
Projekt: Integrovaný vodohospodářský management v ochranných pásmech vodního zdroje Želivka

Registrační číslo sub-projektu: BG FTA EČ: 008

Nositel projektu: Via rustica o.s., nám. Svobody 320, 395 01 Pacov, IČ: 26982170

Identifikace zdrojů financování: Blokovaný grant CZ0001 z Fondu Technické asistence v rámci Finančních mechanismů EHP/Norska



- A1 – Expertní doporučení ke zřízení malých mokřadů v zemědělsky využívané krajině (odborné poznatky dlouhodobého vědeckého výzkumu experta Dr. Benta C. Braskeruda) – finální výstup 2.

Zpracoval: A.R.C. spol s r.o., Klimentská 8, 110 00 Praha 1, IČ: 48591394

překlad studie a komentář k výstavbě mokřadů v POP-DV: Ing. Hrnčířová

Za spolupráce: Svazek obcí Hořepnického regionu, Obecní úřad Hořepník, náměstí Prof. Bechyně 79, 394 21 Hořepník

Via Rustica o.s. nám. Svobody 320, 395 01 Pacov

Praha, Únor 2009

Použité zkratky:

CW – constructed wetlands – malé budované mokřady
TP – celkový fosfor
TN – celkový dusík
Q – průtok
POP DV - Plán oblasti povodí pro Dolní Vltavu

Použité termíny:

Aerobní/anaerobní podmínky prostředí – prostředí s dostatkem/nedostatkem kyslíku
Anoxie – vodní prostředí bez kyslíku
Biodiverzita – druhová pestrost na určitém území
Difúzní zdroje znečištění – plošné zdroje
Eutrofizace – proces nadměrného zatížení prostředí živinami – vede k rozvoji některých řas a znehodnocení vody pro využití člověkem
Komponenty – složky, části
Liniové revitalizace toků-tvarování koryta a břehů
Litorální pásmo-břehové pásmo
Makrofyty – vyšší rostliny
Negativní retence – uvolňování původně zadržovaných částic nebo živin
Nutrienty – živiny
Meliorace – odvodnění (vlhké louky)
Pesticidy – chemické látky využívané pro ochranu rostlin
Polutanty – znečišťující látky v prostředí
Půdní agregáty – shluky drobných jílovitých částic v půdě
Redox potenciál – redukční potenciál
Retence – zadržování
Revitalizace toků – navrácení přírodního charakteru koryt toků
Sedimentace – usazování
Sorpční komplex - jílovité částice váží na svém povrchu ionty živin a dalších látek
Vodoteče nízkého řádu – například povodí čtvrtého řádu je nejmenší jednotkou povodí

Klíčová slova:

Mokřady, účinnost retence, revitalizace toků

Zdrojová literatura:

Prezentace 2009, Studie dlouhodobého norského výzkumu retence u malých budovaných mokřadů– Dr. Bent C. Braskerud, Agricultural University of Norway, Bioforsk Institute, Norsko
Doktorská práce (2001) -Sedimentace v malých budovaných mokřadech-Dr. Bent C. Braskerud
Plán oblasti povodí pro Dolní Vltavu – oficiální dokument vypracovaný správcem povodí – státní organizací Povodí Vltavy, a.s.
Vodohospodářské revitalizace a jejich uplatnění v ochraně před povodněmi – Ing. Tomáš Just a kol., publikace MŽP, ČSOP, Ekologické služby, s.r.o.

OBSAH

I.	Malé mokřady v zemědělské krajině – základní charakteristika	4
I.1	Definice přírodních typů mokřadů (dle Justa)	4
II.	Zahraníční zkušenosti s budováním malých mokřadů v zemědělské krajině	6
II.1	Typy mokřadů a popis jejich částí	6
II.2	Proces fungování mokřadů	8
III.	Výsledky dlouhodobého norského výzkumu účinnosti malých budovaných mokřadů	9
III.1	Průtok a retence půdních částic	9
III.2	Průtok a retence fosforu	10
III.2.1	Fosfor v sedimentech mokřadů	11
III.2.2	Retence rozpustného fosforu v minerálních filtrech	11
III.2.3	Redukční potenciál a retence fosforu	12
III.3	Hloubka mokřadu a význam vegetace	12
III.3.1	Riziko odnosu sedimentů	13
III.4	Retence dusíku v malých mokřadech	14
III.4.1	Retence dusíku v organických filtrech	14
III.5	Retence pesticidů v malých mokřadech	15
IV.	Závěrečné doporučení	16
IV.1	Plocha hladiny a údržba mokřadu	17
IV.2	Možnosti budování malých mokřadů v povodí VN Švihov – shrnutí doporučení	18

I. Malé mokřady v zemědělské krajině – základní charakteristika

I.1 Definice přírodních typů mokřadů (dle Justa)

Definice mokřadu

Mokřad může být definován jako výrazně zavodněné či zamokřené území, které ale není jezerem, nádrží ani součástí aktivního koryta vodního toku. Voda v mokřadu vystupuje k terénu a nad terén, hloubka je nejčastěji kolem 0,6 m. Jde o velmi členité přechodové prostředí s nejednoznačnou hranicí mezi vodou a souš, které vyniká pestrostí a bohatostí různých forem života.

Hlavními prvky prostředí mokřadu je zátopa s hloubkou 0-0,6 m, příznivá pro kořenící vodní rostliny a podmáčené území s hloubkou hladiny podzemní vody do 0,2 m, příhodnou pro mokřadní rostliny. Tato základní prostředí každého mokřadu mohou být kombinována s vystupujícím ostrůvkem souše nebo hlubšími tůňmi. Proto lze v širším smyslu označit jako mokřady i rozsáhlejší litorální pásmo rybníka nebo mokřiny u břehů širší řeky.

