

KOŘENOVÉ ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD



■ Úvod

Přírozené mokřady jsou využívány pro čištění odpadních vod již více než sto let. V mnoha případech však šlo spíše o pouhé vypouštění než čištění odpadních vod. Hlavním důvodem toho byl fakt, že mokřady byly až do 60. let minulého století považovány za bezcenné biotopy. Nekontrolované vypouštění odpadních vod způsobilo v mnoha případech nevratné poničení celé řady mokřadů. V posledních desetiletích však díky intenzivnímu studiu mokřadních systémů nastal výrazný obrat v chápání významu role mokřadů v přírodě a nekontrolované vypouštění odpadních vod do přírodních mokřadů se v civilizovaných zemích snížilo na minimum.

Umělé mokřady jsou systémy, které jsou navrhovány a stavěny tak, aby při čištění odpadních vod byly využívány procesy, které probíhají v přírodních mokřadech. Umělé mokřady se rozdělují podle několika kritérií, především podle druhu použité vegetace a způsobu průtoku odpadní vody (Obr. 1). **Systémy s plovoucí vegetací** využívají především vodní hyacint (*Eichhornia crassipes*) a okřehek (*Lemna spp.*). Vzhledem k velké produkci biomasy a ke schopnosti přijímat a kumulovat velké množství živin byly koncem 70. a začátkem 80. let 20. století do těchto systémů vkládány velké naděje především pro odstraňování dusíku a fosforu z odpadních vod. Zkušenosti však ukázaly, že provoz těchto systémů je velmi neekonomický (nutnost pravidelného sklizení biomasy a následné využití biomasy, nutnost intenzivního provzdušňování pro více zatížené systémy) a navíc růst rostlin je velmi limitován klimatickými podmínkami. Především pak vodní hyacint je schopen celoročně plného růstu pouze v tropických a subtropických oblastech (foto 1). **Umělé mokřady s rostlinami s plovoucími listy** (např. lekníny – *Nymphaea spp.* nebo stulíky – *Nuphar spp.*) jsou využívány pouze ojediněle a v současnosti prakticky nejsou k dispozici podrobnější informace o jejich použití.

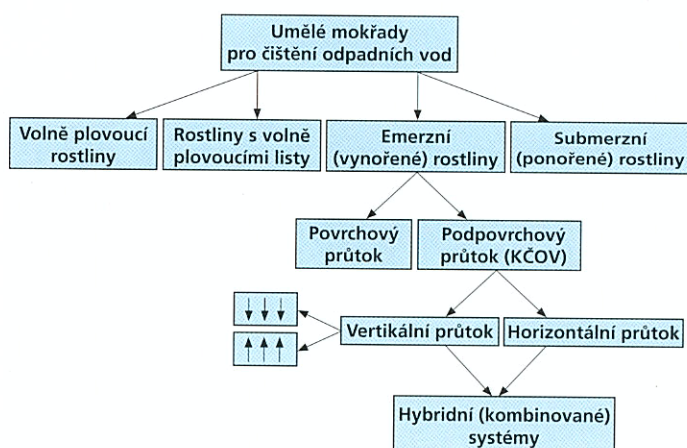
Foto 1 Umělý mokřad s vodním hyacintem (*Eichhornia crassipes*), San Diego, Kalifornie. Foto G. Tchobanoglous.



Umělé mokřady s ponořenou (submerzní) vegetací se uplatňují stále ve větší míře po celém světě. Vzhledem k fyziologické povaze rostlin je však nezbytně nutné, aby voda neobsahovala vyšší koncentrace nerozpuštěných látek a nebyla limitována fotosyntéza rostlin nedostatkem světla. Navíc submerzní rostliny preferují vodu s vyšším obsahem rozpuštěného kyslíku. Z těchto důvodů se tyto systémy používají především na dočišťování odpadních vod případně pro odpadní vody s nízkým obsahem organických látek (foto 2). Rostlin, které lze využít, je celá řada, např. *Egeria densa*, *Elodea canadensis*, *Ceratophyllum demersum* nebo *Hydrilla verticillata*.



Foto 2 Umělý mokřad se submerzní vegetací pro čištění splachů z okruhu F1 v kanadském Montrealu. Foto J. Vymazal.



Obr. 1. Rozdělení umělých mokřadů pro čištění odpadních vod.

Jednoznačně největší skupinu umělých mokřadů tvoří **systémy s vynořenou (emerzní) vegetací**. První pokusy s využitím emerzních mokřadních rostlin pro čištění odpadních vod byly prováděny v Německu již na začátku 50. let 20. století, avšak první plno provozní mokřadní čistírny byly uvedeny do provozu až koncem 60. a začátkem 70. let v Nizozemí a v Ně-

mecku. Systémy s emerzní vegetací lze dále rozdělit podle toho, zda je nebo není přítomna volná vodní hladina. Umělé mokřady s volnou vodní hladinou se nazývají **umělé mokřady s povrchovým tokem** (foto 3). Tyto mokřady se používají po celém světě, nejčastě-



Foto 3 Umělý mokřad s volnou vodní hladinou v estonském Pölsamaa pro čištění městských splaškových vod. Foto J. Vymazal.

ji však v Severní Americe, kde jich je v současnosti v provozu asi 10 tisíc. Při tomto způsobu čištění je znečištění odstraňováno ve vodním sloupci mělkých nádrží, které jsou prorostlé mokřadní vegetací. Systémy bez volné vodní hladiny, jinak také nazývané **systémy s podpovrchovým tokem**, jsou v současné době nejvíce používanými umělými mokřady. Podle průtoku se tyto systémy dále dělí na **systémy s horizontálním průtokem** (tzv. kořenové čistírny, KČOV) a **systémy s vertikálním průtokem**. Kromě směru průtoku odpadní vody je hlavní rozdíl v tom, že do horizontálního systému, tj. do kořenové čistírny, přitéká odpadní voda kontinuálně, do vertikálního



Foto 4 Umělý mokřad s vertikálním průtokem – součást kombinovaného systému (laguna, vertikální průtok, horizontální průtok) pro čištění průsaků ze skládky pevného odpadu v portugalském městě Leiria. Foto J. Vymazal.

