

Analýza změn odtokových poměrů pro Českou republiku

LUKÁŠ SMELÍK

Klíčová slova: srážky – CN křivky – odtok – eroze – protierozní opatření – protipovodňová opatření

SOUHRN

Dílčím cílem projektu „Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice“ bylo zjištění současných odtokových poměrů v České republice pomocí metody CN křivky. V plochách vybraných povodí, kde podle výpočtu vychází velké odtokové výšky a malá vsakovací schopnost, byla v ideové rovině navržena typizovaná protierozní (PEO) a protipovodňová (PPO) opatření, která se podle dřívějších zkušeností jeví jako účinná, ekonomicky únosná a prosaditelná. Efekt těchto navrhovaných opatření [1] byl na celém území České republiky posouzen pomocí výpočtu odtokových poměrů metodou CN křivek. Z rozdílů odtokových poměrů současného stavu území a území s návrhy byla analyzována účinnost opatření na diskretizovaném území – povodích IV. řádu. Analýzy proběhly v prostředí GIS.

ÚVOD

Česká republika byla v posledních letech zasažena několika povodněmi z přívalových srážek, které urychlily prosazování změn odtokových poměrů v jednotlivých územích s cílem zvýšit ochranu před negativními dopady eroze a před lokálními povodněmi zejména v obcích. Obecně má výzkum v této oblasti poukázat na povodí ohrožená a nedostatečně chráněná před erozí půdy a s tím související zvýšený povrchový odtok. Navrhovaná ideová opatření [1] v ploše povodí jsou souborem doporučených opatření, která mají omezit negativní dopady přívalových srážek. Pozitivním přínosem návrhů je rovněž zachování kvalitní půdy na obhospodařovaných pozemcích.

Odtokové poměry (odtokový režim) jsou souborem přírodních a umělých (antropogenně ovlivněných) podmínek, které ovlivňují povrchový a podpovrchový odtok z povodí. Protože nelze postihnout veškeré jevy v povodí a ve vodních tocích, jsou nejdůležitější z jevů schematizovány. Hlavní ovlivňující podmínky, zejména průběh srážkové události, typ pokryvu a vlastnosti půd, mohou působit buď v celém povodí, nebo jen v jeho části. K přímému odtoku dochází ve chvíli, kdy je půda nasycena předchozími srážkami, nebo v průběhu přívalových srážek, kdy se voda nestačí vsakovat. Čím je déšť intenzivnější, tj. spadne velký srážkový úhrn za krátký časový úsek, tím je odtok vyšší. Voda, která se v povodí nevsákne nebo neakumuluje v nádržích či snížených místech, je nazývána povrchový odtok. Vztahuje se k uzávěrovému profilu, což je nejnižší položené místo v povodí, kterým voda odtéká. Tímto místem může být profil povodí IV. řádu, přispívající plocha kritického bodu nebo povodí k profilu hráze navrženého akumulací prostoru. Velikost projevu povrchového odtoku lze pozorovat v korytech vodních toků, kanálech, údolnicích nebo nádržích jako zvýšení úrovně vodní hladiny.

V rámci řešení projektu Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice (dále jen Strategie) byly sledovány přínosy opatření pomocí změn hodnot přímého odtoku. Za tímto účelem bylo nezbytné stanovit velikost přímého odtoku před a po návrzích vhodných opatření a analyzovat vzniklé rozdíly výšek a objemů odtoku. V případě dílčích hydrologických celků, kde byly dosaženy vysoké rozdíly v hodnotách přímého odtoku, se doporučuje realizace opatření se všemi přínosy, tj. zvýšením vsaku dešťové vody do půdy a zpomalení nebo zadržení odtékající vody.

METODY VÝPOČTU PŘÍMÉHO ODTOKU

Používané metody

Odtok z povodí se stanovuje na základě četných srážkoodtokových matematických modelů, které popisují vztahy v řešeném povodí a predikují velikost odtoku na základě vstupních údajů o srážkách. Modely se liší mírou schematizace povodí, množstvím vstupních údajů, náročností na výpočet a shodou s reálně naměřenými parametry. Některé modely jsou vhodné pro určitý typ povodí a mají tak omezenou použitelnost. Jak uvádí [2], použití konvenčních metod měření odtoku je velmi nákladné, časově náročné a náchylné k chybám z důvodu nedostatku spolehlivých podkladových dat. Většina povodí má navíc omezený počet měřidel pro záznam srážek a množství odtoku. Z existujících přístupů pro odhad odtoku z povodí bylo vybráno několik z nich [2, 3]:

- model povodí UBCWM: model detailně popisuje hydrologii horských a zaledněných oblastí; pro výpočet odtoku v prostředí České republiky není svým zaměřením vhodný;
- umělé neuronové sítě ANN (Artificial Neural Network): jsou vhodné spíše pro malá povodí, neboť je řeší detailně na základě souvislosti mezi mnoha srážkovými událostmi; pro řešení na území celé ČR nejsou neuronové sítě vhodné;
- metoda čísel odtokových křivek SCS-CN: metoda vybraná pro řešení odtokových poměrů; je založená na znalosti srážek a půdního pokryvu a jako u jedné z mála lze vyhodnotit změny v krajině bez další kalibrace modelu;
- modely jednotkových hydrogramů: jednotkový hydrogram má stálou intenzitu a rovnoměrné rozložení srážek v povodí; výpočet vychází ze znalosti měřených srážek a odtoků; model je nepoužitelný pro absenci měření ve většině povodí;
- rovnice oblastní: rovnice obsahují koeficienty, které souvisí s příslušností k území nebo k povodí toku; není snadné je automatizovat a navíc jsou výsledky jen orientační;

