

## 2. Ohrožení a ochrana půdy

### 2.1 Úvod

Tak jako by půdní biolog měl mít především základní v domosti o půdě a procesech, které v ní probíhají, tak je důležité, aby měl i povědomí o problematice degradace a ochrany půdy. Snad nikdo nepochybně uje profesi lékaře, avšak v medicíně pracující v základním výzkumu musí opakovaně obhajovat smysl své práce a finanční prostředky na ni vynakládané. Půdní biolog přitom může svým výzkumem významně přispět k pochopení negativních vlivů, které má rozrušená lidská činnost na tak klíčové vlastnosti půdy, jako jsou úrodnost nebo retenční schopnost vody. Může také navrhnout vhodná protopatření. Jistě jsme si všimli, jak je půda pro lovčáka významná z ekonomického hlediska. Přesto se k ní chová poměrně mácešsky, a tak dochází k znehodnocování (degradaci) půdy i její úplné ztrátě. Z hlediska ochrany životního prostředí je při pohledu na vývoj příslušné legislativy patrné, že se ochrana půdy netýkala a vlastně dodnes netýká stejné pozornosti jako voda a ovzdušší (to neplatí pouze pro českou legislativu, ale v podstatě obecně). Přede vším to platí pro problematiku znečištění půdy cizorodými a více méně toxickými látkami. Na druhé straně existuje řada ustanovení k ochraně půdy přede vším v zemědělské a lesnické legislativě, chybí však zpravidla komplexnější pohled na tuto problematiku a půda mimo zemědělský a lesnický fond často zůstává nepokryta. Má-li půdní biolog přispět k ochraně půdy, resp. chce-li získat prostředky na aplikovanému výzkumu, musí o této problematice něco vědět.

### 2.2 Půdní eroze

Pod pojmem eroze půdy rozumíme uvolnění a následný odnos pevných půdních částic v třetí vodou, případně pohybem ledovce (nikoliv jistě uložení těchto částic na jiném místě). Gravitace vede k vyrovnávání reliéfu krajiny, avšak v případě vodní eroze se nemusí jednat o odnos půdy z výše položených na níže položená místa, protože jemné půdní částice mohou být v trnými proudy unášeny na velké vzdálenosti (známý je například spád jemného písku ze Sahary na evropských ledovcích). Půdní eroze je považována za nejvýznamnější celosvětový problém ochrany půdy. U orné půdy ve svažitých polohách byl zaznamenán roční odnos 30 tun půdy na hektar. V humidním klimatu se přitom uvádí nová tvorba půdy v množství 1-2 tun na hektar ročně, což odpovídá vrstvě 0,1 až 0,2 mm půdy. Čím má půda jemnější strukturu a nižší soudržnost (kohezi), tím je k erozi náchylnější. Přemísťování jílových a organických látek do hlubších částí půdního profilu působením prosakující vody lze označit za vnitřní erozi půdy.

#### 2.2.1 Vodní eroze

Schopnost vzdušného proudění erodovat půdu je závislá na jeho rychlosti nad půdním povrchem. Přibližně nad ním je proudění laminární. S rostoucí vzdáleností se rychlost zvyšuje a proudění se mění na turbulentní. Pokud jsou půdní částice zachyceny tímto turbulentním prouděním, dochází k jejich odtržení od půdního povrchu a vymrštění do výšky. Menší částice se přitom dostávají výše a jsou odnášeny na větší vzdálenost. Větší částice se buď pouze kutálí po povrchu, nebo na něj opakovaně dopadají a skákalí. Při jejich dopadech jsou vymrštěny do vzduchu a uchvacovány turbulentním prouděním další částice. Čím delší je dráha v trnu, na které takto může působit na půdu, tím více se uplatňuje tento lavinový efekt. Vodní eroze ohrožuje nejvíce nesoudržné půdy se suchým povrchem prostým vegetací: jemné písčité a prachové půdy a drobtovité organické půdy. Naopak vlhké a mokré půdy vodní erozi

nepodléhají. Nerespektování zemědělských (agrotechnických) postupů, které by mírnily riziko v trné erozi, vedlo v první polovině 20. století k intenzivní v trné erozi (právním bouřím) s drastickými ekologickými i ekonomickými dopady na středním západ Spojených států amerických (šust bowlō); obdobná situace nastala i v Rusku, resp. na Ukrajině.

### 2.2.2 Vodní eroze

Dešťové kapky při dopadu vymrštují do vzduchu jemné prášičice. Dělá-li se tak na svahu, spadne vlivem gravitace více takto vymrštěných prášičic níže od místa dopadu kapky než výše. Zvlhnutí prášičice její soudržnost jak zvyšovat, tak i snižovat. Dešťová voda má nízkou vodivost a má na prášičici koloidy dispergující úroveň. Dochází k narušení struktury prášičic agregátů, stlačování velkých pórů. Uvolněné jemné prášičice ucpávají póry na prášičicím povrchu, což vede ke snížené infiltraci a následně ke sbírání vody na povrchu a při sklonu terénu k jejímu odtoku po svahu. Tato voda odnáší prášičici, případně za ne po svahu stékat vodou nasycená prášičice jako taková. Prášičice se pak opět usazuje na úpatí svahu. Rovnoměrný odnos prášičice představuje plošnou erozi. Čím je větší sklon svahu, tím rychlejší je tok vody, a tím spíše se za prášičice usmírní tok nerovnostmi prášičicím povrchu tvořící erozní stružky a tyto spojují do větších struhů a rýhů, což hovoříme o rýhové erozi. Prášičice unášené ve stružkách a struhách vodním proudem obroubují jejich koryta (abrazé), čím více prášičic a čím větší rychlostí je vodou unášeno, tím je jejich společná abrazivní síla větší a tím rychleji se struhy zvětšují, což opravdu velké označujeme jako stružkové erozi. Odplavená prášičice může být unášena přes menší do větší vodních toků a poté bude dojde k sedimentaci nebo je odplavena až do moře.

### 2.2.3 Protierozní opatření

Nejlepší ochranou proti erozi je zapojení vegetačního pokryvu: chrání prášičicím povrch proti kinetické energii vodních kapek, zpomaluje jeho vysychání, brzdí vítr a snižuje turbulence nad prášičicím povrchem a proto není prášičice drflí na místě. Ochrana představuje také opadová vrstva (obdobně mulčování rostlinného odpadu), bez ochrany vegetací je však rovněž vystavena erozi. Nejlepší ochranu tak poskytl lesní porost, nejhrošfenější jsou naopak velké lány obnašené orné prášičice. V terasách ze stavebních materiálů (např. kamenné zídky) nebo vysázené vegetace (stromy, živých plotů), ale i meze a remízky (vzniklé za jiným účelem) zkracují vzdálenost, na kterou může vítr nabírat na rychlosti a prášičice sobě lavinovitý nárost v trné erozi. Prášičice tak dokonce i zatravněné pásy (které postrádají výraznou vertikální komponentu) nebo stěží obdělávané a neobdělávané orné prášičice, různých polních plodin (více a méně chránících prášičicím povrch) apod. Ochrana prášičicím povrchu udržuje schopnost prášičice vodu přijímat a snižuje tak riziko povrchového odtoku. Vodní erozi dále snižuje udržování co nejmenšího sklonu vodoteče a zpomalení jejich toku: terasování svahů (pomáhají i samotné travnaté pásy a meze kolmo ke spádnicím), přehrazení vodoteče apod. Zpomalování menších toků a opevnění jejich břehů ve svažitých terénech má tradici například v lesnickém hrazení bystřin. Dělší jsou také agrotechnická opatření jako udržování tzv. konturové orby (brázdy sledují vrstevnice, nikoliv spádnice, což druhé je daleko méně náročné, ale na svazích z hlediska vodní eroze vysoce rizikové). Obhospodaření orné prášičice by nemělo probíhat za příliš vlhkých i suchých podmínek. V prvním případě dochází k zhutnění prášičice a vtlačené stopy po zemědělských strojích slouží jako erozní stružky. V druhém případě se při rozbíjení prášičicím agregátů uvolní jemné prášičice, které lehce podléhají v trné erozi.