systému je dávkována přerušovaně na povrch filtračního lože. Na rozdíl od horizontálního systému, který pracuje na gravitačním principu, pro vertikální systémy jsou nutná čerpadla a složitější rozvodné zařízení, aby bylo dosaženo dobré distribuce odpadní vody (foto 4). Oba typy byly vyvinuty již v první polovině 60. let 20. století v Německu, a zpočátku byly řazeny za sebou (tzv. „Seidel systém“ podle Dr. Käthe Seidelové z University v Krefeldu) a vertikální pole rovněž zastávalo funkci předčištění. Přerušovaný přívod odpadní vody zvyšuje možnost prokysličení filtračního lože, čímž se vytvářejí vhodné podmínky pro nitrifikaci, a tím i ke zlepšenému účinku při odstraňování amoniaku. Horizontální pole je naproti tomu většinou anoxické až anaerobní (tj. bez kyslíku), což dává předpoklady k denitrifikaci dusičnanů vzniklých při nitrifikaci. Postupem času však byla vertikální pole nahrazována klasickým mechanickým předčištěním a vertikální systémy se znovu začaly využívat až v 80. letech, především v důsledku zvýšeného důrazu na odstraňování amoniaku. V současné době se znovu používají kombinace vertikálního a horizontálního systému, případně dalších typů umělých mokřadů a v literatuře jsou tyto systémy označovány jako „hybridní“ nebo „kombinované“ (foto 5).

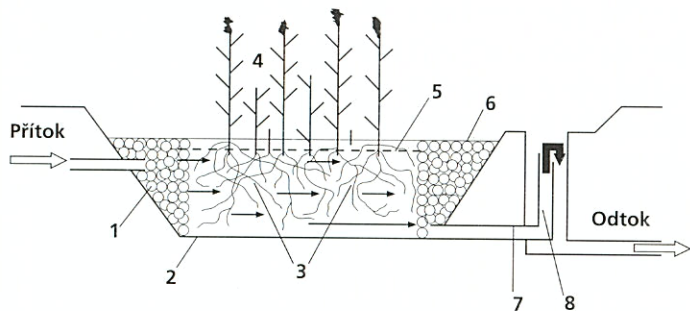


Foto 5 Kombinovaný systém v čínském Yantianu (laguna, mokřad s vodním hyacintem, mokřad s horizontálním průtokem) pro společné čištění městských splašků a průmyslových odpadních vod. Foto J. Vymazal.

■ Kořenové čistírny odpadních vod (KČOV)

Základním principem KČOV je horizontální průtok odpadní vody propustným substrátem, který je osázen mokřadními rostlinami (Obr. 2). Při průtoku odpadní vody filtračním materiálem dochází k odstraňování znečištění kombinací fyzikálních, chemických a biologických procesů. Název „kořenová čistírna“ vznikl z anglického „Root Zone Method“,

což bylo pojmenování umělých mokřadů s podpo-
vrchovým horizontálním průtokem, které se použí-
valo v 70. a 80. letech 20. století.



Obr. 2. Typické uspořádání kořenové čistírny.
1 – distribuční zóna (kamenivo, 50–200 mm),
2 – nepropustná bariéra (PE nebo PVC), 3 – fil-
trační materiál (kačírky, štěrky, drcené kamenivo),
4 – vegetace, 5 – výška vodní hladiny v kořeno-
vém loži nastavitelná v odtokové šachtě, 6 – odtok-
ová zóna (shodná s distribuční zónou), 7 – sběr-
ná drenáž, 8 – regulace výšky hladiny

Předčištění

Před vlastní kořenovou čistírnu je vždy nutné
zařadit mechanické předčištění, které je pro tento

Foto 6 Lapák písku a česle na KČOV Kámen
u Havlíčkova Brodu. Foto J. Vymazal.



Foto 7 Předčištění (lapák písku, česle a štěrbinová
nádrž) na KČOV Petrovice u Havlíčkova Brodu.
Foto J. Vymazal.

typ čištění velmi důležité. V případě nedokonalého
předčištění se dostatečně neodstraní nerozpuštěné
látky, které mohou následně ucpat vlastní filtrační
lože. Pro domovní čistírnu postačuje jednoduchý
septik nebo usazovací nádrž. Je však možné využít
i různé intenzifikované septiky (např. typ SL) nebo
domovní anaerobní filtr. Pro malé obce je nejvhod-
nější kombinace česlí a štěrbinové nádrže, v případě
jednotné kanalizace (splachy společně s dešťovými
splachy) je nutné oddělit dešťové přívaly a zařadit
lapák písku, případně i štěrku [foto 6 a 7](#).

Filtrační lože

Filtrační lože je většinou 60 až 80 cm hluboké
a substrát musí být dostatečně propustný, aby
nedocházelo k ucpávání. Kořenové čistírny, které
se stavěly v 70. a 80. letech 20. století většinou vy-
užívaly těžké, jílovité zeminy, které měly vysoký
filtrační a čistící účinek, ale docházelo velmi rychle
k ucpávání a k povrchovému odtoku. Tato skuteč-
nost snižovala příliš výsledný čistící efekt, ale do-
cházelo k hygienickým problémům (např. zápach),
a také k problematickému způsobu provozování

v zimních měsících. V současné době se nejvíce používá praný šterk, drcené kamenivo nebo kačírky o zrnitosti 4/8 nebo 8/16 mm. Je vhodné používat pouze jednu frakci, neboť při použití více frakcí může dojít k nedokonalému promísení jednotlivých frakcí a poté se mohou vytvářet zkratové proudy ve filtračním loži. Navíc je bezpodmínečně nutné použít materiály zbavené prachu, případně zeminy. V případě šterku je vhodné vždy použít praný šterk. Rozvodné a sběrné zóny jsou vyplněny hrubým kamenivem (50–200 mm), aby se odpadní voda dobře rozvedla po celém profilu nátokové hrany. Filtrační lože je odděleno od podloží nepropustnou vrstvou, nejčastěji plastovou fólií (PVC, PE), aby nedocházelo k nekontrolovaným průsakům do podloží a následnému znehodnocování podzemních vod. Plastovou fólii je nutné ochránit před poškozením, např. podložit a překrýt geotextílií, aby nedošlo k protržení fólie při navážení filtračního materiálu (foto 8). Pokud je podloží tvořeno málo propustným materiálem (jíly s hydraulickou vodivostí $<10^{-8}$ m/s), není nutné používat další izolace.

