

Ústav geologie a pedologie

**Lesnická pedologie
pro posluchače LDF Mendelu v Brně**

Dušan Vavříček
Aleš Kučera



Tato skripta byla vytvořena v rámci projektu InoBio – Inovace biologických a lesnických disciplín pro vyšší konkurence schopnost, registrační číslo projektu CZ.1.07/2.2.00/28.0018. za přispění finančních prostředků EU a státního rozpočtu České republiky.



Obsah

1	PŮDA V LESNÍM POJETÍ: ÚVOD DO PROBLEMATIKY LESNICKÉ PEDOLOGIE	9
1.1	ZÁKLADNÍ POJMY	9
1.2	FUNKCE PŮDY V LESNÍM PROSTŘEDÍ	10
2	VZNIK A VÝVOJ PŮDY	11
2.1	PŮDOTVORNÉ FAKTORY	11
2.1.1	MATEČNÁ HORNINA	11
2.1.2	KLIMA	12
2.1.3	TOPOGRAFIE	13
2.1.4	ORGANIZMY	14
2.1.5	ČAS	15
2.2	ZÁKLADNÍ PROCESY FORMACE PŮDNÍHO TĚLESA	15
2.2.1	ZVĚTRÁVACÍ PŮDOTVORNÝ PROCES	16
2.3	PŮDNÍ SLOŽKY	17
2.3.1	ANORGANICKÁ SLOŽKA	17
2.3.2	ORGANICKÁ SLOŽKA	19
2.3.3	KAPALNÁ SLOŽKA LESNÍCH PŮD	20
2.3.4	PLYNNÁ SLOŽKA LESNÍCH PŮD	21
3	MINERÁLNÍ PODÍL PŮDY, KOLOIDNÍ SYSTÉM	23
3.1	PŮDA A MATEČNÁ HORNINA	23
3.2	ČLENĚNÍ MINERÁLNÍ PŮDNÍ SLOŽKY	24
3.2.1	SKELET V PŮDĚ	24
3.2.2	MINERALOGIE JEMNOZEMĚ	25
3.3	JÍLOVÉ MINERÁLY	26
3.3.1	STRUKTURA JÍLOVÝCH MINERÁLŮ	26
3.3.2	ČLENĚNÍ JÍLOVÝCH MINERÁLŮ	26
3.4	KOLOIDNÍ SYSTÉM PŮDY	27
4	VODA V PŮDĚ	29
4.1	ZDROJE A ZTRÁTY PŮDNÍ VODY	29
4.2	OBSAH A FORMY VODY V PŮDĚ	30
4.3	VODNÍ POTENCIÁL	33
4.4	POHYB VODY V PŮDĚ, VODNÍ REŽIM	34
4.5	PŮDNÍ VODODRŽNOST, PŮDNÍ HYDROLIMITY	38
4.6	VYBRANÉ PRAKTICKÉ ASPEKTY PROBLEMATIKY VODY V LESNÍCH PŮDÁCH	45
5	PŮDNÍ VZDUCH, TEPLOTA PŮDY	47
5.1	PŮDNÍ VZDUCH	47
5.1.1	OXIDAČNĚ-REDUKČNÍ PROCESY V PŮDĚ	48
5.2	TEPLOTA PŮDY A TEPELNÝ REŽIM	50

5.2.1	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TEPLotu PŮDY	50
5.2.2	TEPELNÝ REŽIM A JEHO DYNAMIKA	52

6 PŮDOTVORNÉ PROCESY, PŮDNÍ TAXONOMIE **54**

6.1	PŮDOTVORNÉ PROCESY	54
6.1.1	PROCESY ROZPADU A PŘEMĚNY HORNIN	54
6.1.1.1	Procesy přeměny hornin	54
6.1.1.2	Změna a vývoj jílových minerálů	54
6.1.2	MIGRACE PRVKŮ A SLOUČENIN	55
6.1.3	METAMORFICKÉ PŮDOTVORNÉ PROCESY	57
6.1.4	PŮDOTVORNÉ PROCESY V HYDRICKÝCH PODMÍNKÁCH	57
6.1.5	ZASOLOVÁNÍ A ODSOLOVÁNÍ PŮD	58
6.2	TAXONOMIE PŮD	59
6.2.1	MEZINÁRODNÍ SYSTÉMY	59
6.2.1.1	World Reference Base for Soil Classification (WRB)	60
6.2.1.2	Soil Taxonomy	61
6.2.2	TAXONOMICKÝ KLASIFIKAČNÍ SYSTÉM PŮD ČESKÉ REPUBLIKY	61

7 ORGANICKÁ HMOTA LESNÍCH PŮD **64**

7.1	UHLÍK JAKO ZÁKLADNÍ SLOŽKA ORGANICKÉ HMOTY	64
7.2	VZNIK A ROZKLAD ORGANICKÉ HMOTY, HUMUS	65
7.2.1	AEROBNÍ PROCESY PŘEMĚNY ORGANICKÝCH LÁTEK	65
7.2.2	ANAEROBNÍ PROCESY PŘEMĚNY ORGANICKÝCH LÁTEK	69
7.3	LESNÍ HUMUS	69
7.3.1	HORIZONTY NADLOŽNÍHO HUMUSU	69
7.3.2	HUMUSOVÉ FORMY LESNÍCH PŮD	72
7.3.2.1	Anhydrogenní humusové formy	72
7.3.2.2	Hydrogenní humusové formy	77
7.3.2.3	Biologické aspekty problematiky humusových forem	77
7.3.2.4	Některé aspekty problematiky humusových forem z hlediska lesnické praxe	78
7.3.3	KLÍČ K URČOVÁNÍ SKUPIN HUMUSOVÝCH FOREM	79

8 PŮDNÍ ORGANIZMY A EKOLOGIE LESNÍCH PŮD **82**

8.1	DIVERZITA PŮDNÍCH ORGANISMŮ	82
8.2	SKUPINY PŮDNÍCH ORGANISMŮ	83
8.3	PŮDNÍ ENZYMY	88

9 PŮDNÍ HORIZONTY, PŮDNÍ PROFIL **91**

9.1	HORIZONTY LESNÍCH PŮD	91
9.1.1	ORGANICKÉ HORIZONTY LESNÍCH PŮD	91
9.1.2	ORGANOMINERÁLNÍ POVRCHOVÉ HORIZONTY	92
9.1.3	PODPOVRCHOVÉ HORIZONTY	92
9.1.3.1	Eluviální horizonty	92
9.1.3.2	B horizonty	92
9.1.3.3	Substrátové horizonty	93

9.1.3.4	Vodou ovlivněné horizonty	93
9.1.3.5	Přechodové horizonty	94
9.1.3.6	Vícenásobné horizonty	94
9.1.3.7	Fosilní horizonty	94
9.2	STRATIGRAFIE PŮDNÍHO PROFILU	95
10	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PŮD	96
10.1	BARVA PŮDY	96
10.1.1	BARVA JAKO INDIKÁTOR PŮDNÍCH VLASTNOSTÍ	96
10.1.2	KLASIFIKACE BARVY PŮDY	96
10.2	ZRNITOST PŮDY	97
10.3	PŮDNÍ STRUKTURA	100
10.4	MĚRNÁ HMOTNOST	101
10.5	OBJEMOVÁ HMOTNOST (ρ_w), OBJEMOVÁ HMOTNOST REDUKOVANÁ (ρ_d)	101
10.6	PÓROVITOST (P)	102
10.7	OBJEMOVÁ VLHKOST, MOMENTÁLNÍ PROVZDUŠNĚNOST, MINIMÁLNÍ VZDUŠNÁ KAPACITA	103
11	FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ VLASTNOSTI PŮD	105
11.1	PŮDNÍ REAKCE	105
11.1.1	FORMY PŮDNÍ REAKCE	107
11.1.2	PŮDNÍ PUFROVITOST	108
11.2	PŮDNÍ SORPCE	111
11.2.1	MECHANICKÁ SORPCE	111
11.2.2	FYZIKÁLNÍ SORPCE	111
11.2.3	CHEMICKÁ SORPCE	111
11.2.4	FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÁ SORPCE	112
11.2.5	ORGANICKÁ SORPCE	114
11.2.6	BIOLOGICKÁ SORPCE	115
11.2.7	CHARAKTERISTIKY SORPČNÍHO KOMPLEXU	115
12	CHEMICKÉ VLASTNOSTI PŮD	117
12.1	ZÁKLADNÍ ASPEKTY KOLOBĚHU ŽIVIN V LESNÍCH EKOSYSTÉMECH	117
12.2	MAKROELEMENTY LESNÍCH PŮD	118
12.2.1	KOLOBĚH A PŘEMĚNY UHLÍKU V PŮDĚ	118
12.2.2	CYKLUS DUSÍKU A JEHO PŘÍSTUPNOST V PŮDĚ	119
12.2.2.1	Zdroje dusíku v ekosystémech	120
12.2.2.2	Ztráty dusíku z ekosystémů	120
12.2.2.3	Vnitřní cykly dusíku (přeměny forem)	121
12.3	POMĚR UHLÍKU A DUSÍKU, C/N	122
12.4	CHARAKTERISTIKA DALŠÍCH MAKROŽIVIN (Mg, P, S, Ca, K)	123
12.5	MIKROELEMENTY LESNÍCH PŮD	125
13	VÝŽIVA A HNOJENÍ ROSTLIN V LESNÍM HOSPODÁŘSTVÍ	126
13.1	METODY HNOJENÍ	126
13.1.1	ZÁKLADNÍ HNOJENÍ	126

13.1.2	OPERATIVNÍ HNOJENÍ, KARENCE	128
13.2	ÚPRAVA ZÁSOB ŽIVIN V PŮDĚ	130
13.2.1	NORMATIVY PRO OBSAHY ŽIVIN V PŮDĚ	131
13.2.2	PLÁNOVÁNÍ HNOJENÍ (POUŽÍVANÉ V ZEMĚDĚLSTVÍ)	134
13.3	TYPY HNOJIV	135
13.3.1	PRŮMYSLOVÁ HNOJIVA A JEJICH POUŽITÍ	135
13.3.2	NOVÉ TYPY HNOJIV POUŽÍVANÝCH V LESNÍM HOSPODÁŘSTVÍ	140
13.3.3	RŮSTOVÉ STIMULÁTORY POUŽÍVANÉ V LESNICTVÍ	142
13.3.3.1	Fyziologické účinky fytohormonů	143
13.3.3.2	Přípravky s fytostimulačním účinkem: účinky a způsob aplikace	144
13.4	KOMPOSTOVÁNÍ	145
13.4.1	FÁZE KOMPOSTOVÁNÍ	145
13.4.2	ZAKLÁDÁNÍ KOMPOSTŮ, ZÁSADY PRO KOMPOSTOVÁNÍ	146
13.4.3	HODNOCENÍ KVALITY A ZRALOSTI KOMPOSTU	148
13.4.4	DRUHY KOMPOSTŮ	149
14	LESNICKO-PEDOLOGICKÉ ASPEKTY MINERÁLNÍ VÝŽIVY LESNÍCH DŘEVIN	151
14.1	Hlavní aspekty výživy rostlin	151
14.2	Problematika příjmu živin rostlinou	151
14.2.1	KOŘENOVÁ VÝŽIVA	151
14.2.2	FOLIÁLNÍ VÝŽIVA	152
14.3	Výživa rostlin a Liebigův zákon	153
14.4	Faktory ovlivňující příjem živin	153
15	DEGRADACE A OCHRANA PŮDY, ENVIRONMENTÁLNÍ POJETÍ PŮDY	155
15.1	CHEMICKÁ DEGRADACE PŮDY	155
15.1.1	ACIDIFIKACE	155
15.1.1.1	Příčiny acidifikace	156
15.1.1.2	Antropogenní acidifikace, imise – vliv základních polutantů S a N na lesní půdu	159
15.1.1.3	Případná opatření omezující acidifikaci	159
15.1.2	KARBONÁTY V PŮDĚ, VÁPŇENÍ LESNÍCH PŮD	160
15.1.3	HLINÍK V PŮDĚ	161
15.1.4	TĚŽKÉ KOVY V PŮDĚ	162
15.1.5	ZASOLENÍ PŮD	167
15.2	FYZIKÁLNÍ DEGRADACE PŮDY	168
15.2.1	SPECIFIKA EXTRÉMNĚ LEHKÝCH A TĚŽKÝCH PŮD	169
15.2.2	DEGRADACE FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ VLIVEM TĚŽEBNÍ ČINNOSTI	170
15.3	PŮDNÍ EROZE	172
15.3.1	VODNÍ EROZE	173
15.3.2	VĚTRNÁ EROZE	175
15.3.3	INTROSKELETOVÁ EROZE	176
15.4	LESNÍ PŮDY V KONTEXTU KLIMATICKÝCH ZMĚN	177
15.4.1	HYDRICKÝ REŽIM LESŮ A LESNÍCH PŮD	177
15.4.1.1	Hydrický režim horských lesů	177
15.4.1.2	Hydrický režim lužních lesů	178
15.4.2	KLIMATICKÉ ZMĚNY: ODEZVA LESNÍCH EKOSYSTÉMŮ	179
15.4.2.1	Otázky krajinné ekologie	179
15.4.2.2	Perturbace	179

Slovo úvodem

Tento učební text je určen zejména posluchačům lesnických, krajinářských a arboristických oborů vyučovaných na LDF Mendelu v Brně, ale dále také posluchačům ostatních fakult Mendelu i dalších škol, je-li to v souladu s náplní pedologických předmětů. Dále je určen širší odbore veřejnosti, ať už v souvislosti s využitím studenty kombinovaného studia, kteří jsou již často v těsném kontaktu s lesnickým provozem, nebo v rámci kurzů a blokové výuky. Z hlediska náplně pedologických předmětů vyučovaných v rámci zmíněných oborů text výrazně přesahuje základní učivo. Zejména v rozšiřujících textech ve formě Boxů jsou uvedeny nadstavbové informace, které mohou sloužit pro hlubší pochopení problematiky lesnické pedologie a výživy lesních dřevin, nebo být použitelným podkladem při zpracování závěrečných prací na Ústavu geologie a pedologie.

Z důvodu značného rozsahu text nebyl doplněn o jinak bohatou grafickou složku (fotografie půdních profilů, lesních porostů, schémata apod.), jejíž uplatnění je zamýšleno pro připravovanou monografii Základy lesnického půdoznalství a hnojení a výživy lesních dřevin (Vavříček, Kučera), vydávanou v roce 2015.

Text neprošel jazykovou úpravou a v současnosti neobsahuje dlouhý seznam použité literatury, který bude dále aktualizován.

Čtenáři však mohou své případné dotazy a připomínky směřovat na autory

doc. Dr. Ing. Dušan Vavříček (dusvav@mendelu.cz)

ing. Aleš Kučera, Ph.D. (xkucera1@mendelu.cz)

1 PŮDA V LESNÍM POJETÍ: ÚVOD DO PROBLEMATIKY LESNICKÉ PEDOLOGIE

1.1 Základní pojmy

Na tomto místě jsou uvedeny základní pojmy, které tvoří nejširší tematický rámec tohoto učebního textu, a které jsou často používány v různých textech v odlišném pojetí. Z těchto důvodů autoři přikládají jejich definování zvláštní význam.

Půda je útvar, který je výsledkem rozpadu matečného materiálu a rozličných přeměn, probíhajících pod vlivem různě kombinovaných atmosférických, biologických a mechanických faktorů v průběhu času.

Pedologický slovník půdu definuje jako produkt rozpadu, přeměny a uspořádání svrchních vrstev zemské kůry, který podléhá vlivu organismů, atmosféry a změn na daném místě.

Jde tedy o komplexní a dynamické prostředí, které vzniká pod vlivem externích faktorů (litosféra, hydrosféra, atmosféra, biosféra) a interních faktorů (vlastní půdotvorné procesy). Půdní vlastnosti podléhají progresivnímu vývoji pod vlivem kombinací těchto faktorů: dílem účinku klimatu a pionýrské vegetace dochází k rozkládání matečné horniny a vznikající organická hmota se mísí s minerální složkou půdy a mění se v humus a ve výsledku v kyselinu uhličitou, vodu, amoniak a nitráty. Minerální a organické látky mohou být přemístěny srážkovou a bočně prosakující půdní vodou. Tím v půdním profilu dojde k vývoji jednotlivých vrstev (horizontů), které se od sebe liší texturou, strukturou a barvou a dalšími vlastnostmi.

Půdu lze také popsat jako soubor horizontů v přírodním útvaru, který se vyvinul z povrchových zvětralin zemské kůry a organických zbytků. Jednotlivé složky (minerální podíl, voda, půdní vzduch, organické látky – živé i mrtvé organizmy) se vyskytují v různých poměrech, což podmiňuje pestré třídění a zastoupení půd.

Půda vzniká a vyvíjí se vzájemným působením půdotvorných činitelů v půdotvorném prostředí během určitého času. Je jednou ze základních složek ekosystému jako součást tzv. geobiocenózy (Buček & Lacina, 2002).

Pedologie je věda, která studuje utváření, vlastnosti, vývoj a prostorovou organizaci půdy. Pedologie vnímá půdu jako komplexní a dynamické prostředí. V rámci pedologie se časem vyvinula řada dílčích oborů, jako např. půdní genetika (řeší vznik a vývoj půd), půdní systematika (řeší klasifikaci a taxonomii půd), půdní ekologie (řeší stanovištní podmínky ve vztahu k rostlinám a živočichům), půdní mikromorfologie (řeší půdní procesy a formaci půdy na mikroskopické úrovni), paleopedologie (řeší půdy, které se vyvíjely v minulých geologických érách, v podmínkách odlišných od těch současných) aj.

Pedogeneze je soubor fyzikálních, chemických a biologických procesů, které vedou k formaci půdy jako výsledku přeměny a následného vývoje půdotvorného materiálu.

Půdní horizont je horizontálně situovaná půdní vrstva na zemském povrchu, která je texturně, strukturně, barevně apod. jednotná a která vykazuje specifické vlastnosti oproti jiným vrstvám dané půdy.

Půdní profil (v jistém slova smyslu zvaný také *solum*) je vertikální řez půdou, vedený od půdního povrchu směrem k půdotvornému substrátu (pokud to podmínky umožňují). Zobrazuje vývoj diferenciačních (rozlišovacích) pedogenetických horizontů a umožňuje pozorovat morfologické detaily a přesný odběr půdních vzorků za účelem laboratorních analýz. Půdní profil také představuje schéma, vyobrazující rozmístění půdních vlastností v rámci hloubky půdy podle textury, obsahu organické hmoty, hydromorfních znaků apod.

Matečná hornina je soudržná nebo narušená hornina, na které probíhá pedogeneze a ze které vzniká půdní materiál. Může vznikat jako výsledek formace zemského povrchu ve smyslu transportu zvětralého materiálu (koluvia, aluvia a jiné nánosy) nebo může být výsledkem geologických procesů spojených s formací zemské kůry. Tato specifikace matečné horniny může být nepřesně pochopena,

neboť matečná hornina v užším slova smyslu je často zaměňována s termínem substrát v případě, že vlastní půdotvorný materiál není přímo spojen s půdním materiálem. Tento terminologický konflikt lze vyřešit pojmem podložní hornina.

Za **lesní stanoviště** lze považovat výsek zemského povrchu s lesním porostem, který je charakteristický jistou homogenitou souboru fyzických (podložní hornina, klima, topografie) a biologických (porostní typ, skladba rostlinného společenstva) charakteristik.

1.2 Funkce půdy v lesním prostředí

V širším slova smyslu půda představuje faktor, podílející se tvorbě obrazu krajiny se všemi jejími součástmi (lesní, zemědělské, urbánní půdy). Tak jako na řadu dalších environmentálních složek, i na půdu lze nahlížet v holistickém nebo antropocentrickém pojetí. V prvním případě půda představuje složku životního prostředí, kde probíhají půdotvorné procesy, a která umožňuje růst vyšších rostlin. V antropocentrickém pojetí půda účelově představuje nástroj rostlinné produkce, a to jak ve smyslu lesnickém tak také zemědělském nebo arboristickém. V posledních letech se antropocentrický náhled na půdu výrazně mění: ve smyslu nejen rostlinné produkce, ale také ve smyslu vědomí potřeby zachování trvalé kvality půdy a možnosti jejího dlouhodobého využívání a její ochrany.

V každém ekosystému, ať se jedná o sady, zahrady, zemědělské půdy, lesní porosty apod., půda hraje pět klíčových rolí (Brady, Weil 2002): (1) Půda ukotvuje kořeny rostlin a dodává živiny nezbytné pro jejich růst. Půdní vlastnosti určují charakter vegetace a nepřímo také počet a druhové složení živočichů (včetně člověka), které jsou rostliny schopné uživit. (2) Půdní vlastnosti jsou základním faktorem ovlivňujícím osud vody v hydrologických systémech. Koloběh vody, její využití, kontaminace a čištění jsou půdou významně ovlivněny. (3) Půda jako recyklační systém. V půdě je asimilováno velké množství různých produktů, částí rostlinných a živočišných těl a jejich základní stavební prvky jsou recyklovány a zpřístupněny následným živým organizmům. (4) Půda představuje životní prostředí pro nespočet živých organismů, počínaje drobnými obratlovci nebo členovci až po mikroskopické organizmy s enormní druhovou pestrostí. (5) V antropogenně podmíněných ekosystémech hraje půda významnou roli coby „technický prostředek“ ve stavebnictví nebo dopravě.