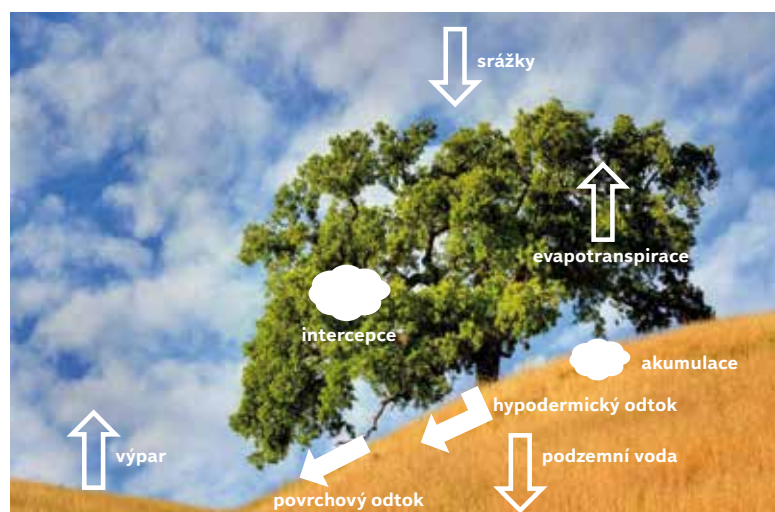
- rovnice objemové: rovnice jsou založeny na odhadu povodňové vlny a tvaru hydrogramu; také není snadné je automatizovat a výsledky lze použít jen k orientačním účelům;
- rovnice intenzitní: rovnice byly odvozeny pro srážkové události s krátkou dobou trvání; dosazuje se do nich intenzita srážek podle doby trvání a doby opakování; výpočet není snadné automatizovat a výsledky jsou jen orientační;
- výpočet podle odtokového součinitele: výpočet je jednoduchý, neboť lze součinitele najít v tabulkách [4]; z důvodu absence mnohých kombinací druhů povrchů jsou nepoužitelné pro požadované výpočty.

Výpočet stavu odtokových poměrů byl proveden metodou CN křivek, která je z důvodu snadného použití vhodná k řešení v prostředí GIS. Metoda je široce používaná právě pro svou jednoduchost [2]. Pomocí automatizace výpočtů v ArcGIS lze stanovit výšky a objemy odtoků pro velká území (např. celou Českou republiku), a to během několika výpočtových kroků.

Metoda CN křivek

Metoda CN křivek (CN z anglického *Curve Number*) je založena na experimentálním výzkumu. Výpočtové rovnice jsou empirické [4]. Metoda je oblíbená a stále používaná. Používá se ke stanovení velikosti přímého odtoku na základě znalosti intenzity srážek a typu povrchu [5]. Metoda byla testována a ověřena mnohými výzkumy a studii odtokových poměrů. V malých povodích existuje dobrá korelace mezi naměřenou výškou odtoku a výškou odtoku stanovenou metodou čísel CN s aplikací GIS. Právě pro tyto důvody byla metoda CN křivek vybrána pro vyjádření odtokových poměrů v projektu Strategie. Podle [6] může být metoda CN křivek použita v navrhování a posuzování technických protierozních opatření, např. pro dráhy soustředěného povrchového odtoku, zatravněné údolnice, průlehy, záchytné příkopy, zasakovací pásy a malé vodní nádrže. Metodou lze získat informace o přítoku do nádrže, ale vlastní transformace odtoku se řeší zvlášť.

Metoda CN křivek vychází z předpokladu, že poměr mezi aktuální retencí (objem vody zadrženy při odtoku) a maximální retencí (potenciálně zadržitelný objem vody) v povodí je stejný jako poměr mezi výškou odtoku a výškou přívalemých srážek po odečtení počátečních ztrát. Výpočet podle Metody čísel odtokových křivek lze použít pro stanovení objemu přímého odtoku způsobeného návrhovým přívalemým deštěm dané pravděpodobnosti výskytu. Do přímého odtoku se zahrnují dvě složky: povrchový odtok a hypodermický odtok (podpovrchový, tj. proudění v malé vrstvě pod povrchem bez interakce s podzemní vodou).



Obr. 1. Rozčlenění srážkového úhrnu na jednotlivé složky
Fig. 1. Breakdown of rainfall on individual components

Specifika a omezení metody CN křivek

Metoda byla odvozena na zemědělsky využívaných povodích, jejichž plocha není větší než 10 km² [5]. Zejména pro velká povodí je potřeba u výsledků výpočtů počítat se značnými nepřesnostmi. Správnost volby CN by měla ověřit kalibrace odtoku podle skutečných srážkových událostí. Takové řešení by bylo možné na malém území se známými hydrogramy odtoku. Velká povodí nelze řešit dohromady, a proto je potřeba je rozdělit na dílčí povodí. To souvisí s různým časovým vývojem srážek, odezvou povodí na srážky a rozdílnou dobou odtoku z jednotlivých dílčích povodí. Objemy přímého odtoku z jednotlivých dílčích povodí také nelze jednoduše sčítat. Metoda navíc neuvažuje akumulaci vody v nádržích.