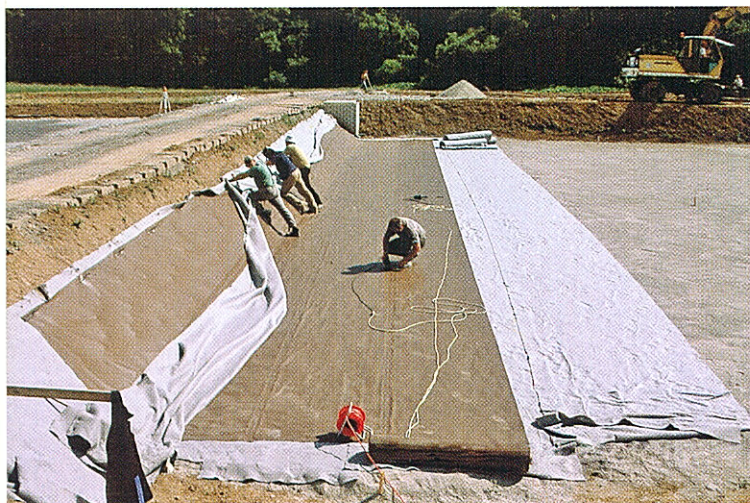


Foto 8 Plastovou fólii je nutné podložit a překrýt geotextílií. KČOV Mořina. Foto J. Vymazal.

Dimenzování filtračních polí

Kořenové čistírny jsou téměř vždy dimenzovány tak, aby bylo zajištěno dostatečné odstranění organických a nerozpuštěných látek. Plocha kořenových polí je navrhována podle rovnice (1), která vychází z reakce prvního řádu pro pístový tok při odstraňování BSK_5 :

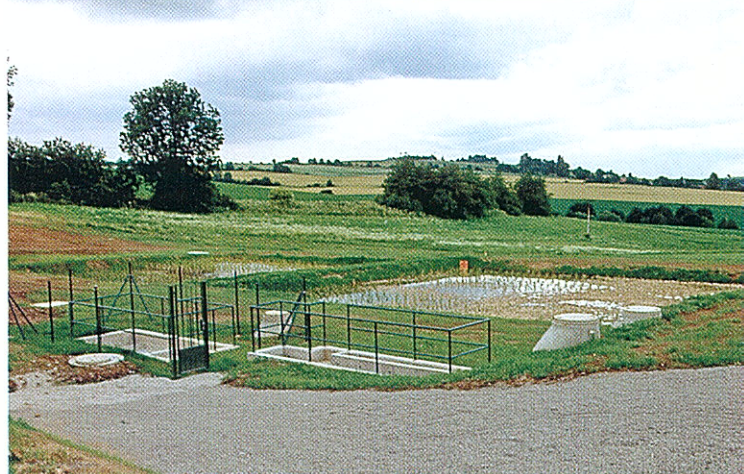
$$A_h = Q_d (\ln C_o - \ln C_t) / K_{BSK} \quad (1)$$

- kde A_h = plocha filtračních polí (m^2)
 Q_d = průměrný průtok odpadní vody (m^3/d)
 C_o = koncentrace BSK_5 na přítoku na filtrační pole (mg/l)
 C_t = požadovaná koncentrace BSK_5 na odtoku (mg/l)
 K_{BSK} = rychlostní konstanta (m/d)

Tato rovnice byla navržena Kickuthem v polovině 70. let 20. století a je s úspěchem používána dodnes. Změnila se pouze hodnota konstanty K_{BSK} . Hodnota $0,19 \text{ m d}^{-1}$, kterou původně navrhl Kickuth v Německu a jejímž výsledkem byla příliš malá plocha, byla na základě výsledků z více než jednoho sta provozních kořenových čistíren ve Velké Británii a Dánsku změněna koncem 80. let na $0,1 \text{ m d}^{-1}$. I když výsledky z KČOV po celém světě později ukázaly, že hodnota $0,1 \text{ m d}^{-1}$ je pravděpodobně dostatečná pro dimenzování filtračních polí čistíren, které jsou určeny pro odstraňování organických a nerozpuštěných látek, v současné době se používá spíše hodnota $0,075\text{--}0,085 \text{ m d}^{-1}$ pro zajištění kvalitní účinnosti čištění. Pro městské a domovní splašky vychází s použitím této rovnice plocha filtračních polí ca. 5 m^2 na jednoho připojeného obyvatele. Vzhledem k faktu, že v současné době je produkce znečištění na malých vesnicích menší než v minulosti, vychází plocha vegetačních polí přibližně $8\text{--}10 \text{ m}^2$ na jednoho ekvivalentního obyvatele (EO, tj. 60 g BSK_5 na osobu a den). V některých zemích, jako např. ve Velké Británii, se rovnice (1) pro výpočet plochy polí nepoužívá a plocha polí je přímo dimenzována na 5 m^2 na připojeného obyvatele.

Zpočátku bylo vždy využíváno jen jedno filtrační pole bez omezení velikosti, což vedlo často ke špatné hydraulice systému a zkratovým proudům. Tento nedostatek byl eliminován rozdělením celkové plochy na několik menších polí (foto 9), což však na druhou stranu vede ke zvětšení celkové plochy čistírny. Jako pomocná návrhová kritéria se používají dva faktory: délka nátokové hrany $0,20\text{--}0,40 \text{ m}$ na jednoho připojeného obyvatele a maximální délka kořenového pole cca 30 metrů. Výsledkem je, že filtrační pole mají často poměr délka:šířka menší než 1. Široká nátoková hrana zabraňuje lokálnímu přetížení a případnému ucpávání lože, krátké pole minimalizuje výskyt zkratových proudů.

Foto 9 Celkovou plochu filtračních polí je vhodné rozdělit na několik menších ploch. KČOV Petrovice u Havlíčkova Brodu krátce po osázení v červenci 2004. Foto J. Vymazal.



Distribuce odpadní vody

Původně byla mechanicky předčištěná odpadní voda většinou přiváděna do rozvodné zóny přes otevřený žlab. Tento způsob se však ukázal jako nepříliš vhodný vzhledem k nutnosti stálé kontroly přelivné hrany, problémům v zimním období a také hygienickým závadám (zápach). Od poloviny 80. let je předčištěná odpadní voda běžně přiváděna přímo do rozvodné zóny, která je vyplněna hrubým kamením. Pro rozvod se většinou používají plastové trubky s velkými otvory, aby se zabránilo ucpávání. Rozvodné potrubí může být uloženo buď pod úroveň povrchu filtračního pole a povrch rozvodné zóny je ve stejné úrovni jako povrch filtračního pole nebo jsou rozvodné trubky uloženy nad úroveň povrchu filtračního pole a jsou převrstveny hrubým kamenivem.

