to changed soil moisture regime due to river regulation. *Journal of Forest Science*, 49 (9): 429–438.
- VAŠÍČEK J. 1991. Changes in the structure and biomass of the herb layer under the condition of a medium moisture gradient. In: Penka M. et al. (eds.): Floodplain forest ecosystem. After water management measures. Amsterdam, Elsevier: 197–242.
- VAŠÍČEK J. 2000. Progress and evaluation of alluvial forests revitalisation performed by the forestry enterprise of Židlochovice. In: Kulhavý J. et al. (eds): Management of floodplain forests in Southern Moravia. Proceedings of the international conference held in Židlochovice, Czech Republic, May 13–16 2000. Brno, Mendel University of Agriculture and Forestry: 11–13.
- VESELÝ D. 2004. Vodní hospodářství v oblasti dolního toku řek Moravy a Dyje, povodně a regulace toků od historie po současnost. In: Hrib, M., Kordiovský, E.: Lužní les v Dyjsko-moravské nivě. Břeclav, Moraviapress: 49–66.
- VYBÍRAL J. 2007. Lužní lesy v Biosférické rezervaci Dolní Morava. Sborník Regionálního muzea v Mikulově: 36–42. Dostupné na: <http://www.rmm.cz/region/2007/05%20vybral%20-%20lesy.pdf>
- WEBB R.H., LEAKE S. 2006. Ground-water surface-water interactions and long-term change in riverine riparian vegetation in the south-western United States. *Journal of Hydrology*, 320: 302–323.
- YAO L., HUO Z., FENG S., MAO X., KANG S., CHEN J., XU J., STEENHUIS T.S. 2014. Evaluation of spatial interpolation methods for ground-water level in an arid inland oasis, northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 71 (4): 1911–1924.

THE DYNAMICS OF GROUNDWATER LEVEL IN THE MORAVA RIVER FLOODPLAIN (CZECH REPUBLIC)

SUMMARY

The existence of floodplain forests in the Morava River floodplain (Czech Republic) is conditioned by the local specific hydrogeological and pedological conditions. The increasingly perceptible climatic extremes combined with the specific soil and hydrogeological conditions of the Morava River floodplain significantly affect the groundwater dynamics in the right-bank alluvium. Following the last hydraulic engineering measures carried out in the Morava River floodplain in the second half of the 20th century, the groundwater regime has been subjected to frequent and less predictable changes, which has had a negative impact on floodplain forests. The aim of the presented study is to verify the possibilities of applying GIS methods in evaluating the current annual groundwater dynamics in the model area with the objective to predict changes in the groundwater regime following changes in the landscape water balance.

In the course of 2013 we measured the movement of groundwater in the monitoring facility in the Mikulčický Forest through a network of monitoring wells (Fig. 1), whose position and elevation were determined using geodetic polygon lines. The rather undulating microrelief was created through a digital terrain model using LIDAR data collected by the State Administration of Land Surveying and Cadastre in 2013 (Fig. 2). By combining these methodological procedures we obtained a new perspective of groundwater flow in the given part of the right-bank alluvium of the Morava River (Fig. 3). The vertical profile of the terrain, whose slope decreases with distance from the Morava River bed, plays an important part. The annual dynamics, or the difference between the spring maximum and autumn minimum in groundwater levels, is essential for the natural development of the floodplain ecosystem and its moisture regime. This phenomenon, which is supported by a number of older publications in the field, took place in 2013 as well. Detailed measurements determined that a slight increase in the groundwater level in a certain section of transect A was, among other things, probably caused by the considerable heterogeneity of the soil environment (Fig. 4). It combines washed-out sand dunes with clay sediments from flood sludge, which represent materials with dramatically different permeability coefficients. Such conditions give rise to pressure waves, which may be one of the causes of fluctuating groundwater levels. In autumn 2013 the groundwater table throughout the entire transect A sank to the underlying sand and gravel level, which may result in disrupted capillary saturation of the soil profile. If combined with insufficient rainfall at the given time (Fig. 5), moisture stress may be imposed on the monitored forest ecosystem. This is one of the outcomes of the hydraulic engineering measures carried out in the 1970s with the aim to maximize the exploitation of the fertile alluvium of the Morava River.

The results obtained confirm the possibility of applying the given GIS method in evaluation of the groundwater level and the ongoing trend of groundwater level decrease in the study area, in relation to the specific climatic and hydrological conditions in the river basin.