Z pohledu lesních ekosystémů půda představuje substrát, který umožňuje zakořenění vyšších rostlin. Jako taková zaujímá klíčovou roli v existenci lesních porostů a tím zajištění života na zemi ve formě, jak ji známe dnes. Tato funkce je podmíněna schopností půdy poskytovat substrát zajišťující trvalou (dlouhodobou) stabilitu rostlin a trvale (dlouhodobě) poskytovat dostatečné množství živin a vláhy. Faktor dlouhodobosti vymezuje lesní půdy (lesní ekosystémy) vůči jiným typům systémů. Zatímco např. v zemědělském pojetí je funkčnost půdy zajištěna a podmíněna agrotechnickým zásahy, které přizpůsobují půdní vlastnosti pěstovaným kulturám (úprava obsahu živin, textury, hydrofyzikálních vlastností apod.) kalkulujícími s obmýtím zpravidla jeden až dva roky, lesní půdy jsou podmíněny existencí dlouhověkých porostů. V pojetí lesnické pedologie je tedy nutné respektovat ekologické nároky dřevin a jejich pěstění v ekologicky optimálních podmínkách, neboť samotné technické zásahy do půdy jsou z dlouhodobého hlediska nežádoucí ve srovnání s potřebou nalézt optimální dřevinnou skladbu, která odpovídá charakteru stanoviště.

2 VZNIK A VÝVOJ PŮDY

Půda vzniká jako průnik dílčích zemských sfér. Těmito sférami se budeme v různých formách a na různých úrovních zabývat s cílem poznat míru a efekt jejich účinku a význam pro vznik a vývoj půdy. Atmosféra, jako plynný obal Země obsahující kyslík, oxid uhličitý, vodní páry a další složky, který zasahuje do půdního prostředí v podobě půdního vzduchu, je zmíněna zejména v kapitolách 2.3.4 a 5.1. Litosféra, jako zvětralinový obal, poskytující půdě základní matici a v převážné většině půd tvoří objemově i hmotnostně nejvýznamnější podíl půdy, je zmíněna v kapitolách 2.1.1, 2.3.1 a 3. Hydrosférou coby vodním obalem Země, který si představujeme zejména v podobě vodních ploch, srážek, sněhu a ledu, nicméně pro vznik a vývoj půd je zcela nepostradatelný, v pedologickém pojetí zmiňujeme v kapitolách 2.3.3 a 4. Biosférou zahrnující živé organizmy ve všech jejich formách, které zároveň výrazně ovlivňují své prostředí, s nímž jsou v těsné interakci, se zabýváme v kapitolách 2.1.4, 2.3.2 a 8. Antroposféře, kterou lze začlenit jako součást biosféry, nicméně svými účinky na půdní prostředí je tak specifická, že je vhodné zabývat se tímto tématem samostatně, věnujeme kapitolu 2.1.4, a zejména celou kapitolu 15. Pedosféra tak vzniká za spoluúčinku dílčích sfér, které působí různou mírou, což vytváří specifické podmínky pro vznik a vývoj půd. Už proto jsou také půdy tak variabilní ve svých vlastnostech, znacích a probíhajících procesech.

2.1 Půdotvorné faktory

Půda je složitý přírodní útvar, který vzniká za spolupůsobení více faktorů, kterými jsou matečná hornina, klima, organizmy, reliéf terénu, čas a lidská činnost. Protože v jednotlivé faktory působí vždy v různé intenzitě a různým způsobem, lze se setkat na každém místě a v každém čase se zcela ojedinělým půdním tělesem, se zcela ojedinělými půdními vlastnostmi a specifickým vývojem. V každém případě však prvních pět vyjmenovaných faktorů musí být alespoň v minimální míře zastoupeno, aby se mohla půda vyvíjet s tím, že vývoj půdy je podmíněn právě faktorem, který je nejméně zastoupen, neboť právě tento vytváří limitující podmínky pro pedogenezi. Vývoj půdy však nemusí nutně znamenat zvyšování kvality půdních vlastností. Vývoj půdy může být buď **progresivní**, který představuje soubor vývojových fází půdy vedoucí k rovnováze jednotlivých půdních procesů a k dlouhodobě neměnnému stavu půdy (ačkoli pojetí neměnnosti je z pohledu geologického věku Země v podstatě vždy zkreslující). Progresivní vývoj znamená vývoj půdních horizontů – horizontu organického, organo-minerálního, minerálních horizontů a popřípadě jejich přechody. **Regresivní** a **degradační** vývoj je často podmíněn náhlými změnami v ekosystému, jako například zhroucení klimaxového stádia, náhlý úbytek vegetace, lidský zásah do ekosystému, sesuvy půdy apod., který je možné obecně nazývat *perturbace*. Jejím následkem bývá náhlý úbytek organické hmoty, odnos půdních částic nebo i destrukce svrchních částí půdy a návrat vývoje do některého z předcházejících vývojových stádií. Zde pak začíná nový vývoj, zpravidla odlišný od původního, neboť probíhá za pozměněných klimatických podmínek, za přítomnosti jiných rostlinných a živočišných společenstev nebo v jiných topografických podmínkách.

Půdotvorné faktory lze rozdělit na pasivní (matečná hornina) a aktivní (klima, topografie, organizmy, čas).

2.1.1 Matečná hornina

Od charakteru matečné horniny (Viz také kapitolu 2.3.1 a kapitolu 3.1) se odvíjejí celé pedogenetické řady, typické pro konkrétní chemismus, fyzikální vlastnosti nebo způsob zvětrávání: na spraších se vyvíjejí půdy černozemního typu, ty mohou na odvápněných spraších (sprašových hlínách) přecházet v hnědozemě nebo luvizemě; na karbonátových půdách se vyvíjejí rendziny a pararendziny, na kyselých horninách kambizemě, které přecházejí v podzolové půdy apod.

Matečná hornina také ovlivňuje primární chemismus půdy a zásobu živin, vodní a vzdušný režim v půdě, zrnitost a skeletnatost půdy.

Podle původu matečné horniny lze půdy primárně rozdělit na (1) **reziduální** – vzniklé v místě zvětrávání horniny, (2) **transportované**, na kterých vzniká půda coby na nepůvodním materiálu – lakustrinní (z jezerních sedimentů), aluviální (z říčních sedimentů), marinní (z mořských sedimentů), koluviální (výsledek gravitační sedimentace), glaciální (z ledovcových sedimentů) a eolické (naváté) a (3) **organické** – kde půda vzniká na základě hromadění biomasy. K těmto základním třem skupinám půd lze také přidat půdy (4) **antropické**, vzniklé jako důsledek lidské činnosti. V tomto kontextu se jedná o půdy vrstvených stavebních, skrývkových, těžebních materiálů apod., o půdy s homogenizovaným půdním profilem a podobně. Problematika antropických půd však není předmětem lesnické pedologie a tento text se jimi nebude zvlášť zabývat.

V podmínkách střední Evropy se většina půd vyvíjí na materiálu, který již podstoupil nějaký transport, což plyne už z toho, že na zemském povrchu jsou usazené horniny nejrozsáhlejší (60 %) – v rámci České republiky zastoupené zejména Karpatech ve srovnání s Českým masívem – (přeměněné 25 %, vyvěřelé 15 %) s tím, že převážná část půd se vyvíjí na svahovinách a materiálech půdotoků (*soliflukce*), typických v České republice zejména pro Západní Karpaty.

2.1.2 Klima

Klima náleží k faktorům s velmi významným vlivem, a to zejména proto, že na charakteru klimatu závisí charakter a intenzita zvětrávání hornin. Klima jako faktor se projevuje zejména dvěma činiteli, a to vodou (vzdušná, půdní vlhkost a podobně) a teplotou.

V rámci klimatu se lze často setkat s půdami, které se vyvíjejí v těsné vazbě na zeměpisnou šířku, bez závislosti na charakteru matečné horniny, ale výhradně v závislosti na klimatu. Takto se formují tzv. *zonální půdy*, které jsou specifické pro celé zeměpisné pásy. Na severní polokouli, směrem od severu na jih, se tak lze setkat s pásem tundry, pásem podzolových půd, šedozemí a degradovaných černozemí, černozemí a hnědozemí stepních oblastí.

Klima se podílí ve smyslu třech vlivů:

- **vliv na činnost živé složky půdy.** Živá složka půdy (půdní edafon) zaujímá významnou roli v látkových tocích v ekosystému, ovlivňuje mineralizaci a humifikaci organické hmoty a tedy i vývoj humusu v půdě.
- **vliv na teplotní a vodní režim** půdy. Klima se mění jak se zeměpisnou šířkou, tak také s nadmořskou výškou, kdy s rostoucí nadmořskou výškou obecně klesá teplota podle tzv. vertikálních teplotních gradientů (Rožnovský & Havlíček, 2000), kdy podle např. nasyceně adiabatického gradientu teplota klesne o 0,6°C na 100 výškových metrů, a zvyšují se srážkové úhrny, které vzrostou přibližně o 60 mm na 100 výškových metrů.
- **vliv na rychlost chemických reakcí.** Obecně platí, že v chladnějším klimatu probíhají chemické procesy pomaleji a tím je pozvolnější i půdní geneze. Se vzrůstem teplot o 10°C se rychlost biochemických reakcí více než zdvojnásobí.

Z hlediska potřeb lesnické pedologie vymezit několik klimatických typů, a to **podnebí suché, aridní**, které vyjadřuje klimatické podmínky umožňující vysoký výpar, zatímco atmosférické srážky jsou neúměrně nižší. Hranice aridity, neboli suchosti klimatu lze vyjádřit pomocí Langova dešťového faktoru, a to vzorcem $f=(R/t_r)$, kde R je průměrný roční srážkový úhrn v mm a t_r je průměrná roční teplota. Pro vymezení hranice sucha v ČR je použito hodnoty 70 podle Langova dešťového faktoru. Opakem aridního podnebí je **podnebí vlhké, humidní**, které je typické nadbytkem vody oproti výparu, případně výparu a infiltraci. V oblastech humidního klimatu se tvoří vodní toky a trvalé říční sítě. Charakter půdotvorné procesy je na klimatických typech těsně závislý. V humidním klimatu jsou chemické i biochemické reakce, stejně jako zvětrávání či transport látek v profilu výrazně rychlejší. Humidní klima také favorizuje rozvoj vegetace stromovitěho vzrůstu, zatímco v klimatu subhumidním nebo semiaridním se vyvíjí zejména travní vegetace nebo vegetace keřovitěho vzrůstu. Dalším typem je **klima půdní**, které vyjadřuje dlouhodobý režim fyzikálních vlastností půdy. Závisí na obsahu půdního vzduchu, půdní vody, organických látek, fyzikálních vlastnostech půdní hmoty,

ale i na vlivu přízemní vrstvy atmosféry nebo vegetace. Půdní klima je dáno hlavními klimatogenetickými procesy, a to radiační, energetickou a vodní bilancí. Půdní klima je řazené k tzv. **mikroklimatu**. Závislost půdní geneze na reliéfu (expozice, sklon, tvar terénu) vyjadřuje **mezoklima** a vývoj genetických půdních druhů je dán **makroklimatem**.

Jedním z klíčových faktorů zvětrávání hornin je voda. S rostoucí hloubkou, kterou proniká voda do regolitu, roste také zvětrávací vrstva půdy. Voda, která má možnost perkolovat půdním profilem, se navíc podílí nejen na zvětrávání hornin, ale také na transportu pohyblivých půdních složek zejména do větších hloubek půdy. Pokud by ostatní faktory, jako teplotní režim, matečná hornina, topografie a čas byly neměnné, rostoucí roční srážkové úhrny obecně vedou k vyššímu obsahu jílů a organické hmoty v půdě, vyšší aciditě a nižšímu poměru Si/Al (jako projevu větší intenzity zvětrávání).

Obecně se lze s méně vyvinutými půdami setkat v suchém klimatu, kde se voda coby médium pro chemické reakce, faktor pro zvětrávání hornin nemůže podílet na půdní genezi či na spolutvorbě životního prostředí pro půdní organizmy. Zároveň však neplatí absolutní přímá úměra obsahu vody v půdě a intenzity biochemických reakcí: od určité míry se voda stává naopak limitním faktorem pro biologickou aktivitu a dekompoziční procesy, které nabývají jiného charakteru, než v půdách s vyrovnaným vodním režimem. Příkladem mohou být organozemě (rašelinné půdy) se zcela specifickým vodním režimem i vývojem půdy. Problematiku půdní vody je tak třeba posuzovat v kontextu jejího poměru k půdnímu vzduchu, což dohromady tvoří tzv. vodní/vzdušný režim půdy.

Druhým faktorem v rámci působení klimatu je teplota, která ovlivňuje vývoj půd dvojitým způsobem:

- vlivem na rychlost a způsob zvětrávání hornin: rychlé v teplém klimatu, pozvolné v chladném klimatu. Půdy tropických oblastí tak bývají na velmi hlubokých zvětralinách, půdy ve vyšších nadmořských výškách a vysokých hodnot zeměpisných šířek bývají mělké, kamenité, často chudé na půdní materiál;
- vlivem na rychlost dekompozice (rozkladu) organické hmoty: v chladném klimatu dochází více k jejímu hromadění, zatímco v teplém klimatu se organická hmota rychle rozkládá.

2.1.3 Topografie

Topografie nebo také reliéf terénu nebo také geomorfologie je faktorem představujícím specifika v rámci daného klimatu nebo dané matečné horniny. Reliéf terénu může spoluutvářet podmínky mezoklimatu, podílet se na mocnosti půdních horizontů, na dekompozičních procesech nebo na intenzitě zvětrávacích procesů. Hovoří o tvarech a konfiguraci zemského povrchu, které popisuje ve smyslu příklonění svahů ke světové straně (**expozice**), sklonů svahů (**inklinace**), **terénních tvarů** a **nadmořské výšky**. Expozice ovlivňuje teplotní a vlhkostní režim stanoviště, ale také skeletnatost půdy. Obecně jsou svahy se západní expozicí více skeletnaté než svahy s východní expozicí. Sklon svahu ovlivňuje množství vody proudící půdním tělesem, kdy na prudších svazích se k srážkové vodě přidává také voda laterální. Její množství v půdním profilu je minimální v rovinatém terénu a na vrcholech svahů, zatímco nejvíce jí proudí půdou nad bází svahu, kde se k srážkové vodě, která dopadne v daném místě, přidává také voda vsakující do půdy v místech položených v rámci jednoho svahu výše. Tvar terénu může být konvexní (pahorek, kupa, vrch, hora, velehora, štít, hřeben a hřbet), konkávní (kotlina, brázda, brána, úval), přímý nebo zvlněný.

Z pohledu geomorfologie je zemský povrch klasifikován podle Tab. 2—1.

Tab. 2—1: Geomorfologická klasifikace zemského povrchu z pohledu nadmořské výšky.

nadmořská výška	geomorfologická klasifikace
do 200 m n. m.	nížiny
200 - 500 m n. m.	pahorkatiny
500 - 1000 m n. m.	vrchoviny
1000 - 1400 m n. m.	hornatiny
nad 1400 m n. m.	velehory

Topografie terénu ovlivňuje významně charakter matečné horniny, ale také vegetaci. Rostliny náročnější na půdní vlhkost budou lépe prosperovat v terénních sníženinách, zatímco rostlinám náročnějším na dostatečný přísun světla budou více vyhovovat vrcholy svahů. V terénních depresích se také lze setkat s teplotní inverzí, slabším prouděním vzduchu, vyšší vzdušnou vlhkostí, ale i akumulací organické hmoty nebo různých minerálních sedimentů.

2.1.4 Organizmy

Půda je ovlivňována různou měrou a různým způsobem všemi organizmy, a to přímo i nepřímo. Dřeviny zprostředkovávají koloběh látek v ekosystému zejména přes opad, který je navíc pro většinu dřevin specifický. Obecně je opad listnáčů kvalitnější a během dekompozice se z něj uvolňuje více živin, zatímco opad většiny jehličnanů je kyselejší, méně bohatý na živiny a pomaleji se rozkládá. Bylinná a travní vegetace se podílí na tvorbě humusu a na charakteru hydrotermálního režimu půdy. Kořeny rostlin půdu chrání proti erozi, čímž také zpomalují pohyb minerálních částic. Zároveň podporují zvětrávání, a to jak mechanickým narušováním hornin, tak působením kořenových exsudátů, urychlujících rozpouštění minerálů.

Od skladby vegetace se také odvíjí charakter dekompozice. Zatímco travní společenstva jsou typická akumulací stabilních organických látek ve svrchních vrstvách půdy, v lesních společenstvech jsou koloběhy látek intenzivnější, lesní humus je méně stabilní a kyselejší a organická hmota se vyskytuje více ve formě nerozloženého opadu na půdním povrchu.

Výsledky posledních studií ukazují, že zejména rostliny stromovitého vzrůstu v přirozených lesních ekosystémech mají pro pedogenezi větší význam, než jaký jim dosavadní teorie přisuzovaly. Zejména tzv. vývratová dynamika zapříčiňuje vlivem vyvracení kořenů a vyzvedávání spodních půdních horizontů promíchávání půdního profilu, který je tak de-facto v neustálém dlouhodobém procesu přeměny s délkou cyklu v řádu stovek až tisíců let (Šamonil 2014, Šamonil et al. 2014). Stejně tak půdotvorný faktor času (viz kap. 2.1.5) v tom případě v jistém slova smyslu není až tak významným, neboť půdy mohou být značně vyvinuté (vyvinutý půdní profil s velkým množstvím půdních horizontů jako např. podzoly) navzory relativně nízkému stáří ve smyslu absolutního počtu let.

Půdní živočichové ovlivňují půdu jednak formou evidentní, jako je hloubení nor a zemních děr nebo hromadění různého materiálu na půdním povrchu (liška, králík myšice apod.), jednak formou méně patrnou promícháváním půdy a zapracováváním organické hmoty hlouběji do půdy (žížaly, mravenci a další drobní živočichové). Svým pohybem v půdě také ovlivňují vodní a vzdušný režim půdy.

O co nenápadnější, o to významnější skupinou půdních organizmů jsou mikroorganizmy. Zejména při půdním povrchu se v půdě vyskytují v enormních počtech (řádově ve stovkách až tisících druhů na gram půdy) a jsou zodpovědné za většinu biochemických reakcí, za enzymatickou aktivitu půdy i za látkové koloběhy.

Specifickým organizmem ovlivňujícím nejrazantněji půdní prostředí je člověk, jehož vliv je buď přímý – kultivací půdy, odlesněním s erozními dopady, urbanizací krajiny –, nebo nepřímý – skrz úpravu dřevinné skladby lesních porostů, imisní vlivy, eutrofizaci apod. Člověk představuje nejrazantnější faktor, který zejména za rozkvětu industriální éry, ale de-facto již s rozvojem

zemědělství, výrazně ovlivnil půdní prostředí v lokálním i globálním měřítku. Problematika lidské činnosti v kontextu lesních půd bude probrána v kapitole 15.

2.1.5 Čas

Doba (délka) půdotvorného procesu při konstantnosti ostatních půdotvorných faktorů se může projevit na ochuzení nebo obohacení půdy o nejrůznější složky. Stáří půdy je tak faktor, který může zapříčinit, že za nezměněných ostatních podmínek se můžeme setkat s docela odlišnými půdními tělesy, a to jenom z důvodu delšího času, po který se půda vyvíjela. Například na jednom půdotvorném substrátu, kterým původně mohla být spraš, se z černozemě vyvine šedozem, z šedozemě hnědozem, z té luvizem a z té pseudoglej. Nebo na kyselých vulkanických horninách se z litozemí vyvíjí rankery, z těch kambizemě rankerové, dále kambizemě, kambizemě dystrické, kryptopodzoly a ve výsledku podzoly. Tyto pedogenetické řady (samozřejmě zde uvedené ve velmi zjednodušeném schématu) jsou závislé pouze na čase jako faktoru, za jehož „působení“ dochází k vývoji půdního profilu.

S časem se půdy stávají hlubší, stávají se také mocnější půdní horizonty a jejich počet se zvyšuje. Na jedné straně vývojové řady tak stojí *iniciální*, nevyvinuté, půdy o jediném horizontu opadu, pod nímž začíná přímo matečná hornina a na druhé straně se lze setkat s komplikovanými půdními profily i o šesti a více půdních horizontech.

Z hlediska času se půdy dělí na **recentní**, které vznikly a vyvíjejí se v současných klimatických podmínkách holocénu (posledních 10 až 12 tis. let), **reliktní**, které vznikly zpravidla ve starších geologických obdobích. Kritériem pro zařazení půdy mezi reliktní však není věk v konstantním pojetí. Reliktní půdy mohou být i relativně mladé, ale vznikly za jiných vývojových podmínek, než současných, např. za aridního klimatu, kdy probíhaly odlišné půdotvorné procesy než za klimatu humidního.

Třetím typem jsou půdy **fosilní** nebo také paleosoly. Tyto půdy také vznikaly za podmínek odlišných oproti současným (zejména klima a vegetace). Jsou zpravidla překryté mladšími uloženinami holocénu (spraše, sprašové a jiné hlíny), což také přispělo k ukončení jejich vývoje a zakonzervování v takové stavu, že si uchovaly své vlastnosti.

2.2 Základní procesy formace půdního tělesa

V kapitolách 2.1.1 až 2.1.5 jsme si popsali *izolovaně* vliv jednotlivých půdotvorných faktorů, díky kterým půda nabývá své specifické vlastnosti. Podstatné však je, že tyto faktory působí současně, v různé intenzitě a v různé formě. Tyto faktory lze doplnit ještě o specifické vlastnosti prostředí, jako je hladina podzemní vody, způsob využívání krajiny aj.