Hlavní funkce mokřadů:

PODPORA BIODIVERZITY	- prostředí mokřadů jsou významná velkou biodiverzitou, včetně výskytu mnoha vzácných a ohrožených druhů rostlin a živočichů
ZADRŽOVÁNÍ VODY V KRAJINĚ	- mokřad nasává vodu jako houba a zadržuje ji a postupně stále uvolňuje, - působí v krajině jako aktivní zásoba vody, protože ji uvolňuje i v době sucha, naopak malé vodní nádrže jsou z tohoto hlediska pasivní, neboť nevypouští vodu v době sucha a jsou to nepropustné nádrže
POZITIVNÍ VLIV NA LOKÁLNÍ KLIMA	- intenzivní výpar z vodní hladiny a z rostlin ochlazuje a zvlhčuje místní klima a přispívá ke stabilitě malého vodního koloběhu
TLUMENÍ PRŮBĚHU POVODNÍ ROZLÉVÁNÍM DO PLOCHY MOKŘADU A ZPOMALOVÁNÍM JEJÍHO POSTUPU	- retenční funkce je ještě výraznější při ohrázkování mokřadu, které vytváří větší retenční prostor (například mokřady v místě bývalých rybníků a suchých poldrů). Poměrně intenzivní zanášení mokřadů větších niv povodňovými splaveninami patří k jejich přirozené dynamice a je třeba s ním počítat.
PODPORA A STABILIZACE ZDROJŮ PITNÉ VODY	- stabilizace hladiny podzemní vody
FIXACE UHLÍKU (CO₂) A JEHO UKLÁDÁNÍ DO SEDIMENTŮ A TÍM DÍLČÍ OVLIVNĚNÍ GLOBÁLNÍHO KLIMATU	- sedimenty jsou využitelné v zemědělství a energetice z dlouhodobého hlediska.
PRODUKCE BIOMASY	- zdroje rákosí anebo proutí pro tradiční druhy výrob, popřípadě jako surovinu pro energetické využití – biomasa z obnovitelných zdrojů (pro malý zájem odběratelů je produkce biomasy dosud okrajovým významem)
<i>Další výhody a nevýhody mokřadů</i>	
VYUŽITÍ PRO MYSLIVOST	- mokřady jsou velmi atraktivní z hlediska myslivosti, organizace mohou pomáhat při zakládání a spolupracovat s AOPK, ale způsoby využívání je třeba podřizovat potřebám ochrany přírody
SPECIFIKA MOKŘADŮ:	- nejsou vhodné pro chov ryb a jejich zpeněžitelné výtěžky jsou omezené, - s ohledem na klesající zájem o těžko využitelné zemědělské pozemky - nivy je třeba mokřad vidět ne jako zanedbané území bez využití, ale naopak jako velkou příležitost mokřady obnovovat nebo zakládat v nivách, - nejsou vhodné ke koupání, navíc populace komárů jsou důvodem, že se nehodí budovat mokřady v těsné blízkosti sídel.

Porovnání mokřadů a malých vodních nádrží

Významnou předností mokřadů oproti malým vodním nádržím jsou malé pořizovací a provozní náklady. Zapojený mokřad je z přírodovědeckého hlediska hodnotnější než nádrže a prakticky nepotřebuje údržbu. Předpokládá se ochrana stávajících mokřadů a podpora budování nebo obnovy nových. Mokřady jsou chápány jako druh vodohospodářského díla a jako žádoucí a vhodný prvek revitalizace údolních niv, poškozených dříve často nevhodnou regulací toků.

Hlavní technické parametry mokřadů:

- Celková plocha velikosti mokřadu
- Velikost plochy nejaktivnějšího mokřadu (zátopa a podmáčené území)
- Velikost plochy navazujícího území
- Délka břehové čáry
- Zadržovaný objem vody
- Povodňová retenční a průtoková kapacita

Typy uměle vytvořených mokřadů, které lze uplatnit při revitalizaci drobných toků a jejich niv:

- A) nízký suchý poldr s trvalým mělkým zatopením a mokřadem,
- B) starý rybník, rekonstruovaný pouze na částečné zatopení a mokřad,
- C) malé vzdouvací přesypávky na postranním přítoku,
- D) vytvoření mokřadu nasypáním nízkého vzdouvacího valu napříč nivou,
- E) vytvoření mokřadu plošným sejmutím zeminy (odvoz) s ponecháním nízkých ostrůvků,
- F) vytvoření mokřadu nepravidelným odtěžením břehů potoka.

Doporučení pro liniovou revitalizaci toků:

Přednost mají nová koryta místo rekonstrukce starých, mělká koryta před hlubokými (v intravilánu ale musí být hlubší kvůli bezpečnosti průtoků), vykoupení pozemků v potočném pásu nebrání realizaci meandrů, přednostní realizace projektů bez majetkových a technických komplikací je levnější a efekt je rychlejší.

Údržba revitalizačního díla po realizaci projektu

- zálivka, obžínání, ochrana proti zvěři, plevelům a invazním druhům - od počátku,
- management ochrany biotopů chráněných druhů,
- kontrola stavebních prvků: hrází, výpustí, přelivů,
- péče o výsadby dřevin -3 roky až 5 let,
- udržovací probírky břehových porostů - zimní těžba palivového dříví - do 10 % kmenů nechávat i souše v biotopu.
- sečení břehových porostů jen ve výjimečných případech,
- čištění koryt (přirozené nánosy výjimečně, leda odpadky a nánosy po povodních – povinnost správce).

II. Zahraniční zkušenosti s budováním malých mokřadů v zemědělské krajině

Významným zdrojem difuzního znečištění toků jsou plošné erozní smyvy půdy, živin i pesticidů ze zemědělsky obdělávaných pozemků (z orné půdy) v povodí. Eroze způsobuje zanášení koryt i nádrží, nadměrnou sedimentaci půdních částic bohatých na fosfor a tím má tento erozní proces významný podíl na následném zhoršení procesu eutrofizace, která ohrožuje vodní toky i jezera.

Všeobecně jsou mokřady považovány za účinné a často také jediné možné opatření pro omezení vstupu difuzního znečištění do toků. Obvykle je pro dosažení dobrých výsledků požadována větší plocha mokřadu. Jak ale naznačují výsledky dlouhodobého norského výzkumu, v krajině, která neumožňuje navrhování velkoplošných mokřadů, ale pouze malých, lze jejich účinnost významně zvýšit díky několika ověřeným doporučením.

Zemědělské organizace v Norsku financovaly výstavbu mokřadů, 10 let poté probíhal výzkum (hrazený Ministerstvem zemědělství), který hodnotil, jak mohou malé mokřady (jejichž plocha je asi 0,1 % plochy povodí) přispívat k čištění povrchových vod. Ukazuje výsledky z několika mokřadů, z nichž každý byl monitorován odběrem poměrných směsných vzorků na vtoku a výtoku. Sedimentační pasti a talíře byly umístěny přímo uvnitř 6 mokřadů, aby bylo možné sledovat rozmístění a vlastnosti sedimentu.

Sledován byl také redukční potenciál, aby se ověřilo, jaký má vliv na retenci fosforu v mokřadu. Dále je prezentováno několik výsledků retence dusíku, přestože dusík není v Norsku považován za významný problém ohrožení kvality povrchových vod. Také jsou k dispozici výsledky retence pesticidů ze dvou mokřadů.