Metoda CN křivek by se měla používat pro části povodí mimo intravilán, ideálně pro volnou krajinu nebo řídké urbanizované území [4]. Zejména v urbanizovaném území může dojít k situaci, že je povrch nepropustný a pod ním je propustná půda [7]. Je tedy očekávána vysoká počáteční retence, ke které ve skutečnosti nemusí dojít.

Nevýhodou metody je vysoká citlivost na zvolené hodnoty CN. Rovněž není k dispozici jasný manuál k tomu, jak určit aktuální vlhkostní poměry půdy. K odhadu stavu nasycení půdy lze využít výšku srážek v předchozích dnech s rozlišením, zda se jedná o vegetační nebo mimovegetační období. V modelu pro výpočet se nevyužívá sklon povrchu povodí [2]. Důvodem je fakt, že v USA, kde metoda vznikla, mají pozemky většinou sklony menší než 5 %. Proto je použitelnost metody čísel CN v horských povodích omezená. Přes svá omezení je ale stále hojně používána.

Pro modelování odtoků z přívalemých srážek se doporučuje používat Metodu čísel odtokových křivek ve standardní formě (hodnota CNII pro střední nasycení půdy) a pro velikost 24hodinových úhrnů srážek $H_s > 100$ mm. Metodu lze použít omezeně i pro nižší srážky v rozmezí 40 až 100 mm [8].

VSTUPNÍ DATA

Vstupními daty pro výpočet byly rastrové vrstvy srážkových úhrnů s dobami opakování 20, 100 a 200 let od ČHMÚ a rastrové vrstvy CNII křivek před a po návrzích opatření vytvořených v rámci projektu Strategie. Výpočet proběhl v programu ArcGIS pomocí funkce Raster Calculator.

Srážkový úhrn

Výška srážek H_s (mm) (srážkový úhrn návrhového přívalemého deště) je jedním z parametrů, který je potřeba znát pro stanovení odtokových poměrů. Průběh reálné srážky závisí na délce jejího trvání, intenzitě a směru pohybu deště. Srážkový úhrn představuje výšku vrstvy vody, která na konkrétní místo naprší za určitý časový úsek. Výška srážek pro jednotlivé doby opakování se stanovuje z dlouhodobého měření ČHMÚ pomocí statistických analýz. Automatické stanice ČHMÚ měří úhrny srážek v intervalu 10 minut a ty jsou pak dále přepočítávány na hodinové úhrny. Stanice vybavené běžným srážkoměrem měří úhrny za 24 hodin, kdy pozorovatel odečítá hodnoty v 7 hodin ráno následujícího dne. Vzhledem k různé hustotě pokrytí území stanicemi se výška srážek stanovuje plošným váženým průměrem. V rámci řešení projektu Strategie byly jako návrhové zvoleny 24hodinové úhrny srážek s dobou opakování 20, 100 a 200 let. Data o srážkách byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ) pro celé území ČR v rastrové podobě. To bylo výhodné pro řešení v prostředí programu ArcGIS, kde analýzy probíhaly na rastrových datech s danou velikostí pixelu. V případě dat o srážkách bylo rozlišení jednoho pixelu 1 km × 1 km.

Metoda CN křivek uvažuje s tzv. počáteční ztrátou, která byla stanovena experimentálním výzkumem na 20 % maximální retence A , viz rovnici (4). Tato ztráta

zahrnuje dešťovou vodu zachycenou na rostlinách (intercepce), fyzikálně vypařenou vodu (evaporace), vodu vypařenou dýcháním rostlin (transpirace), vsáknutou vodu (infiltrace) a vodu zachycenou ve snížených místech (povrchová akumulace), viz obr. 1. Výzkum počáteční ztráty vycházel z pozorování reakce přívalových srážek na malých povodích v počátečních fázích deště. V rovnici (3) si lze všimnout, že maximální potenciální retence je pouze funkcí čísel odtokových křivek CN . Není tedy závislá na srážkách, ale pouze na infiltračních vlastnostech půdy a půdního pokryvu. Lze stanovit výšku srážek, za kterých bude ještě nulový odtok z povodí, a tudíž není potřeba pokračovat ve výpočtu. Nulový odtok bude např. při $CN = 50$ a $H_s < 50$ mm, $CN = 70$ a $H_s < 20$ mm nebo $CN = 90$ a $H_s < 5$ mm [8].

Typ povrchu a způsob jeho využití

Maximální (potenciální) retenci území A (mm) potřebnou pro výpočet výšky H_o (mm) a objemu Oph (m^3) přímého odtoku udávají čísla odtokových křivek CN (-). Čísla CN se podle typu povrchu pohybují mezi hodnotami teoreticky od $CN = 0$, kdy se vše vsákne (reálně však od cca $CN = 30$), do $CN = 100$, kdy vše odtече. Hodnota čísel CN závisí na typu povrchu, způsobu jeho využití, případněm uplatnění protierozních opatření a propustnosti půdy pro vodu.