Sběrné potrubí je uloženo na dně filtračního lože a je spojeno v odtokové šachtě s výpustním mechanismem, kterým se nastavuje výška vodního sloupce ve filtračním loži (na principu spojených nádob). První KČOV využívaly železných otočných kolen, která však rychle podléhala korozi a manipulace s nimi se stala velmi obtížnou. Železná kolena byla postupně nahrazena plastovými, ale v poslední době se nejlépe osvědčují flexibilní hadice zavěšené na řetízcích (foto 10). Manipulace s hadicemi je velmi snadná a lze docílit velmi přesného nastavení



Foto 10 Regulace výšky vodní hladiny ve filtračním poli pomocí flexibilních hadic zavěšených na řetízcích na KČOV Spálené Poříčí. Foto J. Vymazal.

výšky vodní hladiny. Při běžném provozu se hladina vody udržuje 5–10 cm pod povrchem filtračního lože. V zimních měsících lze vodní hladinu snížit, ale provozní zkušenosti ukazují, že vegetace poskytuje dostatečnou izolaci před zamrznáním, a hladinu vody není nutné v zimním období snižovat.

Vegetace

Mokřadní rostliny plní v kořenových čistírnách řadu důležitých funkcí, ale je nutné si uvědomit, že

tyto funkce jsou především nepřímého charakteru. V našich klimatických podmínkách se jeví jako nejdůležitější funkce zateplování povrchu filtračních polí v průběhu zimního období. Z tohoto důvodu se vegetace sklízí až na konci zimního období, když již nehrozí nebezpečí velkých mrazů. Další významnou funkcí rostlin je poskytování podkladu (kořeny a oddenky) pro přisedlé mikroorganismy, které se jinak nevyskytují ve volné půdě, a přivádění kyslíku do kořenové zóny, která je většinou anoxická nebo anaerobní (tj. bez kyslíku). Mokřadní rostliny jsou fyziologicky a morfologicky uzpůsobeny k transportu kyslíku z atmosféry do podzemních částí, aby tyto části rostlin mohly respirovat (dýchat). Kyslík, který není spotřebován na respiraci, difunduje do okolí kořenů a vytváří malé aerobní zóny.

Pro osázení KČOV se nejvíce používá rákos obecný (*Phragmites australis*), především pro svou schopnost tolerovat značnou míru znečištění



Foto 11 Rákos obecný (*Phragmites australis*) může na KČOV dorůst výšky až 4 metrů. KČOV Studénka u Havlíčkova Brodu. Foto J. Vymazal.

(foto 11). Často je vysazován v kombinaci s chrasticí rákosovitou (*Phalaris arundinacea*), která roste rychleji než rákos a vytváří kompaktní porost již během prvního vegetačního období (foto 12).

Foto 12 Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*) na KČOV Břehov u Českých Budějovic. Mezi pruhu chrastice je rákos obecný. Foto J. Vymazal.



Pro malé domovní čistírny lze využít i jiné mokřadní rostliny, které mají navíc i dekorativní charakter, např. orobince (*Typha spp.*) nebo různé druhy kosatců (*Iris spp.*) (foto 13). Rostliny se vysazují v hustotě 4–8 na 1 m² přímo do šterkového lože,



Foto 13 Žlutý kosatec bahenní (*Iris pseudacorus*) a modrý kosatec sibiřský (*Iris sibirica*) působí velmi dekorativně na domovní KČOV Žitenice u Litoměřic. Foto P. Hrnčíř.

pokud možno bez zeminy. Po vysázení rostlin je vhodné udržovat hladinu vody při povrchu lože, případně těsně nad povrchem (foto 14), až do té doby, než rostliny řádně zakoření.



Foto 14 Sazenice chrastice rákosovité na KČOV Petrovice u Havlíčkova Brodu krátce po osázení v červenci 2004 jsou mělce zaplavené, aby se lépe uchytily. Foto J. Vymazal.

Provoz a údržba

Velkou výhodou KČOV ve srovnání s klasickými čistírnami je, že KČOV nevyžadují elektrickou energii a neobsahují žádné mechanické součásti,

kteřé by se mohly opotřebovávat. **To ovšem svádí k přístupu, že KČOV jsou v podstatě bezobslužné, což však v žádném případě není pravda.** I velmi jednoduchá sestava – mechanické předčištění a kořenové pole – vyžaduje pravidelnou kontrolu. Především je nutné pravidelně kontrolovat a případně vyvážet septik nebo šterbinovou nádrž a čistit česle a lapák písku a šterku, pokud je zařazen do sestavy předčištění. Dále je nutné pravidelně kontrolovat nastavení výšky vodní hladiny, rozdělení nátoky odpadní vody na vlastní kořenové lože, případně na konci zimního období posekat vegetaci. Pokud je údržba systematická a pravidelná, jsou náklady na ni minimální a údržba je časově nenáročná. Ve většině případů postačuje u obecních čistíren jedna hodina denně.

■ Využití kořenových čistíren pro různé druhy odpadních vod

Do kořenových čistíren byly zpočátku vkládány velké naděje pro dočišťování odpadních vod se zvýšeným důrazem na odstraňování živin. Již velmi záhy se ukázalo, že tento předpoklad je nesprávný a že kořenové čistírny jsou naopak pro takové využití nevhodné. Naproti tomu KČOV prokázaly výbornou schopnost odstraňovat organické a nerozpuštěné látky, a proto byly v 70. a 80. letech 20. století využívány téměř výhradně k čištění městských a domovních splaškových vod z malých zdrojů znečištění. Od konce 80. let 20. století se však použití kořenových čistíren (někdy v kombinaci s jinými typy umělých mokřadů) rozšířilo na téměř všechny druhy odpadních vod včetně průmyslových (foto 15) a zemědělských (Obr. 3).



Foto 15 Kořenová čistírna pro čištění odpadních vod z výroby kyseliny dusičné. Estarreja, Portugalsko. Foto J. Vymazal.