Ať se na vzniku půdy podílí kterýkoli z výše uvedených půdotvorných faktorů více či méně, v každém případě je vývoj půdy podmíněn čtyřmi základními půdotvornými procesy. Tyto procesy odlišují půdu od vrstev zvětralin nebo sedimentů, které vznikají a formují se na základě geologických pochodů. Uvedené půdotvorné procesy v půdě probíhají v různé formě a intenzitě, nicméně probíhají *vždy a současně*. Protože však půdotvorné faktory působí vždy specificky, specifické jsou i probíhající půdotvorné procesy. V prostředí lesních ekosystémů, na půdách více méně přirozeně se vyvíjejících, se tak lze setkat s výraznou půdní heterogenitou, podmíněnou jedinečnou kombinací pedogenetických faktorů, která znamená, že prakticky nelze nalézt dvě totožná půdní tělesa.

- **Přeměna** zahrnuje zvětrávání primárních minerálů, rozklad a přeměnu jílových minerálů a sesquioxidů, rozklad organické hmoty, syntézu organických kyselin a humusu.
- **Transport** zahrnuje pohyb organických a anorganických půdních částic s pohybem půdní vody v rámci půdního profilu, a to buď vertikálně – sestupným nebo vzestupným směrem, nebo laterálně – horizontálním směrem.

- **Obohacení** představuje přínos látek do půdy (půdního profilu) z externího zdroje. Příkladem pro lesní půdy může být opad lesních dřevin a přísun organické hmoty na půdní povrch, nebo také sedimentace eolického materiálu nebo říčních sedimentů v lužních oblastech, ale také obohacení půdy o soli rozpuštěné v podzemní vodě a kapilárním vztlakem vynesené na půdní povrch.
- **Ztráta:** k odnosu materiálu dochází např. vymýváním půdní vodou, vodní a větrnou erozí, výparem transpirací rostlin. Tak může dojít ke ztrátám vody, živin, organické hmoty, jílu, prachu apod. Ztráty v lesních jsou také zapříčiněné těžbou a odvozem dřevní hmoty a pálením těžebních zbytků.

Čtyři uvedené půdotvorné procesy představují nejširší rámec vlastní půdní geneze. Ta pochopitelně probíhá ve formě tzv. diferenčních půdotvorných procesů, které budou probírány v kapitole 6.1.

2.2.1 Zvětrávací půdotvorný proces

Půda tvoří svrchní část litosféry, která podléhá intenzivním zvětrávacím procesům. Zvětrávání znamená pochody, které vedou k rozpadu horniny přírodními faktory nebo činností člověka. Hlavními činiteli zvětrávání jsou teplota, sluneční záření, činnost vody a vegetace (organizmů obecně), působení chemických látek (rozpuštění nebo obohacování o minerály). Podle hlavního zvětrávacího faktoru se zvětrávání dělí na několik typů:

- **Fyzikální (mechanické) zvětrávání** představuje mechanický rozpad hornin na menší části vlivem teplotních změn, roztažných účinků ledu nebo rostoucích kořenů. Při fyzikálním zvětrávání se nemění chemická podstata horniny. Dochází ke změnám v napětí ve vnitřních a vnějších vrstvách horniny a když toto napětí překročí pevnost horniny, dojde k tvorbě puklin a následnému rozpadu. Při **zmrznutí vody** např. dochází k objemovým změnám až o 9 %, což má za následek zvyšování všesměrného tlaku. Zároveň se zvyšujícím se tlakem okolní horniny na vodu se snižuje teplotní hranice, při níž se voda mění v led. Voda tak začíná zamrzat nejprve na povrchu horniny, kterou tak účinně roztahuje a dosud nezmrzlá voda se dostává pod všesměrný tlak. Jak pokračuje mrznutí vody do hloubky horniny, v trhlině se stále zvyšuje tlak zamrzající vody a je třeba stále nižší teploty pro zamrznutí zbylé vody. Tímto způsobem vznikají ve značné hloubce horniny velké síly působící roztahování jednotlivých horninových bloků. Trhací účinek vody je důležitým faktorem zejména v humidním klimatu v horských oblastech, kdy denní teploty oscilují kolem bodu mrazu. Vedle krystalů vody působí roztažným účinkem také další minerály, např. **soli krystalizující v trhlinách**, v pórech atd., když vodou nasycené horniny vysychají. Účinnou solí je např. síran vápenatý (sádrovec). Mechanický rozpad působí také **teplotní změny**, zejména na půdním povrchu s největšími teplotními výkyvy. Horniny jsou špatným tepelným vodičem a jsou-li např. horniny během dne zahřáty, vyvíjí se výrazný teplotní gradient, zejména u větších horninových bloků. Důsledkem je vznik horninového napětí a tvorba puklin, často zasahujících hluboko do horniny. Tento účinek je zesílen u polyminerálních hornin, kde jednotlivé součástky (minerály) mají různou tepelnou roztažnost. Tento typ zvětrávání probíhá zejména v pouštích a polopouštích, kde jsou velké rozdíly v teplotách mezi dnem a nocí.
- **Chemické zvětrávání** znamená rozpouštění horniny vlivem agresivních roztoků, kyselin nebo zásad. Chemické zvětrávání neznámá rozpad v pravém slova smyslu, ale spíše změnu, neboť při chemickém zvětrávání dochází k přeměně primárních minerálů na sekundární. V problematice pedologie je významné povrchové zvětrávání, které závisí na klimatu, době působení roztoků, hloubce podzemní vody a chemické odolnosti horniny. Při povrchovém zvětrávání jsou hlavními faktory kyslík, srážková voda, oxid uhličitý a organické a další kyseliny. Hloubka chemického zvětrávání závisí také na dlouhodobosti podmínek a jejich intenzitě. V podmínkách mírného klimatu tato hloubka zpravidla nepřesahuje jednotky metrů, zatímco např. v aridním klimatu, jakkoli je chemické zvětrávání málo intenzivní, jsou zvětralinové vrstvy značně hluboké, neboť proces zvětrávání nebyl

přerušen dobou ledovou. V tropickém klimatu jsou zase zvětraliny hluboké jednak z důvodu dlouhodobosti zvětrávacího procesu, jednak z důvodu značné intenzity působení zvětrávacích účinků.

- Dále lze samostatně vymezit **biologické zvětrávání**, které působí zpravidla buď mechanicky (např. pronikání kořenů do mezer v hornině) nebo chemicky (působení kořenových exsudátů nebo extracelulárních enzymů půdních organismů). Účast různých organismů na zvětrávání hornin je výrazně podmíněna klimatickými poměry. Ve vlhkém tropickém klimatu se vegetace uplatňuje na zvětrávání hojně, zatímco v aridních oblastech, chudých na vegetaci je biologické zvětrávání nevýznamné. Vyšší rostliny podporují mechanické rozrušování hornin tlakem kořenů, organické kyseliny působí chemické narušení skalního podkladu atd.

Zvětrávacími procesy dochází k uvolňování makroelementů a mikroelementů do půdy (zejména P, K, Ca, Mg, S, Fe, B, Mo, Mn, Cu a Zn). Jejich množství a vzájemný poměr závisí na mineralogickém složení matečné horniny, na její odolnosti vůči zvětrávání i na daných zvětrávacích podmínkách (zejména klimatických).

2.3 Půdní složky

Půda je trojfázový systém, který sestává z pevné, kapalné a plynné složky. Tyto fáze jsou v půdě zastoupeny v různých poměrech, na kterých do značné míry závisí vývoj půdy a probíhající půdotvorné procesy.

Pevná fáze (cca 45-55 %) sestává z minerálního a organického podílu půdy. Minerální podíl představuje minerální částice různé velikosti, různé formy i různého uspořádání. Obecně se dělí na jíl, prach písek a skelet – částice nad 2 mm (hrubý písek, štěrk, kameny). Organický podíl je složen z živých organismů (rostlin, živočichů, hub, mikroorganismů, nebuněčných atd.) a dále z odumřelých organických zbytků a přeměněné (dekomponované a resyntetizované) organické hmoty zvané humusové látky.

Kapalná fáze (cca 20-30 %) představuje půdní roztok obsahující ionty, organické molekuly, soli a další chemické sloučeniny. Kapalná fáze je do značné míry fixována na pevnou půdní fázi, v rámci jejíhož uspořádání vyplňuje póry a podílí se tak na tvorbě souvislejší půdní hmoty.

Plynná fáze (cca 20-30 %) je složena z plynů (kyslík, dusík, oxid uhličitý apod.) a vodní páry. Zabírá půdní mezery, které nejsou vyplněné vodou. Mezi půdním vzduchem a přízemní vrstvou troposféry probíhá nepřetržitá látková výměna, nicméně složením se půdní vzduch od nadzemního liší.

Půdní součásti lze také členit (1) anorganickou složku (kameny, štěrk, písek, prach, jílové částice apod.), organickou složku (humus, surovou organickou hmotu, edafon), půdní vodu a půdní vzduch.

2.3.1 Anorganická složka

Je podstatnou částí půdní hmoty, tvořící podíl 93-99 %. Minerální podíl představuje polydisprezní systém skládající se z velkého souboru částic různé velikosti, různého petrografického a mineralogického složení. Z minerálů jsou to především hlavní horninotvorné minerály – silikáty (živce, slídy, pyroxeny, amfiboly, jílové minerály atd.), oxidy křemíku (zejména křemen), oxidy železa, karbonáty. Půda se formuje z různých hornin nacházejících se v povrchových vrstvách zemské kůry. Horniny se skládají z nerostů a mohou mít buď fádni (monominerální horniny) nebo pestré složení, které má bezprostřední vliv na chemické vlastnosti půd i na jejich další vlastnosti odvozené od charakteru zvětrávání (vodní a vzdušný režim, sléhavost, zrnitost apod.). Zemská kůra se vyznačuje nevyváženým složením co do zastoupení jednotlivých prvků. Z 92 přirozeně se vyskytujících prvků je jich pouze 8 tzv. makroelementů, s podílem vyšším jak 1 % (Tab. 2–2).

Tab. 2—2: Procentické zastoupení hlavních horninotvorných prvků v zemské kůře.

prvek	O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	ostatní
%	46,6	27,7	8,1	5,0	3,7	2,8	2,6	2,1	>2

První čtyři prvky (O, Si, Al a Fe) tvoří tzv. kostru půdy. Při porovnání přehledu z Tab. 2—2 s potřebou prvků suchozemské vegetace (Tab. 2—3) jsou však patrné výrazné odlišnosti.

Tab. 2—3: Škálování potřeby 16 nezbytných makro- a mikroelementů suchozemskou vegetací (platí obecně pro většinu rostlinných druhů).

C > O > H > N > P > K > Ca > Mg > S > Fe > B > Mo > Cl > Mn > Cu > Zn

První tři (C, O, H) rostliny přijímají z atmosféry prostřednictvím vody a CO₂, zatímco ze zbývajících 13 prvků jsou pouze 4 zastoupené v množství větším jak 1 %. Z toho plyne, že téměř 90 % zemské kůry je tvořeno prvky, které z fyziologického hlediska nejsou prvořadě. Z makrobioelementů, které se uvolňují z hornin (resp. nerostů), jsou nejvýznamnější Ca, Mg, K a P.

Výskyt prvků v nerostech

Vápník	kalcit, apatit, dolomit, granát, magnezit, amfibol
Hořčík	olivín, dolomit, serpentiny, chlorit, biotit
Draslík	leucit, ortoklas, sanidin, biotit, nefelín
Fosfor	apatit, vivianit

Podle obsahu živin v půdě lze horniny rozdělit do skupin podle tzv. minerální síly. Podstatný není jen celkový obsah živin, ale i harmonický poměr v zastoupení prvků. Pro pěstování rostlin není příznivější půda ta, která má vysoký obsah některého z uvedených prvků (např. Ca nebo Mg) a nedostatek jiných (např. K nebo P), ale ta, která má množství prvků vyvážené (více viz v kapitole 13 a 14).

V klimatických podmínkách mírného pásu (resp. střední Evropy) jsou půdy děleny dle minerální síly na:

- **Minerálně velmi bohaté půdy** - jsou to půdy bohatě zásobené živinami, vyskytující se zejména na melafyrech, čedičích a jejich tufech, na slínech, na slinitých vápencích.
- **Minerálně bohaté** - jsou zastoupeny např. na spraších na jemných nivních uloženinách, vápenitých pískovcích, písčitých slínech, vápencích a dolomitech.
- **Minerálně středně silné půdy** - vyskytují se obvykle na žulách, rulách, pískovcích, jílovitých břidlicích, sprašových hlínách.
- **Minerálně slabé půdy** - vyskytují se zejména na pískovcích, vátých píscích, svorech.
- **Minerálně chudé půdy** - vyskytují se převážně na křemencích, křemenných štěrcích, křemenných vátých píscích.

Minerální sílu matečné horniny lze hodnotit podle kritérií uvedených v Tab. 2—4.

Tab. 2—4: Klasifikace minerální síly matečné horniny podle obsahu hlavních prvků. Obsah jednotlivých prvků je zjišťován totálním rozбором v kyselině fosforečné. Upraveno podle Stejskala et al. (1968), Vavříček nepublikováno.

hodnocení obsahu	K [mg·kg ⁻¹]		Mg [mg·kg ⁻¹]		P [mg·kg ⁻¹]		Ca [mg·kg ⁻¹]	
	K ₂ O	prvek	MgO	prvek	P ₂ O ₅	prvek	CaO	prvek
nedostatečný	< 5900	< 5000	< 3500	< 2100	< 600	< 250	< 2900	< 2100
velmi nízký	5900-8800	5000-7500	3500-7100	2100-4200	600-1200	250-500	2900-5800	2100-4100
nízký	8800-17600	7500-14500	7100-17700	4200-10500	1200-2100	500-900	5800-14900	4100-10600
střední	17600-29300	14500-24000	17700-35500	10500-21000	2100-2900	900-1300	14900-28900	10600-20500
dobrý	29300-43900	24000-36000	35500-65900	21000-39500	2900-4400	1300-1900	28900-53700	20500-38200
velmi dobrý	43900-58500	36000-50000	65900-106400	39500-64000	4400-7500	1900-3300	53700-86800	38200-61600
nadbytečný	> 58000	> 50000	> 106400	> 64000	> 7500	> 3300	> 86800	> 61600

Na tvorbě půd se více než z 80 % podílejí usazené horniny, které vyplňují sníženiny a kotliny. Vyvrělé se podílejí z cca 13 % a přeměněné z cca 7 %, zejména ve vyšších polohách.

Protože nejvíce vulkanitů je na území ČR zastoupeno granitoidními horninami a nejvíce přeměněných rulami, matečné horniny půd jsou zpravidla kyselé až neutrální, v nichž převládají silikáty nad křemenem. V sedimentárních horninách naopak převažuje křemen, zatímco podíl silikátů je nižší. Sedimentární horniny jsou dle způsobu vzniku a původu materiálu členěny do čtyř hlavních skupin, a to mechanické (úlomkovité), chemické, biogenní (organogenní) a smíšené (více viz v kapitole 3.1).

2.3.2 Organická složka

Organická složka představuje důležitou komponentu půdního tělesa a spolu s anorganickou složkou tvoří pevnou půdní hmotu. Zahrnuje jednak (1) živou složku (půdní organizmy – edafon), která se rozděluje do říše rostlin, živočichů a hub, jednak (2) neživou složku (půdní organická hmota), zastoupenou odumřelými organizmy nebo jejich částmi (humusotvorný materiál) a produkty nebo meziprodukty transformace organických zbytků (humus). Ač je v půdě hmotnostně i objemově velmi nevýznamně zastoupená, významně ovlivňuje složení půdy, půdní vlastnosti a půdní úrodnost.

Tab. 2—5: Orientační hodnoty produkce organických zbytků (obsah organické hmoty v nejsvrchnější části půdy včetně „opadu“) ve vybraných suchozemských ekosystémech (pro celkovou hodnotu je ještě třeba přičíst také odumřelý zooedafon a fytoedafon).

Typ suchozemského ekosystému	t·ha ⁻¹
Obecně na půdní povrch	3-5
Lužní les	6
Smrkový les	5-7
Okopaniny	1
Obiloviny	3,5
Travní porosty	15

Přibližné složení organické hmoty a vyjádření poměru uhlíku : dusíku (C:N)

C = 45 %, O = 42 %, H = 6,5 %, N = 1,5 %, popel = 5 %; poměr C:N = 45 : 1,5 = 30

Počet sloučenin, které se vyskytují v organických zbytcích, je rozmanitý a značný. Nejdůležitějšími a nejrozšířenějšími sloučeninami jsou cukry, jednoduché organické kyseliny, pryskyřice, tuky, vosky, třísloviny, celulóza, hemicelulózy, lignin, organické dusíkaté látky, popeloviny.

Cukry a jednoduché organické kyseliny lze charakterizovat jako látky rozpustné ve vodě s rychlým rozkladem (mikrobiálním, chemickým a fyzikálním). Za aerobních podmínek se rozkládají na CO₂, H₂O, v anaerobních podmínkách dochází ke kvašení, rozkladu na organické kyseliny, alkoholy, CO₂ a H₂O.

Pryskyřice, tuky, vosky, třísloviny jsou rozpustné v organických rozpouštědlech, těžko rozložitelné chemickou cestou, obtížně mikrobiálně. Tuky jsou oxidovány a probíhá hydrolytický proces (enzymy lipázy).

Celulóza a hemicelulóza jsou dominující složkou, zdrojem energie pro edafon. Snadný mikrobiální rozklad za přítomnosti příslušných enzymů – celuláz (za aerobních podmínek se rozkládají na CO_2 a H_2O , za anaerobních podmínek při rozkladu vznikají – organické kyseliny, alkoholy, H_2 , CH_4).

Lignin je hlavní součástí dřevní hmoty, odolává rozkladné činnosti mikroorganismů, tvoří komplexy s celulózou, za optimální teploty z něj při rozkladu vznikají látky humusové povahy.

Organické dusíkaté látky jsou tvořeny z 1/3 bílkovinami, ze 2/3 nukleoproteiny, nukleovými kyselinami. Rozkladem se mění dusíkaté látky přístupné rostlinám (amoniace); amoniak je využíván mikroflórou na biosyntézu.

Popeloviny tvoří minerální látky, vyskytují se do 10 % sušiny v rostlinách.

Organické látky se liší podle rozložitelnosti, a to v pořadí: cukry > jednoduché proteiny > bílkoviny > hemicelulózy > celulóza > tuky > vosky > lignin.

2.3.3 Kapalná složka lesních půd

Voda do půdy vstupuje primárně jako atmosférické srážky a dále ve formě spodní nebo laterální (mající původ v bočním vsaku) vody. Voda je v půdě jako (1) sorpční – vázaná s koloidy, kdy ztrácí vlastnosti rozpouštědla; (2) kapilární, kdy nepodléhá vlivu zemské tíže a může se půdou pohybovat všemi směry; a (3) gravitační, kdy zaujímá největší póry a protéká volně půdním profilem ve směru působení gravitace (více o této problematice viz v kapitole 4 Voda v půdě).

Voda v půdě představuje velmi pohyblivou a aktivní složku, která působí, není-li vázána na povrchy koloidů, jako velmi účinné rozpouštědlo. Účastní se na koloběhu látek, výživě rostlin, biochemických, chemických a fyzikálně-chemických reakcích.

V půdě je voda přítomna ve formě půdního roztoku. Ve vodě jsou rozpuštěné jednak plyny (O_2 , CO_2 , NH_3 , oxidy N a S apod.), jednak minerály. Rozpuštěné minerální látky pocházejí jednak ze zvětrávacích procesů, kdy se z hornin uvolňují do půdního roztoku, jednak z nadzemní části lesních porostů, a to emisí nebo prostupem přes koruny stromů. Tzv. pročešáváním mlhy do půdy vstoupí až 50-250 kg minerálních látek na hektar za rok. Tím dochází k výraznému obohacení půdního povrchu nejen s rostlinným opadem, ale i se srážkovou vodou – např. Ca, Mg, K, P, N. Tyto prvky v půdě reagují s pevnou fází, dále se rozpouštějí nebo srážejí, zatímco voda může přecházet do dalších fyzikálních stavů. Složení vody závisí na rozpouštění minerálů a organických sloučenin, na výměně iontů mezi sorpčním komplexem a půdním roztokem a na reakci půdního roztoku, kořenového vlášení a půdních mikroorganismů. Ve vodě jsou rozpuštěny minerální (kyseliny, zásady, soli) a organické (koloidy rozpouštěných sloučenin, cukry, fulvokyseliny, aminokyseliny) látky.

půdní roztok lesních půd:

minerální látky	:	organické látky
1	:	5-15

Koncentrace solí dosahuje v kyselých půdách 0,2 % ($2\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), v neutrálních až mírně alkalických půdách do 0,6 % ($6\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), v zasolených půdách > 0,6 %.

Ke kvantitativnímu i kvalitativnímu šetření půdního roztoku lze využít **lyzimetry**. Je to zařízení, které je instalováno v půdě a jímá půdní roztok do nádob – buď jako gravitační vodu (také nazývané průsakové sběrače nebo gravitační lyzimetry), nebo s využitím podtlaku (tzv. podtlakové tenzometry). V případě lyzimetrů je půda hydrologicky izolována jako kontejner od okolní země buď oříznutím půdy do formy monolitu, nebo jako sypaný, a do lyzimetry tak přichází voda z plochy o známé výměře, což lze využít např. pro přepočítání vsaku na 1 ha. V případě průsakových sběračů jsou zařízení zapravena do půdy pod příslušný horizont bez porušení půdní struktury a bez izolace půdy od okolní zeminy.