Typem pokryvu může být les, pole, louka, silnice, zástavba atd. Uvedené typy mohou mít další podtypy, které se liší vegetací, její hustotou a údržbou. Pokryv ovlivňuje, s jakou silou a časovým zpožděním dopadne kapka deště na povrch a jak se bude dešťová voda vsakovat. Vsakovací vlastnosti půd se mění v závislosti na aktuálním stavu nasycení z předchozích srážek a prokypření, které závisí např. na zvolené technologii obdělávání. Informace o zemědělských pozemcích byly zjišťovány z databáze LPIS (Land Parcel Identification System) [9], což je geografický informační systém evidence využití zemědělské půdy, který byl vytvořen pro účely čerpání dotací vázaných na zemědělskou půdu. Ze systému lze zjistit druh kultury a údaje o BPEJ (bonitovaná půdně ekologická jednotka), od které se odvíjí produkční schopnost zemědělské půdy (kvalita půdy) a její cena. BPEJ je systém pětimístných číselných kódů, kde číslo na 2. a 3. místě udává hlavní půdní jednotku (HPJ). Pro účely metody CN byly definovány čtyři hydrologické skupiny půd (HSP), které se liší infiltračními charakteristikami (skupina A: rychlost infiltrace $> 0,12$ mm.min⁻¹, skupina D: rychlost infiltrace $< 0,02$ mm.min⁻¹). Tyto hydrologické skupiny je možné v ČR stanovit na základě HPJ [5]. V území, kde není uvedeno využití a BPEJ, lze rozsah a využití pozemků identifikovat pomocí databáze CORINE Land Cover [10]. Pro vlastní řešení byla k dispozici verze z roku 2012. Podklad sdružuje oblasti stejného typu nebo zobrazuje převládající typ pozemku. Přesnost podkladu je řádově v desítkách metrů.

Stanovení čísel CN

Čísla CN se pro konkrétní pozemky stanovují obvykle podle tabulek. Pro potřeby projektu Strategie byla využívána modifikovaná tabulka 1, která vychází z [5]. Pro vlastní stanovení je potřeba znát druh povrchu a hydrologickou skupinu půd (HSP). Na vodních plochách se hodnoty CN nestanovují. Ke splnění cílů řešení byly vytvořeny dvě rastrové vrstvy čísel odtokových křivek CN_{II} s rozlišením pixelu 10 m \times 10 m. Jedna vrstva uvažuje stav současného využití území, druhá vrstva vyjadřuje stav území s návrhovými opatřeními, viz [1]. V každém pixelu je uvedena průměrná hodnota čísel CN stanovená váženým průměrem z typů povrchů a půd v uvedeném pixelu.

Tabulka 1. Hodnoty CN_{II} pro jednotlivé druhy povrchu a hydrologické skupiny půd
Table 1. CN_{II} values for individual types of surfaces and hydrological types of soils

Současné využití povrchu	HSP			
	A	B	C	D
orná půda	72	81	88	91
chmelnice	72	81	88	91
vinice	59	74	82	86
ovocný sad	59	74	82	86
travní porost	49	69	79	84
jiná kultura	59	74	82	86
zalesněno	45	66	77	83
porost bez rozlišení	36	60	73	79
ostatní	59	74	82	86
intravilán	59	74	82	86
silnice, dálnice	74	84	90	92
železnice včetně náspu	59	74	82	86

Předchozí nasycení půdy

Aktuální vlhkost půdy (nasycení vodou) má vliv na intenzitu vsakování a tím na hodnoty CN . Odtokové křivky se v praxi stanovují pro stavy, kdy je před přívalovými srážkami půda suchá (CN_I), středně nasycená (návrhový stav CN_{II}) nebo nasycená (CN_{III}) vodou z předcházejících dešťů. Poskytovatelem dat o nasycenosti území je ČHMÚ. Hodnoty CN_{II} se stanovují podle tabulky 1 a 2, hodnoty CN_I a CN_{III} se stanovují přepočtem z CN_{II} podle rovnic (1) a (2) podle [11]. Ukazuje se, že při vyšších hodnotách CN_{II} (od $CN > 50$) v kombinaci se suchým stavem nasycení povodí vycházejí hodnoty maximální retence velmi vysoké. Proto se doporučuje přepočtem na stav CN_I pro klimatické podmínky v České republice nepoužívat [8].

$$CN_I = \frac{4,2 \cdot CN_{II}}{10 - 0,058 \cdot CN_{II}} \quad (1)$$

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CN_{II}}{10 + 0,13 \cdot CN_{II}} \quad (2)$$

VÝPOČET VÝŠKY PŘÍMÉHO ODTOKU

Výpočet výšky přímého odtoku, respektive objemu přímého odtoku, se provádí pomocí empirických rovnic stanovených z dlouhodobého výzkumu. Rovnice (3) slouží ke stanovení maximální potenciální retence A (mm), která je pouze funkcí čísel CN (-), respektive CN_{II} . Výpočet probíhá odděleně pro návrhové stavy před a po návrzích opatření.

$$A = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Je-li srážkový úhrn HS (mm) větší než hodnota počáteční ztráty, která má hodnotu stanovenou výzkumy 20 % maximální potenciální retence A , provede se výpočet výšky přímého odtoku H_o (mm) podle rovnice (4). V opačném případě je vypočtený odtok nulový. Výpočet probíhá odděleně pro scénáře s dobou opakování 20, 100 a 200 let a návrhové stavy před a po návrzích opatření.