II.1 Typy mokřadů a popis jejich částí

Sledované malé mokřady (viz následující tabulka č. 1) se nacházely v mírném a chladném mírném klimatické oblasti v zemědělských oblastech v Jižním Norsku. Většina studií se prováděla na nejstarších typech mokřadu typu CW-A.

Tabulka č.1 - Charakteristika sledovaných typů mokřadů a charakteristika povodí

Typ mokřadu CW-	Rok výstavby mokřadu	A - Plocha mokřadu (m ²)	Mokřad je tvořen Komponenty *	Převládající typ půd	P - Plocha povodí (km ²)	Rozloha mokřadu (A) vzhledem k ploše povodí P (%)	Podíl zem. půdy k ploše povodí P (%)
A	1990	900	a b	naplavený prachovitý jíl a prachovitá hlína	1,48	0,06 %	17 %
B**	1990	630	a b	naplavený prachovitý jíl a prachovitá hlína	0,86	0,07 %	11%
C	1990	345	a b	naplavený prachovitý jíl a prachovitá hlína	0,5	0,07 %	27 %
D**	1990	263	a b	naplavený prachovitý jíl a prachovitá hlína	0,9	0,03 %	28 %
F	1994	870	a c b b c b	prachovité naplaveniny (moréna)	1,03	0,08 %	14 %

G***	1993	840	a b b b c c c b	prachovité naplaveniny (moréna)	0,22	0,38 %	99 %
L**	2001	1.200	a b:c,b,x-y:b	naplavený písek	0,8	0,15 %	88 %

Zdroj: Prezentace Dr. Benta Braskeruda na semináři Water 2009

Legenda:

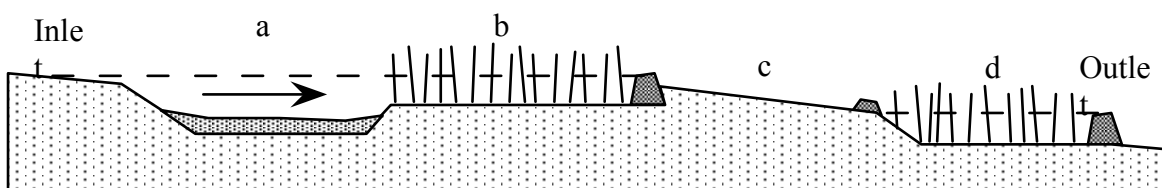
* komponenty viz obrázek č.1 a č.2

** odebrání vzorků pouze v letní sezoně,

*** CW-G byl sledován uprostřed (G1) a na výtoku (G2). G je G2, pokud není uvedeno jinak

Malé budované mokřady (CW) obsahují maximálně 4 různé komponenty - viz následující schéma. (obrázek č.1). Jednotlivé části mohou být opakovaně řazeny za sebou, a výsledný navržený design ovlivňuje celkovou účinnost mokřadu.

Obrázek č. 1 – Základní funkční složky malého mokřadu v Norsku (CW)



Zdroj: Prezentace Dr. Benta Braskeruda na semináři Water 2009

Legenda:

Inlet – Vtok

a - sedimentační rybník (nádrž) (hloubka 1m),

b - vegetační filtr (hloubka 0,5 m)

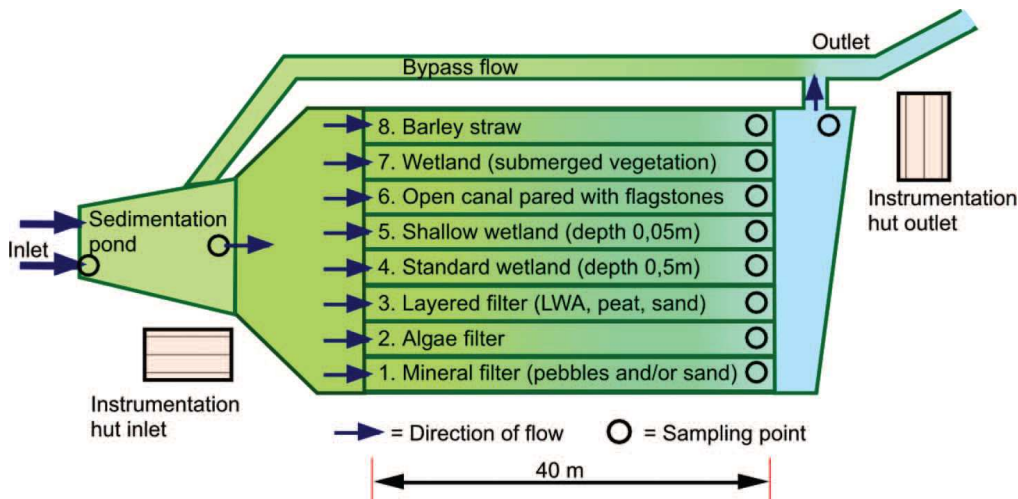
c - přepad s kameny nebo vegetací (0 m),

d - odtoková nádrž (hloubka 0,5 - 0,8 m),

Outlet - odtok

Následující schéma (obrázek č. 2) zobrazuje budované mokřady typu L, které jsou složeny z osmi různých typů filtrů (délka 40 m).

Obrázek č. 2 – Schéma mokřadu typu L



Zdroj: Prezentace Dr. Benta Braskeruda na semináři Water 2009

Legenda-pohled na mokřad shora:

Inlet - vtok

Outlet - odtok

Direction of flow – směr toku

Bypass flow – odlehčovací kanál pro období vysokých průtoků (přívalové srážky)

Sedimentation pond - sedimentační nádrž

Sampling point – místo odběru vzorků

Například zdola:

1. minerální filtr - oblázky anebo písek,
2. filtr z řas,
3. vrstevnatý filtr - rašelina, písek,
4. standardní mokřad s hloubkou 0,5 m,
5. mělký mokřad s hloubkou 0,05 m,
6. otevřený kanál s plochými kameny,
7. mokřad s ponořenou vegetací,
8. ječná sláma.

II.2 Proces fungování mokřadů

Zadržování (retence) půdních částic je v procesu fungování malých mokřadů klíčovým faktorem, jelikož fosfor a mnoho dalších polutantů jsou většinou na půdní částice vázány. Všeobecně se soudí, že rychlost usazování (sedimentace) částic, erozní splach a velikost plochy hladiny mokřadu ovlivňují účinnost retence.