Pomocí lyzimetrů lze zjišťovat hydrologickou bilanci půdního profilu, evapotranspiraci, ale i půdní chemismus, kontaminaci půdy, účinek rostlinného krytu nebo různých půdních vlastností, s využitím pro modelování hydrických, růstových podmínek aj.

Ke zjišťování vlastností půdního roztoku se používají také **iontoměniče**.

Lze si pod nimi představit „granulky“, které mají schopnost poutat ve svém vnitřním povrchu ionty. Iontoměniče jsou tedy syntetického původu (kostra vzniká syntézou polymeru styrenu s divinylbenzenem – DVB) a mají funkční výměnné (ionogenní) skupiny. Funkční skupina je tvořena dvěma částmi: fixovaným iontem, který je pevně vázán na kostru iontoměniče a párovým iontem, který je poután k fixovanému iontu s možností výměny za ekvivalentní množství jiných iontů stejného typu náboje. Podle charakteru funkčních skupin se iontoměniče dělí na anxy se zásaditými funkčními skupinami, které vyměňují anionty a katexy s kyselými funkčními skupinami, které vyměňují kationty.

Iontoměniče se umísťují do půdy na do předem stanovené hloubky a na předem stanovenou inkubační dobu. Po jejím uběhnutí dojde k iontové výměně na iontoměničích za ionty obsažené v půdním roztoku, který „omývá“ iontoměniče umístěné v iontoměničových sondách.

Obě metody slouží ke zjišťování vlastností půdního roztoku in situ, tedy v přírodních podmínkách, což je nespornou výhodou, neboť odběrem, transportem, skladováním a zpracováním na půdní vzorky působí řada vlivů, které mohou výrazně pozměnit sledované parametry.

Významnou roli při vstupu vody do půdy hraje nadložní humus. Ten výrazně ovlivňuje vodní režim i chemismus půdního roztoku. Při pH 3,5-5 (podzoly, pseudogleje, luvizemě) je koncentrace minerálních látek 1-2 g/l, při pH 5,5-8 (černoze, rendzina) je koncentrace minerálních látek 2-4 g·l⁻¹.

Se srážkami se také do půdy dostávají imisní sloučeniny, transportované často na značné vzdálenosti (až stovky km), které se vsakem vody do půdy vstupují do chemických reakcí a ovlivňují půdní chemismus. Mezi lety 1955 a 1972 tak v řadě oblastí, zejména okrajových pohoří, pH pokleslo i o více než 1 s tím (z 5,7 na 4,5) s tím, že normální pH srážek je 5,6 (viz také kapitulu 15.1.1.2).

2.3.4 Plyná složka lesních půd

Půdní plyny (viz také kapitulu 5) představují v podstatě atmosférický vzduch, který je pozměněný oproti původnímu složení. Mezi půdou a atmosférou probíhá výměna plynů, přesto jsou obě prostředí ve složení vzduchu odlišná. Půdní vzduch obsahuje méně O₂ a více CO₂, což plyne z intenzivní biologické aktivity (zejména dýchání) a pomalejšího pohybu vzduchu v půdním prostředí. Z půdního vzduchu je neaktivnější plyn kyslík O₂. Povrchové vrstvy obsahují cca 18-20 % O₂, avšak obsah kyslíku se liší v závislosti na konkrétních půdních typech. Výměna vzduchu mezi půdou a ovzduším je zhoršená zejména v zamokřených a podmáčených půdách, kde obsah kyslíku může klesnout až na 1 %. O nedostatku kyslíku v půdě hovoříme při jeho obsahu 8-10, zejména pak pod 5 %. S hloubkou půdy obsah O₂ klesá a pomaleji stoupá koncentrace CO₂ a zároveň je obtížnější (pomalejší) výměna plynů s ovzduším.

Při nedostatečném provzdušnění dochází k redukci Fe a Mn sloučenin a k anaerobnímu rozkladu organických látek, který doprovázejí hnilobné procesy.

Kyslík je v půdě spotřebováván (a) při dýchání kořenů; (b) při dýchání mikrobů; (c) při biochemických a chemických reakcích; (d) oxidací minerálních a organických sloučenin. Množství O₂ 3-5 mg·l⁻¹ představuje optimum pro kořeny většiny terestrických rostlin. 0,2-1 mg·l⁻¹ O₂ představuje mírnou anaerobiózu a pod při koncentraci <0,2 nastává absolutní anaerobióza.

Oxid uhličitý (CO₂) je ve vzduchu obsažen cca v 10x vyšší koncentraci než v ovzduší (0,3 %). Je produkovan při rozkladné činnosti organických látek, kde CO₂ je jedním z konečných výstupů, při

dýchání kořenů, při dýchání mikroorganismů. CO_2 se podílí na změnách v půdní reakci a na zvětrávacích procesech v půdě. Nejvyšší koncentrace CO_2 je v půdě na jaře a na podzim (max. 17 %); glejové půdy s rašelinným procesem mohou obsahovat až 5,7 % CO_2 , vysoké koncentrace jsou také na ulehých půdách a pod mulčovací kůrou. Koncentrace vyšší než 1 % je už pro řadu rostlin toxická. Při zvýšení koncentrace CO_2 dochází k produkci HCO_3^- a tím k zakyselení. To vede k rozpouštění do té doby stabilních látek, ovlivňuje se také sorpce živin, O_2 i NH_3 .

Dusík (N) je v půdě zastoupen cca ze 78 %. Při denitrifikaci se jeho množství může navýšit až na 80-82 %, při nitrifikaci se naopak jeho spotřeba snižuje.

Podíl **vodních par** se v půdě blíží 100 %.

Ostatní plyny, jako SO_2 , metan nebo amoniak jsou v půdě v nepatrném zastoupení.

Největší množství vzduchu, které je půda schopná pojmout, odpovídá hodnotě půdní pórovitosti. Nejmenší naopak hodnotě minimální vzdušné kapacity, což znamená obsah vzduchu v nekapilárních pórech za předpokladu, že voda je po většinu času pouze v kapilárách.

Provzdušněnost půdy jako spolutvůrce fyziologického prostředí

optimální provzdušnění	15-25 %
malé až nedostatečné provzdušnění	5-10 %
patologicky nízké provzdušnění	5-6 %

Hranice fyziologické provzdušněnosti půdy je okolo 5 %.

Na provzdušnění půdy má vliv celá řada vnějších faktorů, jako je zhutňování půdního povrchu a tím znesnadňování výměny plynů a jejich vstupu do půdy (v rekreačních lesích, v půdách pastvin, po pojezdu lesní techniky transportu a těžby dřeva). Provzdušnění (výměnu plynů) zlepšují oxidační procesy v půdě, aktivita půdní mikroflóry a dýchání kořenů.

3 MINERÁLNÍ PODÍL PŮDY, KOLOIDNÍ SYSTÉM

Velikost, poměrové zastoupení fragmentů různé velikosti obsažených v půdě a jejich složení úzce souvisí s charakterem matečné horniny, jejím chemismem a charakterem zvětrávání. Minerální půdní složka se vyznačuje svým abiotickým, anorganickým původem a je výsledkem rozpadu matečné horniny – jejího zvětrávání nebo sedimentace v deponiu v případě alochtonních půdotvorných substrátů.

3.1 Půda a matečná hornina

Horniny se často vyznačují pestrým mineralogickým složením a tím také chemismem. Ten má bezprostřední vliv jednak na skladbu zemské kůry, jednak také na chemické složení půd. Minerální podíl se formuje z různých hornin nacházejících se v povrchových vrstvách zemské kůry. Z 92 přirozeně se vyskytujících prvků je jich pouze 8 s podílem vyšším než 1 %.

Minerální podíl půdy představuje polydisperzní systém skládající se z velkého souboru částic různé velikosti a různého petrografického a mineralogického složení. Z minerálů to jsou především živce, křemen, slídy, jílové minerály, amfiboly, augity a karbonáty. Mineralogické složení hornin a obsah živin udává tzv. **minerální sílu**. Pro minerální sílu a trofnost lesního stanoviště však není podstatný jen celkový obsah živin, ale také jejich harmonický poměr v zastoupení prvků. V klimatických podmínkách mírného pásu (střední Evropy) lze půdy rozdělit podle minerálního složení na:

- Minerálně velmi bohaté půdy, dobře zásobené živinami, vznikající zejména na melafyrech, čedičích a jejich tufech, slínech a slinitých vápencích;
- Minerálně bohaté půdy, vyvíjející se zejména na spraších, na jemných nivních uloženinách, vápnitých pískovcích, písčitých slínech, vápencích a dolomitech;
- Minerálně středně bohaté půdy, vyvíjející se obvykle na žulách rulách, pískovcích, jílovitých břidlicích, sprašových hlínách;
- Minerálně slabé půdy vyvíjející se zejména na pískovcích, vátých písčích a svorech;
- Minerálně chudé půdy na křemencích, křemenných štěrcích, křemenných vátých písčích.

Na tvorbě půdy se z více než 80 % podílejí usazené horniny, které vyplňují nížiny a kotliny. Vyvřelé horniny se podílejí z cca 13 %, přeměněné z cca 7 %, zpravidla ve vyšších polohách. Ve vyvřelých horninách jsou dominantní složkou silikáty (zastoupeny z cca 80 %), méně křemen; zatímco v sedimentech je křemen hlavním minerálem (jako tvrdý, chemicky odolný a obtížně zvětratelný), zatímco podíl silikátů je nižší.

Z hlediska geneze půdotvorného substrátu je vhodné horniny dělit dle jejich vzniku a mineralogického složení.

Vyvřelé horniny (vulkanity) se dle způsobu (resp. místa) vzniku dělí na hlubinné, výlevné a žilné, z hlediska chemismu dělí na kyselé (obsah $\text{SiO}_2 > 65\%$, obsah křemene $> 20\%$), neutrální (obsah SiO_2 52-65 %, obsah křemene $< 20\%$), bazické (obsah SiO_2 44-52 %, více méně bezkřemenné) a ultrabazické (obsah $\text{SiO}_2 < 44\%$, neobsahují křemen).

Usazené horniny (sedimenty) se podle způsobu vzniku a složení dělí na

1. Mechanické – úlomkovité, klastické, které vznikly mechanickým a chemickým rozkladem starších hornin (vyvřelých, přeměněných nebo sedimentárních); dělí se na (A) podle stupně diagenese na zpevněné a nezpevněné; (B) podle velikosti úlomků na psefity (úlomky převážně $> 2\text{ mm}$), psamity (úlomky převážně 0,05-2 mm), aleurity (úlomky převážně 0,01-0,05 mm) a pelity (úlomky převážně $< 0,01\text{ mm}$);
2. Chemické, které vznikly sedimentací minerálních látek rozpuštěných ve vodách po předchozím vysrážení. Hlavním činitelem je vyluhování vodorozpustných látek z hornin, jejich přemisťování a sedimentace – srážení a ztráta vody;

3. Biogenní (organogenní), které se skládají z biogenních a organických látek, s výrazným podílem biogenní složky, např. rašeliny. Zpravidla se zformovaly rovněž za účasti vody;
4. Smíšené, které vznikly promísením sedimentárního materiálů různého původu.

Charakteristickým znakem sedimentů je vrstevnatost, velmi pestré mineralogické a chemické složení, různorodost ve velikosti a tvaru úlomků. Podle velikosti mechanických úlomků mohou sedimenty mít psefitickou, psamitickou, aleuritickou a pelitickou strukturu.

Nejrozšířenějším sedimentem jsou **spraše**. Obsahují vysoký podíl prachových částic (45-60 %) a CaCO_3 , tedy karbonáty, které se mohou z půdy vyluhovat, popř. vysrážet v půdním profilu ve formě cicvárů, výkvětů, nodulí, kongrecí apod. Mineralogicky spraše obsahují zejména křemen a živce. Spraše chudé na CaCO_3 se nazývají **sprašové hlíny**. Příznivé fyzikální a chemické vlastnosti spraší vytvářejí předpoklady pro vznik úrodných půd, jako jsou černozemě a hnědozemě.

Na rozsáhlých plochách terénech vznikají zvětřováním pevných horniny zvětřaliny různých mocností zvané **eluvialní hlíny**. Jejich složení odpovídá charakteru původní horniny.

Deluvialní (svahové) hlíny vznikly odnosem zvětřalého materiálu po svahu. Svahoviny mají různou zrnitost i mineralogické a chemické složení, v závislosti na výchozím materiálu, délce transportu a vytržení sedimentu v akumulární části terénu.

Aluvialní hlíny se vytvořily v nivách říčních toků. Jejich složení je odvislé od geologicko-petrografické stavby celého povodí nad místem sedimentace, a to i ve značné vzdálenosti zdroje sedimentačního materiálu. Jsou rozšířené v údolních nivách vodních toků.

Obdobně jako *hlinité sedimenty* představují celý soubor hornin i *jíly*, pro které je charakteristický vysoký obsah jílových částic - více jak 50 %, tj. částic menších jak 0,01 mm. Hlavními součástmi jsou různé jílové křemičitany, koloidní kyselina křemičitá a koloidní sloučeniny sesquioxidů, podle klimatických podmínek v době jejich vzniku. Chemické, biogenní a smíšené sedimenty se podle využití třídí na uhličitánová, křemitá, fosforečná, solná a rašelinná ložiska.

Podle převládajících jílových minerálů mohou být jíly kaolinické, montmorillonitické, nontronitické, illitické a allofanické (viz kapitolu 3.3.2).

Přeměněné horniny (metamorfity) primárně rozdělují podle druhu výchozí horniny na ortometamorfity, pochází-li metamorfit z vyvřelé horniny a parametamorfity, pochází-li metamorfit z usazené horniny. Od chemismu výchozí horniny se do značné míry odvíjí chemismus metamorfitu.

3.2 Členění minerální půdní složky

Minerální půdní složka se nejčastěji dělí na skelet s průměrem částic > 2 mm a jemnozem s velikostí částic < 2 mm.

3.2.1 Skelet v půdě

Skelet má v půdě značný význam a každý komplexní popis půdního tělesa by měl obsahovat informaci o skeletnatosti půdy z hlediska jak jeho velikosti, tak i procentického zastoupení, které by se mělo udávat pro jednotlivé frakce skeletu. Se zvyšujícím se podílem skeletu se snižuje vodní kapacita půdy, neboť se také snižuje podíl jemnozemě a organické hmoty. Obsah skeletu by měl být také zohledněn při vyjadřování zásob živin v půdě na plošnou jednotku nebo pro daný půdní horizont. V opačném případě dochází k nadhodnocování údajů o retenční kapacitě půdy nebo o obsahu živin v půdě a v důsledku k chybnému vyčíslení potřeby hnojení apod.

Např. je-li obsah hořčíku $Mg = 80 \text{ mg/kg}$, znamená to obsah Mg v *jemnozemí* půdního vzorku.
Je-li skeletnatost daného horizontu 40 %, obsah jemnozemě je 60 %.

Reálná zásoba hořčíku v půdě je $80 \cdot 0,6 = 48 \text{ mg/kg}$ půdy daného horizontu.

Naopak skelet je významný pro propustnost půdy pro vodu a pro její drénování do spodních vrstev. Vedle hojnosti skeletu je pro pohyb vody půdním profilem významná jeho orientace. Vrstevnatě, rovnoběžně s půdním povrchem, orientovaný skelet přispívá k pomalejšímu průchodu vody půdou, zatímco nepravidelně orientovaný skelet např. v důsledku svahových pohybů přispívá k vyšší propustnosti půdy.

Textura a skeletnatost patří ke stabilním půdním vlastnostem, které se v čase jen pozvolna mění. Vlivem zvětrávacích procesů se v případě normálně probíhající eroze podíl jemnozemě a jemnější frakce skeletu zvyšuje. V případě změny podmínek ve smyslu zvýšení intenzity eroze však může dojít v krátké době k výraznému poměrnému navýšení skeletu.

Tab. 3—1: Klasifikace půdního skeletu na základě jeho (a) velikosti; (b) hojnosti v půdním profilu resp. v půdním horizontu (FAO, 2006).

Klasifikace velikosti frakcí skeletu		Klasifikace obsahu skeletu	
2-6 mm	hrubý písek	0 %	bez skeletu
6-20 mm	drobný štěrč	0-2 %	velmi nízký obsah skeletu
20-60 mm	střední štěrč	2-5 %	nízký obsah skeletu
60-200 mm	hrubý štěrč	5-15 %	střední obsah skeletu
200-600 mm	kameny	15-40 %	zvýšený obsah skeletu
> 600 mm	balvany	40-80 %	vysoký obsah skeletu
		> 80 %	velmi vysoký obsah skeletu

3.2.2 Mineralogie jemnozemě

Písčité frakce sestává z převážné části z křemenných zrn odolných zvětrávání. Další složkou mohou být živcová zrna nebo karbonátová atd. Písek v půdě přispívá k provzdušnění půdy a její propustnosti pro vodu. Zároveň nemá prakticky žádnou schopnost sorpce pro živiny a má velmi nízkou vododržnost. Písčité zrna také nemají tendenci se agregovat, takže písčité půdy jsou sypké s elementární strukturou (nestrukturní). Protože písčité částice jsou relativně velké, mají naopak malý specifický povrch. Na písčitých půdách se tvoří vysychavé, vysoce provzdušněné půdy, zpravidla živinami chudé, oligotrofní.

Prachová frakce zahrnuje částice, které nejsou okem patrné. V prachové frakci dominují křemenná zrna. Jejich tvar je podobný jako v případě písčitých zrn, avšak na omak působí hladce a jemně. Prachová zrna by neměla být cítit při mnutí mezi prsty.

Prach se vyznačuje menšími póry mezi částicemi a jejich větším podílem. Má také vyšší vododržnost. Prach však příliš nepřispívá k tvorbě půdní struktury a nevytváří strukturní agregáty a nevyznačuje se výraznou plasticitou vlivem přijímání vody nebo stabilitou agregátů. Prachové půdy jsou tak náchylné k erozi. Je-li půdní povrch bez vegetace, je pro něj typická slévavost, tvorba škraloupů a kůr, které plynou z vysoké rozpadavosti půdních částic vlivem deště. Taková situace nastává např. v půdách spraší a sprašových hlín, obecně eolických materiálů, s dominující prachovou frakcí.

Jílovité částice se vyznačují velkým specifickým povrchem, díky kterému mají obrovskou kapacitu absorbovat vodu, ionty a jiné substance. Jíl patří mezi koloidní částice půdy a má také všechny vlastnosti typické po půdní koloidní systém.

3.3 Jílové minerály

3.3.1 Struktura jílových minerálů

Jílové minerály mají původ buď jako produkt zvětvávání primárních minerálů, jako jsou např. živce, slídy, amfiboly, pyroxeny atd., obecně primárních silikátů, nebo z neoformace prostřednictvím hydrolýzy, nebo z transformace jiných jílových minerálů. Jílové minerály patří mezi tzv. fylosilikáty (vyznačují se zpravidla listkovitou strukturou) a jsou složeny ze střídajících se vrstev krystalických struktur tetraedrů nebo oktaedrů. Tetraedry, sestávající ze čtyř atomů kyslíku, které obklopují jeden atom křemíku, představují základní stavební prvek primárních silikátů. Zde tvoří řetězce organizované do vláknitých, dvojrozměrných nebo trojrozměrných struktur. Tetraedrické uspořádání krystalických struktur si sekundární silikáty (zejména jílové minerály) zachovávají.

Krystalické mřížky nejsou rozmístěny v jílových minerálech zpravidla chaoticky, nýbrž tvoří organizované struktury, které podmiňují vlastnosti jednotlivých typů minerálů a jsou také klíčem k jejich klasifikaci.

Tetraedrické struktury sestávají ze dvou vrstev kyslíků, které obklopují atomy křemíku (vždy na jeden atom křemíku připadají čtyři atomy kyslíku). Tyto tetraedrické (čtyřstěnné) struktury pyramidálního tvaru se váží do dlouhých řetězců pomocí volných nábojů kyslíku a vytváří vrstevnaté sítě. Tato řetězitá struktura se vytváří díky tomu, že křemík má oxidační číslo Si^{4+} a kyslík O^{2-} . V takovém případě je v molekule tetraedru celkem osm volných elektronů e^- , které mohou obsadit pouze čtyři kladné náboje, jimiž disponuje křemík. Proto jsou zbylé volné záporné náboje kyslíku spotřebovány na vytvoření vazby se sousedním křemíkem.

Obdobně jsou budovány oktaedrické struktury sestávající z šesti vrcholů obklopujících centrální atom hliníku, hořčíku nebo železa, čímž vznikají osmiboké útvary. Vrcholy jsou obsazeny buď atomy kyslíku, čímž vznikají místa pro navázání dalších centrálních kationtů hořčíku nebo železa, nebo hydroxylovými anionty bez dalších vazeb.

3.3.2 Členění jílových minerálů

Jílové minerály, které vytvářejí výše popsané krystalické struktury, jsou systematizovány podle způsobu organizace vrstev tetraedrů a oktaedrů. Jílové minerály se tak dělí na dvě hlavní skupiny, a to na minerály typu 1:1, kdy se střídá vždy jedna vrstva tetraedrická s jednou vrstvou oktaedrickou, a na minerály typu 2:1, kdy je vždy oktaedrická vrstva umístěna mezi dvěma vrstvami tetraedrů. Tyto vrstvy (dvě v případě jílových minerálů typu 1:1 a tři v případě jílových minerálů 2:1) jsou neoddělitelně spojeny a jsou prokládány mezivrstvami, kam jsou sorbovány kationty nebo voda. Následkem je potom bobtnání jílu při zvyšování jejich vlhkosti. Adsorpce kationtů se odehrává díky procesu zvanému izomorfní substituce, která je popsána v kapitole 11.2.4, viz také BOX 11–4. Výsledkem izomorfní substituce je, že jílové minerály disponují trvale záporným nábojem a mohou tak výměnně poutat (adsorbovat) na svůj vnitřní povrch kationty.