## 2.3 Odlesňování a dezertifikace

S p sobením v trné a vodní eroze úzce souvisí dezertifikace, tedy p em na vlh ích biotop na polopou-ť a fl pou-ť a postup pou-ťí na jejich okrajích. Typický je posun Sahary na jih v tzv. Sáhelu - pásmu jejího p echodu na suchou savanu. Uvádí se, že b hem 50 let (cca. 1940-1990) narostla pou-ť v Sahelu o rozlohu velikosti Somálska. Do budoucna je ohrožena t etina afrického kontinentu. Dal-í ozvlá- ohroženou oblastí je -ir-í okolí pou-ť Gobi v severozápadní ín (Vnit ním Mongolsku) a Mongolsku. Proces dezertifikace je asto spjatý s neúnosným vyuffíváním í ní vody na zavlařování, vysycháním jezer a jejich stoupající salinitou (jezero ad v Africe, Kaspické mo e a Aralské jezero v Asii), zasolováním p dy atd. Nar stající lidská populace, v postifených oblastech zpravidla pastevci dobytka, se se svými domácími zví aty v obdobích sucha soust edí u napajedel a v jejich okolí postupn zcela ni í d evinnou vegetaci (listy slouffí domácím zví at m za potravu, d evo na otop). P íli-intenzivní pastva dobytka ni í vegeta ní pokryv. Ostrá kopyta ovcí a koz mohou ve v t-í mí e naru-ovat travní drn. Ve vlh ích podmínkách m fle zase se-lap vegetace a p dy skotem vést ke zhutn ní p dy (viz nífle), v p ípad mokré p dy také k rozru-ení její struktury. P i velkoplo-ném odles ōování mohou být dezertifikací postifeny i oblasti, které jsou od p irozen aridních oblastí vzdáleny a jejichfl klimatické podmínky by umořl ovaly r st les a to dokonce i les velice vlhkých, jako jsou tropické de-ťné lesy (viz kap. 2.8). Hluboko zv tralé tropické p dy bez krytu vegetace rychle podléhají vodní erozi; zbývají vylouhované vrstvy minerální p dy s minimálním obsahem flivin. Erozní strouhy mohou dosahovat obrovských rozm r . Schopnost zadržlení vody prudce klesá, dochází ke zm nám klimatu dané oblasti ke klimatu su-ímu. Odles ōování je dnes p edev-ím problém tropických a subtropických oblastí. Historicky byly zasafeny velké ásti Eurasie a Severní Ameriky, kde dnes celková plocha les nar stá p esto i práv proto, že zde je provozováno intenzivní lesní hospodá ství. Kolem St edozemního mo e a na Blízkém východ docházelo od starov ku k velkoplo-nému odles ōování (jedna z hlavních p í in byla výstavba velkých obchodních a vále ných lo stev ó od dob starých ek , Féni an i Kartaginc a íman p es italské m stské státy st edov ku nap . Benátky, Janov atd., po velké portugalské a -pan lské flotily ranného novov ku). To vedlo mnohde k dezertifikaci i posílilo vznik krasových jev na vápencových horninách. Také Britské ostrovy p í-ly brzy o v t-ínu svých les . V novov ku postoupilo odles ōování i v severn j-ích ástech západní a st ední Evropy natolik, že vznikly velkoplo-né bezlesé pustiny s okyselenou p dou chudou na fliviny: v esovi-ť a pískové duny, a to nejen na mo ských pob eřích, ale také ve vnitrozemí, kde svým putováním ohrořovaly ornou p du i lidská sídla. Lesy byly mýceny za ú elem získání orné p dy, pastvin a luk. Zárove bylo d evo hlavní surovinou ó nejen jako stavební materiál, ale také jako zdroj energie ó palivo. Lesy byly intenzivn vyuffívány: asto jako pa eziny neboli nízký les s velmi krátkým obmýtím, p ípadn jako st ední les, tedy s ponecháním n kolika výstavek za ú elem získání stavebního d íví v t-ích objem ; k tomu p istupovala lesní pastva dobytka (p edev-ím skotu a prasat, na jihu také koz). S rozmachem sklená ství a hornictví byly vyt fleny i velké rozlohy horských les ó sklá ské hut byly zakládány blízko zdroje, d ev né uhlí bylo ale také dopravováno na v t-í vzdálenosti; klády slouffily výrob trám k vyd evn ní dol . Zárove se v-ak za alo rodit lesnictví jako hospodá ský obor, který nem l ve své náplni pouze t flbu, ale také obnovu a p st ní lesa. Trend úbytku les tak byl postupn v Evrop zvrácen, poda ilo se dokonce zalesnit i váte písky a v esovi-ť . Roz-í ily se ale monokultury jehli nan , p edev-ím smrku a borovice, na jihu Evropy také australských blahovi ník , tedy d evin rychlého r stu a v p ípad jehli nan také kvalitního stavebního d íví.

## 2.4 Vliv p dní vody, zavlařování, odvod ování

V závislosti na klimatu (mnořství srážek a jejich rozloření v ase, teploty) a typu p dy dochází pomocí p dní vody k p emís ování látek v p dním profilu. Ve vlhkém (humidním ařl perhumidním) klimatu p evařuje prosakování vody ařl po podzemní vodu a p itom dochází k vyluhování iont a p emís ování pevných ástic ó humusu a jílú ó do niř-ích vrstev. V suchém (aridním) klimatu naopak p evařuje odpar vody z p dního povrchu ó p dní voda stoupá k povrchu a odpa uje se, p i emřl se p i povrchu hromadí vysrářené soli. P edev-ím v terénních depresích tak vznikají solné pánve. K zasolení dochází za takových podmínek také p i zavlařování. Na tuto skute nost patrn doplatila ada lidských civilizací zalořených na zem d lství na zavlařované p d , které v d sledku zasolení p dy nebylo trvale udrřitelným (známý je nap . p ípad starov ké civilizace m sta Ur v Mezopotámii ó dne-ním jifním Iráku). Katastrořální dopady m lo také velkoplo-né zavlařování vodou z p ítok do Kaspického mo e a Aralského jezera v dobách Sov tského svazu. Zasolení p dy lze p i provozování zavlařování zabránit velmi jemným rozvodem a dávkováním vody jednotlivým rostlinám, tak aby p ivedená voda byla beze zbytku p ijata rostlinou.

Brání-li pr saku vody nepropustné podlořlí, dochází k zamok ení p dy hromadí se de-ovou nebo m lkou podzemní vodou. To je spojené s vytla ením vzduchu z p dních pór . Dochází ke vzniku oglejených i glejových p d (viz kap. 3.3). Za anaerobních podmínek jsou redukovány slou eniny feleza a manganu. Takto jsou dob e rozpustné ve vod a rozptýlí se ve zvodn lé zón . Dojde-li k vyschnutí, jsou op t oxidovány, stávají se -patn rozpustnými a vysrářlí se: vznikají hrudky oxid a hydroxid feleza a manganu. Anaerobní rozklad nevede k úplné mineralizaci organických látek, ale pouze k organickým meziproduct m rozkladu a jejich hromad ní (surový humus, ra-elina). Rozklad a tím i remineralizace řivín jsou také brříd ny niř-í teplotou zamok ených p d, která sniřuje rychlost chemických reakcí, a niř-ím osídlením p dní faunou. Zem d lec i lesník se snařlí zamok enou p du odvodnit a tím umořnit i usnadnit její zem d lské i lesnické vyuřtítí. V p ípad ra-elini- k tomu slouřlí odvod ovací p íkopy a p ípadn vysázení d evín, které stanoví-t vysou-í zvy-enou mírou evapotranspirace. V ostatních p ípadech se spí-e pokládá drenářní potrubí napojené na men-í vodote e (potoky), ásto nap ímené, aby byl urychlen odtok vody do v t-ích tok . Pro toto odvod ování ili vysou-ování pozemk se u nás zařil pojem meliorace (z latiny, znamená zlep-ení). Jedná se v podstat o velice nep esný výklad tohoto slova, protoře zlep-ení zem d lské ( i jiné) p dy lze ásto dosáhnout jinými opat eními, nap . hnojením, vápn ním, opat eními na zlep-ení p dní struktury nebo také zavlařováním. V lesnictví se uřlívá pojem meliora ní d evína pro d evíny, které svými vlastnostmi, p edev-ím slořením svého listového opadu, zlep-ují vlastnosti p dy (jedná se o n které listá e, nap . javory). Ekonomické výhody vysou-ení zem d lské i lesnické p dy (které se pro hospodá e projeví vy-ími sklizn mí kulturních plodin i d eva) mohou být také vyvářeny a mnohdy p evářeny ekologickými (environmentálními) i národohospodá skými nevýhodami: sniřeným dopl ováním zásob podzemní vody, sniřenou retencí vody a v t-ím rizikem vy-ích a rychlej-ích povod ových vln niře po proudu (v d sledku se zna nými náklady na náhradu -kod a protipovod ová opat ení), v neposlední ad také ztratou vlhkých luk a mok adních biotop jako řivotního prost edí mnohých dnes ásto vzácných a ohrořených druh rostlin a řivo ich .

## 2.5 Zhut ování p dy

V kařdé p d dochází k p irozenému zhut ování atmosferickým tlakem a tlakem svrchn j-ích vrstev na ty spodn j-í. Proti tomu p sobí kyp ení p dy mrazem, pror stáním ko ínky a hrabavou inností p dních řivo ich (bioturbace). S rostoucí mechanizací zem d lství a

lesnictví však dochází k závažnému poškození půdy jejím zhutněním či utufováním. Tato mechanizace se neprojevuje pouze ústředním pouhříváním země deskových a lesnických strojů oproti tažným zvířatům (v západní a střední Evropě dnes je to tak nejspíše přetvárá práce koní a vyvážení dřeva z horského lesa), ale také vývojem a nasazováním stále většího a těžších strojů.

Je-li půda zatížena, neprobíhá tato záležitost pouze v kolmici. Půda se pod tlakem snaží uhnout do stran. Dochází k plastické deformaci půdy, která z velké části přetvárá i poté, co vertikální tlak pomine. Horizontální zhutnění často přesahuje to vertikální. Zatímco u normálně zhutněných půd přibývá hustota s hloubkou, vyznačují se příliš zhutněné půdy tím, že hustota s hloubkou nenarůstá a někdy dokonce i klesá. Zhutněným jsou postiženy hlavně velké póry, trpí tudíž schopnost půdy vodu proskakovat do hlubších vrstev; dochází k zamokření vrchní půdy. Významným jeví se redukce objemu pórů je přitom přerušování jejich kontinuity. Zřejmě to i vrstvení: hroty kolů mohou pronikat pouze do jím existujících pórů, teprve poté mohou kolové laterálními směry vyvinout tlak a chodit ku rozdílu.

Náchylnost půdy ke zhutnění je dána především její texturou a obsahem vody. Nejnáchylnější jsou půdy jemné zrnitosti a bohaté na jílu zvlhčené tak, aby byly tvárné. Při stoupajícím nasycení vodou náchylnost ke zhutnění opět klesá (voda v pórech vyvíjí protitlak), půda však ztrácí soudržnost a při mechanické zátlaku (prokluzující kola, přelapující kopyta dobytka) dochází k jejímu hnutí. Tím dochází k destrukci půdních pórů, především těch v hloubce. Mezi viditelnými škodlivými dopady patří vznik hlubokých, zamokřených stop, v nichž klesá úrodnost půdy, a které mohou sloužit jako erozní rýhy; v lesích dochází k poškození kořenového systému stromů pod trasou například jícího stroje, zvyšuje se tím možnost houbových infekcí (hniloby). Vzniku závažných škod zhutněným půdám lze zabránit vhodným načasováním přejíždění traktorem na období, kdy je půda suchá či pouze mírně vlhká. V půdách v lesích se také nabízí zimní období se zmrzlou půdou (tání, přemrzávání a odvoz dřeva). Čím je zrnitost půdy jemnější a její soudržnost nižší, tím je útlak rozmezí půdní vlhkosti, při které je riziko zhutnění malé. Protože k největšímu zhutnění dochází při prvních přejížděcích půdách, bývá výhodnější, když se stroj opakovaně pohybuje po stejné trase. Při lesnických pracích v jehličnatých lesích lze tlak kol na půdu rozložit na větší plochu vystláním pojízdné trasy vrstvou chvojí (za stejným účelem byly vyvinuty i vrstvy škoberce z umělých materiálů). Také se uhlivají co nejvíce a lehce podtlakované pneumatiky, případně se tlak rozkládá na vícero os.