To může být vysvětleno běžně užívanou rovnicí pro povodí prvního řádu (Kadlec and Knight, 1996):

$$(1) \quad C_{\text{out}} = (C_{\text{in}} - C^*) \exp(-k \cdot A / Q) + C^*$$

kde C_{in} a C_{out} jsou koncentrace polutantů na vtoku (C_{in}) a ve výtoku (C_{out}) v $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$, C^* je hodnota pozadí ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) a k je konstanta poměru odstraňování ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Můžeme říci, že konstanta k je rovna rychlosti usazování rozptýlených půdních částic.

Retence nezávisí na hloubce, jak bylo stanoveno již v roce 1904 (Hazen, 1904):

$$(2) \quad E = \frac{w \cdot A}{Q}$$

Retence E je přímo úměrná ploše hladiny (A), rychlosti usazování částic (w) a nepřímo úměrná odtoku (Q). Proto, když zdvojnásobíme objem mokřadu zdvojnásobením jeho hladiny, vzroste nám retence, avšak při vyšším odtoku Q se vlivem rychlejšího proudění vody částice nestačí usadit a snižuje se retence E .

Čím mělký je mokřad, tím kratší je usazovací vzdálenost a tím pádem je rychlost usazování částic w vyšší (naopak zdvojnásobení hloubky mokřadu nemá na zvýšení retence vliv).

III. Výsledky dlouhodobého norského výzkumu účinnosti malých budovaných mokřadů

Sledované malé mokřady (méně než 0,1 % plochy povodí) se nacházely v mírné a chladné klimatické oblasti v zemědělských oblastech v Jižním Norsku.

Plocha povodí se pohybovala od 22 ha u mokřadu typu CW-G do 150 ha u typu CW-A (viz následující tabulka č. 2).

Typické norské povodí má více než 50 % lesů.

Tabulka č.2 - Charakteristika mokřadů zařazených do dlouhodobého výzkumu účinnosti

Typ mokřadu	Rok výstavby mokřadu	A - Plocha mokřadu (m ²)	P - Plocha povodí (km ²)	Rozloha mokřadu (A) vzhledem k ploše povodí P (%)	Podíl zem. půdy k ploše povodí P (%)
CW - A	1990	900	1,48	0,06 %	17 %
CW - C	1990	345	0,5	0,07 %	27 %
CW - F	1994	870	1,03	0,08 %	14 %
CW - G*	1993	840	0,22	0,38 %	99 %

Zdroj: Prezentace Dr. Benta Braskeruda na semináři Water 2009

Legenda:

* CW-G byl sledován uprostřed (G1) a na výtoku (G2). G je G2, pokud není uvedeno jinak

Převládající typy půd:

- naplavený prachovitý jílu a prachovitá hlína (typy CW-A a CW-C),
- prachovité naplaveniny (moréna) u typu CW-F a CW-G.

Roční úhrn srážek se pohyboval od 750 do 1400 mm (typy CW-A a CW-G).

Průměrný roční hydraulický průtok (podíl průměrného denního průtoku k ploše mokřadu Q/A) byl v rozmezí od 0,66 m/d ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) v CW-G2 do 3,4 m / d v CW-D.

III.1 Průtok a retence půdních částic

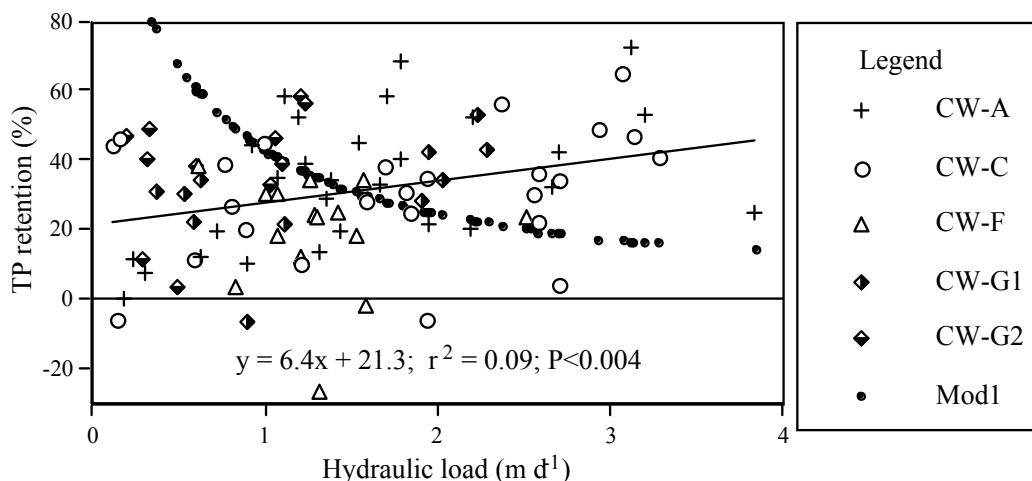
Průměrná retence jílu byla 57 % u typu CW-A, což je asi třikrát vyšší hodnota, než bylo předpovězeno rovnicí (1) - strana 8. Podobný výsledek byl prokázán u typu CW-C. Data ukazují, že jílové částice se chovaly jako jemné a střední prachové částice s ohledem na rychlost sedimentace. Pravděpodobně mezi půdními částicemi převládaly agregáty (Sveistrup et al, 2008). Transport ve vodotečích většinou vede k rozbití agregátů, proto je vhodné zkrátit na minimum transportní vzdálenosti, což může být dosaženo zařazením malých budovaných mokřadů (CW) do koloběhu vody v malých povodích.

Vzhledem k rovnici (2) - strana 8, je očekáváno, že retence všech typů pevných látek klesá s rostoucím průtokem (Q). Přestože průtok rostl, bylo prokázáno (Braskerud 2003), že vstupovaly do mokřadu půdní částice a agregáty s rychlejší usazovací rychlostí. Výsledkem bylo, že retence často rostla s rostoucím průtokem Q, což bylo také zjištěno u celkového fosforu (viz graf č. 1). Dle prokázaných dat rovnice (2) nepředpovídá retenci správně (neklesá s rostoucím průtokem), jelikož nezohledňuje celý proces půdní eroze v povodí.

III.2 Průtok a retence fosforu

Sledování vztahu mezi retencí fosforu (%) a průtokem (Q/A) v malých budovaných mokřadech vzhledem k rovnici (1) pro povodí prvního řádu, kde $k = 204$ a $C^* = 0$ popisuje následující graf č. 1 a tabulka č.3. Data pro retenci jsou za vegetační sezónu (období 3 měsíců). Negativní retence je ztráta fosforu z mokřadu (Braskerud, 2002a). Fosfor je obvykle vázán na půdní částice, což je velmi důležité z hlediska procesu usazování.