Jílové minerály typu 1:1 zahrnují *kaolinit*, *hallyosit*, *nacrit* a *dickit*. Jedna vrstva kaolinitu obsahuje jednu vrstvu tetraedrů a jednu vrstvu oktaedrů, pak následuje adsorpční mezivrstva. V mezivrstvě kaolinitu jsou vytvořeny pevné vodíkové vazby, což má za následek výrazné snížení jeho vnitřního povrchu (pouze 5-30 m^2/g). Jílové minerály kaolinitového typu nemohou vrstvy oddálit při přijímání vody. Důsledkem tak je jednak nízká nasáklivost kaolinitu, jednak prakticky nulová bobtnavost. Zároveň nízká míra izomorfní substituce má za následek nízký záporný náboj a tím nízkou míru výměnné sorpce.

Bobtnavé jílové minerály typu 2:1 jsou typické jednou vrstvou oktaedru mezi dvěma vrstvami tetraedru. Mezi bobtnavé jíly tohoto krystalického uspořádání patří jílové minerály typu *smektit* a *vermikulit*. Skupina *smektitu* dále zahrnuje *montmorillonit*, *nontronit*, *beidelit* a *saponit*. Vyznačují se velkým specifickým povrchem (550-650 m^2/g) a vysokým negativním nábojem plynoucím z izomorfní substituce (adsorpční kapacita je 20-40 x vyšší než u kaolinitu). Vysoká bobtnavost

znamená na druhou stranu také velkou smrštitelnost při ztrátě vody. Tato vlastnost se projevuje zejména v půdách typu vertisolů, které jsou typické tvorbou hlubokých klínovitých trhlin, do kterých je v procesech střídání vysychání a bobtnání zapracovávána organická hmota za vzniku tirsového půdního horizontu. Skupina *vermikulitu* se vyznačuje větším vnitřním povrchem ($600\text{--}700\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$), ale menší bobtnavostí.

Nebobtnavé silikáty typu 2:1 představují skupinu minerálů zahrnujících jemnozrnné slídy a chlority. Mezi *slídy* této skupiny minerálů se řadí illit a glaukonit. Vrstvy této skupiny minerálů jsou poutány velkými silami, a proto nejsou bobtnavé. Svou kapacitou pro jímání vody a adsorpci kationtů se podobají kaolinitu. *Chlority* jsou skupinou jílu bez bobtnavosti a s nízkou sorpcí pro kationty.

Sorpční schopnosti jílových minerálů	
typ jílového minerálu	KVK [$\text{mmol}\cdot 100\text{g}^{-1}$]
Kaolinit	5-15
Illit	10-40
Motmorillonit	80-150
Vermikulit	100-150
Chlorit	10-40

Nekrystalické jílové minerály zahrnují alofán a imogolit. V jejich případě se netvoří výše popsané krystalické struktury. Makroskopicky se vyznačují masívními, hroznovitými agregáty, na mikroskopické úrovni jsou tvořeny zakřivenými vrstvami hliníkových oktaedrů a křemíkových tetraedrů v různých sekvencích.

3.4 Koloidní systém půdy

Tato kapitola je věnována koloidnímu systému půdy v obecném slova smyslu. Koloidy mohou být původu anorganického i organického, čímž nutně dojde k tematickému přesahu kapitoly 3. Nicméně z hlediska ucelenosti tohoto učebního textu je organická část koloidního systému také předmětem této kapitoly.

Koloidní frakce je reprezentována jílovými a humusovými částicemi půdy a dále nesilikátovými koloidy. Jejich společným znakem je jejich **malý rozměr**, a to $< 0,001\text{ mm}$ (někteří autoři udávají $0,002\text{ mm}$), který jim dává koloidní vlastnosti. Další vlastností koloidu je jeho enormní **vnitřní povrch**. Samotný vnější povrch koloidních částic je několikanásobně větší než např. u částic písku (až 1000 x). Vnitřní povrch je však mnohonásobně větší. Pohybuje se mezi 10 a 800 m^2 , podle typu jílových minerálů, které mají lístkovitou strukturu, čímž se jejich vnitřní povrch ve srovnání s vnějším podstatně zvětšuje. Struktura jílovitých minerálů má charakter spíše knihy, kdy každá stránka představuje specifický vnitřní povrch, který se aktivně účastní na sorpci vody, iontů apod. Lze předpokládat, že celkový vnitřní povrch půdy na ploše 1 ha do hloubky 1,5 m při obsahu jílu 45 % (jemnozrnná půda) může být až 8 700 000 km^2 .

Dalším znakem koloidů je, že více méně trvale disponují kladným, častěji ale záporným **elektrickým nábojem**. Velikost tohoto náboje je závislá na typech koloidů (jílové minerály, oxidy železa a hliníku, humusové látky) a také na vnějších podmínkách prostředí, jako např. pH.

V půdě jsou kationty obsaženy jednak jako výměnně vázané (adsorbované) na koloidech (na jejich vnitřních a vnějších površích) a jednak volně v půdním roztoku. Mezi koncentrací iontů v půdním roztoku a vázaných na koloidech panuje rovnovážný stav. To znamená, že např. pokud je v půdním roztoku dominantně obsažen kationt vodíku H^+ , tento je také dominantně vázán na koloidech. S přísunem (např. vápněním nebo z produktů mineralizace) iontů do půdy nebo s jejich odběrem z půdy (např. odběrem rostlinou nebo ztrátou vyplavením z půdního roztoku) se tak adekvátně vyrovnává koncentrace jednotlivých kationtů v půdním roztoku a na koloidech. Tento proces neustálého pohybu se nazývá kationtová výměna. Probíhá u každého koloidu a je to jeden

z klíčových mechanismů, jakými je půda schopná si uchovat živiny přístupné rostlinám a snížit riziko jejich vyplavení s půdním roztokem při průsaku vody půdou.

Vedle kationtů koloidy také ve velkém množství poutají molekuly vody. Voda vytváří polární molekuly (viz kapitolu 4 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), jejichž kladně orientované póly jsou koloidy přitahovány. V případě, že se jedná o koloid jílového minerálu, tato adsorpce má za následek zvýšení plasticity a bobtnání materiálu. Adsorbovaná voda je rostlinám nepřístupná, protože je poutána silami, které nejsou schopné sací síly kořenů překonat (více viz v kapitole 4.5). Zároveň tato voda představuje významný biotop pro řadu půdních organizmů, zejména bakterií.

Koloidní systém půdy je reprezentován jílovými minerály, oxidy železa a hliníku, a humusovými látkami.

Jílové minerály představují významnou půdní složku s koloidními vlastnostmi. Micela jílového minerálu se navenek jeví jako záporně nabitá částice. Přitahuje kationty a ty jsou výměnně poutány (adsorbovány) na vnitřní povrch v mezivrstvách jílových minerálů, ale také na jejich vnější povrch a také tvoří mrak kationtů neustále vířících v půdním roztoku kolem micely. Krystalické jílové minerály jsou dominantní složkou koloidního systému ve většině půd. Nekrystalické jílové minerály jsou nejčastěji vázané na vulkanické popelé a jsou přítomné zejména v andozemích. Vyznačují se vysokou retencí pro vodu a vysokou adsorpční schopností pro fosfáty a další anionty, zejména v kyselém prostředí.

Oxidy a hydroxidy železa a hliníku jsou skupinou jednoduchých sloučenin železa nebo hliníku s kyslíkem nebo hydroxilovou skupinou a s různým poměrem krystalické vody. Krystalizující oxidy Fe a Al jsou reprezentovány zejména gibbsitem (hydroxid Al) a goethitem (oxid Fe). Minerály této skupiny mají nízkou plasticitu. Jejich náboj může být kladný i záporný. Je způsoben vytěsněním iontu vodíku z oxy-hydroxidové skupiny nebo obohacením této skupiny o vodíkový iont. Nevytvářejí tetraedrické struktury a neobsahují křemík. Na tyto typy koloidů se silně váží anionty, jako jsou fosfáty nebo arzenáty. Z hydroxidů hliníku je nejčastější gibbsit $[\text{Al}(\text{OH})_3]$, z oxy-hydroxidů a oxidů železa goethit (FeOOH), limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), typické pro temperátní zónu a pigmentující půdy do hněda a okrovo-reziva, a hematit (Fe_2O_3), který se tvoří v suchých oblastech a pigmentuje půdy do červená.

Humus představuje nekystalické organické substance skládající se z velkých organických molekul různého chemického složení. Zpravidla vždy však obsahují 40-60 % C, 30-50 % O, 3-7 % H a 1-5 % N. Samotná identifikace struktury humusových koloidů je velmi složitá. Sestávají z komplexních uhlíkových řetězců a kruhových struktur s množstvím chemicky aktivních funkčních –OH skupin (karboxylových, fenolických nebo alkoholových). Náboj humusových koloidů vzniká v závislosti na iontu H^+ , který je buď uvolněn (a vzniká tak disponibilní záporný náboj) nebo přijat (a vzniká tak disponibilní kladný náboj) aktivní –OH skupinou koloidu. Záporný náboj vždy převažuje nad kladným a je mnohonásobně větší než u jílových minerálů. Humusové látky tak jsou neúčinnější koloidy pro fyzikálně-chemickou sorpci a také pro sorpci pro vodu, čemuž přispívá obrovský vnitřní povrch a přítomnost hydrofilních skupin ve struktuře makromolekul. Vedle hydrofilních obsahuje ale také hydrofobní skupiny reprezentované nepolárními organickými složkami. Celkově je problematika humusových látek v půdě velmi složitá a je stále předmětem celé řady studií zaměřených na složení i vlastnosti humusu (viz také kapitolu 7).

4 VODA V PŮDĚ

Za půdní vodu označujeme veškerou vodu obsaženou v půdě v kapalném, plynném i pevném skupenství. V pedologickém slova smyslu se také používá termín *půdní vláh*a. Z lesnického hlediska lze vodu považovat za hlavní produkční faktor, neboť voda je významná nejen pro výživu (médium pro živiny), ale také pro růst a vývoj porostů. Voda v kapalném skupenství v půdě působí svými dispergačními, rozpouštěcími, hydrolytickými a translokačními účinky. Půdní voda je nenahraditelnou pro průběh různých fyzikálních, fyzikálně-chemických, biochemických i biologických procesů v půdě a de-facto podmiňuje vznik půdy a vývoj pedosféry. Bezprostředně půdní voda podmiňuje existenci a životaschopnost půdních organismů a rostlin, neboť je médiem živin i prostředím, ve kterém probíhají biochemické a biologické procesy.

Voda ve smyslu H_2O nepůsobí na své okolí neutrálně. Na molekulární úrovni voda působí jako dipól, kdy na jedné straně molekuly je záporný náboj tvořený jedním atomem kyslíku a na druhé straně je kladný náboj tvořený dvěma atomy vodíku. Dochází tak k vytvoření vodíkové vazby mezi systémy kovalentní vazby (chemická vazba, kterou lze charakterizovat sdílením jednoho nebo více párů elektronů mezi dvěma prvky).

Molekula vody má přirozenou tendenci disociovat – rozpadat se na (OH^-) a (H^+) . Tato ionizace je velmi slabá. V průměru se rozpadá 1 molekula z 10^7 molekul, z čehož ale vyplývá, že např. při zvýšených srážkách v horských oblastech dochází k větší produkci H^+ iontů a jejich vyšším vstupům do půdy, což přispívá k acidifikaci půdy.

BOX 4–1: Vlastnosti vody na molekulární úrovni

BOX

Při hustotě vody $\rho = 1$ platí:

1 kg $H_2O = 1\,l = 1000$ g. Molekulární hmotnost vody je 18,0154 (součet hmotnostních čísel atomů tvořících molekulu vody $2 \times 1,008 + 15,9994$). V 1 l vody je $1\,000/18,0154 = 55,508$ molů H_2O .

Počet částic (molekul) v 1 molu vyjadřuje Avogadrova konstanta (N_A) a její hodnota je $6,0221415 \cdot 10^{23}$. Je-li v 1 kg (1 l) vody 55,508 molů, znamená to $55,508 \cdot 6,0221415 \cdot 10^{23} = 3,34 \cdot 10^{25}$ molekul vody.

Je-li každá 10^7 . molekula disociována (rozdělena na (OH^-) a (H^+) , pak je v 1 l H_2O disociovaných $3,34 \cdot 10^{25}/10^7 = 3,34 \cdot 10^{18}$ molekul, což činí $1\,mm \cdot m^{-2}$.

4.1 Zdroje a ztráty půdní vody

Ve většině oblastí mírného klimatického pásu jsou nejvýznamnějším zdrojem vody **vertikální srážky**. Roční úhrn srážek v ČR je v průměru 550-1800 mm s tím, že větší část připadá na vegetační období. **Horizontální srážky** představují v mnoha oblastech významný zdroj vody (až 700 mm za rok), např. v mlžných lesích tropických oblastí, ale i v horských polohách, kde dochází často k „pročesávání mlhy“. Zejména v období přísušků je vydatným zdrojem vody **rosa**, zejména v hustých zapojených porostech s velkou kondenzační plochou. **Intercepce** představuje vodu zadrženou vegetací a opět odpařenou. Při nízkých srážkových úhrnech (0,5-1 mm) v zapojených porostech voda ani nepříjde do kontaktu s půdou. Intercepce klesá se stoupající intenzitou deště a nabývá nižších hodnot v zimě než v létě.

Zejména v písčitých půdách s vysokým podílem makropórů dochází k intenzivní **kondenzaci půdních par**.

Je-li podzemní voda dostatečně blízko půdnímu povrchu, voda vstupuje do půdy díky **kapilárnímu zdvihu**. Ten představuje výšku vodního sloupce, o jakou voda vystoupá nad souvislou hladinu pozemní vody. Během roku kapilární zdvih kolísá v řádech dm až m. V blízkosti vodních toků, nádrží, rybníků apod. voda vstupuje do půdy horizontálním pohybem jako **boční přítok** (laterální voda).

Půdní voda v pravém slova smyslu představuje půdní roztok, ve kterém jsou rozpuštěné minerální látky a který je životním prostředím většiny půdních organismů. Obsah vody v půdě

(půdní vlhkost) i složení půdního roztoku závisí značně na topografii. Rozpuštěné látky mohou tvořit podíl i 300-800 mg·kg⁻¹, zejména na bázích svahů a v podsvahových deluviích, kde jsou půdy minerálně vlhčí a minerálně bohatší.

Porost o stejné druhové skladbě a věku může dosahovat i o 8-10 stupňů vyšší absolutní výškové bonity při porovnání porostů z bází svahů a jejich vrcholů.

Ke ztrátám vody dochází zejména vsakem, povrchovým odtokem, výparem a přes rostliny. Charakter povrchového odtoku závisí na mnoha faktorech, zejména na sklonu, množství a intenzitě srážek, propustnosti půdy, hloubce promrznutí, vegetačním krytu. Přeschlý půdní povrch se vyznačuje špatnou smáčivostí, zatímco po nasátí vodou se humus chová jako propustný filtr s vysokou hydraulickou vodivostí. Humus se také vyznačuje nižší ztrátovostí vody (vyšší retencí) ve srovnání s minerální půdou. Nadložní humus tak hraje z hlediska vodního režimu klíčovou a nenahraditelnou roli: jednak při vysokých srážkových úhrnech nadložní humus pojme několika násobně více vody než níže ležící minerální horizonty, jednak omezuje ztráty vody z půdy.

V členitém území s prudkými svahy může odtéci až 80 % srážkové vody. Odtok je lesními porosty významně regulován, a to jak v období dešťů (odtok je v porovnání s nelesní půdou nižší), tak v období sucha (odtok je v porovnání s nelesní půdou vyšší).

4.2 Obsah a formy vody v půdě

Voda je v půdě vázána silami různé povahy (chemické, fyzikálně-chemické a fyzikální). Voda je v půdě obsažena v pórech ve formě vodních par (půdní vzduch obsahující vodní páry), nebo v kapalně formě, kdy obsahuje rozpuštěné minerály nebo lehce rozpustné soli (osmotická voda). Mezi jednotlivými formami vody není ostrá hranice. Zpravidla se formy poutání vody v půdě překrývají a často jsou vázány i na specifické půdní horizonty. **Kohezně** je voda poutána jen ve vztahu k jejímu vnitřnímu napětí. **Sorpční** voda je vázána jako kapilární, obalová nebo hygroskopická. Dále je voda v půdě přítomna jako gravitační, která zaplňuje pouze dočasně velké póry, a podzemní.

Jak je patrné z výše uvedeného a jak i dále budeme moci poznat, na vodu v půdě působí celý soubor silových polí. Výslednicí souhrnů sil, které vodu v půdě drží (sorpční, kapilární, pneumatické, gravitační síly), dohromady tvoří **vodní potenciál** nebo také **potenciál půdní vody**, což je síla, jakou je voda v půdě poutána (více viz v kapitole 4.3). Dá se říci, že je to síla, kterou bychom museli vyvinout, abychom vodu z půdy „odsáli“, a proto se také síla poutání vody v půdě nazývá **sací tlak**. A protože je to **sací tlak**, je vyjádřen jako převrácená (záporná) hodnota atmosférického tlaku. Je odvozen tlaku vodního sloupce v cm.

Tlak sloupce 1000 cm = 1 atm = 0,1 MPa
Vodní potenciál je -0,1 MPa

Čím méně obsahuje půda vody, tím většími silami je zbylá voda v půdě poutána a tím těžší je tuto zbylou vodu z půdy odsát. Zároveň čím méně půda obsahuje vody, tím se zvyšuje její vodní potenciál. Půda tak „chce“ při nízké vlhkosti přijímat vodu ze svého okolí silněji, neboť jsou „aktivovány“ větší sací síly. Tuto skutečnost vyjadřuje **sací napětí**.

Okamžitá vlhkost znamená obsah vody v půdě v daném okamžiku. Je to dynamická veličina závislá na aktuálním chodu počastí a stavu půdy. Zpravidla se vyjadřuje jako **hmotnostní vlhkost (w)** v hmotnostních procentech, tedy vlhkost přirozeně vlhkého půdního vzorku ve vztahu k hmotnosti vysušené půdy (veličina používaná pro mechaniku zemin a půdní fyziku) nebo vlhké půdy (veličina používaná pro chemickou analytiku). Vysoušení půdních vzorků probíhá při teplotě 105 °C. Okamžitou vlhkost lze zjistit také pomocí nepřímých metod. Jsou to metody, které neměří přímo obsah vody v půdě, ale vyjadřují jej prostřednictvím jiné veličiny, na které je půdní vlhkost závislá. K tomuto měření se využívá zejména reflektometrů (TDR), které měří čas navrácení vyslaného vysokofrekvenčního elektrického signálu, nebo snímačů půdní vlhkosti jako elektromagnetického

impulzu (měřeného ve voltech) nebo tensiometrů (využívají se zejména pro měření vodního potenciálu).

Okamžitá vlhkost je odrazem nárůstu a ztráty vody v půdě. Vedle hmotnostních procent také lze použít objemová procenta, nebo také mm zásoby vody. Vyjadřuje úbytek vody ze známého objemu půdního vzorku, zpravidla fyzikálního válečku o objemu 100 cm³. Zvlášť v humusových horizontech je významnější faktor objemová vlhkost než hmotnostní vlhkost, neboť humus se vyznačuje výrazným nepochybně objemové hmotnosti a sací schopnosti.

Vyjádření v mm zásoby vody je praktické z hlediska sledování srážkových úhrnů, které se udávají ve stejných jednotkách, a tím schopnosti půdy absorbovat dané množství srážek.

$$1 \text{ mm srážek na } 1\text{m}^2 = 1 \text{ l vody} = 10\,000 \text{ l vody na } 1 \text{ ha}$$

Pro vyjádření obsahu vody v půdě v mm platí vztah, že **vlhkost vyjádřená v objemových procentech (%_{obj.}) je rovna zásobě vody v mm pro 10 cm vrstvu půdy**. Např. je-li objemová vlhkost 21 %_{obj.}, ve vrstvě půdy 0-10 cm je zásoba vody 21 mm (viz také BOX 4—2).

Zásobu využitelné vody (ZVV) lze vyjádřit pomocí analýzy fyzikálního válečku s využitím vztahu

$$ZVV = (W - BV) \cdot 100 / VVK \quad [\%]$$

kde

W je hodnota změřené objemové vlhkosti půdy ve vrstvě 0-10 cm;

BV je bod vadnutí;

VVK je využitelná vodní kapacita (vše v objemových %), stanovená jako rozdíl polní vodní kapacity (retenční vodní kapacity) a bodu vadnutí.

Při monitoringu stavu vody v půdě je objemová vlhkost měřena kontinuálně pomocí terénních půdních vlhkoměrů a porovnává se s BV a Θ_{RVK24} , což jsou hydrolimity (stálé, potenciální hodnoty) stanovované při terénních průzkumech. Θ_{RVK24} pak představuje maximální množství vody (horní mez vodního režimu půdy), které je půda schopna držet vlastními silami v téměř rovnovážném stavu proti působení gravitační síly (klasifikace ZVV viz Tab. 4—1).