Tradičním opatřením proti zhutnění země deskových je orba. Tou dochází k vytvoření prostor mezi půdními agregáty, samotné agregáty ale mohou být za nepříznivých podmínek naopak dále zhutněny. Významně se to projevuje v hloubce těsně pod dosahem radlice, kde se opakovanou orbou může vytvořit zhutněná vrstva zadržující vodu. Tento problém nabyl na závažnosti poté, co se začaly uhlivávat traktory a začalo se orat do větší hloubky za účelem vyfúkní fluvin z větší části půdního profilu (tzv. hluboká orba). Obecně vedou přejíždění velmi těžkými stroji ke zhutnění ve větší hloubce (40-60 cm) s obdobnými následky. V posledních desetiletích se v rostoucí míře uplatňuje polní hospodářství bez obracení půdy pluhem, pouze s omezenými a ústředními mechanickými zásahy (například bránění k rozvolnění ztvrdlého povrchu) nebo zcela bez nich (bezorební postupy, anglicky *šno-tillage*).

## 2.6 Acidifikace půdy

Přísun iontů vodíku (protonů) do půdy vede k okyselení neboli acidifikaci pokud dojde k vyčerpání pufrovací kapacity půdy, resp. pokud rychlost přísunu převyšuje rychlost pufrace, a pokud zároveň dochází k odnosu iontů uvolněných do půdního roztoku. Pokud naopak dochází k akumulaci iontů odpařováním vody a laterálním prouděním, dochází k alkalizaci

pH (zpravidla hovoříme o zasolení a viz výše, a tyto pojmy nejsou zcela synonymní), pH i emfl pH dosahují hodnot pH kolem 12. Pokud bychom se chtěli vyjádřit velmi přesně, neměli bychom vlastně hovořit o kationtech vodíku (protonech (H<sup>+</sup>)), ale o oxoniových (starší výraz: hydroniových) iontech H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> (případně takto označujeme i dále hydratizované ionty H(H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub><sup>+</sup>). Samotný proton totiž ve vodním roztoku neexistuje, proto se okamžitě reaguje, nejprve s molekulou vody (pozitivní náboj se ve vzniklém oxoniovém iontu přeusouvá k atomu kyslíku) a bývá ještě dále obalen pláštěm dalších molekul vody, které mají z hlediska rozložení náboje charakter dipólu.

V půdě se nachází dva pufovací systémy a zóny, které protony reverzibilně a ireverzibilně vázají, a tím stabilizují jejich koncentraci v půdním roztoku (uváděnou jako pH, tedy záporný dekadický logaritmus ionty vodíku i ve vodním roztoku oxoniových ionty). Pufovací účinnost je dána pufovací kapacitou a pufovací rychlostí. První uvádí celkový počet protonů, které mohou být 1 kg dané půdy neutralizovány, druhá kolik jich je za určitou časovou jednotku skutečně neutralizováno. Látka, která působí jako chemický pufr, se v tomto procesu mění na kyselinu. Čím je slabší takto vznikající kyselina, tím vyšší je rozsah pH, ve kterém daná látka jako pufr působí. Pufovací systémy v půdě na sebe z hlediska rozsahu pH, při kterém působí, více méně navazují, někdy se lehce překrývají (obr. ...). Ne každá půda však má k dispozici všechny pufovací systémy; například na kyselém podloží (na kterém pískovce, kyselý vyvěliny jako flula a rula, atd.) zcela chybí karbonátová pufovací zóna.

pufovací zóna (systém)	pH půdy	chemické reakce
karbonátová (uhlíkatá)	6,2 – 8,6	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \longrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
silikátová	5,0 – 6,2	$\text{[(-SiO}_4\text{)Al]}^- + 4 \text{H}^+ + 6 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow (\text{-SiOH})_4 + \text{[Al(H}_2\text{O)}_6\text{]}^{3+}$
kationtové výměnné kapacity	4,2 – 5,0	
hliníku	3,0 – 4,2	$\text{[Al}_6\text{(OH)}_{15}\text{]}^{3+} + 15 \text{H}^+ + 21 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 6 \text{[Al(H}_2\text{O)}_6\text{]}^{3+}$
železa	3,0 – 3,5	$\text{FeOOH} + 3 \text{H}^+ + 4 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{[Fe(H}_2\text{O)}_6\text{]}^{3+}$

Obr. ...: Pufovací zóny a systémy v půdě

Acidifikace je proces, který v půdách probíhá i přirozeně. Kořínky a půdní organismy dýchají a obohacují půdní vzduch i roztok o CO<sub>2</sub>, které reaguje na slabou kyselinu uhlíkatou. Rostliny také svými kořínky vypouštějí H<sup>+</sup>, aby se do roztoku uvolnily kationty flivín, které pak přijímají. V průběhu humifikace organických látek dochází k oxidaci bočních a hlavních molekul, a tím stoupá počet kyselých funkčních skupin (karboxylové a fenolické hydroxylové skupiny). Tomu odpovídá uvolnění protonů do roztoku. Když se tak v úzkém kontaktu s minerální půdou, dochází k jejich rychlé neutralizaci. V opačném případě v surovém opadu a tlejícím dřevě dochází k místnímu okyselení afl o dvě jednotky pH. Funguje zde

pozitivní vztažná vazba: v kyselém prostředí získává rozklad houbami a humifikace navrch oproti mineralizaci (za kterou jsou ve většině zodpovědné bakterie). Vegetace s proleženým kyselým a nepatrně rozložitelným opadem (jehličnany, v es) tento proces posilují. Ilovky tedy dlouhodobě posiluje acidifikaci vyerpáním p d (vznik v esovi- , na kterých pastevcí ovčí zámrn odstraní nálety dřevin, např. břízy) a vysazováním monokultur jehličnanů. Daleko rychlejší a dramatičtější proces acidifikace byl však nastartován přemyslovou revolucí spojenou se získáváním energie z fosilních paliv. Do ovzduší začalo být uvolňováno velké množství plynných emisí oxidu siřičitého a oxidu dusíku a pevných částic oxidu sazí a popílku. Poměry neudržitelné z hlediska lidského zdraví v přemyslových oblastech (předešlým vznik tzv. kyselého, redukčního či londýnského smogu) byly vyřešeny přechodem na vhodnější fosilní paliva (z hnědého a černého uhlí na ropu a posléze zemní plyn oxidem předešlým v případě vytápění domácností), zapojením jaderné a později alternativních energií (včetně sluneční, geotermální), instalací filtrů na pevné částice u zdrojů a předešlým v případě velkých zdrojů (přemyslové výroby, elektráren a tepláren) výstavbou vysokých komínů k rozptýlení kyselých kyselin do atmosféry. Boj proti lokálnímu vzniku smogových situací byl v severní Americe a Evropě západně od železné opony úspěšně veden v 60. letech 20. století, východně se situace mnohem (u nás předešlým v severozápadních částech i na Ostravsku) nepodařilo dovést do začátku 90. let. V číně a dalších zemích jihovýchodní Asie nastal tento problém později a stále trvá. Výstavbou vysokých komínů a odstraněním popílku (který byl spíše alkalický a vedl k částečné neutralizaci kyselých emisí) se však problém emisí SO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub> pouze přesunul a z problému lokálního a regionálního se stal problém kontinentální a celosvětový. Emitované plyny unášené (tzv. transmise) výškovými proudy předešlým ve směru převládajícího proudění (tj. na severní polokouli i převládajících jihovýchodních v třech směrech severovýchodním) jsou v atmosféře absorbovány kapkami vody, resp. působí jako kondenzační jádra pro vodní páru, přičemž sobením ultrafialového záření dochází k řadě chemickým reakcím. Oxidy síry a dusíku se mění na kyseliny. Konečně dochází k vnosu (imisi) těchto látek do vrstvy atmosféry blízko zemského povrchu a jejich spadu (depozici) na něj. Zařilo se přitom, stejně jako imise (vlastně unášené látky) označíme koncentrace látek v ovzduší (uvádíme hmotnostní jednotku nebo podíl molekul, např. jako ppm, na objem vzduchu, zpravidla m<sup>3</sup>; emise naopak zpravidla uvádíme jako látkové toky, tedy jako hmotnostní jednotku vypouštěnou zdrojem za jednotku času, zpravidla rok). Spad či depozici pak uvádíme v hmotnostních jednotkách na plochu (zpravidla v kg/ha). Rozlíčíme přitom mezi suchou a mokrou depozicí. Přímý spád prachových částic a adsorbce plynných látek označíme jako suchou depozici. Převažuje depozice mokrá, ke které dochází, pokud se látky rozpustí či vymyté srážkami (deštěm, sněhem, mlhou či rosou) dostanou na zemský povrch (předu, vodní plochu, vegetaci). Pro mokrou depozici kyselin (zpravidla ve velmi zjednodušené podobě) se zařilo označí kyselý dešť (angl. acid rain, něm. saurer Regen, přičemž pH nižším než 5,5, což je hodnota přemyslované rovnováhy mezi atmosférickým CO<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> rozpustným v dešťové vodě; kyselá mlha dosahuje ještě vyšší kyselosti než kyselý dešť). V Evropě kulminovaly kyselý dešť v 70.-80. letech 20. století. Rovní depozice síry (obsažené v iontech SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) se v pohybovala řádově do 30 kg na hektar, rovní depozice dusíku (obsaženého v iontech NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) dosahovaly obdobných, zpravidla o něco nižších hodnot. S nimi se objevil problém acidifikace povrchových vod a škod na lesních porostech a při jejich odumírání. Acidifikace povrchových vod byla přitom obzvláště závažná v jižní Skandinávii, kde většina depozice pocházela ze vzdálených zdrojů v západní a střední Evropě a akvatické sedimenty a přitom na převažujícím kyselém podloží (rulách a flulách) mají jen nízkou pufrovací schopnost. Lesy byly významně zasaženy i ve střední Evropě (také na severovýchodě USA a Kanady). V Krušných horách bylo pozorováno chřadnutí lesů dokonce již od 40. let a koncem 20. století dosáhlo katastrofálních rozměrů zde se projevovala mimo jiné exponovaná poloha v blízkosti významných zdrojů