Graf č. 1 - Sledování vztahu mezi retencí fosforu (%) a průtokem (Q/A) v malých budovaných mokřadech



Legenda:

TP retention – retence celkového fosforu (%)

Hydraulic Load – hydraulický průtok v m/den

Tabulka č. 3 - Průměrný roční hydraulický průtok (Q/A), retence půdních částic a fosforu ve 4 malých mokřadech.

Typ mokřadu	Hydraulický průtok (Q/A) (m/d)	Retence půdních částic		Retence celkového fosforu	
		Relativní (%)	Specifická ($g/m^2/år$)	Relativní (%)	Specifická ($g/m^2/år$)
CW-A	1,7	66	83	42	51
CW-C	1,9	45	89	27	58
CW-F	1,8	62	36	23	37
CW-G	0,8	68	22	42	46

Zdroj: Prezentace Dr. Benta Braskeruda na semináři Water 2009

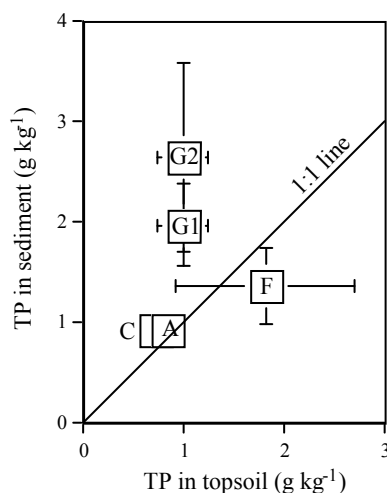
Výše uvedená tabulka č. 3 shrnuje 2 výsledky. Nejvyšší relativní retence půdních částic byla zjištěna u mokřadu typu CW-G (G2), který měl nejvyšší poměr plochy mokřadu: ku ploše povodí (viz Tabulka č. 2 – 0,38 %). Také u mokřadu typu CW-A byla zjištěna vysoká účinnost. Typ CW-C prokázal nižší účinnost retence částic. Vysvětlením je patrně výskyt menších agregátů díky nižší stabilitě agregátů v ornici povodí (Braskerud, 2003).

Nejnižší retence celkového fosforu byla zjištěna v typu CW-F (23 %), což bylo způsobeno vysokým obsahem rostlinám přístupného fosforu v ornici (vodorozpustný P). Pouze 52 % celkového fosforu na vstupu bylo vázáno na půdní částice, oproti tomu v jiných mokřadech to bylo až 84 %.

III.2.1 Fosfor v sedimentech mokřadů

Průměrný obsah celkového fosforu v sedimentech byl stejný v mokřadech typu CW-C a CW-A. U typu CW-F a CW-G byl obsah fosforu v sedimentech o něco vyšší (viz Graf č. 2). Obecně, obsah fosforu v sedimentech mokřadů byl vyšší než obsah fosforu v okolní ornici. Jen v povodí CW-F byla zjištěna větší variabilita obsahu fosforu v ornici oproti jiným povodím. Navíc pozemky orné půdy jsou v krajině rozptýlené, takže na fosfor bohatá ornice se nemusela dostat do sedimentu mokřadu. Nelze tedy vyloučit typ CW-F z obecně stanovených výše uvedených trendů.

Graf č. 2 - Vztah mezi obsahem celkového fosforu v ornici a v sedimentech mokřadu typu CW-A, CW-C, CW-F, CW-G1 a CW-G2 (\pm standardní odchylka).



Legenda:

TP in sediment – Celkový fosfor v sedimentech

TP in topsoil – Celkový fosfor v ornici

1:1 line - čára poměru 1:1 znamená stejný obsah fosforu v půdě a sedimentech (Braskerud, 2002a).

I když obsah fosforu v sedimentech byl vysoký, obsah fosforu vázaného na rozpuštěné pevné látky ve vodotečích byl ještě vyšší (střední hodnota od 0,11 do 0,64 % TSS, Braskerud, 2002a). Frakce půdy nejbohatší na fosfor tedy nebyly zachyceny v sedimentech pravděpodobně z důvodu příliš malé velikosti částic a agregátů.

III.2.2 Retence rozpustného fosforu v minerálních filtrech

V letním období v době nízkých průtoků, je procento rozpuštěného fosforu vyšší, navíc se fosfor může uvolňovat ze sedimentů (viz graf č. 3). Do mokřadu podobného typu jako CW-A a CW-D byl blízko odtoku přidán filtr Leca Filtralite P (0,5 – 4 mm). Filtr byl dimenzován pouze pro období nízkých průtoků (0,2 l s⁻¹), voda zůstává ve filtru po dobu 20 hodin. V případě vyšších (přívalových) průtoků je proud odveden odlehčovacím korytem (bypass). Předběžné výsledky ukazují 50-80 % pokles obsahu fosforu (vstupní koncentrace 0,03-0,3 mg P l⁻¹).

Podobná studie byla provedena na typu CW-L (Braskerud, 2005a) s filtrem bohatým na železo a hrubým pískem. Retence rozpustného fosforu byla 55 % (vstup 0,3 mg P l⁻¹). Minerální filtry by měly být zařazeny na konci mokřadu, aby se zabránilo jejich ucpávání půdními částicemi.

III.2.3 Redukční potenciál a retence fosforu

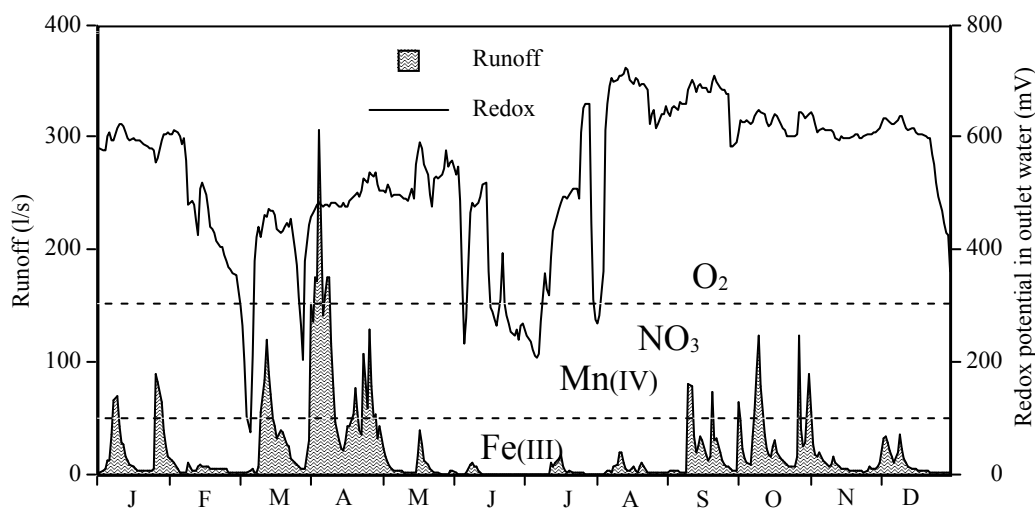
Všeobecně byla studována retence fosforu vázaného na půdní částice v malých mokřadech. Sorpční proces fosforu však závisí i na redukčním potenciálu prostředí, nicméně vázaný fosfor může být uvolňován i za podmínek nízkého redukčního potenciálu.