Box

Využitelná vodní kapacita (VVK) je odrazem nárůstu a ztráty vody v půdě. Vyjadřuje se v %, ale i v mm zásoby. Při jejím stanovení se vychází z předpokladu, že 1 mm vysoký sloupec vody představuje objem vody 1 l na 1 m². Z hlediska praktického využití tohoto vztahu je podstatné, že objemová procenta zjištěné půdní vlhkosti (%_{obj.}) nebo daného hydrolimitu (zpravidla v rozmezí bodu vadnutí BV a retenční vodní kapacity Θ_{RVK24} , což je stav půdní vlhkosti, kdy je voda v půdě relativně dlouho poutána, ale stále je rostlinám dostupná) vyjadřuje zásobu vody v půdě [mm] pro 10 cm vrstvu půdy. *Např. je-li zjištěná půdní vlhkost 22 %_{obj.}, je ve svrchních 10 cm půdy 22 mm souvislého vodního sloupce.* Tato hodnota se z hlediska distribuce kořenů vyjadřuje pro svrchních 20 cm půdy a zjištěná objemová % půdní vlhkosti se proto násobí 2x. *Hodnota VVK proto bude 2x22 = 44 mm.*

Největší rozmezí BV – Θ_{RVK24} je u hlinitých půd, méně u půd jílovitých a nejméně u písčitých. Vedle texturních charakteristik je třeba při stanovení VVK zohlednit obsah skeletu v půdě, který se na vodní retenci prakticky nepodílí a představuje z hlediska vododržnosti neaktivní složku půdy. V praxi to znamená adekvátně snížit objemové % půdní vlhkosti (resp. VVK) o objemové % zastoupení skeletu v půdě. *Ve výše uvedeném příkladu to znamená, že půda se zastoupením skeletu 50 %_{obj.} má VVK 44/2 = 22 mm; při skeletnatosti 75 %_{obj.} je to 44/4 = 11 mm, při skeletnatosti 10 %_{obj.} je to 44-44/10=39,6 mm apod.*

VVK také vyjadřuje, jaké množství přívalových srážek je půda schopná zachytit. Z tohoto aspektu se jedná o významný údaj o retenci krajiny ve smyslu půdy jako přírodního útvaru, který s velkou efektivitou působí proti rozvodňování toků v důsledku přívalových, ale i dlouhotrvajících srážek. V tomto ohledu hraje půd, a zejména lesní s několikanásobně vyšší VVK ve srovnání se zemědělskými půdami a tím spíše s urbanizovaným územím, nenahraditelnou roli v hospodaření vody v krajině! Při stanovení VVK se stanovuje rozdíl Θ_{RVK24} -BV v případě stanovení dostupné vody rostlinám nebo VVK přímo odpovídá Θ_{RVK24} při stanovení celkového objemu zadržitelné vody.

Klasifikace VVK

dobrá	> 40 mm
dostatečná	20-40 mm
nedostatečná	< 20 mm

Např. je-li u ornice o mocnosti 0-20 cm zásoba VVK 42 mm, je v půdě 21 %_{obj.} přístupné vody. U hlinitých půd je to zpravidla cca 30 %.

Z hlediska zásoby dostupné vody tento příklad znamená, že při průměrné denní evapotranspiraci 3 mm (hodnota pro mírný klimatický pás), zásoba dostupné vody stačí při absenci jiných externích zdrojů vody na 14 dní (42/3).

Hodnoty objemové vlhkosti jsou měřeny kontinuálně, optimálně v intervalu po 15 min, a v ideálním případě jsou odesílány z terénního měřicího zařízení přes satelitní spojení do klimatické databáze. Zjištěné hodnoty ZVV lze vyhodnotit pomocí Tab. 4—1.

Tab. 4—1: Kategorie půdní vlhkosti stanovené jako zásoby využitelné vody (ZVV).

kategorie půdní vlhkosti ZVV	zjištěné hodnoty ZVV [%]
velmi nízká (5)	< 20
nízká (4)	20 – 40
dostatečná (3)	40 – 60
dobrá (2)	60 – 80
vysoká (1)	> 80

Objemová vlhkost udává objemový podíl vody v daném objemu půdy – např. ve fyzikálním válečku. Při stanovení vycházíme ze skutečnosti, že hmotnost 1 ml (1 cm³) vody je 1 g. Objemová vlhkost je potom vyjádřena vztahem

$$V_O = O_V/O_P \quad [\%]$$

kde

O_V je objem vody ve vzorku (rozdíl mezi hmotností čerstvého vzorku a vzorku vysušeného při 105°C);

O_P je objem původního neporušeného vzorku.

Relativní vlhkost udává, do jaké míry jsou půdní póry vyplněny vodou. Na rozdíl od okamžité vlhkosti umožňuje porovnat vlhkosti různých druhů půd, neboť je veličinou relativní.

Podle pohyblivosti vody a jejích přístupnosti pro rostliny je vyvinuta řada klasifikací, kategorizujících míru poutání vody půdou. Síla, jakou je voda v půdě poutána, je ovlivněna řadou faktorů, jako půdní textura, obsah organické hmoty, objemová hmotnost půdy nebo samotná půdní vlhkost.

Relativní vlhkost lze vyjádřit vztahem

$$V_r = V_o/P \cdot 100 \quad [\%]$$

kde

P je pórovitost.

Zásobní vlhkost představuje zásobu vody v půdě vyjádřenou výškou vodního sloupce v hodnocení půdě. Veličina umožňuje porovnání půdní vlhkosti se srážkami a výparem a vyjádří se vztahem

$$V_z = V_o \cdot h \quad [\%] \quad \dots$$

kde

h je mocnost půdní vrstvy v cm.

4.3 Vodní potenciál

Voda je v půdě poutána různě velkou silou. Zároveň ne vždy stejný procentický obsah vody v půdě znamená její stejnou dostupnost. Na vodu v půdě působí *matriční síly*, které jsou podmíněny zvláštnostmi vztahů mezi vodou a pevnou fází půdy. Představují různé adsorpční síly působící mezi pevným povrchem půdních částic a vodními molekulami (van der Waalsovy síly, vazba vodíkovými můstky na kyslíkové ionty pevného povrchu, vazba elektrostatickými silami povrchu, kapilární meniskové síly, síly vyplývající z difuze iontů v elektrické dvojvrstvě atd.). Významný vliv má také gravitace, obsah volných iontů v půdním roztoku, tlakové síly vyplývající z hydrostatického tlaku, atmosférický tlak i tlak uzavřený v půdních pórech. Jsou-li tyto síly vyrovnané, půdní voda je v klidu, avšak většinou se voda v půdě pohybuje ve směru převládajících sil. V tom případě hovoříme o **vodním potenciálu (Ψ)**, neboli energii potřebné k přemístění vody z jednoho silového pole do druhého.

Vodní potenciál vyjadřuje sílu, jakou je voda v půdě poutána, resp. sílu, která je potřebná k jejímu přemístění. Vodní potenciál tedy představuje tlak a vyjadřujeme jej v pascálech. A protože se jedná o sací sílu půdy, vodní potenciál nabývá záporných hodnot (-kPa). V praxi to znamená, že voda se v půdě pohybuje z míst s vyšší vlhkostí (vyššího vodního potenciálu) do míst s nižší vlhkostí (nižšího vodního potenciálu), která vodu do sebe „nasávají“.

Ve vlhké půdě voda obaluje půdní částice (hygroskopická voda), ale také vyplňuje mikropóry a makropóry. Za takového stavu je voda půdou poutána slabě, má velkou volnost ve svém pohybu a v půdě je malý sací tlak (nízký vodní potenciál). Energie půdní vody v takovém stavu je blízká energii vody v nádobě. Jakmile ale půda prosychá, voda z makropórů a mikropórů je odebírána a zbývající voda je stále silněji poutána k půdním částicím. Voda má v takovém případě omezenou volnost pohybu.

BOX 4—3: Jednotkové vztahy mezi veličinami pro vyjádření vodního potenciálu

Vodní potenciál se vyjadřuje v různých jednotkách: výška vodního sloupce v cm, jednotky tlaku (atmosféry, bary, pascaly). V soustavě SI se vodní potenciál vyjadřuje v pascalech (Pa, kPa, MPa). Platí vztah $0,1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar} = 1 \text{ at} = 1020 \text{ cm vodního sloupce}$.

výška vodního sloupce	vodní potenciál	vodní potenciál	pF
cm	milibar	kPa	
0	0	0	-
10,2	-10	-1	1,0
102	-100	-10	2,0
306	-300	-30	2,5
1 020	-1 000	-100	3,0
15 300	-15 000	-1 500	4,2
31 700	-31 000	-3 100	4,5
102 000	-100 000	-10 000	5,0

Vodní potenciál závisí na řadě půdních faktorů. Voda je v půdě silněji poutána se stoupajícím **osmotickým potenciálem**, který je dán množstvím a složením rozpuštěných látek v půdní vodě. Volná energie vody a tím také vodní potenciál se snižují s rostoucím množstvím rozpuštěných látek, např. solí, což je významný faktor v zasolených půdách. **Gravitační potenciál** je významný z hlediska vodního režimu. Závisí na něm, jak vysoko nad souvislou hladinu podzemní vody stoupne půdní voda díky matričnímu potenciálu půdy (vzlínavost kapilárami apod.).

Vodní potenciál také závisí na textuře, na struktuře i na charakteru povrchu půdních částic. Jílovitá půda zadržuje při stejném vodním potenciálu více vody než písčité, neboli stejné množství vody je v jílovité půdě poutáno silnějšími silami nežli v písčité, kde je voda pohyblivější. To se v praxi projevuje např. prosycháním stanovišť vátých písků nebo zamokřeností těžkých jílovitých půd.

Vztah obsahu vody v půdě a vodního potenciálu vyjadřují pF křivky. pF křivky nebo také retenční křivky jsou vyjádřením vodního potenciálu pomocí záporného dekadického logaritmu. Některé hodnoty pF uvádí BOX 4—3.

4.4 Pohyb vody v půdě, vodní režim

Jak již bylo řečeno, voda je v půdě přítomna ve více formách, které lze klasifikovat podle toho, jaké půdní mikroprostředí vodu obsahuje a jaká je tedy energetická bilance.

Zásoby vody na zemi [$\cdot 10^{15} \text{ kg}$]

ledovce	19200
horniny do 4 km hloubky	8350
sladká a slaná jezera	229
půdy	67
řeky, potoky	1,2

zásoby vody v půdě jsou 60x větší než v řekách

Gravitační voda (viz také kapitulu 4.5) je v půdě nejslaběji vázána a vykazuje nejvyšší vodní potenciál (-33 až -10 kPa i více). Pohyb vody je nejčastěji vertikální, ve směru působení gravitace. Tato voda je přítomna pouze v hrubých gravitačních pórech, kterými voda prosakuje půdou. Tato voda se v půdě vyskytuje pouze krátkodobě a s odezněním vstupu vody do půdy se její objem rychle snižuje. **Kapilární voda** je přítomna pouze v kapilárních pórech. Ty jsou typické vzlínáním vody po stěnách kapilár díky vodnímu menisku. Kapilární voda není vázána na zemskou tíži a může se půdou pohybovat všesměrně. Se snižováním vlhkosti se voda souvisle obsazující kapilární a částečně i

nekapilární póry stává nespojitou a méně pohyblivou. Vodní potenciál kapilární vody se pohybuje přibližně mezi -3 100 až -10 kPa. **Adsorpční a hygroskopická voda** je v půdě poutána adsorpčními a osmotickými silami. Zpravidla pouze obaluje půdní částice a hodnoty vodního potenciálu jsou zpravidla nižší než -3 100 kPa.

Pohyb vody v půdě je ovlivněn gradienty vlhkosti a teploty i mineralogickým složením půdy. Při vysoké vlhkosti se voda pohybuje ve směru gravitace. Tento směr perkolace vody je typický pro humidní oblasti (s převažujícími srážkami nad výparem), kde se tento pohyb podílí na eluviaci (vymývání) půdních částic a jejich sestupu do nižších vrstev půdy nebo úplnému vyplavení. To je typické pro tropické oblasti nebo pro horské oblasti mírného pásu. V podmínkách aridního nebo semiaridního klimatu (výpar převládá nad srážkami) je pohyb vody vzestupný, ve směru působení sacího tlaku, který je na prosychajícím půdním povrchu nižší a voda tedy vzlíná půdním profilem. V aridních oblastech s sebou vynáší z podzemní vody rozpuštěné soli, které tvoří vnitropůdní nebo povrchové výkvěty a škraloupky.

Propustnost (permeabilita) půdy pro vodu je podmíněna řadou faktorů. Více propustné jsou hrubozrnné (písčité) půdy, u půd tvořených na smíšených substrátech různých zrnitostí je celková propustnost podmíněna nejméně propustnou vrstvou. Jak bylo naznačeno již v Kapitole 4.1, při propustnosti také rozhoduje počáteční vlhkost a vzduch v půdě. Suché půdy se obtížně zvlhčují, je-li v suché půdě sorbováno velké množství plynů. Půdní částice obalené vzduchem brání vnikání vody, neboť vůči vnikání vody do půdy klade odpor i v půdě obsažený plyn, který voda musí vytlačit. Tato situace nastává např. u nadložního humusu, který se vyznačuje vysokou sorpční kapacitou – jak pro vodu nebo živiny, tak také pro vzduch. Silice, pryskyřice a vosky obsažené v asimilačním aparátu zejména jehličnatých dřevin jsou navíc vodoodpudivé, což dále snižuje smáčivost půdního povrchu. Vsakování se také zlepšuje se zvyšující se teplotou, neboť se snižuje vnitřní tření a tím viskozita půdy.

Box: Infiltrace a permeabilita

Je třeba rozlišovat mezi infiltrací a propustností: **Infiltrace** nebo také vsak znamená proces vstupu vody do půdy, která je nenasyčená vodou. Infiltrace probíhá do té doby, dokud není půda vodou půně nasycena a jedná se tedy o nenasyčené proudění vody.

Nenasycené proudění není v čase konstantní, neboť část pórů je během infiltrace vyplněna vzduchem a neúčastní se proudění, nýbrž se sytí vodou. Rychlost infiltrace závisí na pórovitosti i na poměru kapilárních, semikapilárních a nekapilárních pórů, tedy na textuře a obsahu organické hmoty. **Permeabilita** (také perkolace, propustnost, hydraulická vodivost) vyjadřuje rychlost pohybu vody půdou v sestupném směru. Při tomto procesu jsou půdní póry zaplněné vodou a jedná se tedy o tzv. nasycené proudění vody. Hnací silou nasyceného proudění je gradient vodního potenciálu. V porézním nasyceném prostředí permeabilita vyjadřuje prostřednictvím

Darcyho zákona poměr mezi rychlostí průtoku kapaliny a hydraulickým gradientem, což udává koeficient permeability. Darcy zákon stanovil na modelu proudění vody skrz kolonu s pískem a vyjádřil vztahem

$$V = K \cdot H/L$$

kde

V je rychlost proudění vody (vyjádřena zpravidla v $\text{cm} \cdot \text{hod}^{-1}$);

H je výška vodního sloupce v cm;

L je výška vrstvy písku v koloně;

H/L je výškový rozdíl mezi úrovní hladiny nad vstupem do filtru (kolony) a úrovní hladiny přiléhající k spodní výtokové ploše, dělený délkou (výškou) kolony **L**;

K je koeficient permeability.

Cílem většiny měření infiltrace je dosáhnout nasyceného proudění a tím konstantního toku vody půdou, kdy tzv. kumulativní infiltrace probíhá po přímce a je vyrovnaná.

V terénu používané metody měření infiltrace jsou zejména guelphský permeametr a infiltrační kruhy (jednoduchý kruh, dvojité kruhy) pro zjištění vsaku půdního povrchu.

Vsak do půdy se vyjadřuje koeficientem infiltrace (rychlost postupu vody do půdy. U suchých půd je rychlost infiltrace ve vazbě na texturu následující:

půdní druh	rychlost infiltrace
hrubý písek	$> 1440 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$
písek	$> 200 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$ (i $360 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$)
písčitá hlína	$100\text{--}150 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$
hlína	$50\text{--}100 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$
jílovitá hlína	$10\text{--}50 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$
jíl	$1\text{--}5 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$ (i méně než $0,004 \text{ mm} \cdot \text{hod}^{-1}$)

Laboratorně se permeabilita (retenční křivky) stanoví v podtlakových nebo přetlakových propustoměrech na neporušených vzorcích půdy (více viz např. v Čermák 2012, ČSN CEN ISO/TS 17892-11).

Hodnocení permeability půdy (upraveno podle URL [3]).

Rychlost permeability [$\text{cm} \cdot \text{hod}^{-1}$]	Hodnocení
> 25	velmi rychlá
12,7-25	rychlá
6,4-12,7	středně rychlá
2,0-6,4	střední
0,5-2,0	středně pomalá
0,13-0,5	pomalá
$< 0,13$	velmi pomalá

V lesních půdách se lze u metod zjišťování infiltrace s řadou metodických problémů, zejména z důvodu vysoké heterogenity půdy.

Jak častý skelet, tak kořeny způsobují přítomnost vnitropůdní drenáže a makropórů nebo špatný kontakt přístroje s půdou. Výsledky měření tak bývají značně variabilní a je třeba velký počet opakování měření pro získání dostatečně relevantních dat.

Je-li obsah vody pod mezí hygroskopické vody, voda se půdou pohybuje pouze ve formě páry, z míst vyššího tlaku do místa nižšího tlaku, tedy z míst teplejších do míst chladnějších. V praxi to znamená, že v zimě se voda pohybuje směrem od povrchu do hlubších vrstev půdy a v zimě naopak, z hloubky k povrchu.

Jestliže se obsah vody v půdě pohybuje v rozmezí hygroskopické vody a maximální kapilární kapacity (Θ_{MKK}), pohybuje se voda pod vlivem sorpčních i kapilárních sil. Tímto způsobem je pohyb vody zajištěn především u jílovitých půd, kde se uplatňuje při vyrovnávání vlhkosti v období sucha. Voda nejprve vstupuje do jemnějších kapilár, které mají větší sací tlak.

Je-li vlhkost vyšší než je Θ_{MKK} , pohyb vody probíhá pod vlivem kapilárního vztlínání nebo gravitačních sil. Nejrychleji se voda pohybuje gravitačními póry, nejpomaleji sorpčními silami v kapilárách střední velikosti.

rychlost pohybu vody v kapilárách:

průměr kapiláry [mm]	rychlost pohybu vody
< 0,030 mm	> 5 cm/hod
0,003-0,030 mm	2-5 cm/hod (sací tlak je -0,1 až -0,01 MPa, pF je 3-2)

Suchý vzduch přízemní části atmosféry má schopnost velmi silně odsávat vodu z půdy. Půdní vlhkost pak může klesat i pod číslo hygroskopicity (Vh)!

Ve svažitých polohách humidních oblastí se ke srážkové vodě přidává také tzv. **laterální voda**. Znamená to, že na svahu proudí níže položeným půdním profilem více vody nežli výše položeným, neboť k vsakující srážkové vodě proudí půdní voda z výše položených partií svahu. Tento jev může přispět i k diferenciaci půdních typů na krátkou vzdálenost.

Vodní režim vyjadřuje uspořádání vody z prostorového a časového hlediska. Zaujímá vstupy vody do půdy, zadržení vody v půdě a unikání z půdy. Vodní režim zveme také vodní bilancí, kdy kvantifikujeme na začátku měřicího období vstupy (srážky, závlahy, povrchovou vodu, sníh, vztlínání, laterální vodu atd.) a na konci měřicího období ztráty vody (výpar, transpirace vegetací, povrchový a podzemní odtok, zadržení vody v půdě). Vodní režim je podmíněn klimatem, vegetací, půdotvorným substrátem, polohou podzemní vody, reliéfem terénu a historií krajiny. Vodní režim je v obecné rovině vyjádřen vztahem teploty, potenciální evapotranspirace, srážek, aktuální evapotranspirace. Na základě výsledné bilance pak nastává vodní deficit nebo vodní přebytek a voda je buď využívána rostlinami, nebo zadržována v půdě.

Aridní režim (*aridus* = lat. suchý) znamená suché klima po více než polovinu po sobě jdoucích dní v roce, kdy je teplota v hloubce 50 cm vyšší než 5°C. Zároveň je vlhkých méně než 90 po sobě jdoucích dní. Aridní je typický pro pouštní a polopouštní (aridní a semiaridní) oblasti. V půdách neprobíhá (nebo pouze minimálně) žádné vymývání a zpravidla dochází k akumulaci (srážení) solí v půdě a na jejím povrchu.

Udický režim (*udus* = lat. vlhký). Půda není suchá více než 90 po sobě jdoucích dní v normálním roce. Udický režim je typický pro půdy humidního klimatu s rovnoměrně rozprostřenými srážkami v roce, s dostatkem srážek během léta, takže srážky a zásoba vody v půdě jsou přibližně v rovnováze s evapotranspirací nebo zásobu mírně převyšují.

V případě, že srážky převažují ve všech měsících nad evapotranspirací a vodní potenciál stoupá nad -100 kPa, voda prakticky nepřetržitě perkoluje půdním profilem. Tento extrémně vlhký režim se nazývá **perudický**.

Ustický režim (*ustus* = lat. spálený) tvoří přechod mezi aridním a udickým režimem. Při ustickém režimu nenastává během roku období nadbytku vody, ale také nenastává dlouhodobý deficit. Je typický pro oblasti subhumidního nebo semiaridního klimatu, kdy deštivé období nastává obvykle na jaře a v létě nebo na jaře a na podzim, nikoli však v zimě.

Xerický vodní režim (*xeros* = řecky suchý) je typický pro oblasti mediteránního klimatu, s vlhkou a chladnou zimou a suchým a teplým létem nebo jarem a podzimem. Srážky, které padají v období nízké potenciální evapotranspirace, se významně podílejí na promyvném režimu půdy.