především na české straně, ale také v sousedním Německu a blízkém Polsku. Docházelo zde k spalování hnědého uhlí s vysokým obsahem síry. Tzv. odsíením elektráren a dalších velkých bodových zdrojů instalací odluškovací síry (částečně také odstavením starších z nich) došlo k velice významnému snížení emisí  $\text{SO}_2$ , a tím k snížení kyselosti deště. Například v západním Německu probíhal tento proces od 70. do 80. let, ve východním Německu a Polsku až v 90. letech. Na rozdíl od emisí oxidu siřičitého se emise oxidu dusíku podařilo snížit nepodstatně a v současné době opět narůstají. Opatření k odstranění dusíku u zdroje jsou technicky poměrně náročná a finančně nákladná, provádí se proto jenom v omezené míře a s omezenou účinností. Kromě velkých bodových zdrojů jsou významným zdrojem emisí oxidu dusíku spalovací motory, tedy především automobilová a letecká doprava. Jedná se tedy o mobilní zdroje, jejichž působení je spíše plošného charakteru, přičemž emise ve velkých částech světa dochází k jejich nárůstu.

Poškození lesních porostů kyselými dešti se děje jak přímým působením na asimilační orgány, tak přes půdu působením na kořenový systém. Vysoká vegetace přitom zachytává více suché i mokré deprese, hovoříme o intercepci. Horské lesy přímou vyšávají kapky z mlhy a oblaků, které stoupají po horských úbočích, ochlazením vlhkého vzduchu při jeho stoupání zde také dochází ke zvýšené četnosti a intenzitě srážek. Obecně proto bývá deprese křídlin z ovzduší vyvíjena na lesních stanovištích nejen na stanovištích otevřených (polích, pastvinách, loukách) a horské lesy bývají více postiženy i tehdy, kdy jsou vzdáleny od významných emisních zdrojů. Jehličnaté porosty pak bývají postiženy více než listnaté, protože často rostou (resp. jsou vysazovány) v horách a na kyselém podloží, a také proto, že zůstávají olistěné i v zimě, kdy je velký povrch jejich jehlic vystaven vyšším koncentracím těchto křídlin (v zimním pololetí se více topí a více svítí, takže je spalováno více fosilních paliv). U stromů s hladkou kůrou hraje podstatnou roli také stékání vody po kmeni (v daném kontextu především buku; významné může být i v tropech, kde působí k vodní erozi především u kmene). Půda v bezprostředním okolí kmenů pak bývá více okyselená než v ústředním okolí.

Akoliv se podařilo škodlivé emise výrazně snížit, jejich negativní důsledky se projevují stále, a to právě vlivem acidifikace půdy, ke které již došlo. V závislosti na vlastnostech půdy (přítomnosti a kapacitě pufrovacího systému) a intenzitě kyselých deprese tedy dochází k okyselení půdy. Po vyerpání jednoho systému klesá pH a nastupuje systém další. Nacházíme-li se například v zásobené vápníkem, například na vápencovém podloží, dochází k rozpouštění uhlíkatého vápenatého a jeho vymývání, aniž by po dlouhou dobu docházelo k významné změně pH. V silikátové pufrovací zóně jsou uvolňovány ionty hliníku, které jsou však znovu vysráženy nebo v rámci kationtové výměnné kapacity navázány na půdní koloidy. V rámci pufrovacího systému kationtové výměnné kapacity vede zvýšená koncentrace protonu (resp. oxoniových iontů) v půdním roztoku k vytlačování kationtů prvků, které slouží jako důležitá živina rostlin (především  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  a  $\text{Mg}^{2+}$ ), z vazebných pozic při povrchu půdních koloidů. Vnesené anionty  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{SO}_4^{2-}$  jsou absorbovány pouze slabě. Dochází tak k vyplavování těchto živin do podzemní vody. Po vyerpání kationtové výměnné kapacity nastupuje pufrovací zóna hliníku a posléze i železa. Dochází k rozpadu jílových minerálů a uvolnění velkého množství iontů hliníku ( $\text{Al}^{3+}$ , zpravidla v realitě splátnutím z 6 molekul vody jako  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ ) a  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ). Volné ionty vodíku působí jako silný buněčný jed a poškozuje kořinky rostlin, a tím jejich schopnost přijímat vodu a živiny. Působí také negativně na půdní faunu a mikroflóru. Zvýšená koncentrace  $\text{Al}^{3+}$  je z hlediska negativních dopadů acidifikace patrně daleko významnější než zvýšená koncentrace  $\text{H}^+$  jako taková. Do roztoku jsou také stoupající množství uvolňovány ionty těžkých kovů jako  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  a  $\text{Ni}^{2+}$ , které mohou ve vyšších koncentracích rovněž působit toxicky, zároveň dochází k jejich vymývání. Olovo a měď oproti tomu vytvářejí i v kyselém prostředí stabilní komplexy s huminovými látkami.



K acidifikaci mohou přispět také emise pavičku, které pochází hlavně ze zemědělské činnosti, tj. chovu hospodářských zvířat a hnojení mořenkou a kejdou. V oblastech s velkou hustotou velkochovu, především prasat, mohou emise pavičku přesahovat i emise  $\text{NO}_x$  a  $\text{SO}_2$ . Pavička sám je alkalický, v atmosféře reaguje na  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  a takto může neutralizovat dešťovou vodu. V půdě pak dochází k nitrifikaci amoniového iontu ( $\text{NH}_4^+$ ), přičemž jsou uvolňovány protony.

## 2.7 Eutrofizace půdy

Zatímco klasickým problémem zemědělství je vyerpání půdy, tedy příliš velké ztráty živin odnosem sklizní, erozí ornice a vymýváním, přinesly emise dusíkatých sloučenin do ovzduší ( $\text{NO}_x$  a  $\text{NH}_3$ ) a jejich následná depozice problém opačný - alespoň pokud jde o dusík jako důležitý, často limitující makroelement. Atmosferická depozice v současnosti představuje cca 12 % reaktivního dusíku vstupujícího globálně do suchozemských a povrchových ekosystémů (v některých regionech představuje vyšší podíl, například v USA cca 33 %). V mnohých evropských zemích se průměrná atmosferická depozice dusíku pohybuje kolem 20 kg na hektar za rok, místy jsou dosahovány i dvojnásobné či vyšší hodnoty. Na zemědělských půdách k tomu přispívá hnojení, přičemž dusík zpravidla představuje jednu z hlavních složek hnojiva (viz 2.7). Problematika obohacování ekosystému živinami o eutrofizaci je známa především u stojatých vod (zde hraje kromě dusíku důležitou úlohu fosfor), k eutrofizaci ale dochází i v mořských a terestrických ekosystémech. V případě suchozemských ekosystémů přispívá eutrofizace právě prostřednictvím půdy. Nejcitlivěji reagují společenstva přizpůsobená oligotrofním stanovištím, například řeky. Obohacení půdy dusíkem může také vést k její acidifikaci (viz kap. 2.5). Především přehnojení, resp. hnojení nepřiměřeným a nevhodným hnojivem, vede k ztrátám dusíku do podzemní vody. Zde se nachází jako dusičnany ( $\text{NO}_3^-$ ), ale také jako vysoce toxické dusitany ( $\text{NO}_2^-$ ).

## 2.8 Vyerpání půdy a hnojení

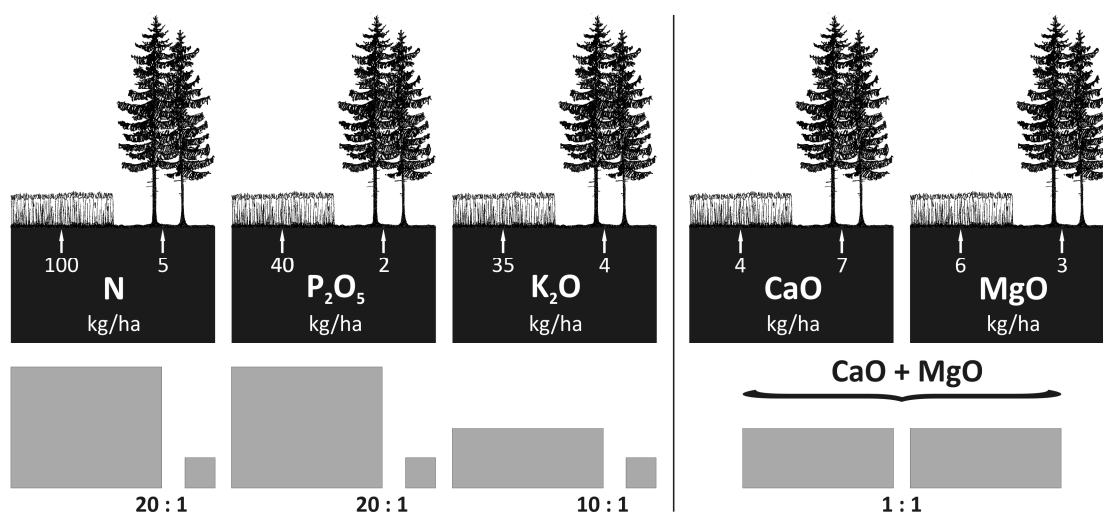
### 2.8.1 Ztráty živin a faktory ovlivňující dostupnost dusíku

Jedna z důležitých vlastností půdy je její úrodnost. Čím je větší úrodnost půdy, tím je vyšší primární produkce stanoviště (za předpokladu příznivých klimatických podmínek).