Splaškové vody	domovní městské	jednotná kanalizace oddílná kanalizace
Zemědělské vody	kravíny, vepřiny, drůbežárny, mléčnice	
Průmyslové vody	potravinářský průmysl (mlékárny včetně výroby sýrů, cukrovary, zpracování ryb, škrobárny, jatka, lihovary, výroba vína, zpracování brambor, zpracování zeleniny) důlní drenážní vody (uhlí, železné rudy) těžký průmysl (rafinérie ropy, výroba hnojiv, polymerů, výbušnin, chemikálií, farmaceutik, papíru a papíroviny)	
Splachové vody	městské splachy, dálnice, parkoviště, letiště (včetně rozmrazovacích prostředků), železniční depa, čerpací stanice (včetně myček aut), skleníky, zahradnictví, zemědělské plochy	
Průsaky ze skládek pevného odpadu Stabilizace a mineralizace čistírenských kalů		

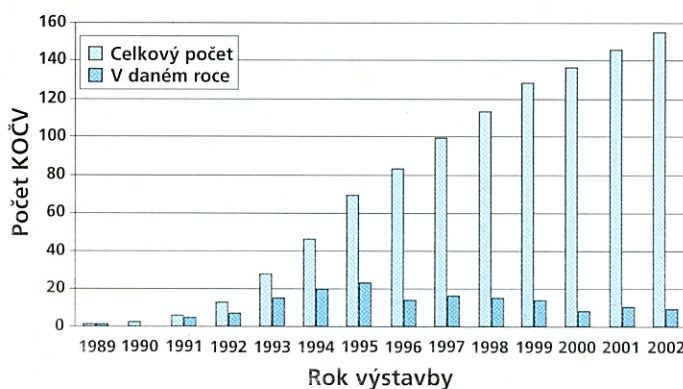
Obr. 3. Využití kořenových čistíren pro různé druhy odpadních vod

■ Současný stav v České republice

V České republice byla první kořenová čistírna uvedena do provozu v roce 1989. Do konce roku 1991 byly uvedeny do provozu pouze další čtyři KČOV především díky odporu vodohospodářských orgánů a skutečnosti, že KČOV nebyly na seznamu tzv. „doporučených způsobů čištění odpadních vod pro malé zdroje znečištění“. Poté, co byl tento seznam zrušen a navíc obce získaly větší finanční nezávislost, bylo uvedeno do provozu v letech 1992 a 1993 celkem 22 KČOV. Ve většině evropských zemí byl začátek jejich využívání provázen shodnými problémy. Hlavním důvodem, proč v některých zemích trvalo 10 i více let než byly KČOV akceptovány vodohospodářskými institucemi, byla nedůvěra k jednoduchosti systému čištění. V době, kdy „klasické“ čistírny odpadních vod jsou řízeny elektronicky pomocí počítačů, nebylo pro některé odpovědné pracovníky přijatelné a především „stravitelné“, že systém, který pracuje bez elektrické energie a bez mechanických součástí, může dosahovat při odstraňování organických a nerozpuštěných látek stejného účinku. Kromě toho byla proti kořenovým čistírnám velmi silná tzv. „betonová lobby“, tvořená především výrobci klasických čis-

tíren odpadních vod. Byl to vlastně „začarovaný kruh“ – úřady poukazovaly na nedostatek výsledků vzhledem k malému počtu KČOV a zároveň bránily jejich výstavbě. V současné době jsou KČOV akceptovány jako vhodný způsob čištění odpadních vod pro malé zdroje znečištění ve většině evropských zemí. KČOV jsou určeny především k odstraňování organických a nerozpuštěných látek – tuto funkci plní KČOV velmi dobře, a to bez ohledu na roční období.

Podle průzkumu provedeném v roce 2003 bylo v České republice uvedeno od roku 1989 do provozu minimálně 155 KČOV (Obr. 4), čímž se řadíme v Evropě mezi státy s největším počtem KČOV. Počet KČOV v roce 2004 již přesahuje 160 vzhledem k tomu, že v nedávné době byly uvedeny do provozu další KČOV (např. Stožice u Vodňan, Břehov u Českých Budějovic, Moravec u Pelhřimova nebo Petrovice u Havlíčkova Brodu). V Evropě se KČOV využívají téměř ve všech zemích, nejvíce kořenových čistíren je v Německu (kde jsou označovány jako „Sumpfpflanzenkläranlagen“), a to především v Dolním Sasku, Porýní-Vestfálsku a v Bavorsku. Celkový počet se odhaduje na 50 000 a je předpoklad, že jejich počet velmi rychle naroste především na území bývalé NDR. Většinu tvoří malé domovní čistírny, které doplňují stávající septiky. Dalšími „velmocemi“ jsou Rakousko (cca 1600 KČOV), Velká Británie (cca 800 KČOV) a Dánsko (cca 500 KČOV). Mezi další evropské státy s větším počtem KČOV se řadí Itálie (cca 400), Polsko (cca 120), Portugalsko (cca 100). Ve Francii je v provozu asi 100 KČOV, a to především domovních čistíren pro < 10 osob. Kořenové čistírny jsou úspěšně využívány i v zemích s podstatně chladnějším klimatem než u nás. V Evropě jde především o Norsko a Estonsko. V obou zemích je v provozu asi 30 KČOV pro malé obce. V Norsku jsou KČOV využívány také pro čištění průsaků ze skládek tuhého odpadu.



Obr. 4. Celkový počet kořenových čistíren v České republice.

Využití a návrhové parametry

Z provedeného průzkumu vyplynulo, že KČOV v České republice slouží převážně pro čištění městských a domovních splaškových vod jako hlavní stupeň čištění. Pouze šest KČOV je navrženo jako dočišťovací stupeň a osm KČOV je navrženo pro jiný druh odpadní vody. Celkem 92 KČOV bylo vybudováno na oddílné kanalizaci a 56 na jednotné kanalizaci.

Velikost KČOV v České republice se pohybuje ve stejném rozsahu jako ve většině evropských zemí, tj. od domovních čistíren po sídla do 1000 EO. Největší KČOV jsou v Osově Bítýšce (1000 připojených obyvatel), v Čisté u Rakovníka (800 připojených obyvatel) a Obecnici u Příbrami (do konce roku 2004 bude připojeno 800 obyvatel, předpokládá se připojení 1200 obyvatel). Ve Spáleném Poříčí u Plzně jsou dvě samostatné KČOV – první byla vybudována v roce 1992 pro 700 EO a v roce 2002 byla v těsné blízkosti uvedena do provozu druhá KČOV pro 800 EO. Z provedeného průzkumu vyplynulo, že nejvíce



Foto 16 Domovní kořenová čistírna v Kyjově u Havlíčkova Brodu. Foto J. Vymazal.



Foto 17 KČOV Příbraz u Jindřichova Hradce pro 300 ekvivalentních obyvatel. Foto J. Vymazal

KČOV je navrženo jako domovní čistírny pro < 10 EO (43 KČOV, [foto 16](#)) a pro malá sídla 100–500 EO (64 KČOV, [foto 17](#)). Při průměrné specifické ploše 5,7 m² na připojeného obyvatele je nejvíce KČOV navrženo s plochou filtračních polí < 50 m² (42 KČOV) a v rozmezí 500–2500 m² (67 KČOV).