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2 \cdot A)^2}{H_s + 0,8 \cdot A} \quad (4)$$

Objem přímého odtoku Oph (m³) se pro konkrétní povodí stanoví pomocí rovnice (5), kde vstupy jsou výška přímého odtoku H_o (mm) a plocha povodí Pp (km²). Výpočet probíhá odděleně pro scénáře s dobou opakování 20, 100 a 200 let a návrhové stavy před a po návrzích opatření.

$$Oph = 1000 \cdot H_o \cdot Pp \quad (5)$$

Výpočet maximální potenciální retence, výšky přímého odtoku a objemu přímého odtoku byl proveden pomocí softwaru ArcGIS 10.0. Před vlastním výpočtem bylo potřeba provést přípravu vstupních dat, která spočívala ve sjednocení velikosti gridu rastru na 10 m × 10 m a souřadného systému na S-JTSK. V případě výchozího rozlišení 1 km × 1 km u srážkových úhrnů došlo pouze k homogennímu rozložení do gridu 10 m × 10 m. Výpočty rovnic (4) a (5) pro oba návrhové stavy (před a po návrzích) a tři doby opakování (20, 100 a 200 let) probíhaly v Raster calculatoru. Pro stanovení objemu přímého odtoku Oph bylo potřeba znát plochy povodí IV. řádu Pp . Povodí IV. řádu bylo zvoleno proto, že metoda CN křivek má omezenou použitelnost pro velká území. Plochy Pp byly získány z vektorové vrstvy rozvodnic IV. řádu pro Českou republiku. Pro stanovení průměrných hodnot výšek odtoku H_o pro jednotlivá povodí IV. řádu byla využita funkce „Zonal statistic as table“. Hodnoty Pp a H_o byly vloženy do programu MS Excel a pomocí rovnice (5) se stanovil objem odtoku Oph . Byly vypočítány změny odtokových poměrů, viz kapitolu Výsledky analýz.

NAVRHOVANÁ OPATŘENÍ

Snížení odtoku z povodí po přívalových srážkách souvisí se snahou omezit erozní činnost deště. Po dopadu kapky deště na povrch dojde k prvotnímu narušení krycí vrstvy půdy. Při delším účinku deště a nedostatečném vsakování dochází k odtoku vody z místa dopadu kapky. Odtok je nejdříve plošný, ale po několika metrech přechází v soustředěný odtok vody, který má již dostatek energie k vytvoření erozní rýhy. Ta se v průběhu deště zahlubuje a odnos půdy se urychluje. Cílem opatření je zmenšit a zpomalit nebo zastavit množství suspenze vody a půdy, která odtéká po svazích.

U horních povodí není vzhledem k rychlému průběhu povodní prostor pro operativní řízení. Proto je potřeba se na přívalové srážky vhodně zvoleným souborem opatření připravit. Preferovaným řešením je změna odtokových poměrů. Ta nemusí zahrnovat jen nákladné investice do opatření, jakými jsou komplexní pozemkové úpravy, stavby akumulčních prostorů nebo protipovodňová opatření v intravilánech obcí. Lze navrhnout také nestrukturální organizační opatření, která se dají rozdělit do dvou kategorií: vyloučení pěstování

erozně nebezpečných plodin (VENP) a používání protierozních agrotechnologií. Mezi strukturální opatření se řadí záchytné průlehy a příkopy, protierozní meze, ochranná zatravnění, zasakovací pásy, ochranné pásy podél vodních toků, stabilizace drah soustředěného odtoku, stavby vodních nádrží a ochranných nádrží a vymezení oblastí pro řízený rozliv do inundace. Přehled navrhovaných ideových opatření s hodnotami čísel odtokových křivek pro střední nasycení $CNII$ a čtyři skupiny hydrologických skupin půd jsou uvedeny v *tabulce 2*. Jejich rozložení v území je uvedeno na mapovém portálu „Voda v krajině“ [1].

Tabulka 2. Hodnoty $CNII$ pro jednotlivá navrhovaná opatření a hydrologické skupiny půd
Table 2. $CNII$ values for individual designed protection and hydrological types of soils

Navrhovaná opatření	HSP			
	A	B	C	D
záchytný průleh	49	69	79	84
protierozní mez	49	69	79	84
VENP	63	75	83	87
protierozní agrotechnologie – širokořádkové kultury	64	74	81	85
VENP a protierozní agrotechnologie	60	72	80	83
plošné trvalé travní porosty (TTP)	49	69	79	84
stabilizace dráhy soustředěného odtoku	39	61	74	80
zasakovací pás	39	61	74	80
ochranný pás podél toku	49	69	79	84
zatravnění na speciálních kulturách	49	69	79	84
lesnicko pěstební opatření	30	55	70	77
řízená inundace – zóna rozlivu	49	69	79	84

Strukturální opatření, která řeší změnu odtokových poměrů technickými opatřeními, jsou náročná na přípravu a finanční prostředky. Přípravné práce před realizací návrhů opatření řeší vlastní technický návrh podle platných norem, návaznost na stávající stavby, zákonné potřeby a požadavky vlastníků okolních a dotčených pozemků. Stavbou se nesmí zhoršit odtokové podmínky v jiných místech povodí. Jedním z nejsložitějších úkolů přípravy je výkup pozemků pro vlastní navrhované stavby.