V rámci dlouhodobého měření redukčního potenciálu na odtoku mokřadu typu CW-A v období 3,5 roku (Braskerud et al., 2005b) bylo zjištěno, že hodnoty byly vždy pozitivní a často vysoké (střední hodnota 550 mV), což indikuje aerobní podmínky. Vysoké průtoky (průměrně 2,3 m d⁻¹) zásobovaly mokřad dostatkem vody pro udržování aerobních podmínek v povrchové vrstvě vody.

Naopak redukční potenciál naměřený v sedimentech bez vegetace byl vždy záporný (pod -200 mV), což značí anaerobní podmínky. Pokud je redukčního potenciál nízký asi pod 100 mV, Fe(III) ionty jsou redukovány na Fe(II), a fosfor vázaný na železo se uvolní.

V následujícím grafu je znázorněn převládající příjemce elektronů při daném redukčním potenciálu.

Graf č. 3 - Denní sledování průtoků a redukčního potenciálu v typu CW-A během roku 2001.



Legenda:

Runoff (l/s) – průtok (l/s)

Redox potential in outlet water (mV) – redukční potenciál v odtokové vodě (mV)

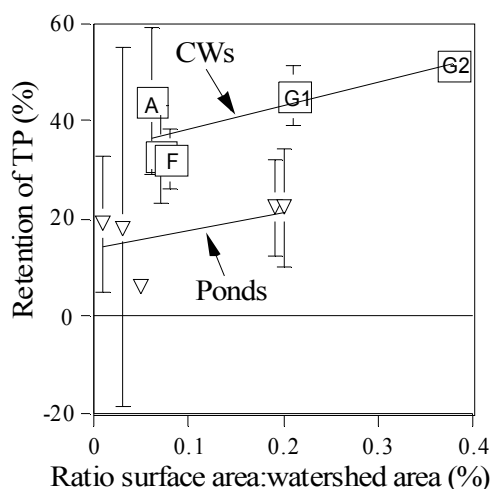
J, F, M,.... – měsíce roku

Díky vysokému redukčnímu potenciálu ve vodě, retence celkového fosforu byla zřejmá a období odnosu byly ojedinělé.

III.3 Hloubka mokřadu a význam vegetace

Pozitivní efekt mělké hloubky mokřadu byl podpořen výsledky srovnávací studie retence fosforu v mokřadech a rybnících (Uusi-Kämpä et al., 2000). Rybníky nacházející se ve Finsku a Švédsku byly často hlubší než 1 metr a byly porostlé vegetací pouze na březích. Hodnocené mokřady byly podobné jako výše popsané typy.

Graf č. 4 - Retence celkového fosforu (\pm stand. odchylka) v mokřadech a rybnících (upraveno ze studie Uusi- Kämpä et al., 2000).



Legenda:

Retention of TP (%) - Retence celkového fosforu (%)

Ratio surface area: watershed area (%) – Podíl povrchové plochy mokřadu ku celkové ploše povodí (%)

CWs – mokřady

Ponds – rybníky

Retence fosforu v mokřadech byla dvojnásobná oproti sledovaným rybníkům.

III.3.1 Riziko odnosu sedimentů

Odnos sedimentů byl sledován ve dvou případech během celé doby studia mokřadů.

(i) pokud mokřady typu CW-A, CW-B, CW-C a CW-D měly vegetační pokryv méně než 20 %, pak přibližně 40 % sedimentů bylo odneseno. Ale jakmile vegetační pokryv vzrostl na asi 50 %, odnos sedimentů byl zanedbatelný (Braskerud, 2001a).

Shrnutím dodáváme, že vegetace má pozitivní efekt na usazovací vzdálenost v mělkých nádržích (viz. obrázek č. 1) neboť zabraňuje víření a odnosu sedimentů. Proto hloubka budovaných mokřadů by měla být přizpůsobena potřebám růstu vegetace, tedy asi 0,5 m nebo méně.

(ii) Přepadové zóny (viz. obrázek č. 1) v mokřadech mají dvojí funkci. Zaprvé prokysličují vodu, zadruhé retence půdních částic roste díky malé usazovací vzdálenosti za podmínek nízkého průtoku. To by mělo být vhodné pro částice malé velikosti. Ale s tím jak průtok roste, sedimenty se víří a odplavují.

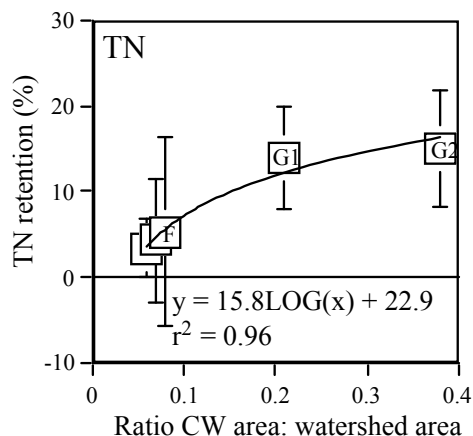
Pokud máme shrnout předchozí sledování, odtokový rybník za přepadovou zónou může zajišťovat v tomto smyslu prostor pro znovuzachycení odnášených sedimentů z mokřadu. Zaplněné mokřady budou pravděpodobně fungovat jako přepadové zóny.

Navíc makrofyty zvyšují účinnost proudění tím, že redukují krátký oběh vody nebo sdružený odtok v případě přívalových srážek (Braskerud, 2001a).

III.4 Retence dusíku v malých mokřadech

Budované mokřady v Norsku jsou často příliš malé, aby dosáhly vysoké relativní retence dusíku. Mokřady často zabírají pouze 0,1 % plochy povodí. Graf č. 5 ukazuje, jak retence celkového dusíku roste s poměrem plochy hladiny ku ploše povodí.