Účinnost čištění

Kořenové čistírny jsou navrhovány a dimenzovány především pro odstraňování organických a nerozpuštěných látek, tj. parametrů, které jsou limitovány pro malé zdroje znečištění. V Tabulce 1 je uveden souhrn účinnosti KČOV v České republice. Zde je vhodné poznamenat, že účinnost čištění dosahovaná v České republice je naprosto srovnatelná s účinností KČOV po celém světě.

Parametr	Přítok (mg l ⁻¹)	Odtok (mg l ⁻¹)	Účinnost (%)	n	N
BSK ₅	150	14,4	85,8	184	65
CHSK _{Cr}	333	53	76,1	109	40
Nerozpuštěné látky	165	11,9	84,8	125	44
Celkový N	56	27,6	47,0	37	16
NH ₄ ⁺ -N	27,5	18,0	33,4	77	31
NO ₃ ⁻ -N	5,8	2,45	40,9	31	12
Celkový P	6,8	3,3	41,4	68	26

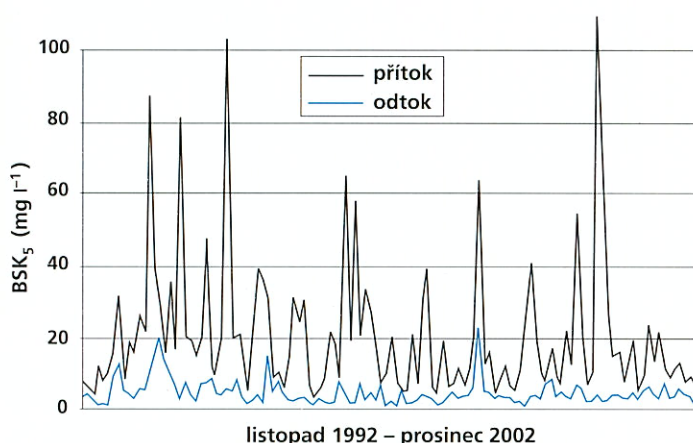
Tabulka 1. Účinnost kořenových čistíren v ČR. n = počet ročních průměrů, N = počet KČOV. Průměrná účinnost vypočítána na základě účinnosti jednotlivých čistíren.

Organické látky

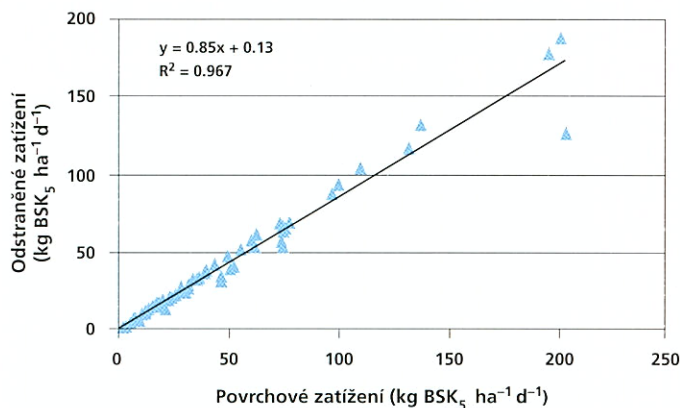
Organické látky, stanovené jako BSK₅ nebo CHSK_{Cr}, jsou odstraňovány velmi efektivně. Mikrobiální rozklad organických látek probíhá ve filtračním loži jednak aerobně, ale převážně anaerobně, tj. bez přítomnosti rozpuštěného kyslíku. Původní představa, že kyslík difundující z kořenů a oddenků mokřadních rostlin provzdušní celé filtrační lože, se ukázala jako nesprávná a prokázalo se, že rozpuštěný kyslík se nachází pouze v těsné blízkosti podzemních orgánů rostlin. Většina filtračního lože tak zůstává anoxická nebo anaerobní. Účinnost odstraňování organických látek je prakticky nezávislá na ročním období a také na koncentraci na přítoku (Obr. 5). Graf na obrázku 5 navíc dobře dokládá schopnost kořenových čistíren čistit odpadní vody s velmi nízkou vstupní koncentrací organických látek.

Průměrné povrchové zatížení filtračních polí kořenových čistíren v České republice činí 41,4 kg

$BSK_5 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ a $99 \text{ kg CHSK}_{Cr} \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Z obrázku 6 je patrné, že existuje velmi těsná korelace mezi vstupním a odstraněným organickým zatížením, a tudíž odstraněné množství lze velmi dobře předpovědět.



Obr. 5. Odstraňování BSK_5 na KČOV Spálené Poříčí v letech 1992–2002.



Obr. 6. Závislost mezi vstupním a odstraněným povrchovým zatížením (80 ročních průměrů z 30 KČOV).

Nerozpuštěné látky

Nerozpuštěné látky (NL) jsou v kořenových čistírnách odstraňovány velmi efektivně filtrací a sedimentací ve filtračním loži. Většina nerozpuštěných látek je zadržována v prvních metrech filtračních polí, což může vést především při nedokonalém předčištění k ucpávání lože a následnému povrchovému odtoku. Tento jev nemá většinou vliv na celkový čistící účinek, mohou (avšak nemusí) se však objevit hygienické problémy (zápach, komáři). Provozní zkušenosti ukazují, že pokud k ucpání lože dochází, jde většinou o velmi úzký pruh a jeho výměna je velmi jednoduchá a časově i finančně nenáročná. Průměrné látkové zatížení filtračních polí KČOV v České republice je $40,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ a i pro NL platí těsný vztah mezi vstupním a odstraněným zatížením ($r^2 = 0.995$).

Fosfor

Fosfor je v kořenových čistírnách odstraňován především adsorpcí a srážením ve filtračním loži, případně adsorpcí rostlinami (a následnou sklizní nadzemní biomasy). Materiály, které jsou běžně využívány pro filtraci v kořenových čistírnách (kačírek, štěrk, drcené kamenivo), však mají velmi malou sorpční kapacitu, a proto je odstraňování fosforu v KČOV poměrně nízké a pro splaškové vody většinou nepřesahuje 50 % (viz Tabulka 1). Odstraňování fosforu lze zvýšit použitím materiálů, které mají vysokou sorpční schopnost, například kalcit. V některých zemích (např. Norsko, Estonsko nebo Portugalsko) se jako filtrační materiál používá termicky expandovaný jíl, který má vysokou sorpční kapacitu, a odstraňování fosforu dosahuje až 95 %. Sorpční kapacita tohoto materiálu je však limitovaná a po čase je nutné celou náplň vyměnit. Navíc cena těchto filtračních materiálů je výrazně vyšší než u běžně používaných filtračních materiálů. Fosfor zadržený v nadzemních částech rostlin tvoří většinou jen malou část (<5 %) z odstraněného množství. Z tohoto důvodu je sklizení biomasy za účelem odstraňování fosforu (a dusíku) neefektivní při čištění splaškových odpadních vod. Sklizení biomasy však může odstranit výrazně větší množství fosforu u velmi zředěných odpadních vod.