Změna odtokových poměrů

Každá výše uvedená změna s sebou přináší snížení hodnot čísel CN , zvýšení maximální potenciální retence, snížení výšky odtoku a snížení objemu odtoku. Objem odtoku se výrazně projeví v případě, že se změna využití území aplikuje na větším území. Nejlepších výsledků je dosaženo při změně využití pozemku z orné půdy na les [8]. Méně účinná, ale stále přínosná je změna z orné půdy na přirozené louky nebo změny luk a pastvin na les. Změna přirozených luk na lesy má v uvažovaných možnostech změn nejmenší efekt. Pozitivní efekt těchto změn se bude dále zvětšovat s rostoucí výškou srážkového úhrnu. Zmenšení výšky odtoku je způsobeno pomalejším odtokem a tím i větším časem na vsáknutí (infiltrace vody) do půdy. Je nutné podotknout, že zvětšení vsaku má pozitivní vliv na aktuální povodňovou událost z přívalových srážek, ovšem na roční bilanci stavu podzemních vod se změna využití pozemku projeví jen minimálně, neboť infiltrace je krátkodobá.

VÝSLEDKY ANALÝZ

Znalost odtokových podmínek a potřeb ochrany území byla v rámci projektu Strategie podkladem k návrhům vhodných opatření, případně celého komplexu opatření v plochách povodí, viz [1]. Na základě porovnání objemů přímého odtoku pro současný stav využití území s objemy přímého odtoku pro návrhový stav s protierozními opatřeními v jednotlivých povodích lze stanovit, jaký mají navrhovaná ideová opatření vliv na změnu odtokových poměrů. Výsledky řešení byly využity pro hodnocení účinnosti navržených opatření na zemědělské půdě.

Změny odtokových poměrů byly vyhodnoceny pro případ *CNII* s návrhovými 24hodinovými srážkami se třemi dobami opakování (20, 100 a 200 let). Pro jednotlivá povodí IV. řádu bylo podle rovnice (6) provedeno srovnání relativních odchylek výšek odtoku Δr (%) současného $H_{O,soucasnost}$ a návrhového stavu $H_{O,navrh}$ území pro jednotlivé doby opakování, viz obr. 2. Z grafu je patrné, že na velké části povodí IV. řádu nedošlo k žádným návrhům ($\Delta r = 0$). Většina relativních odchylek je menších než cca 50 %. Se zvětšujícími se hodnotami relativních odchylek klesá jejich četnost rychleji u větších dob opakování. To platí i u absolutních odchylek na obr. 3. Se zvětšujícími se hodnotami Δr je pokles četností v případě doby opakování $N = 20$ přibližně lineární, u dob opakování $N = 100$ a $N = 200$ má exponenciální průběh. Rozložení hodnot Δr je výrazně jiné pro dobu opakování $N = 20$ než u dob opakování $N = 100$ a $N = 200$.

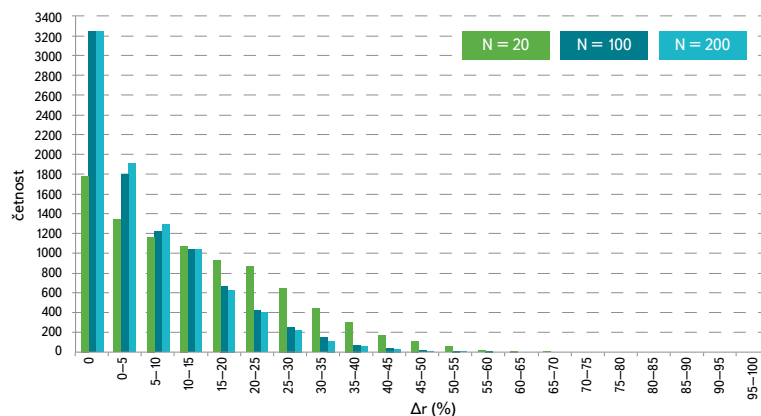
$$\Delta r = \frac{H_{O,soucasnost} - H_{O,navrh}}{H_{O,soucasnost}} \cdot 100 \quad (6)$$

Dále bylo pro jednotlivá povodí IV. řádu provedeno podle rovnice (7) srovnání absolutních odchylek výšek odtoku Δa (mm) současného $H_{O,soucasnost}$ a návrhového stavu $H_{O,navrh}$ území pro jednotlivé doby opakování, viz obr. 3. Z grafu je patrné, že většina absolutních odchylek je menších než cca 15 mm. Účinek relativního snížení výšky odtoku se snižuje se zvětšující se dobou opakování.