Úrodnost půdy tuto vlastnost využívá pro produkci rostlin: zemědělských plodin, které mu slouží za potravu, případně jako surovina k jinému účelu nebo produkci pícnin pro svá domácí zvířata nebo dokonce jako jedné ze základních surovin. V přírodě pedogenze úrodnost půdy zpravidla stoupá až po stabilizaci na určité úrovni. Přitom v zemědělském využívání naopak klesá, pokud nedochází k náhradě živin odebraných sklizní hnojením. Zatímco na hlubokých, úrodných půdách jako jsou černozemě je možné po mnoho let úspěšně hospodářit bez hnojení, vede nedostatek hnojení na středně úrodných a chudých půdách k jejich rychlému vyerpání. Úrodnost také klesá ztrátou svrchní, humózní půdy (ornice) erozí a přitom v trvalém pěstování stejné plodiny jednostranným vyerpáním určitých živin. Pokles se ale při dlouhodobém obhospodářování může projevit i pokud jsme živiny v potrubném množství přidali. Patrně to je důsledek hromadění toxických i **allopatických** látek vylučovaných samotnými rostlinami a mikroorganismy nebo narušením rovnováhy v edafonu, ve kterém může dojít například k namnožení patogenních mikroorganismů. Ztráty živin z lesních ekosystémů s flórou dokonce jsou mimo specifickou situaci v tropech (viz kap. 2.8) spíše zanedbatelné. Velké množství živin je zde v opadu, který se každoročně vrací na půdu a podléhá rozkladu, přičemž dochází

k remineralizaci. Při těžbě v porostu zpravidla zůstává tzv. těžební odpad (v tvé a vrcholky jehli natých stromů), mimo ovšem dochází k jeho shrnování do valů a dokonce pálení, což je z hlediska rovnovážného navrácení živin pro dřevě nevhodné. V dobách, kdy bylo krátké obměnění, v tvé byly vysbírávány jako topné dříví, lesy byly vyušlívány k pastvům domácích zvířat a odpad byl jako tzv. hrabanka shrabáván a pouušlíván jako podestýlka do stájí a chlévů a následně k hnojení zahrádek a polí, však docházelo k daleko významnějším ztrátám živin, takže mnohé lesní porosty prošly významnou fází ochuzení. Obdobně mše moderní vyušlívání těžebního odpadu jako alternativního zdroje energie (výroba dřevě a topných briket) vést k významným ztrátám živin z hospodářských lesů, nejlépe tomu bylo v posledních desetiletích. Srovnání ročních ztrát živin (ve formě, ve které byly mšeny) mezi obilným polem a smrkovým lesem ukazuje obrázek.... Z toho je patrné, že na poli dochází k daleko větším ztrátám dusíku, fosforu a draslíku, zatímco ztráty vápníku a hořčíku jsou na poli a v lese prakticky totéž. Na zemědělské půdě dochází k značným ztrátám dusíku, který je vyplavován do podzemní vody (tab... ). Hlavní faktory ovlivňující obsah dusíku v půdě ukazují obrázek....

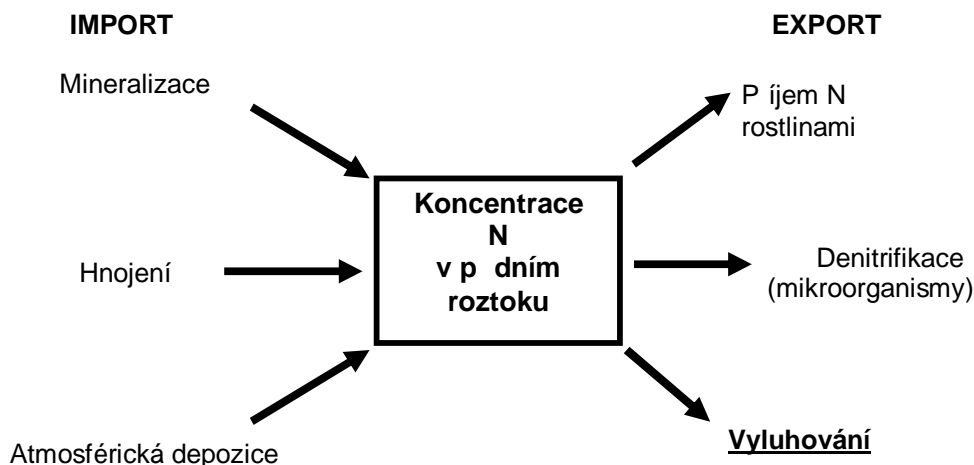
kultura	N	K	Ca	P	Mg
vysetá louka	400	400	140	50	35
cukrová řepa	250	380	85	35	50
krmná kukuřice	230	200	50	38	30
prosírná louka (466 se í)	220	290	90	35	25
mrkev	120	150	100	22	20
řepnát	120	115	30	17	20
okurky	45	60	20	17	15
smíšený les	4	3	3,5	0,5	0,5



**Obrázek:** Roční ztráty vybraných živin (v kg látky, jejíž obsah byl měřen) na obilném poli a ve hospodářském smrkovém lese.

**Tab:...**Průměrné ztráty N (jako NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) v závislosti na vegetačním pokryvu zemědělské půdy

	ztráta NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> na ha a rok	obsah v prosakující vod
pole (orná půda)	206300 kg	206200 mg / l
travné porosty (louky, pastviny)	2610 kg	2610 mg / l

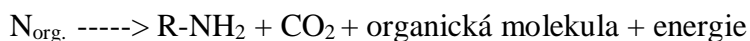


**Obrázek:** Hlavní faktory ovlivňující obsah dusíku v půdě

Mikroorganismy, především bakterie, se podílí na fixaci atmosférického dusíku a na mineralizaci organicky vázaného dusíku. Bakterie volně žijící v půdě, např. *Azotobacter* spp. a *Beijerinckia* spp., fixují za optimálních podmínek do 30 kg na hektar za rok. Symbiotické bakterie rodu *Rhizobium* fixují ročně zpravidla do 300 kg N na hektar, byly však zaznamenány i dvojnásobné hodnoty.

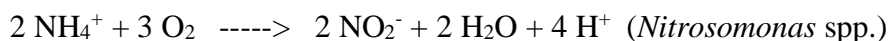
První krok mineralizace je amonifikace: proteolytické štěpení makromolekul (bílkovin, nukleinových kyselin, aminopolysacharidů) a následná **desaminace**:

#### **Amonifikace:**



Vhodné podmínky pro amonifikaci vládnu za střední vlhkosti a vyšších teplot (do 50 °C, např. v kompostu). Za aerobních podmínek dochází k oxidaci amoniového iontu k nitrifikaci, která probíhá ve dvou krocích: v prvním na dusitanový (nitritový) iont a v druhém na dusičnanový (nitrátový).

#### **Nitrifikace:**



Vhodné podmínky pro nitrifikaci představují, kromě přítomnosti kyslíku, středně vlhká půda, neutrální až lehké kyselé reakce a teplota 20-25 °C. V kyselých půdách a při nedostatku

kyslíku může naopak docházet k hromadění amoniových iontů. Na prvním kroku se podílí především chemoautotrofní obligátní aerobní bakterie rodu *Nitrosomonas*. Jako meziproducty zde vznikají  $\text{NH}_2\text{OH}$  a  $\text{NOH}$ , které se chemickou cestou mohou přeměnit na  $\text{N}_2\text{O}$  a uniknout do atmosféry. Druhý krok provádějí bakterie rodu *Nitrobacter*. Probíhá rychleji než první a proto  $\text{NO}_2^-$  nacházíme v půdách pouze ve stopových množstvích. Rostliny dusík zpravidla přijímají jako  $\text{NO}_3^-$ , který redukuje na  $\text{NH}_4^+$  a používají pro syntézu látek s obsahem dusíku. Za anaerobních podmínek (zamokněné půdy) dochází k denitrifikaci, tj. redukci  $\text{NO}_3^-$  na molekulární dusík. Podílí se na tom hlavně heterotrofní bakterie, například rody *Pseudomonas*, *Agrobacterium* a *Bacillus*. Vhodné podmínky pro denitrifikaci nastávají při neutrálním pH, teplotách 10-35 °C a vysokém obsahu dobře dostupného organického materiálu.

### Denitrifikace:



Ne všechny bakterie redukuje dusíkanový iont až na molekulární dusík. Částečně vzniká také  $\text{N}_2\text{O}$ , prchlivý plyn, který uniká do atmosféry dříve, než může být dále redukován. Podíl této neúplné redukce stoupá s klesající teplotou a dostupností organických látek, klesajícím pH a stoupajícím obsahem dusíku.

Nitrifikace a denitrifikace mohou probíhat současně ve stejné půdě: zatímco ve velkých pórech může probíhat nitrifikace, může uvnitř půdních agregátů v menších pórech naplněných vodou docházet k denitrifikaci.

Vyluhováním dusíku přestává být k dispozici pro výživu rostlin, zároveň dochází k ohrožení kvality podzemní vody. Hraniční hodnota platná v EU pro koncentraci  $\text{NO}_3^-$  v pitné vodě je 50 mg / l, což odpovídá 11,3 mg N / l.