Průměrné látkové zatížení je $0,32 \text{ g P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a analýza dostupných dat prokázala, že vztah mezi vstupním a odstraněným zatížením je velmi volný ($r^2 = 0,28$) a množství odstraněného fosforu lze jen těžko předem odhadnout. To je způsobeno velkými rozdíly v sorpční kapacitě používaných filtračních materiálů.

Dusík

Kořenové čistírny nejsou příliš efektivní při odstraňování dusíku. Hlavním důvodem je nedostatek kyslíku ve filtračním loži, což je přirozený úkaz pro všechny mokřady. Nedostatek kyslíku limituje oxidaci amoniaku (nitrifikaci), který je hlavní formou dusíku ve splaškových vodách. Navíc organicky vázaný dusík je efektivně přeměňován na amoniak (tzv. amonifikace) za aerobních i anaerobních podmínek, čímž se navyšuje koncentrace amoniaku v systému. Nitrifikace amoniaku je limitována na nejtěsnější okolí kořenů, ze kterých difunduje kyslík a vzniklé dusičnany jsou efektivně přeměňovány v anaerobních a anoxických částech filtračního lože na plynné formy dusíku (denitrifikace), které unikají do atmosféry. Množství amoniaku oxidovaného na dusičnany, a tudíž dostupného pro denitrifikační bakterie, je však velmi omezené. Z tohoto důvodu se v některých případech, kdy je

kladen důraz na eliminaci amoniaku, kombinují kořenové čistírny s předřazenými umělými mokřady s vertikálním průtokem, kde dochází k intenzivní nitrifikaci.

Průměrné zatížení filtračních polí v České republice je $2,24 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a vztah mezi vstupním a odstraněným zatížením je poměrně těsný ($r^2 = 0.76$). Tento jev se dá vysvětlit skutečností, že dusík je odstraňován v KČOV mikrobiálními procesy a mikrobiální společenstvo kořenových čistíren je obdobné pro stejný typ odpadní vody a není příliš závislé na filtračním materiálu.

Bakteriální znečištění

Mikrobiální znečištění je v kořenových čistírnách zadržováno velmi efektivně kombinací fyzikálních, biologických a chemických procesů. Je složité určit podíl jednotlivých procesů, ale předpokládá se, že nejvíce se uplatňuje přirozený úhyn (vzhledem k době zdržení několika dní), oxidace (enterické bakterie jsou většinou striktně anaerobní), působení antibakteriálních látek vylučovaných z kořenů mokřadních rostlin, predace a sedimentace. Ve většině kořenových čistíren je odstraňování koliformních a termotolerantních koliformních bakterií $>99\%$ při čištění domovních a městských splaškových vod, redukce fekálních streptokoků (enterokoků) je většinou $>95\%$.

Těžké kovy

Těžké kovy nepředstavují výrazný problém v odpadních vodách z malých sídel a z tohoto důvodu není ani k dispozici větší množství dat. Z údajů, které jsou k dispozici z našich KČOV, vyplývá, že eliminace těžkých kovů je vysoká a v průměru dosahuje 80% , ale míra eliminace silně kolísá mezi jednotlivými kovy. Výsledky jednoznačně prokazují, že největší část (cca 90%) je zadržena v sedimentu a v podzemních částech rostlin a jen asi 10% ze zachyceného množství se nachází v nadzemní biomase, přičemž koncentrace těžkých kovů v listech a stoncích rostlin jsou jen mírně zvýšené oproti přirozeným lokalitám.

Mezi faktory, které nejvíce ovlivňují zadržování těžkých kovů v KČOV, patří především přítomnost rozpuštěného kyslíku ve filtračním loži, koncentrace organických látek, dusičnanů, železa a manganu v odpadní vodě. Především přítomnost železa hraje důležitou roli – v aerobních podmínkách je železo oxidováno za vzniku sraženin oxyhydroxidů železa a v této sraženině dochází k souběžnému srážení i dalších kovů. Naproti tomu v anaerobních podmínkách je železo redukováno, čímž se stává více rozpustným, za současného uvolňování dalších

kovů do vody. Za takových podmínek však mohou redukováno železo a další kovy reagovat se sirovodíkem, který vzniká redukcí síranů za silně redukčních podmínek ve filtračním loži. Vzniklé sírníky se ukládají ve filtračním loži, plynný sirovodík však může unikát, což se projevuje nepříjemným zápachem.

Celkové hodnocení účinnosti

Kořenové čistírny prokazují vysokou účinnost při odstraňování organických a nerozpuštěných látek, mikrobiálního znečištění a těžkých kovů. Pokud jsou KČOV dimenzovány za účelem odstranit především organické a nerozpuštěné látky, je eliminace fosforu a dusíku poměrně nízká a pohybuje se v rozmezí $40\text{--}50\%$ pro splaškové vody. Hlavním důvodem nízkého odstranění fosforu je malá sorpční kapacita používaných filtračních materiálů (šterk, kačírek, drcené kamenivo). Eliminace dusíku je limitována slabou schopností kořenových čistíren oxidovat amoniak, který je hlavní formou dusíku ve splaškových odpadních vodách. V tabulce jsou příklady účinnosti KČOV v roce 2002.

KČOV	BSK ₅	CHSK	NL	TP	NH ₄ ⁺ -N
Žitenice	382–4,8	1202–27	695–5,5	14,9–4,0	63,2–45,4
Nový Dvůr	27–1,7		9,2–1,5		
Ondřejov	143–14,8	334–36	129–2,4	8,3–7,0	25,4–23,5
Nezdice	150–6,6	201–29	195–5,4		
Obecnice	173–3,4		944–6,5	4,2–1,6	9,0–6,3
Mořina	59–4,0	160–18,2	137–2,6	3,5–2,2	13,8–11,2
Čistá	53–5,1	140–34	15–6,3		

Tabulka 2. Příklady účinnosti KČOV v roce 2002*. Údaje (přítok – odtok) v mg l^{-1} . (foto 18–24).