Graf č. 5 – Retence dusíku



Legenda:

Retention of TN (%) - Retence celkového dusíku (%)

Ratio CW area: watershed area – Podíl povrchové plochy mokřadu ku celkové ploše povodí

Malé mokřady mají na retenci dusíku menší vliv (rozmezí 3-15 %) kvůli krátké době zdržení. Retence dusíku roste, když roste plocha hladiny mokřadu typu CW-A, CW-C, CW-F, CW-G1 a CW-G2 (Braskerud, 2005a), jak dokládá Graf č. 5.

III.4.1 Retence dusíku v organických filtrech

Použití organických filtrů může zvýšit retenci dusíku. Ale tyto filtry zase snižují retenci fosforu, protože vodní prostředí se stane anoxickým.

V mokřadech typu CW-L bylo zkoušeno zlepšit retenci dusíku použitím 8 různých druhů filtrů. Filtr 4 je běžný norský vegetační filtr, který slouží jako srovnávací. Průměrná retence celkového dusíku v mokřadu byla uvažována 17 % za období květen - září v roce 2003, ale jen 2 % ve stejném období roku 2004. Nižší retence v roce 2004 byla pravděpodobně způsobena vyšším průtokem toho roku.

Organické filtry jako ječná sláma byly účinnější než minerální filtry a standardní mokřady. Filtr z ječné slámy (č. 8 na obrázku č. 2) měl nejvyšší účinnost retence celkového dusíku v obou letech 2003 a 2004 (48 % a 13 %) (Blankenberg et al, 2007b). Ale organické filtry způsobují pokles redukčního potenciálu ve vodě. Výsledkem je, že tento filtr neměl žádnou čistou retenci fosforu. (Braskerud, 2005a).

Nitrátová forma dusíku je nejčastější forma dusíku ve vodě zemědělských povodí, pak následuje organická a amoniakální forma dusíku. Usazování organického dusíku je nejdůležitějším faktorem retence v malých mokřadech. Dlouhodobá studie malých mokřadů CW-A až CW-G ukázala pokles retence dusíku s tím, jak mokřad stárne, což pravděpodobně souvisí s tím, že zachycený organický dusík byl přeměněn na anorganické formy, které byly poté exportovány ven z mokřadu (Braskerud, 2002c).

III.5 Retence pesticidů v malých mokřadech

Kdekoliv se používají pesticidy, dá se očekávat jejich únik do prostředí (Braskerud, 2005a). Budované mokřady na vodotečích prvního a druhého řádu mohou redukovat ztráty pesticidů, pokud jsou stimulovány procesy čištění vody.

Aplikace pesticidů na ornou půdu byla sledována v povodích mokřadů typu CW-G a CW-L. Pesticidy byly nalezeny v mokřadech s nejvyšší koncentrací naměřenou ihned po aplikaci na pozemky. Mokřady mohou redukovat obsah pesticidů ve vodě, efekt závisí na fyzikálně-chemických vlastnostech pesticidů (rozmezí od 0 až 67 %).

Retence pesticidů u mokřadů typu CW-L byla v rozmezí 3 - 47 % v roce 2003 a 19 - 56% v roce 2004. Filtr z plochých kamenů (č. 6 na obrázku č. 2) a filtr z ječné slámy (č. 8 na obrázku č. 2) účinkovaly dobře v porovnání s referenčním filtrem (L4). Přirozené UV-světlo mohlo mít vliv na mělké protékající znečištěné vody, zatímco nízký redukční potenciál a organická hmota jsou faktory účinnosti filtru z ječné slámy.

Ostatní filtry měly hůře předvídatelné výsledky (Blankenberg et al, 2006; Braskerud, 2005a). Filtr z plochých kamenů a ječné slámy neměly dobrou efektivnost retence fosforu.

IV. Závěrečné doporučení

Farmy v Norsku jsou malé a umístěné v kopcovité krajině a byly zde zkoušeny malé mokřady budované podle několika modelů (Chen, 1975; Haan et al., 1994 and Kadlec and Knight, 1996). Vybudované mokřady mají malé rozměry v porovnání s plochou povodí a průtok je dosti vysoký. Ve smyslu retenčních modelů bylo předpokládáno, že vybudované malé mokřady se budou vyznačovat nízkou retencí jemných půdních částic a fosforu, který je často spojen s jílovými částicemi. Bylo ale prokázáno, že mokřady jsou schopné udržet jílovité částice v sedimentech a hlavní faktory, které ovlivňují sedimentaci jsou:

- erozní smyv, protože erozní a transportní procesy v povodí mohou přinášet i částice velkých velikostí,
- agregáty - protože jílovité částice se snadněji usazují v podobě agregátů a s tím souvisí i retence polutantů vázaných na sorpční komplex jílových agregátů.

Výsledkem je, že faktor vlastností povodí je důležitější pro účinnost retence více než vlastní design mokřadu, který ale musí obsahovat několik komponent pro úspěšnou retenci:

1. mělká hloubka
 - a. stimuluje sedimentaci a zlepšuje růst rostlin
 - b. zvyšuje okysličování vody
2. vegetace
 - a. zlepšuje průtokové vlastnosti a v případě přívalových průtoků brání víření sedimentů,
 - b. tvoří ekologicky a mikrobiologicky aktivní prostředí, které přispívá k zadržování a rozkladu polutantů,
3. větší plocha hladiny mokřadu, protože retence roste přímo úměrně s plochou hladiny
4. organické a minerální filtry, pro retenci rozpustných polutantů (pozor na přetížení filtrů nadměrným průtokem, zanášení sedimenty a také na skutečnost, že rozpouštění jedné látky může blokovat rozpouštění jiných látek).

Výsledky norského výzkumu prokazují, že průměrná retence v různých mokřadech se pohybovala v rozmezí:

- ↓ 45 - 68 % u půdních částic,
- ↓ 23 - 42 % u fosforu,
- ↓ 3 - 15 % u dusíku,
- ↓ 3 - 56 % u pesticidů.

Retence fosforu roste v závislosti na erozním smyvu z povodí a to z několika následujících důvodů:

- jílové částice, které do mokřadu vstupují v agregátech se rychleji usazují než jednotlivé oddělené půdní částice,
- mělká hloubka mokřadů znamená kratší sedimentační vzdálenost,
- vegetační pokryv zabraňuje víření a odnosu usazenin,
- použití minerálních filtrů zvyšuje účinnost retence fosforu v době nízkých průtoků.