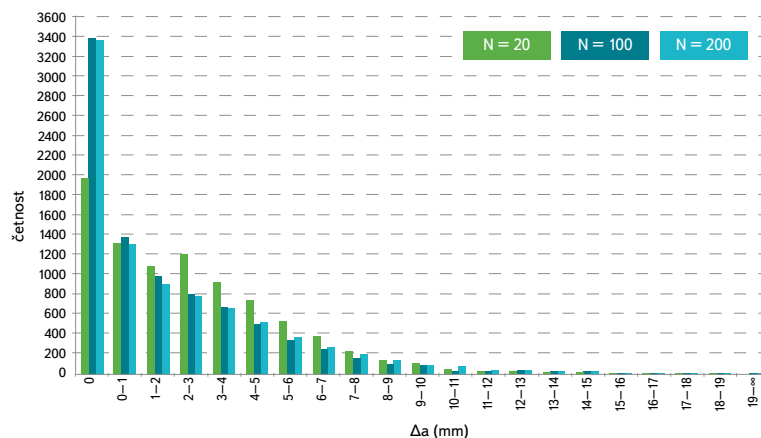
$$\Delta a = \left| H_{O,soucasnost} - H_{O,navrh} \right| \quad (7)$$

Poslední analýza se zabývala srovnáním absolutních odchylek (rozdílů) objemů odtoku ΔOph (m³) současného $Oph_{soucasnost}$ a návrhového stavu Oph_{navrh} území podle rovnice (8) pro jednotlivá povodí IV. řádu a pro jednotlivé doby opakování, viz obr. 4. Z grafu je patrné, že většina odchylek je menších než cca 300 tisíc m³ v jednom povodí. Většina povodí IV. řádu je schopna zachytit objem vody v řádu desítek tisíc m³.

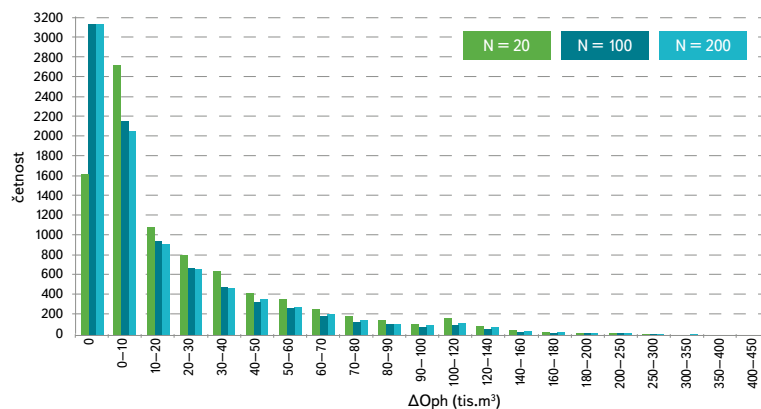
$$\Delta Oph = \left| Oph_{soucasnost} - Oph_{navrh} \right| \quad (8)$$



Obr. 2. Rozložení četnosti relativních odchylek výšek odtoku před a po návrzích
Fig. 2. Histogram of relative deviations of actual runoff for states before and after proposals



Obr. 3. Rozložení četnosti absolutních odchylek výšek odtoku před a po návrzích
Fig. 3. Histogram of absolute deviations of actual runoff for states before and after proposals



Obr. 4. Rozložení četnosti absolutních odchylek objemu odtoku před a po návrzích
Fig. 4. Histogram of absolute deviations of runoff volume for states before and after proposals

ZÁVĚR A DISKUSE

Dílčím úkolem projektu Strategie bylo stanovení odtokových poměrů v povodích IV. řádu pro území celé České republiky. Vyjádřit odtokové vlastnosti území pomocí automatizovaného postupu v prostředí GIS při znalosti návrhových srážek, typu povrchu a způsobu jeho využití umožňuje metoda čísel odtokových křivek (CN). Přestože má metoda svá omezení a původně byla odvozena pro malá nesvažitá povodí, používá se v podmínkách ČR i pro větší a svažitéjší povodí. Výpočet odtoku z celého povodí byl proveden pro současný stav využití území. V některých povodích byla v teoretické rovině na zemědělských pozemcích navržena protierozní a protipovodňová opatření, viz [1]. Cílem návrhů bylo zvýšit zasakovací schopnost krajiny, zpomalit a snížit odtok z území během přívalové epizody. Návrhy strukturálních a nestructurálních opatření na zemědělské půdě, na tocích a v nivě včetně zastavěného území a v podobě nových retenčních prostor jsou koncipovány tak, aby došlo ke změně odtokových poměrů. Podle zkušeností lze očekávat, že realizovatelnost těchto opatření bude úzce svázaná s prováděním komplexních pozemkových úprav. Po návrzích došlo k opětovnému výpočtu odtoku z povodí, v tomto případě na nové vrstvě CN zohledňující navrhovaná opatření v území. Následně došlo k vyhodnocení změn odtokových poměrů a srovnání charakteristik odtoku pro tři návrhové srážky (24hodinový déšť s dobou opakování 20, 100 a 200 let).