Vymyté množství  $\text{NO}_3^-$  závisí na množství prsíkové vody a koncentraci  $\text{NO}_3^-$  v půdním roztoku. Ročně se jedná podle klimatu a půdy o 0-600 mg  $\text{NO}_3^-$ / ha. Ve střední Evropě dochází k vyluhování dusíku hlavně v období listopad-období (rozložený srážek!). Klesá v závislosti na vegetačním pokryvu půdy: úhor (bez vegetace) a zelenácké plochy, brambory, epka, kukuřice, víno a travinné porosty a lesy.

### 2.8.2 Hnojení půdy

Hnojení půdy má za cíl:

- doplnění přirozených zásob živin
- náhradu živin ztracených v důsledku slizů a uvolnění do vody a atmosféry
- tím zachování a zlepšení úrodnosti a biologické aktivity půdy
- za účelem optimálních vlivů rostlin (vysoké výnosy vysoké kvality).

Aby mělo hnojení fládoucí efekt a přitom bylo ekonomické a šetrné vůči flivotnímu prostředí, je třeba především dbát na aplikaci správného množství ve správnou dobu, tedy nepřehnojovat a hnojit tak, aby rostliny mohly uvolnit živiny příměří. Riziková je proto především aplikace hnojiv za suchem nebo během období vegetačního klidu.

Tradiční jsou zemědělcům uflívána **organická hnojiva** různých druhů:

- statková (mrva, kejda, mořska)
- kompost
- zelené hnojivo (zaorané rostliny jako lupina, jetel, epka, různé traviny)

- istírenský kal

Rozklad organických hnojiv probíhá záporn exponenciálně : 50 % slámy se rozloží za ty i m síce, 90 % ařl za dev t let. Obecn platí, ře ím vy—í je u organické látky hodnota pom ru C/N, tím pomalej—í je její rozklad v p d .

Pom r C/N u vybraných organických hnojiv:

Kejda	2610
istírenský kal	5610
Kompost	10630
Mrva	20630
Sláma	706100

Kompost z organických odpad obsahuje relativn mén řivín, zato v—ak má vysoký obsah organické hmoty se stabiliza ním ú inkem v p d . Jeho hodnota C/N má velké rozp tí podle charakteru kompostované hmoty. ásto bývá vy—í (cca 25), což vede k pomalej—ímu rozkladu. Dostupnost řivín po aplikaci je hor—í, m ře dojt k do asné imobilizaci N v mikroorganismech (vekerý dostupný N je zabudován do bun k mikroorganism , dokud nedojde k jeho op tovnému uvoln ní po jejich odum ení, není rostlinám dostupný) .

Kaly z komunálních istíren odpadních vod obsahují hodn řivín i stopových prvk , mohou být dobrým hnojivem. V t—ina obsařených řivín se stává dostupná v krátkodobém ařl st edn dobém horizontu. P i aplikaci velkého mnořství najednou mohou v p d do asn nastat anaerobní podmínky vřivem velkého obsahu vody (odvod ování kal je velmi nákladné, zpravidla dochází jen k áste němu vysu—ení), míra mineralizace je tím snížena.

istírenské kaly také mohou být kontaminovány t řlkými kovy a persistentními organickými polutanty (nap . PCB), pro eřl se v rostoucí mí e stávají nebezpe ným odpadem ukládaným na skládkách.

Na lehkých p dách chudých na vápník i lehce kyselých m ře opakované hnojení kaly i kompostem zvednout pH o asi 1 jednotku.

Ztráta řivín je dnes ásto vyrovnávána **anorganickým ili pr myslovým hnojivem**. Z hlediska ochrany řivotního prost edí je uřlívání pr myslových hnojiv problematické hlavn ze dvou d vod :

- t řeba a p eprava surovin spot ebovávají/ní í krajinu, jsou energeticky náro né, vzniká zát řl dopravou (hluk, pra—nost, emise —kodlivin)
- výroba a distribuce jsou energeticky náro né, emise —kodlivin je zna ná.

Anorganická hnojiva se pouřlívají jedno nebo vícerořlková, ásto je uřlívána sm s N, P, K (1 : 0,4 : 0,8). Dávkování je jednodu—í neřl u organických hnojiv a řiviny mohou být rostlinám i mikroorganism m okamřlít k dispozici. P i aplikaci pomalu se rozpou—t řících granulí lze také u nich zajistit pomalej—í a dlouhodob ří p řsun řivín. Anorganická hnojiva, p edev—ím fosfátová, mohou být také kontaminována t řlkými kovy (jejich p řsun na ornou p du prost ednictvím hnojiv v p řpad Cd a Cr významn p ekrá uje p řsun aplikací kal z istíren odpadních vod).

## 2.9 Problematika vyřlívání tropických p d

Při pohledu na bujnou vegetaci tropických deštných prales se vnucuje představa, že rostou na úrodných půdách. Tato představa se traduje od dob slavného cestovatele a přírodovědce Alexandra von Humboldta (1769-1859). Snahy o pěstování tropických prales na zemědělskou půdu však byly a jsou zřídka úspěšné. Zkušenost z mírného pásma, kde byla odlesněná získána kvalitní orná půda, totiž v tropech zpravidla neplatí: vysoká primární produkce zde zpravidla není spjata s vysokým obsahem živin v půdě. Tropické klima se vyznačuje velmi vysokými srážkami a teplotami. Vlhkost a vysoká teplota urychlují chemické reakce, které se podílejí na roztržení hornin a minerálních složek profilu, které by byly velmi hluboké. Vysoké úhrny srážek přitom způsobují vymývání živin ze svrchních horizontů půdního profilu. Schopnost půdy vázat živiny je přitom dána její sorpční či kationtovou výměnnou kapacitou a obsahem organických látek, především ve formě amorfního humusu. Humus sám o sobě obsahuje makroživiny jako jsou dusík, fosfor a především uhlík, zároveň se ale významnou měrou podílí na sorpční kapacitě půdy. Další část sorpční kapacity je dána obsahem tzv. půdních koloidů nejmenších, tedy jílových částic půdy. Jak molekuly humusu tak jílové minerály mají na svém povrchu elektrický záporný náboj, který vzniká zde vazebná místa pro kationty s kladným nábojem jako jsou  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ . Přidávají se na jejich povrchu nachází také kladné náboje, ty pak umožňují navázání aniontů z půdního roztoku.

V tropickém klimatu je humus přítomen pouze v horních 20-30 cm půdy, jeho obsah je přitom velmi nízký: v hloubce 102 %, maximálně 3 %. Teplota svrchní vrstvy půdy je zde totiž 28-30 °C. Při nárůstu teploty z 20 °C na 30 °C probíhá rozklad 4x rychleji. Zatímco úplný rozklad organické hmoty trvá v mírném pásmu roky, v tropech k němu dochází za cca 9 měsíců. Přesto má humus ve svrchní vrstvě tropických půd hlavní podíl na celkové kationtové výměnné kapacitě: 2 g / cm<sup>3</sup> specifické hmotnosti. Při obsahu 40 % kaolinitu a 2 % humusu je podíl humusu na sorpční kapacitě dvojnásobný.

Rychlé roztržení minerální půdy totiž vede k tomu, že se tropické půdy z hlediska zastoupení jednotlivých druhů jílových minerálů výrazně liší od půd chladnějších klimatických pásem. Mikrokrystaly jílových minerálů se utvářejí v průběhu roztržení mateřné horniny. Sestávají z vrstev oktaedru hydroxidu hliníku a z tetraedru oxidu křemíku.

Různé typy jílových minerálů se liší mimo jiné stavbou krystalu. Zásadní je rozdíl mezi trojvrstevnými a dvouvrstevnými. Trojvrstevné jsou chlority, illity, vermikulity a montmorillonity. Nacházíme je především mimo tropické oblasti.

**Trojvrstvá stavba: Si-O  
Al-OH  
Si-O**

V tropických půdách naopak převažují kaolinity, které jsou dvouvrstevné. Je tomu tak proto, že vyluhování zasahuje také křemík (Si; představuje až 90 % minerálních částic v půdě). Obsah křemíku v půdě je tak snížen, vznikají tzv. fersialitické a feralitické půdy s slabikou Fe(r), Si a Al přitom stojí pro přítomné prvky, které v těchto půdách převažují: železo, křemík a hliník.

**Dvouvrstvá stavba: Al-OH  
Si-O**

Sorpční kapacita různých druhů jílových minerálů se liší o jeden až dva řádky, přitom u kaolinitu je zdaleka nejnižší. Naopak pouze montmorillonity s nejvyššími početnými výměnnými jednotkami dosahují dolní hranice sorpční kapacity humusu (při srovnání množství stejné hmotnosti).