Fosfor v sedimentech je citlivý na redox potenciál vodního prostředí mokřadu, pro jeho stabilizaci v sedimentech musíme zajistit stálý dostatečný průtok přes mokřad.

Malé mokřady mají na retenci dusíku menší vliv kvůli krátké době zdržení. Retence dusíku roste, když roste plocha hladiny mokřadu.

Protože mokřady často dosahují **nejvyšší účinnosti retence po přívalových srážkách**, měly by být umístěné přímo na vodotečích nízkého řádu, jak se domnívá Mitsch (1992) ve své zprávě. Umístění mokřadu podél vodoteče není vhodné, neboť část vody mokřadem vůbec neprochází. Bylo prokázáno, že dokonce i při vysoké rychlosti průtoku 26 m d^{-1} , dochází k retenci (Braskerud et al., 2000).

IV.1 Plocha hladiny a údržba mokřadu

Mokřady typu CW-G měly nejvyšší podíl relativní retence ve všech sledovaných parametrech (viz Tabulka č. 3), protože když roste podíl plochy mokřadu (A) ku ploše povodí (P), roste retence (viz graf č. 4 a 5). Na druhou stranu specifická retence bude klesat.

Existuje vždy optimální velikost mokřadu, ale závisí na faktorech povodí a zranitelnosti povodí vodoteče (Braskerud et al, 2005c).

Byla studována rychlost zanášení (filling rate) čtyř studovaných typů mokřadů. Původně navržená hloubka byla kolem 50 cm ve všech typech mokřadů. Typ CW-D byl zaplněn sedimenty po 9 letech funkce kvůli akumulaci sedimentů. Jde o nejmenší typ mokřadu v poměru k ploše povodí (viz Tabulka č. 2).

Obsah jílu, organické hmoty a fosforu je obvykle stejný nebo vyšší než v původní ornici (Graf č. 2; Braskerud, 2002a; 2003). Sedimenty v mokřadech často odpovídají ornici v povodí a jsou složeny z jemných, stabilních agregátů. Vytěžené sedimenty ze zanesených mokřadů budou asi dost vhodné do půdních substrátů i pro uložení na pole, pokud nejsou kontaminované průmyslovými látkami nebo patogeny. (Sveistrup et al, 2008).

Průměrná roční ztráta půdy se ve sledovaných povodích pohybovala od 580 do 4.760 kg ha^{-1} orné půdy (v povodích CW-F a CW-C). Kvůli této nadměrné ztrátě orné půdy je použití sedimentační nádrže před vstupem do mokřadu velmi vhodné opatření (viz. obrázek č.1).

Pokud se povodí vyznačují malou ztrátou fosforu, je malá i retence. Velké erozní smyvy naopak mohou být důvodem výstavby velkého mokřadu, ale není ekonomicky efektivní budovat mokřady v povodích s malou ztrátou fosforu. Ale existují i jiné priority pro výstavbu mokřadu, jako zvýšení biodiverzity, atraktivity nebo podpoření jiných funkcí krajiny.

Závěrem můžeme říct, že nejdůležitějším faktorem účinné retence znečištění v malých mokřadech jsou vlastnosti povodí jako takového, typ zemědělství, půdní typy, erozní smyvy, stabilita agregátů. Velmi důležitým kritériem zřizovaných mokřadů je jejich mělká hloubka (max. 0,5 m), vegetační filtry a umístění blízko zdroje znečištění.

IV.2 Možnosti budování malých mokřadů v povodí VN Švihov – shrnutí doporučení

V současné době probíhá připomínkové řízení k návrhu opatření Plánu oblasti povodí Dolní Vltavy, kde jsou konzultovány projektové záměry místních iniciativ a ve spolupráci s pracovníky státního podniku Povodí Vltavy jsou kompletovány standardní Listy opatření. Počítá se i lokálními projekty zvyšování retence vody v území, revitalizace toků a budováním mokřadů a rybníků v povodí (individuální projekty).

Obecně formulovaný list opatření DV 100082 - Revitalizace vodních toků obsahuje vysvětlení, jaká konkrétní opatření mohou být realizována z hlediska revitalizace toků, které byly v dřívější době nevhodně upraveny (negativní jevy: pevné dno, geometrické koryto, napřímení toků, zatrubnění, meliorace mokřých luk a znehodnocení údolní nivy, degradace břehových porostů, migrační bariéry pro ryby). Větší spád toků a nevhodná koryta zvyšují rychlost vody a to znamená nežádoucí rychlý odtok vody z území.

Revitalizační opatření mají obnovit přírodní charakter koryt toků a tam kde je to možné, obnovit degradované údolní nivní ekosystémy a tím zpomalit odtok vody z krajiny.

Konkrétní Listy opatření (LO) – popisují a navrhují dílčí opatření revitalizace vybraných úseků toků, včetně odhadu cenové nákladnosti, technické náročnosti a vyhodnocení výskytu vzácných druhů (ohrožení živočichové a rostliny).

Tabulka č. 4 - Revitalizační listy opatření v Plánu oblasti povodí Dolní Vltavy

Číslo LO listu opatření	Název opatření	Název toku	poznámka
DV 110079	Liniová revitalizace toku a nivy	Medulán	
DV 110138	Revitalizace upraveného úseku	Kladinský potok	Chráněné druhy
DV 110050	Liniová revitalizace toku a nivy	Hornolhotský p.	
DV 110135	Revitalizace přítoku	Janovský potok	Chráněné druhy
DV 110132	Revitalizace horní části toku	Janovský potok	Chráněné druhy
DV 110127	Liniová revitalizace toku a nivy	Čechtický až Luční potok	
DV 110129	Liniová revitalizace toku a nivy	Křivsoudovský potok	
DV 110120	Liniová revitalizace toku a nivy	Mnichovický potok	
DV 110094	Liniová revitalizace toku a nivy	Děkanovický potok	
DV 110125	Liniová revitalizace toku a nivy	Čechtický potok	Chráněný druh
DV 110103	Liniová revitalizace toku a nivy	Sedlický potok	Chráněné druhy
DV 110087	Liniová revitalizace toku a nivy	Blažejovický potok	
DV 110051	Liniová revitalizace toku a nivy	Loketský potok	
DV 110069	Liniová revitalizace toku a nivy	Keblovský potok	

Zde navrhované mokřady jsou tedy vlastně obnovené údolní mokré louky a mokřady jako součást údolních niv, nejedná se tedy přímo o navrhování a budování nových mokřadů, i když jejich funkce bude obdobná.