Podle doby opakování deště nedošlo na 20 až 36 % povodí IV. řádu (z celkových 8 958 povodí) ke změnám odtokových poměrů. To je způsobeno tím, že v povodích nebyla navržena žádná opatření nebo srážkový úhrn nepřesáhl očekávanou počáteční infiltraci. Na většině území České republiky došlo ke snížení výšky přímého odtoku H_p . Relativní snížení výšky odtoku se pohybuje obvykle do 50 %. V absolutních hodnotách dochází po návrzích ke snížení výšky odtoku do cca 15 mm, většinou ale jen do 10 mm. Vzhledem k tomu, že povodí mají různou rozlohu, je vhodnější a více vypovídající charakteristikou objem odtoku z povodí. Většina povodí IV. řádu je schopna pomocí návrhových opatření pojmout navíc objem vody v řádu desítek tisíc m^3 , výjimečně až stovek tisíc m^3 . Celková absolutní změna objemu za celou ČR je v případě doby opakování 20 let 238 mil. m^3 , doby opakování 100 let 181 mil. m^3 a doby opakování 200 let 198 mil. m^3 , což je pro představu trojnásobek až čtyřnásobek celého retenčního prostoru Orlické přehrady.

V mnohých případech je změna v odtokových poměrech nepatrná a někdy dokonce zanedbatelná. V takových případech nemá valný význam navrhovat drahá a organizačně náročná opatření v ploše povodí. K tomuto zjištěnému faktu bylo v dalších fázích řešení projektu Strategie přihlíženo.

V mapové aplikaci [1] v sekci „Erozní ohrožení zemědělské půdy“ lze v horním pravém rohu zobrazit seznam vrstev. V části „erozni_ohrozeni_zem_pudy“ lze zobrazovat zvláště navrhované retenční nádrže a ostatní technická i netechnická opatření. Lze zobrazit návrhy na změny pěstování kultur, osevních postupů nebo technických protierozních opatření. V části „analyticke_rastry“ lze zobrazovat rozložení CNIII nebo erozní smyv před návrhem opatření, případně zobrazení sklonitost terénu.

Poděkování

Článek vznikl na základě výsledků projektu Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice, který byl řešen v letech 2014 a 2015 a který byl financován prostředky OPŽP. Za spolupráci na řešení projektu děkuji Ing. Ladislavu Kašpárkovi, CSc., a za korekci příspěvku Ing. Karlu Drbalovi, Ph.D.

Literatura

- [1] OPŽP. Voda v krajině. Dostupné z: <http://www.vodavkrajine.cz/mapove-kompozice>
- [2] EBRAHIMIAN, M.M., NURUDDIN, A.A.B., SOOM, M.A.B.M., and SOOD, A.M. Application of NRCS – Curve number method for runoff estimation in a mountainous watershed. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 10(1), 2012, p. 103–114.
- [3] ŘEDINOVÁ, J., PAVLÁSEK, J. a MÁČA, P. *Hydrologie. Návod ke cvičením*. Praha: ČZU, 2009, 79 s.
- [4] DOSTÁL, T., DAVID, D., VRÁNA, K. a NOVÁKOVÁ, H. *Studie odtokových poměrů v povodí Weisseritz část I. Mapa zdrojových ploch povrchového odtoku*. Praha: ČVUT, 2006, 126 s.
- [5] JANEČEK, M. *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Praha: ČZU, 2012, 113 s.
- [6] DUMBROVSKÝ, M. Úprava odtokových poměrů v povodí. Modul M01. *Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. Brno: VUT, 2007, s. 46.
- [7] CRONSHEY, R. *Urban hydrology for small watersheds*. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986, 164 p.
- [8] KAŠPÁREK, L. a PELÁKOVÁ, M. Analýza citlivosti změn objemu přímého odtoku a infiltrace do půdy při předpokládaných změnách užívání pozemků. *VTEI 5/2014*, 2014, s. 8–12, příloha *Vodního hospodářství č. 10/2014*.
- [9] Ministerstvo zemědělství. LPIS. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny/>
- [10] CENIA. CORINE Land Cover. Dostupné z: <http://geoportal.cenia.cz>
- [11] CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., and MAYS, L.W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988, 572 p.

Autor

Ing. Lukáš Smelík, Ph.D.

✉ lukas_smelik@vuv.cz

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., pobočka Brno

Príspevek prošel lektorským řízením.

ANALYSIS OF CHANGES IN RUNOFF FOR CZECH REPUBLIC

SMELIK, L.

TGM Water Research Institute, p. r. i., Brno branch

Keywords: rainfall – CN curves – runoff – erosion – erosion protection – flood protection

One part of the project “Strategy for protection against negative impacts of floods and erosion phenomena by nature-friendly measures in the Czech Republic” was assessment of actual runoff conditions in the Czech Republic by runoff curve number method. Erosion protection and flood protection measures were designed at areas of chosen catchments, where high runoff and low retention were determined. Following from previous experiences, the efficient, economically acceptable and enforceable typified protection measures were designed. Effect of the designed protection was assessed by computation by means of the runoff curve number method at the whole area of the Czech Republic. The differences in runoff between actual state of territory and state with designed protection on territory were analysed. Territory was discretized on catchment area of the 4th order. Analyses were made in ArcGIS software.