Počet výměnných jednotek na 100 g jílu i humusu:

montmorillonity	806150
chlority, vermikulity	15640
kaolinity	3615
humus	1506500

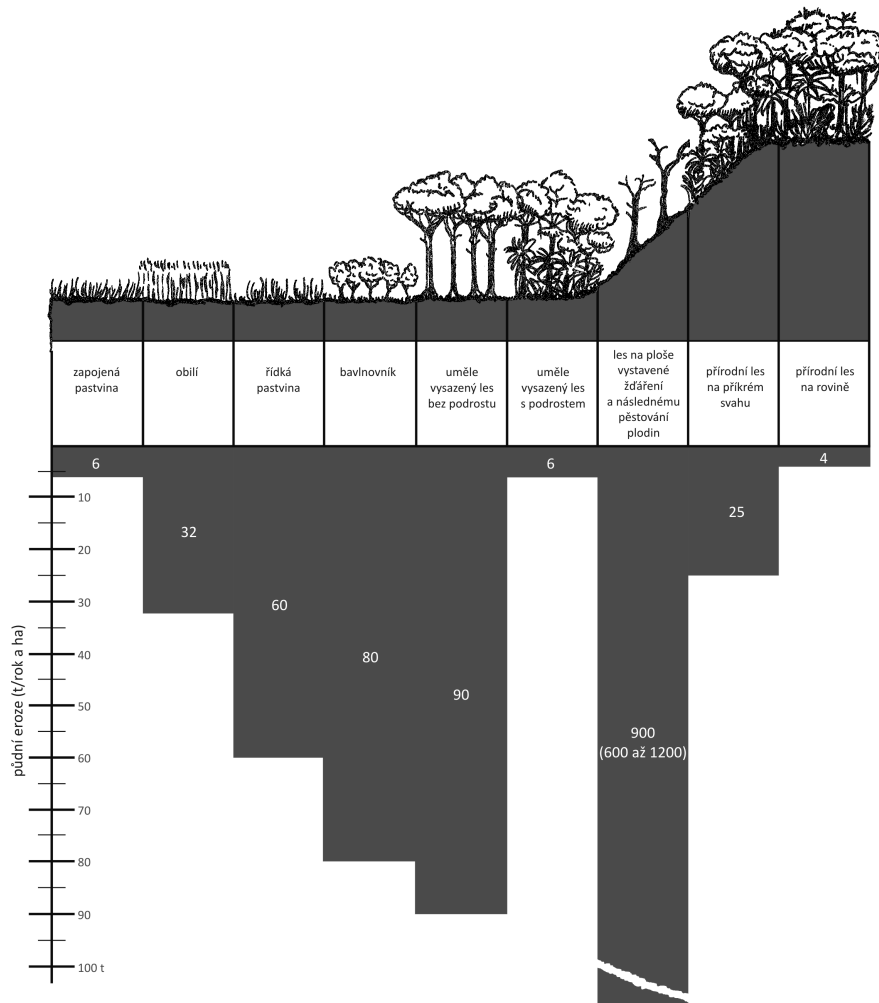
Proč je tedy v tropech tak bujná vegetace? Skoro ve všech fluviny se nacházejí v flivé biomase. Existuje zde p římý kolob h flivin od odum elé k flivé biomase, hovo í se dokonce o zkratu v tomto kolob hu. Odum elé organismy i jejich ásti se rozkládají velmi rychle. Vegetace funguje jako filtr: tropické lesy se vyzna ují výraznou patrovitostí, jsou zde mnohdy hojně epifyty, které zachycují odum elou biomasu i rozpu-t né fliviny d íve, neř by se dostaly do p dy; ko enové systémy jsou koncentrovány v horních 30 cm p dy. Je dob e vyvinuta mykorhiza, která funguje jako past na fliviny (angl. nutrient trap). Vzhledem k vysoké vlhkosti prost edí nedochází v tropických de-tných i mřlných lesích prakticky k p irozeným lesním pofřár m, které by vedly k úniku flivin. fliviny se tak v ekosystému po staletí (100-200 let) akumulují. Také dochází k uvol ování flivin z rychle zv trávající horniny. Nachází-li se tato hluboko pod p dním povrchem, je otázkou, jak moc se tyto uvoln né fliviny stávají rostlinám dostupné. Je v-ak patrné, ře ím chud-í je mate ná hornina, tím del-í je doba regenerace vegetace po jejím naru-ení.

Tradi ní zp sob zem d lství v tropech je toulavý, p i emř je zem d lská p dá získávána kl ením a fl á ením (angl. slash and burn). Protoře technické mořnosti obyvatelstva bývaly a mnohdy stále jsou velmi ořmezené, jsou p itom ásto pokáceny pouze slab-í stromy, zatímco ty v t-í z stanou stát. Pokácená vegetace ale v daném klimatu navzdor sřářkám rychle vysychá a po vyschnutí je podpálena, p i emř pofřár zahubí i v t-ínu stojících strom . Ohe stráví i ást humusu, který se v p d nachází. fliviny ze spálené biomasy i p dní organické hmoty jsou uvoln ny do prost edí ve form popela a ten, resp. mobilizované rozpu-t né fliviny, jsou odná-eny v trem i vodou (povrchov i do hlub-ích vrstev p dního profilu, p ípadn ařl do podzemní vody). Zem d lské plodiny bývají vysazovány p ímo na spáleni-t a tak bývá dosařlena zpravidla velmi dobrá první úroda. Ale řiř druhá sklize bývá ásto slabá a málokdy se vyplácí na daném míst setrvat déle neř po dv ařl t i sklizn . V odkryté p d vystavené intenzivnímu slune nímu zá ení je urychlen rozklad zbývajícího humusu, ten bývá v dob druhé sklizn rozřlořen. P ísun nového rostlinného opadu je malý, k regeneraci humusu nedochází. fliviny byly ve velké mí e vylouhovány a odplaveny, sorp ní kapacita zřátou humusu poklesla na minimum. P ípadná aplikace hnojiv tak z stává bez v t-řho ú inku, protoře p da není schopna fliviny ve form dostupné rostlinám v pot ebné mí e zadržet a tyto jsou ihned zase odplaveny. Paseky, které v tropických lesích za ú elem zem d lství zakládají a brzy zase opou-t jí p ířlu-níci p írodních národ bývají natolik malé, ře jsou pom řn dob e chrán ny p ed p sobením v tru a získávají opad z okolního porostu ó jejich regenerace je tak zdlouhavá, ale mořná. Obdobn , ale na daleko v t-ích plochách se mnohde postupuje za ú elem získávání zem d lské p dy pro nep vodní obyvatelstvo, ásto p esídlované z p elidn ných oblastí (nap . Brazílie, Indonésie), také ve spojitosti s t řlbou d eva, získáváním pastvin pro skot i p dy pro zakládání plantářř. Zde pak mnohdy nastupuje postupná, av-ak rychlá degradace vegetace i p dy ó v p ípad vyuřřívání p dy pro pastvu hrozí ařl dezertifikace, vznik hlubokých erozních řřh atd. Míru p dní eroze v závislosti na zachovalosti ekosystému tropického de-tného lesa, resp. charakteru antropogenního vegeta ního pokryvu a sklonu terénu ukazuje **obrázek...**

V tropech existuje pouze n kolik oblastí, kde p írodní podmínky umořl ují trvalé zem d lství a kde vý-e uvedené do zna né míry neplatí. P edev-ím se jedná o vulkanické p dy bohaté na fliviny, nap . v Indonésii na Jav a Bali (nikoliv ale nap . na Borneu), nebo na Nové Guinei

(zem d lství se zde ale p stuje hlavn v horských polohách, kde jsou klimatické podmínky navzdor zem pisné í ce odli-né). Dále se jedná o záplavová území ek, které te ou z horských oblastí a pravideln sebou p iná-í sedimenty bohaté na fliviny. Mezi n pat í samotná Amazónka a dal-í tzv. bílé eky tekoucí v jifní Americe z And, jejich záplavová území, tzv. várzeas, jsou dlouhodob vyufflvány k p stování plodin. Naopak tzv. erné eky (nap . p ítok eky Amazónky Rio Negro), které te ou z níflinných pralesních oblastí, a jejichfl barva je d sledkem vysokého obsahu huminových kyselin, fliviny nep iná-í a jejich záplavová území, tzv. igapó, trvalé zem d lství nedovolují. V posledních letech ale zji- ujeme, fle v minulosti se na území Amazonie muselo zem d lsky hospoda it na v t-ích plochách a fle tehdej-í indiánské obyvatelstvo na-lo zp sob, jak úrodnost zdej-ích chudých p d výrazn zvý-ít. Portugalský název **terra preta do índio** ozna uje p du, která byla um le obohacena drtí d ev ného uhlí, kostí a organickými zbytky a získala tím tmavou barvu (port. terra preta = erná p da) a zna nou úrodnost (krom d ev ného uhlí jsou pro tuto antropogenní p du typické nálezy st ep nádob z kameniny). Dosahuje hloubku afl 2 m a její vznik je datován na období 450 let p ed n. l. afl 950 let n.l.. Vedou se odborné spory o tom, jak dalece bylo vytvá ení této p dy zám rné a jak dalece vznikala pouze náhodn pod odpadovými jamami. Pokrývá ale mnohdy plochy kolem 40 ha a byly i nalezeny plochy výrazn v t-í rozlohy. P inejmen-ím obdobná, av-ak mén tmavá a tedy i mén úrodná **terra mulata** v okolí lidských sídel patrnl vznikala skute n se zám rem zvý-ít úrodnost p dy. Obdobné p dy byly nalezeny také v n kterých dal-ích oblastech jifní Ameriky a Afriky. Odhady celkové rozlohy p dy terra preta v Amazonii se pohybují mezi 0,1 afl 0,3 %, cofl odpovídá cca 6 000-19 000 km<sup>2</sup> (n kte í auto i ale uvád jí odhady afl 10 % rozlohy). V sou asné dob probíhají výzkumy, jak tuto metodu zdokonalit a vyufflít k zúrodn ní chudých tropických p d, p edev-ím za pouflití tzv. biouhlí (angl. biochar) ó jemnozrnného uhlí získávaného pyrolýzou za vysokých teplot a malého í fládného p ístupu kyslíku ze d eva a jiných organických látek.