4.5 Půdní vododržnost, půdní hydrolimity

Aktuální množství vody v půdě je dáno celkovou sumou zdrojů vody a jejími ztrátami. Zároveň je tato veličina dána **vododržností**, což je množství vody, které se v určité objemové jednotce půdy může zadržet. Vododržnost půdy bývá značná, např. hlinitá půda o mocnosti 1m zadrží na ploše 1 ha 3-3,5 milionů litrů vody, z čehož je cca 2,5 mil. l (300-350 mm vodního sloupce - srážek) přístupných pro rostliny. Vododržnost klesá se stoupajícím obsahem skeletu.

Se stoupající vododržností se také zvyšují **půdní hydrolimity**. Ty představují kvalitativní a kvantitativní změny ve vztazích půdy a vody, neboli jak silně je voda v půdě zadržována (v jakém objemu) při dané vlhkosti půdy. Půdní hydrolimity vyjadřují vztah vody a půdy podle pohyblivosti vody v půdě a podle její přístupnosti pro rostliny. Z těchto hledisek jsou vylišeny tyto půdní hydrolimity:

1. Krystalická voda
2. Adsorpční voda
3. Hygroskopická voda
4. Obalová voda
5. Bod vadnutí
6. Lentokapilární bod
7. Bod snížené dostupnosti
8. Retenční vodní kapacita
9. Maximální kapilární kapacita
10. Polní vodní kapacita
11. Plná vodní kapacita

Protože se pojmy půdní hydrolimity a půdní vododržnost tematicky překrývají a doplňují, budeme se jim v následujícím textu věnovat současně.

Krystalická voda nebo také **molekulární voda** je v půdě nejsilněji poutána. Je to voda obsažená v krystalických strukturách minerálů jako je limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), opál ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) apod. Pro rostliny je nedostupná a lze ji z půdy vytěsnit např. žháním vzorku při teplotě nad 550°C .

Adsorpční vlhkost: $pF = 4,85 - 5,20$ (cca -11 až -7 MPa, -110 až -70 atm). Udává maximální množství vody, které půda může poutat adsorpčními silami, tedy pomocí fyzikálního procesu hromadění H_2O na povrchu částic ještě bez chemických reakcí. Při adsorpční vlhkosti je voda poutána pouze na hydratované ionty a nejmenší koloidní částice. Pod tuto kategorii spadá také monomolekulární vlhkost (kdy půdní částice jsou obaleny pouze jednou vrstvou molekul H_2O) při $pF > 6,36$ (< -1000 atm). Tato voda je prakticky nepohyblivá a nelze ji z půdy odstranit sušením při 105°C . Přímou na povrchu půdních částic je sací tlak až -600 MPa (-6000 atm). Ten se se vzdáleností od půdních částic a se stoupající vlhkostí jak vzduchu, tak i v návaznosti půdy, snižuje.

Vyjádřeno v $\%_{\text{hm}}$ (hmotnostních procentech), adsorpční vlhkost u lehkých až středně těžkých půd dosahuje hodnot cca 2-8 $\%_{\text{hm}}$, u jílovitých půd až 15 $\%_{\text{hm}}$.

S přibývajícím vlhkostí půda vstupuje do zóny **hygroskopické vlhkosti**. Přítomnost hygroskopické vody je podmíněna přitažlivými silami na povrchích částic, kdy atomy O_2 váží dipóly H_2O (molekula rozdělena na H^+ a OH^-), čímž může docházet k hydrataci výměnných kationtů (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), které vytvářejí obaly půdních částic. Tyto síly působí na vzdálenosti několik μm .

Vyjádření sacího tlaku vzduchu	
Relativní vlhkost vzduchu (%)	Sací tlak (MPa)
30	-150
77	-35
95	-6
(stanovováno v exsikátoru za přítomnosti 10 % H ₂ SO ₄)	

Hygroskopická vlhkost je tedy stav, kdy půda obsahuje pouze poutanou (vázanou) vodu v podobě molekul vodní páry. Nastává tehdy, kdy je voda poutána sacími silami půdy: $pF = 4,85$ (-6 MPa, -60 atm). Při laboratorním stanovení půda (půdní vzorek, fyzikální váleček) nasává vodu do meze hygroskopické vlhkosti při 95 % vlhkosti vzduchu za přítomnosti 10 % H₂SO₄ v exsikátoru, tedy při plném nasycení atmosféry vodní párou. Za přítomnosti pouze hygroskopické vody půda poutá atmosférickou vlhkost. Voda částice obaluje jen ve velmi tenké vrstvě 4 nebo 5 molekul a voda se může z této velmi silné vazby na půdní částice uvolnit opět pouze ve formě páry. Této vody se lze zbavit sušením vzorků při 105°C (při 100°C je přítomna v půdě ještě voda kondenzovaná na stěnách kapilár, která také patří do kategorie hygroskopické vody). Obsah hygroskopické vody udává **číslo hygroskopicity**, V_h (nebo také **maximální hygroskopicitu**). V_h se zjistí výpočtem z tzv. **normální hygroskopicity** (V_{h_n}) podle následujících vzorců:

$$V_{h_n} = w_{60} - w_{105} \quad [\%]$$

kde

w_{60} je hmotnost půdy na vzduchu vyschlé při vlhkosti vzduchu 60 %;

w_{105} je hmotnost půdy vyschlé do konstantní hmotnosti při 105°C.

Normální hygroskopicitu vyjadřuje, kolik půda poutá vody při přirozené vlhkosti vzduchu, která je cca 60 %.

Na vzduchu vyschlá půda obsahuje vodu, která je v půdě přirozeně poutána z atmosféry. Pro vyjádření maximální hygroskopicity nebo také čísla hygroskopicity, tedy maximálního množství vody, které do půdy vstupuje ve formě vodní páry slouží

$$V_h = 1,8 \text{ až } 2,0 \times V_{h_n} \quad [\%]$$

Obsah hygroskopické vody je vyšší v případech jemnozrnných půd a půd s vysokým obsahem humusu než půd písčitých a humusem chudých. Číslo hygroskopicity v případech hrubozrnných písků dosahuje hodnot 1-2 ‰_{hm}, v případech jílu až 15 ‰_{hm}.

Tab. 4–2: Hygroskopicitu při normální vlhkosti vzduchu 60 % (V_{h_n}) a maximální hygroskopicitu při vlhkosti vzduchu 95 % (V_h).

typy půd dle textury nebo obsahu organické hmoty	písčité	hlinité	jílovité	zrašelinělé
V_{h_n}	< 2	2-4	4-10	> 10
V_h	<4	4-8	8-20	> 20

Obalová voda je taková, která již v silnější vrstvě obaluje půdní částice. Tato voda je poutána menší silou: $pF = 2,1-4,0$ (-5,0 až -0,1 MPa, -50 až -1 atm). Obalová voda se nepohybuje směrem působení gravitace, ale pouze od větších částic k menším a od částic s větším vodním obalem k částicím s menším vodním obalem. Mezi obalovou a kapilární vodou je tenká hranice, kdy se malé póry kapilár mohou zaplnit obalovou vodou, jak se propojí jednotlivé obaly vody kolem půdních částic.

Voda nepřístupná pro rostliny je taková, kdy v půdě je obsažená voda hygroskopická a z velmi malé části také voda kapilární (vodní potenciál menší než -1,5 MPa. Hygroskopicitu se nachází těsně pod **bodem vadnutí**, kdy rostliny již nejsou schopny překonat síly, jimiž je voda v půdě poutána. Bod vadnutí začíná při $pF = 4,18$ (-2 až -1 MPa, -20 až -10 atm). Značí vlhkost půdy, při které jsou rostliny nedostatečně zásobeny vodou. V rostlinách klesá turgor (klesá tlak rozpínajícího se protoplastu v důsledku sníženého vstupu vody do vakuol na buněčnou stěnu), což se projevuje vadnutím.

BOX 4—5: Některé vztahy ve vyjádření bodu vadnutí

Box	
Bod vadnutí (BV) se lze stanovit laboratorně v kombinaci s výpočtem	
Podle Váši (1959).	
$BV = 0,3 + I. \text{ kategorie půdní textury (jílité částice } < 0,001 \text{ mm)} + 4 \quad [\%]$	
Podle Nováka	
$BV = 2,5 \cdot \check{C}H \quad [\%]$	
kde $\check{C}H$ je číslo hygroskopicity	
lehké půdy	$B.V. = (0,89) 0,54 \cdot f.j. \quad [\%]$
středně těžké půdy	$B.V. = (0,77) 0,52 \cdot f.j. \quad [\%]$
těžké půdy	$B.V. = (0,75) 0,52 \cdot f.j. \quad [\%]$
kde f.j. je fyzikální jíl	
lehké až střední půdy	$B.V. = 3 \cdot \check{C}H \quad [\%]$
těžké půdy	$B.V. = 2,5 \cdot \check{C}H \quad [\%]$
velmi těžké půdy	$B.V. = 2,0 \cdot \check{C}H \quad [\%]$

Hodnota bodu vadnutí závisí také na vývojovém stádiu rostliny: např. bod vadnutí u mladé papriky je -0,6 až -0,3 MPa, zatímco u starší je to -1,5 až -1,2 MPa. Bod vadnutí se mění také se změnami vlhkostních charakteristik, které mají značný vliv na produkci, zejména při změně vlhkosti v intervalu 40-100 % maximální vodní kapacity. Při změně půdní vlhkosti od 40 do 85 %_{obj.} se výrazně zvyšuje nárůst biomasy. Při vlhkosti nad 85 % naopak klesá v důsledku špatného provzdušnění půdy. Nedostatek vody také stimuluje růst kořenů, které naopak v půdách optimálně a nadoptimálně saturovaných vodou vytvářejí malé kořenové svazky a vysoké stromy tak mohou trpět vývraty vlivem zhoršeného kotvení v půdě. Optimální vývoj kořenů tak lze obecně čekat při sacím tlaku vody -0,1 MPa (ustává přibližně při -6 až -0,6 MPa). Z hlediska dostupnosti vody je podstatné, že při odsávání vody kořeny dochází k jejímu pohybu – z míst vlhčích do sušších (z míst s menším potenciálem do míst s vyšším potenciálem). Pro tento pohyb vody mají velký význam hrubší kapiláry o průměru > 0,030 mm, neboť je pohyb v těchto pórech rychlý, ale voda ještě samovolně neodtéká.

maximální sací tlaky některých dřevin	
smrk	-3,0 až -2,8 MPa
buk	-4,0 MPa
dub	-4,1 MPa
jasan	-3,7 MPa
byliny doubrav	-5,3 až -2,7 MPa
byliny v luhu	-2,1 až -0,6 MPa
obilí	cca -1MPa

S přibývajícím obsahem vody se dostává do hranice zvané **lentokapilární bod**, který nastává při $pF = 3,0-3,3$ (-0,3 až -0,1 MPa, -3 až -1 atm, tlaková výška vodního sloupce 1000 až 3000 cm). Je to vlhkost půdy, která je v rozmezí mezi lehce a těžce pohyblivou kapilární vodou. Odpovídá stavu, kdy začíná náhlý pokles pohyblivosti tím, že dojde k přerušení kapilární vody. Voda zůstává jen na styku půdních částic v prstencích v kapilárních a nejjemnějších pórech. Lentokapilární bod (LB) představuje

významný hydrolimit, neboť poklesem vlhkosti půdy pod tuto hodnoty rostliny vodu již nevyužijí. Lentokapilární bod se vypočítá podle vzorce .

$$LB = BV + 0,33 \cdot (\Theta_{RVK24} - BV) \quad [\%_{obj.}]$$

kde

LB je lentokapilární bod;

BV je bod vadnutí;

Θ_{RVK24} je retenční vodní kapacita (jsou zaplněné jen kapiláry po 24 hod. odsávání vody z fyzikálního válečku, viz BOX 4–7).

Lentokapilární bod lze také vyjádřit vztahem

$$LB = 1,5 \text{ až } 2 \cdot V_h \quad [\%]$$

Lentokapilární bod je cca 60 % retenční vodní kapacity. Při snížení vlhkosti půdy na hranici lentokapilárního bodu se podstatně snižuje pohyblivost vody, souvislé vodní sloupce v půdních pórech jsou z většiny přerušené a snižuje se přítok vody ke kořenům.

Lentokapilární bod tak vyjadřuje obsah vody, která začíná být pro většinu rostlin nedostupná. Iniciační fáze zhoršené dostupnosti vody a její pohyblivosti půdou vyjadřuje **bod snížené dostupnosti (BSD)**.

$$BSD = BV + 0,5 \cdot (\Theta_{RVK24} - BV) \quad [\%]$$

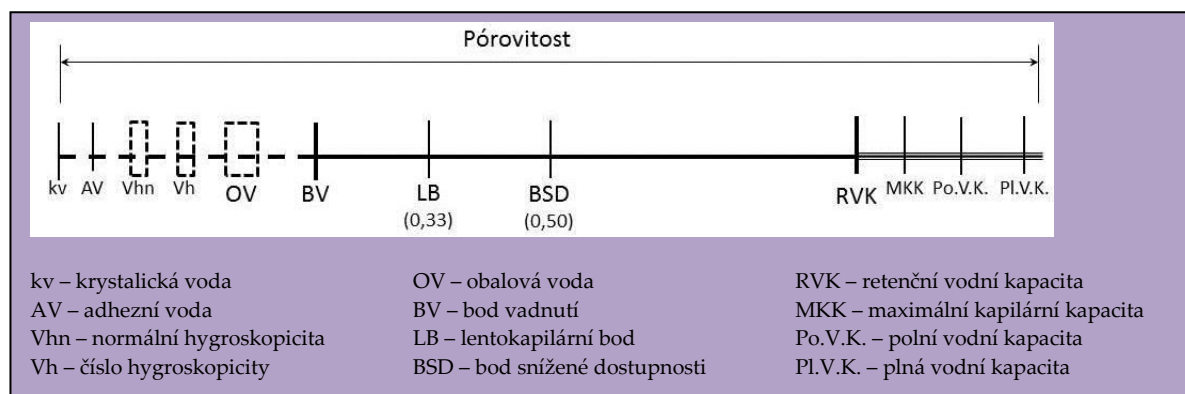
kde

BSD je bod snížené dostupnosti;

BV je bod vadnutí;

Θ_{RVK24} je retenční vodní kapacita (obsah vody po 24 hod odsávání válečku, viz BOX 4–7).

Při bodu snížené dostupnosti voda ještě protéká souvisle půdou, ale pouze v nejtenčích pórech; v semikapilárních a nekapilárních pórech je vodní tok přerušen a voda již pouze obaluje půdní částice.



Retenční vodní kapacita (Θ_{RVK24}): zjištěním retenční vodní kapacity docílíme rozdělení půdních pórů na kapilární a semikapilární. Zjišťuje se stanovením z fyzikálního válečku (viz BOX 4–7). Retenční vodní kapacita odpovídá pF křivkám v intervalu pF = 2,0-2,7 (-0,08 až -0,01 MPa, -0,8 až -0,1 atm, výška vodního sloupce 100-800 cm). Θ_{RVK24} vyjadřuje schopnost půdy zadržet určité množství vody po delší dobu (24 hod). Θ_{RVK24} lze charakterizovat jako množství vody, které je půda schopna zadržet v systému kapilárních pórů a postupně ji pro potřeby rostlin uvolňovat. Aplikovaný metodický postup používá databázi bonitovaných půdně-ekologických jednotek (BPEJ) a jejich

kategorizaci do hydrologických skupin. Výsledné hodnoty Θ_{RVK24} zohledňují průměrnou hloubku profilu a obsah vody, charakterizující tak skutečné množství vody, které je půda při srážkách schopna zadržet. Podobné zohlednění bylo provedeno také u silně skeletnatých půd, kde se zohledňuje zastoupení skeletu, který „nepřijímá vodu“ a tudíž se nepodílí na vodní retenci.

Tab. 4—3: Klasifikace retenční vodní kapacity vyjádřené v množství srážek (mm nebo také $l \cdot m^{-2}$)

Θ_{RVK24}	$l \cdot m^{-2}$
nízká	< 100
nižší střední	100-160
střední	160-220
vyšší střední	220-320
vysoká	> 320

Objem kapilární (vlásečnicové) vody vyjadřuje **maximální kapilární kapacita** (Θ_{MKK}). Tento půdní hydrolimit udává objem kapilárních a části semikapilárních pórů. Sací síly se při této úrovni obsahu vody v půdě pohybují v rozmezí pF 1,6 - 2,0 (-0,01 až -0,007 MPa, -0,1 atm). Udává maximální nasycení kapilárních a částečně semikapilárních pórů (<0,01 mm) vodou. Bez vody jsou při tomto stupni nasycení pouze hrubé póry.

Tab. 4—4: Průměrné hodnoty retenční vodní kapacity a maximální kapilární kapacity pro různé půdní druhy.

Půdní druh	Θ_{RVK24} %obj. (optimum)	Θ_{MKK} %obj. (optimum)
Písčítá	15	10-17
Hlinitopísčítá	21	18-25
Písčítohlinitá	31	25-30
Hlinitá	36	30-35
Jílovitohlinitá	40	35-40
Jílovitá	44	40-45

Polní vodní kapacita představuje schopnost půdy zadržet na delší dobu maximální množství vody v přirozeném profilu proti působení zemské tíže, tedy bez dalšího aktivního odnímání vody. Tento hydrolimit je rozšířen zejména v agronomickém půdoznání, kde se také zjišťuje terénními metodami.

Gravitační voda (viz také kapitulu 4.4): V přirozených podmínkách je její přítomnost v půdě podmíněna zejména srážkami. Směr proudění gravitační vody je ve směru působení gravitace do spodních půdních vrstev. Pohybuje se nejrychleji (více než $12 \text{ cm} \cdot \text{hod}^{-1}$), v hrubých nekapilárních a semikapilárních pórech (trhlínky, chodbičky). Sací a tlakové síly nejsou v případě gravitační vody jednoznačně hraniční (hranice není definována). Zemina plně nasycená vodou dosahuje hydrolimitu plné vodní kapacity, který odpovídá pórovitosti půdy.

Gravitační voda se pohybuje půdou buď jako svahová nebo jako tzv. infiltrovaná. Pohyb vody v půdě je tak podmíněn dvěma procesy: infiltrace, tedy vsak, kdy se se vsakující vodou zaplňují dosud prázdné póry, a probíhá tzv. *nenasycené proudění*. To se postupně zpomaluje, až jsou zaplněny vodou veškeré póry a voda půdou volně protéká nekapilárními póry. Půda je vodou tedy plně nasycena a probíhá *nasycené proudění*. To není z hlediska vodního sloupce, který se postupně zvyšuje směrem od půdního povrchu do větších hloubek, rovnoměrné, ale probíhá spíše jazykovitě.

Box**Kapilární póry (pF 2,7 a méně (-0,1 až 0 MPa, -1 až 0 atm))**

- jemné (<0,0002 mm): pF 2-2,7; voda v nich obsažena je v dobrém poměru k obsahu vzduchu, voda je zde zadržována vztlínáním;
- středně tenké (0,0002-0,01 mm): pF 1,4-2,0; voda je přístupná pro rostliny. V této kategorii rozlišujeme kapilární vodu vztlínající (podepřenou), kdy kapilární voda v půdě je souvisle propojena s jejím zdrojem – podzemní vodou –, a vodu zavěšenou, která zůstává v horních částech půdního profilu a není v kontaktu s podzemní vodou.

Nekapilární póry

- tenké (0,01-0,05 mm): pF 1,77-2,00; voda je dobře přístupná, obsažená v tzv. semikapilárních pórech;
- hrubé (gravitační) (>0,05 mm): pF 1,77-0,00; průsaková voda, lehce přístupná, zbytek vody nad polní nebo retenční vodní kapacitu.

Množství kapilární vody je ovlivňováno střídáním suchého a vlhkého počasí. Může se z půdy ztrácet výparem (evaporací) nebo desukcí kořeny a následnou transpirací přes listy. Tato voda může být do půdy navracena jen srážkami.

Kapilární voda je poutána díky kapilární adhezi a povrchovému napětí menisků (vydutých nebo vypouklých povrchů v trubičkách kapilár. **Kapilární zdvih** (H) výška kapilárního sloupce, který stoupá nad souvislou hladinu podzemní vody.

$$H = 15/r \quad [\text{mm}]$$

kde

r je poloměr kapilární trubice v mm.

Kapilární zdvih se přibližně shoduje s velikostí půdních částic (průměr pórů = 0,3-0,7 násobek průměru půdních částic). V běžných podmínkách je kapilární zdvih maximálně 5-6 m.

u částic o průměru 0,001 mm je kapilární zdvih i 75 m.

Kapilární zdvih během roku kolísá v desítkách cm až v metrech. Hodnocení kapilárního zdvihu udává Tab. 4—5.

Tab. 4—5: Klasifikace kapilárního zdvihu.

rozkolísanost kapilárního zdvihu [cm]	klasifikace kapilárního zdvihu
40	plytký - kámen
40-80	plytký kapilární zdvih
80-130	mírně vysoký kapilární zdvih
130-200	středně vysoký kapilární zdvih
200-300	vysoký kapilární zdvih
300-400	velmi vysoký kapilární zdvih

Tab. 4—6: Porovnání hodnot kapilárního zdvihu zjištěného početně a měřením při daném průměru půdních částic.

rozměr frakce [mm]	kapilární zdvih zjištěný [mm]	kapilární zdvih vypočtený [mm]
0,02-0,05	2000	2100
0,05-0,1	1055	1000
0,1-0,2	428	500
0,2-0,5	246	210
0,5-1	131	100
0,1-2	65	50

Maximální výšku vztlínání udává **kapilární číslo**. Se zmenšující se velikostí částic se jeho hodnota zvyšuje a zároveň se snižuje rychlost vztlínání. Tato vlastnost byla empiricky zjištěna pro různé frakce křemenných zrn (Tab. 4–7).