*počet připojených obyvatel/délka provozu v letech, údaje se vztahují k roku 2002: Žitenice (5/10), Nový Dvůr (140/5), Ondřejov (360/11), Nezdice (450/5), Obecnice (500/2), Mořina (500/2), Čistá (800 /8).

Investiční a provozní náklady

V době, kdy se kořenové čistírny začaly u nás objevovat, tj. před 15 lety, byly investiční náklady přibližně $2\text{--}5\times$ nižší ve srovnání s klasickými čistírnami. V současné době, díky neustále se zvyšujícím vstupům, jsou investiční náklady přibližně na stejné úrovni jako pro klasické čistírny. Je však nutné uvést, že KČOV mají na realizaci velmi specifické požadavky, a ty by neměly být opomíjeny. Pokud se staví na nevhodném místě (nedostupnost vhodného filtračního materiálu, špatný přístup pro sta-



Foto 18 KČOV Žitenice u Litoměřic (5 EO).
Foto P. Hrnčíř.

vební techniku, atd.), může dojít k mimořádnému zdražení vlastní stavby. Na druhé straně lze snížit cenu stavby při vhodné konfiguraci území (např. terénní deprese) nebo v případě podloží s dostatečně nízkou hydraulickou propustností, kde není nutné používat plastové fólie, podstatně snížit cenu stavby. Z tohoto důvodu je každá KČOV jakýsi „originál“ a nelze stanovit přesnou cenu, jako je to u sériově vyráběných klasických čistíren. Z dostupných údajů vyplývá, že cena KČOV (včetně předčištění) se pohybuje v současné době v širokém rozmezí od 4 do 25 tisíc Kč na připojeného obyvatele. Chceme-li stanovit „průměrnou“ cenu KČOV, pak nejlepší odhad se pohybuje kolem 10 tisíc Kč na připojeného

obyvatele, přičemž pro domovní čistírny lze očekávat vyšší a pro obecní čistírny nižší částky. Pokud bychom se snažili vyjádřit investiční cenu jednotlivých komponent čistírny, pak předčištění činí přibližně 25 %, vlastní filtrační pole 60 % a ostatní (šachty, rozvody, oplocení atd.) 15 % z celkových investičních nákladů. V investičních nákladech na filtrační pole tvoří největší položku cena a doprava filtračního materiálu (cca 40 %) a dále pak cena a uložení ochranných fólií (cca 10 %), zemní práce (cca 5 %) a výsadba rostlin (cca 5 %). Jak již bylo uvedeno, cenové relace se však mohou výrazně lišit v závislosti na místních podmínkách.

Jako příklad provozních nákladů na provoz a údržbu kořenové čistírny může sloužit KČOV Spálené



Foto 20 KČOV Ondřejov, okres Praha-východ. (360 EO). Foto J. Vymazal.

Foto 19 KČOV Zdíkov – Nový Dvůr na Šumavě (140 EO). Foto J. Vymazal.



Pořící, kde jsou k dispozici přesná čísla. Provozní náklady zahrnují úklid nadzemní biomasy 1x ročně, 2 hodiny denní údržby jednoho pracovníka a 2x ročně odvoz 2–3 fekálních vozů kalu ze šterbínové nádrže. Mimo tyto náklady musí město zaplatit

i rozboru vody, ochranné pomůcky pro obsluhu atd. Při velikosti ČOV 700 EO (ekvivalentních obyvatel) činily v roce 2002 provozní náklady 131 Kč/EO za rok. Pro srovnání, jen náklady na elektrickou energii pro stejně velké klasické čistírny se pohybují v rozmezí 100–300 Kč/EO za rok podle typu čistírny.

■ Srovnání kořenových čistíren s klasickými čistírnami

Výhody KČOV

- jsou schopny čistit odpadní vody s nízkou koncentrací organických látek, což je u klasických čistíren problém
- dobře se vyrovnávají s kolísáním množství a kvality odpadních vod
- mohou pracovat přerušovaně, což klasické čistírny nemohou
- vyžadují minimální (ale pravidelnou) údržbu
- nevyžadují elektrickou energii
- mají menší náchylnost k havárii systému
- dobře zapadnou do krajiny a jsou její součástí, případně mohou plnit i okrasnou funkci

Nevýhody KČOV

- ve srovnání s klasickými čistírnami jsou náročnější na plochu
- nejsou vhodné pro odstraňování amoniaku a fosforu
- na odtoku se někdy objevuje bílý povlak tvořený elementární sírou tvořící se oxidací sirovodíku, který může (ale nemusí) vznikat při anaerobních poměrech ve filtračních ložích
- strojní čistírny mají lepší předpoklady pro řízení čistícího procesu, pro analýzu případných problémů a pro aplikaci nápravných opatření



Foto 21 KČOV Nezdice u Kašperských Hor (450 EO). Foto J. Vymazal.



Foto 22 KČOV Obecnice u Příbrami. (Do konce roku 2004 bude napojeno 800 EO). Foto J. Vymazal.

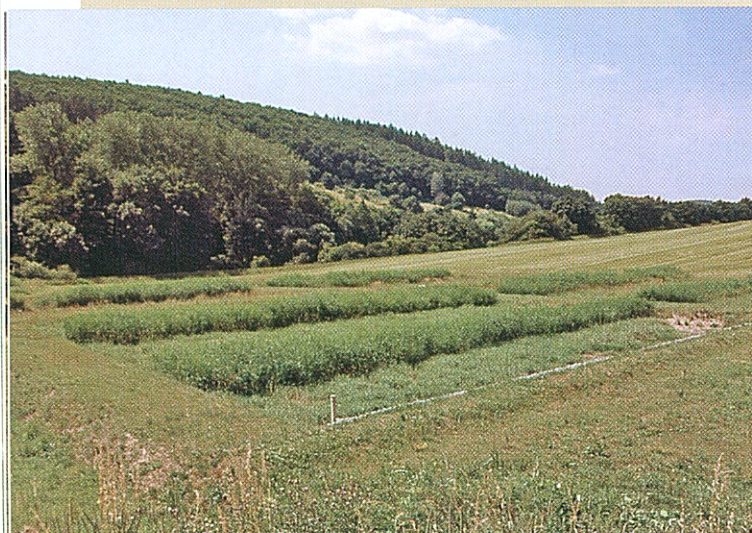


Foto 23 KČOV Mořina u Berouna (700 EO). Foto J. Vymazal.



Foto 24 KČOV Čistá u Rakovníka (800 EO). Foto J. Vymazal.