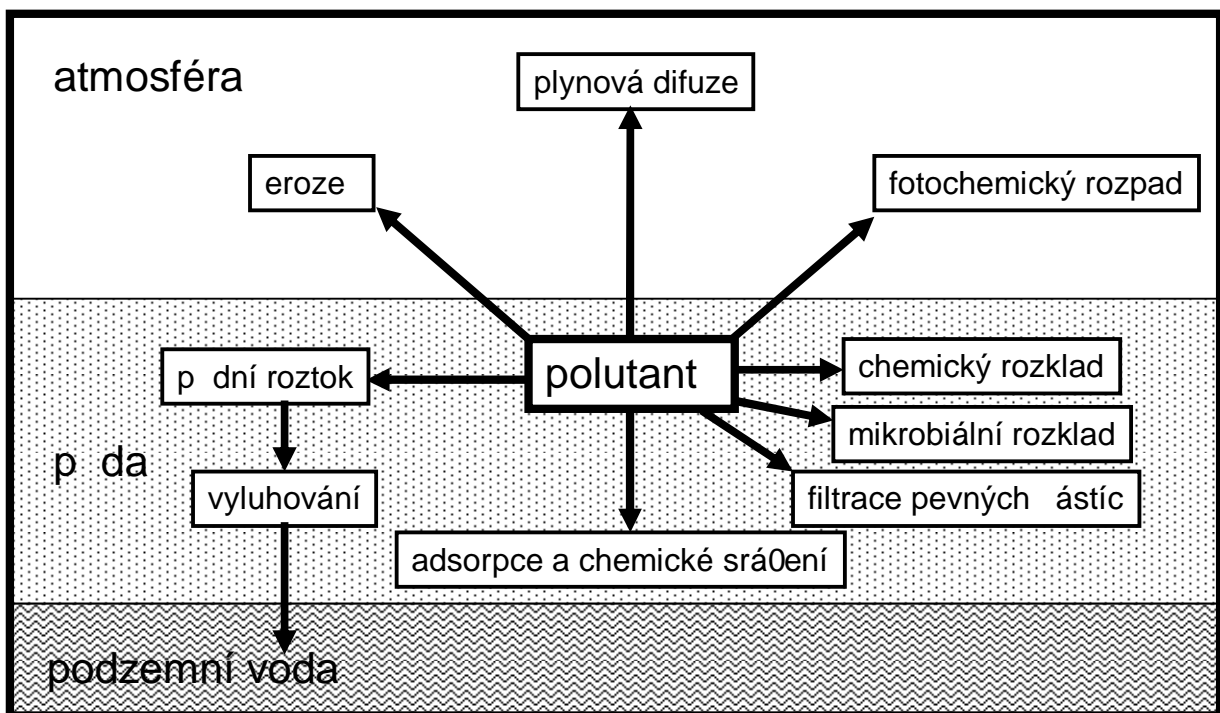




**Obr.....:** Míra p dní eroze v biomu tropického de-tného lesa v závislosti na vegeta ním pokryvu (zachovalý primární les a r zné typy zem d lského i lesnického využití) a sklonu terénu (rovina oproti p íkrému svahu).

## 2.9 Kontaminace p dy

Ke vnosu škodlivých a více méně toxických látek (polutantů) do p dy dochází do značné míry plošnou atmosférickou depozicí a zemním povrchem. Spíše bodové zdroje bývají úniky polutantů (velké jednorázové, i dlouhodobé plíživé) z dolů, průmyslových podniků, skládek odpadu, dopravních havárií apod. Nic mezi představuje kontaminace nívních p d škodlivinami v naplaveninách, především po v tších povodních. Znečištění p dy je v nována ze strany politiky, resp. zákonodárství, pozornost především z hlediska rizika pro lidské zdraví a možné kontaminace podzemních i povrchových vod. Závažný problém představuje posouzení skutečné škodlivosti naměřených koncentrací polutantů v p d, resp. skutečného rizika, které tyto koncentrace představují pro člověka i přírodu. V zásadě se měří celkové koncentrace v p d odebrané na místě a koncentrace ve vylučích z p dy prováděné v laboratorii, případně úniky plynů z p dy (např. po zamoření ropnými produkty). Na vlastnostech konkrétní p dy v etně jejího vodního režimu záleží, jaký podíl případných polutantů (těžkých kovů, organických sloučenin atd.) je pevně vázán v p d a prakticky neškodný, a jaký podíl je naopak mobilní a může být přijímán přírodními organismy, (kulturními) rostlinami, ve formě prachu vdechovaného člověkem i prosakovat do podzemní vody. P dy se z tohoto hlediska hodnota, a proto je uhlívání obecně platných limitních hodnot problematické (v praxi však nevyhnutelné). Dostupnost a mobilita těžkých kovů je vyšší v p dách kyselých než v neutrálních. Chování polutantů v p dním prostředí schematicky znázorňuje obrázek...



Obr...: Chování znečišťující látky o polutantu - v p d

Obecně se uplatňuje princip, že se pokračuje k sanaci tím opatřením, tedy a v takové míře, aby to bylo přírodně budoucímu uhlívání daného pozemku. Vzhledem k velké nákladnosti dekontaminace zeminy (může vyžadovat odštěpení velkých objemů a jejich spálení za vysokých teplot, aniž by docházelo ve v tší míře k emisi škodlivin do ovzduší) se často volí přístup stabilizace daného půdního tělesa (nebo například navážky kontaminované zeminy i skládky odpadu) překrytím vrstvami nepropustnými pro vodu tak, aby nedocházelo k vymývání obsažených nebezpečných látek. V případě kontaminace ropnými látkami se také

uflívá nao kování p dy bakteriálními kulturami se zvý-enou schopností tyto látky rychle rozkládat ó tzv. bioremediace (z angl. bioremediation, p i emfl šremediationõ je v britské angli tin v ochran flivotního prost edí b fln ozna ení pro to, emu esky íkáme sanace ó ozdravení, z lat. sanus = zdravý; remedy ó angl. lé ba, náprava, oprava).

Z hlediska atmosférické depozice stojí za zmínku p edev-ím kontaminace polyaromatickými (p esn ji: polycyklickými aromatickými) uhlovodíky (PAU, angl. PAH ó polyaromatic hydrocarbons) a polychlorovanými bifenyly (PCB). Polyaromatické uhlovodíky jsou asto velmi volatilní a k jejich depozici pak dochází i velmi daleko od zdroje a ó obdobn jako v p ípad kyselých sráfk ó p edev-ím na lesní p d . T fl-í PAU naopak mohou p edstavovat kontaminaci p ímo pod bývalými skládkami uhlí i koksů (kam se dostaly vyluhováním), nebo podél ulic a silnic (z emisí motorových vozidel). P es ovzdu-í se ale do p dy dostávají i t flké kovy jako kadmium, chrom a hlavn olovo, p i emfl k depozici dochází zpravidla blízko zdroje emisí (známá je kontaminace olovem v bezprost ední blízkosti ulic a silnic v d sledku d íve uflívané p ísady olova do benzínu). Podél cest také dochází k zasolování p dy solemi uflívanými pro zimní posyp (o atmosférickou depozici se zde nejedná, v aridním klimatu v-ák mohou být soli ze solných pánví a vyschlých solných jezer uná-eny v trem na velké vzdálenosti).

Organické polutanty se do zem d lské p dy dostávají také ó a to ve v t-í mí e ó p es aplikaci kal z istíren odpadních vod i vybagrovaných í ních sediment apod. Pokud jde o plo-né p sobení v zem d lství, podíváme se zde blíffe na vliv pesticid (k vlivu hnojiv viz vý-e). Aplikovaná množství jsou ve srovnání s hnojivy malá. V p ípad herbicid p edstavuje jedna aplikace 0,1 ó 2 kg ú inné látky / ha, v p ípad fungicidu 0,01ó0,5 kg ú inné látky / ha. Zpravidla dochází u obilí a polních plodin ke dv ma afl -esti aplikacím r zných pesticid za vegeta ní sezónu. Mofné vedlej-í ú inky jsou nap . toxické ú inky na jiné nefl cílové organismy (v . samotné o-et ené rostliny) nebo zm ny chu ových vlastností plod . Výskyt a závaflnost vedlej-ích ú ink ur ují následující faktory:

- **persistence:** doba p sobení látky (je mofné tzv. "carry over" ó toxické p sobení na p í-tí kulturu);
- **akumulace** aktivní látky nebo jejich derivát (vznik rozkladem) v rostlinách a p d , tzv. **residua**;
- **bioakumulace:** nashromáfl ní aktivní látky v potravním et zci, resp. v ur ítých orgánech;
- **negativní vliv na uflite né organismy** (nap . na flíflaly nebo antagonisty -k dc jako jsou pavouci) a dekompozi ní procesy v p d ; je p edm tem ekotoxikologického posouzení.

Pesticidy se velmi li-í z hlediska jejich odolnosti proti rozkladu. Orienta ní hodnoty uvádí podle Metcalfa (1969) **tabulka...** V p ípad šrozkladuõ prvku (olovo, m , arzén) se patrn jedná o vyjád ení jejich odnosu z dané p dy (vymýváním, p dní erozí i sklizní), p ípadn jejich imobilizace. Moderní pesticidy jsou vyvíjeny i s ohledem na to, aby jejich rozklad a rozklad rizikových derivát byl rychlý.

**Tabulka:** Odolnost pesticidů v půdě proti rozkladu (Metcalf, 1969)

Druh pesticidu	Poločas rozkladu (roky)
olovo, měď, arzén	10630
insekticidy Dieldrin, BHC, DDT	264
herbicide Triazin	162
herbicide na bázi kyseliny benzoové	0,261
herbicide na bázi močoviny	0,360,8
herbicide 2,4,5-T, 2,4,6-T	0,160,4
insekticidy organofosfátové	0,0260,2
insekticid Carbaryl	0,02

Při posuzování negativních vedlejších účinků pesticidů se zohlední především tyto věci:

- produkce CO<sub>2</sub> v půdě (málo senzitivní vůči narušení, protože to je závažnější, pokud k němu dojde),
- množství mykorrhizy na kořenových systémech,
- populační hustoty vybraných půdních živočichů.

Při posuzování škodlivosti vedlejších účinků je třeba je porovnat s účinky zcela přirozených faktorů jako jsou zamokření, zmrznutí nebo mechanické narušení. V intenzitě půdních procesů a početnosti populací půdních organismů dochází v důsledku těchto faktorů ke značnému kolísání. Za zanedbatelné platí snížení měřených parametrů, které 30 dní po aplikaci nepřesahuje 20 % výchozích hodnot. Za kritické platí, pokud snížení je –t za 60 dní po aplikaci dosahuje 85 %, resp. za 90 dní 70 %. Takového snížení dosahují fumiganty jako methylbromid (používá se například ke sterilizaci půdy v zahradnictví), herbicide širokou působností jako chlorpikrin a fungicide s obsahem rtuti.