Tab. 4–7: Hodnoty kapilárního zdvihu zjišťovaného pro různé frakce křemenných zrn v různých časech měření. Při zásobení kapilární vodou má největší význam prachová frakce (0,01-0,05 mm), která zajistí v nejkratším čase nejvyšší kapilární zdvih. Z tohoto pohledu je částečně příznivý i jemný písek (0,05-0,1).

průměr zrn v mm	kapilární zdvih v mm					kapilární číslo [mm]
	5 minut	60 minut	1 den	7 dní	60 dní	
> 2	0	0	0	0	0	0
0,5-1	50	50	51	51	51	52
0,05-0,1	108	346	900	1030	1100	1102
0,01-0,05	88	320	1200	1880	2375	2420
0,005-0,01	54	200	810	1910	2690	? (zdvih neustal)

V přírodním prostředí jsou v půdě zastoupené všechny frakce v určitém poměru, což činí podmínky pro kapilární zdvih specifickými. Každá vrstva (půdní horizont nebo geologická vrstva) je vyznačuje různou texturou (zrnitostí) a kapilární zdvih může být přerušen. V texturně homogenním prostředí lze kapilární zdvih vyjádřit dle Tab. 4–8.

Tab. 4–8: Kapilární zdvih pro různé půdní textury.

textura půdy	kapilární zdvih v cm
písčitá	30
hlinitopísčitá	0-80
písčitohlinitá	80-150
hlinitá	150-300
jílovitohlinitá	300-400
jíly	400-600

Při **kapilární pórovitosti** jsou vodou vyplněny pouze kapilární póry při vlhkosti hydrolimitu Θ_{RVK24} . Optimální zastoupení kapilárních pórů je cca 2/3 z celkové pórovitosti. Nadbytek kapilárních pórů znesnadňuje infiltraci (vsakování) vody, vede k provlhčení půdy do malé hloubky a vzrůstu povrchového odtoku, čímž se zvyšuje riziko eroze. Nedostatek kapilárních pórů předznamenává malou zásobu vody pro rostliny, nízkou vododržnost a nasákavost. Objem kapilárních pórů tedy vyjadřuje vztah

$$P_K = \Theta_{RVK24} \quad [\%]$$

kde

P_K je objem kapilárních pórů;

Θ_{RVK24} je retenční vodní kapacita (po 24 hod odsávání fyzikálního válečku plně nasyceného vodou).

Při **semikapilární pórovitosti** jsou zaplněny vodou póry, které nejsou svými vlastnostmi ani vyloženy kapilární, ani vyloženy nekapilární. K jejich vyjádření se používá hydrolimit 30 min. odsávání fyzikálního válečku plně nasyceného vodou (viz BOX 4–7) podle vztahu

$$P_S = \Theta_{30} - \Theta_{RVK24} \quad [\%]$$

kde

P_S je objem semikapilárních pórů;

Θ_{30} je objem vody ve fyzikálním válečku po 30 min. odsávání válečku plně nasátého vodou;

Θ_{RVK24} je retenční vodní kapacita (po 24 hod odsávání fyzikálního válečku plně nasyceného vodou).

Nekapilární pórovitost zaujímá póry s velmi malou vododržností, ve kterých se voda pohybuje s působením gravitace. Také se proto pro vodu v nekapilárních pórech obsaženou používá termín gravitační voda. Při dominanci nekapilárních pórů je v půdě nízká malá zásoba vody díky rychlému průtoku vody do hloubek nepřístupných kořenům rostlin. Z nekapilárních pórů je voda z fyzikálního válečku odsána během 30 min. odsávání z plného nasycení. Pro vyjádření objemu nekapilárních pórů platí vztah

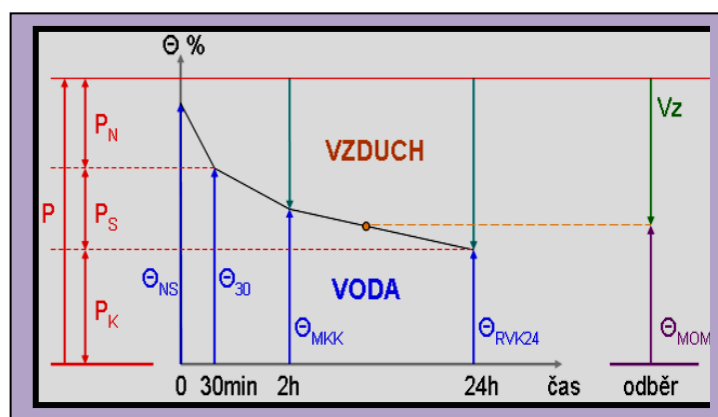
$$P_N = P - \Theta_{30} \quad [\%]$$

kde

P_N je objem nekapilárních pórů;

P je pórovitost;

Θ_{30} je objem vody ve fyzikálním válečku po 30 min. odsávání válečku plně nasátého vodou.



BOX 4—7: Analýza fyzikálního válečku pro stanovení půdních hydrolimitů

Fyzikální váleček (také označován jako neporušený půdní vzorek) je zpravidla o objemu 100 cm³ (v lesnické pedologii) a používá se ke zjišťování charakteristik vodního a vydušného režimu půdy. Stanovení půdních hydrolimitů spočívá ve vážení fyzikálních válečků za určitého obsahu vody. Tento obsah je dán nasáváním válečku vodou do plného nasycení a jeho zpětným odsáváním. V určitých intervalech odsávání jsou válečky váženy.

Θ_{rvk} (plná vodní kapacita)	Váleček plně nasátý vodou. Ukončení nasávání válečku je dáno buď lesknoucím se povrchem válečku (voda vystoupala válečkem až po jeho horní okraj) nebo časovou hranicí 24 hod nasávání.
Θ_{30} (gravitační voda)	Váleček je umístěn na odsávací zařízení a je vážen po 30 minutách od ukončení nasávání.
Θ_{MKK} (maximální kapilární kapacita)	Váleček je vážen po 2 hod od ukončení nasávání
Θ_{RVK24} (retenční vodní kapacita)	Váleček je vážen po 24 hod od ukončení odsávání
Θ_{vhn} (normální hygroskopicitá)	Váleček je vysušen při 105°C do konstantní hmotnosti a následně ponechán několik dní na vzduchu pro nasátí atmosférické vlhkosti.

Po vysušení na vzduchu je váleček vysušen při 105°C na konstantní hmotnost. Hodnoty jednotlivých hmotností válečku z bodů 1-5 jsou vztaženy ke konstantní hmotnosti. Při objemu válečku 100 cm³ platí, že úbytek hmotnosti o 1 g = úbytek objemu vody o 1 ml = snížení vlhkosti o 1 %, což také znamená snížení zásoby využitelné vody o 1 mm.

4.6 Vybrané praktické aspekty problematiky vody v lesních půdách

Voda v rostlinách převyšuje hmotnost sušiny 4-8x a její spotřeba je daleko větší, než spotřeba jiných prvků. Odběr vody kořenovým vlášením je nepřetržitý jednostranný pohyb vody směrem z půdy do rostlinných pletiv a dále ve směru kořen → list. Vody kořeny rostlin více čerpají, než kolik jí

listy odpařují (vytranspirují). Zvýšená transpirace je dána silným osvětlením rostliny, vysušujícím větrem nebo omezenými zásobami vody v půdě.

Tab. 4–9: Vodní bilance dospělých smrkových a bukových porostů podle různých autorů a různých studijních lokalit.

Autor / oblast šetření	srážky z volné plochy [mm]	smrk		buk	
		celkový výpar	odtok	celkový výpar	odtok
Brechtel, Hoyningen Huene (1978) NSR – Frankfurt n. M.	663	582 mm 88 %	81 mm 12 %	554 mm 84 %	109 mm 16 %
Benecke, van der Proeg (1978) NSR - Solling	1066	616 mm 58 %	450 mm 42 %	515 mm 48 %	551 mm 52 %
Ambros (1978) Slovensko – Karpaty	1100	550 mm 50 %	550 mm 50 %	451 mm 41 %	649 mm 59 %
Zelený (1971, 1974) ČR – Beskydy	SM 1080 BK 1250	476 mm 44 %	604 mm 56 %	433 mm 35 %	817 mm 65 %
Kantor (1984) ČR – Orlické hory	1296	491 mm 38 %	805 mm 62 %	346 mm 27 %	950 mm 73 %

Pokles evapotranspirace o 1 l·m⁻² (700 Wh) za den představuje přibližně 40 násobné zvýšení toku zjevného tepla, než je efekt skleníkových plynů. Pokles evapotranspirace za 1 den o 1 mm na území celé ČR (79 000 km²) způsobí uvolnění množství zjevného tepla, které je srovnatelné s celoroční produkcí elektrické energie ve všech elektrárnách (6 000 GWh).

Zjevné teplo = teplo, které vzniká příjmem energie určitým povrchem a tím zvýšením jeho teploty.

Rostliny vytvářejí biomasu s různou efektivitou ve smyslu spotřeby vody. Tento ukazatel se nazývá **transpirační koeficient** a udává se v kg množství vody na kg rostlinou vyprodukované sušiny. Jeho hodnoty pro hlavní lesní dřeviny a vybrané zemědělské plodiny jsou uvedeny v Tab. 4–10.

Tab. 4–10: Hodnoty transpiračního koeficientu pro vybrané lesní dřeviny a zemědělské plodiny

dřevina resp. plodina	transpirační koeficient (kg vody na 1 kg vyprodukované sušiny)
borovice	160-300
buk	300-400
smrk	200-500
jedle	100-250
modřín	230-330
topol	410-600
pšenice	500
žito	400
kukuřice	370
rýže	800

Při průměrných hodnotách transpiračního koeficientu 300 l vody/kg sušiny je tak zapotřebí pro vyprodukování 10 t sušiny 3 mil. litrů vody, což je 300 mm srážek.

Suma výparu vody z půdy a z listové plochy rostlin (transpirované) se nazývá **evapotranspirace**. Její hodnoty jsou pro lesní porosty v průměru 0-1,5 mm/den na jaře a na podzim a 1,5-5 mm/den v létě (až 7 mm/den, což činí na ploše 1 ha 70 000 l).

5 PŮDNÍ VZDUCH, TEPLOTA PŮDY

5.1 Půdní vzduch

Přibližně polovina objemu půdy sestává z pórů vyplněných vodou nebo vzduchem. V půdě nejsou póry vodou vyplněny „odspodu nahoru“, podle pohybu hladiny podzemní vody, ale nepravidelně, v závislosti na velikosti pórů a tím na sacím tlaku, s jakým je voda zadržována v pórech dané velikosti. Stejně tak jsou póry vyplněné vzduchem v půdě rozmístěny více méně rovnoměrně.

Půdní vzduch se od atmosférického liší v několika ohledech. Jeho složení je v rámci půdního tělesa velmi variabilní a mění se na krátkou vzdálenost, v závislosti na přítomnosti kořenů, velikosti pórů, drenáže v daném místě půdy apod. Půdní vzduch obsahuje více vodních par. Pokud není půda suchá, vzdušná vlhkost se blíží hodnotě 100 %. Půdní vzduch také obsahuje CO_2 ve vyšších (až několika set násobně, v průměru 0,1-1,5 %) a O_2 v nižších (i pouze 5-10 %) koncentracích nežli je obsaženo v troposféře (CO_2 cca 0,035 %, O_2 cca 20 %).

Je-li více než 80-90 % pórů zaplněno vodou, půdní prostředí začíná být nedostatečně provzdušněná a vzniká prostředí pro rostliny nepříznivé.

Je nezbytné, aby v půdě probíhal pohyb půdního vzduchu a výměna plynů s přízemní vrstvou troposféry. Výměna plynů probíhá pomocí třech mechanismů:

1. O_2 je do půdy transportován jako rozpuštěný v perkolující (vsakující) vodě. Množství takto transportovaného kyslíku je díky slabé rozpustnosti kyslíku ve vodě poměrně nízké (cca 0,028 ml/ml);
2. výměna vzdušných mas vlivem tlakových změn (0,1-0,2 kPa) způsobovaných prouděním vzduchu a turbulencemi přízemní části atmosféry;
3. difuze molekul plynů skrz půdní póry.

Nejvíce kořenů roste v pórech o velikosti $> 0,1$ mm, kde probíhá rychlá výměna O_2 .

Při náhlém zamokření půdy dochází k rychlé výměně prostoru vyplněného vodou a vzduchem: např. při dešti se nejprve vodou zaplňují krátkodobě makropóry, kterými voda jednak proudí v sestupném směru a z kterých také voda vstupuje do menších pórů, kde je zadržena dlouhodoběji. Proto jsou těžké (jílovité, jílovito-hlinité) půdy s velkým obsahem mikropórů význačně zhoršenou aerací a výměnou plynů mezi půdou a přízemní atmosférou. Výsledkem pak bývá vysoká koncentrace oxidu uhličitého a nízká koncentrace kyslíku, tedy nástup anaerobních podmínek, které jsou pro většinu rostlin a živočichů nepříznivé. Oxidační (oxické, aerobní) podmínky jsou v takových případech nahrazeny redukčními (anoxickými, anaerobními), pro které jsou typické odlišné fyzikálně-chemické, chemické a biologické děje.

BOX 5-1: Aerobní versus anaerobní organismy

<i>Aerobní organismy</i>	<i>Anaerobní organismy</i>
• Mají obecně větší přínos pro půdu a rostliny; • úspěšněji dekomponují uhlíkaté sloučeniny a tím více přispívají ke zvyšování produkce biomasy, humusu, podílu vody a CO₂; • v průběhu dekompozičních procesů zajišťují mineralizaci základních elementů (N, P, S) a tím jejich koloběh; • specializované druhy autotrofů, jako jsou nitrifikační bakterie nebo bakterie oxidující sloučeniny síry produkují NO₃⁻ a SO₄²⁻; • některé druhy bakterií mohou produkovat růstové regulátory typu gyberelliny, které, stimulují růst rostlin.	• Tvoří méně početné skupiny (max. cca 10 % celkové půdní fauny); některé aerobní organismy jsou řazeny mezi tzv. fakultativní anaeroby, kteří mohou růst v anaerobních podmínkách (např. kvasinky alkoholového kvašení, ale také většina bakterií); • produkují méně metabolické energie na mol substrátu během anaerobní respirace, takže růst jejich buněk je pomalejší; • mají rozmanitější produkty metabolismu vedle CO₂ a H₂O, zejména redukované sloučeniny (C₂H₅OH, CH₄, C₂H₄ aj.); • využívají alternativní příjemce elektronů (NO₃⁻, MnO₂, Fe(OH) a SO₄²⁻) a produkují jejich redukované formy, z nichž je v půdě řada nežádoucích (metan, sirovodík, organické kyseliny, alkoholy aj.).

Provzdušňenost lesních půd a složení půdního vzduchu je ovlivněno řadou faktorů:

- charakter nadložního humusu (složení, mocnost, humifikační procesy);
- biologická aktivita;
- textura půdy;
- výška hladiny pozemní vody;
- hustota, výška, stáří porostu;
- management a způsob hospodaření.

Molekulární poměr redukovaného CO₂ a spotřebovaného O₂ (CO₂/O₂) se nazývá **respirační kvocient (RQ)**. U dobře provzdušněných půd RQ=1, s nástupem anoxických podmínek se RQ zvyšuje.

BOX 5-2: Charakteristiky vzdušného režimu půdy (viz také kapitola 10).

- Pórovitost: vyjadřuje objem všech pórů v půdě z celkového objemu půdy – veličina vyjadřující potenciální stav půdy;
- Provzdušněnost: vyjadřuje, jaký objem pórů z celkového objemu půdy je aktuálně vyplněných vzduchem – veličina vyjadřující aktuální stav půdy;
- Minimální vzdušná kapacita: vyjadřuje, jaký podíl pórů z celkové pórovitosti je zaplněný vzduchem, jsou-li všechny kapilární póry zaplněné vodou – veličina vyjadřující potenciální stav půdy;
- Relativní nasycenost pórů: vyjadřuje procentuální podíl pórů zaplněných vodou z celkového objemu pórů v půdě – veličina vyjadřující aktuální stav půdy.

5.1.1 Oxidačně-redukční procesy v půdě

Oxidační redukční procesy v půdě jsou takové procesy, které podmiňují procesy oxidace a redukce. Na těchto procesech se podílejí jednak složky organické (enzymy + H₂O + O₂), jednak složky minerální (Fe²⁺, Fe³⁺, S²⁺, S⁴⁺, N, Mn³⁺, Mn⁶⁺). Schopnost oxidovat nebo redukovat (neboli redox potenciál) závisí na normálním potenciálu E, udávaného ve voltech nebo milivoltech. Se zvyšujícím se E stoupá schopnost oxidace a naopak.

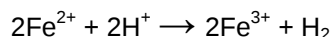
V obecném smyslu redox potenciál vyjadřuje schopnost systému se redukovat nebo oxidovat. V půdě vyjadřuje schopnost jakékoli substance být redukovanou nebo oxidovanou.

Hodnoty redox potenciálu jsou vztaženy k referenčnímu stavu, který je dán redox potenciálem vodíkového páru $\frac{1}{2}\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{e}^-$, jehož redox potenciál je roven nule. Silné oxidační činidlo je kyslík (O₂), neboť snadno přijímá elektrony od řady jiných prvků. Aerobní respirace vyžaduje O₂ jako akceptora elektronů, neboť aerobní organismy oxidují organický uhlík, čímž dochází k uvolňování energie nezbytné pro život. Kyslík je schopen oxidovat organické i anorganické látky.

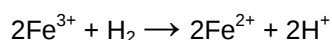
Oxidoredukční reakce jsou charakteristické přenosem elektronů: oxidace představuje ztrátu elektronu, redukce získání elektronu, např.



V první rovnici je dvojmocné železo oxidované na trojmocné za ztráty elektronu (zvýšení kladného náboje), v druhé rovnici je vodík redukován za snížení kladného náboje a příjmu dvou elektronů. Aby mohla být určitá látka oxidována, musí jiná látka přijmout volné elektrony e^- neboli u oxidačně redukčních reakcí platí, že oxidace jedné látky (frakce zeminy nebo prvku v půdě) je spojena s redukcí jiné látky a naopak.



Železo je v uvedené reakci oxidováno, zatímco vodík je redukován. Reakce může probíhat obousměrně, tedy



Do uvedených oxidačně redukčních reakcí vstupují tři faktory:

1. tendence železa Fe^{2+} uvolňovat elektrony a železa Fe^{3+} elektrony akceptovat;
2. tendence vodíku H^+ akceptovat elektrony a H_2 poskytnout elektrony;
3. koncentrace daných složek v prostředí.

Redox potenciál je závislý na přítomnosti akceptoru elektronů a na pH. Pro všechny látky v půdě platí, že se stoupající hodnotou pH klesá jejich redox potenciál a tedy schopnost se oxidovat – přijmout elektron. Každá látka (sloučenina) se ale oxiduje/redukuje při různém pH a různém redox potenciálu (Tab. 5–1).

Tab. 5–1: Oxidované a redukování formy některých prvků v půdě a jejich redox potenciál (E), ve kterém dochází ke změně jejich formy při pH=6. Kyslík je v plynné formě v půdě přítomen při hodnotách E vyšších než 0,38–0,32 V. Při nižším E mikroorganizmy využívají jiné elementy než kyslík jako akceptory elektronů při metabolických procesech.

oxidovaná forma	redukována forma	E, při kterém dochází ke změně formy [V]
O_2	H_2O	0,38 až 0,38
NO_3^-	N_2	0,28 až 0,22
Mn^{4+}	Mn^{2+}	0,22 až 0,18
Fe^{3+}	Fe^{2+}	0,11 až 0,08
SO_4^{2-}	S^{2-}	-0,14 až -0,17
CO_2	CH_4	-0,20 až 0,28

Při redukčních podmínkách mikroorganizmy nevyužívají půdní O_2 , nýbrž kyslík obsažený v jiných látkách (chemických sloučeninách, minerálech apod.).

BOX 5-3: Měření redox potenciálu

Box

Měření redox potenciálu objasňuje průběh oxidačních a redukčních procesů dříve, než se projeví barevnou změnou v půdním profilu (anaerobní procesy, nepříznivý rozklad organických látek při nadměrném zamokření půdy). Významný je u půdy s výrazným hydrickým režimem (glejové a oglejené půdy), kde lze podle zjištěných hodnot volit příslušná opatření při péči o lesní porosty a stanoviště (volba vhodného způsobu výsadby, předpoklad rizik při obnově lesa, volba vhodné dřevinné skladby v obnovním cíli, lesotechnická opatření apod.).

Z těchto důvodů je praktické pracovat s informacemi o hodnotách redox potenciálu ve svrchních vrstvách půdy, ale i v rámci půdního profilu a detekovat zónu častějšího nebo permanentního zamokření půdy.

Redox potenciál se měří potenciální diferenciací (rozdílem napětí) dvou elektrod – platinové a kalomelové nebo mezi standardní vodíkovou elektrodou a příslušným oxidačně-redukčním přechodem.

Redox potenciál nabývá hodnot od -0,3 do 0,85 V (-300 až 850 mV).

Sklon k poskytnutí nebo přijetí elektronů dané látky je vyjádřena oxidačně-redukčním standardem nebo také napětím měřeným mezi jednou polovinou reakce (např. $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$) a napětím na platinové elektrodě.

V praxi se redox potenciál měří pomocí laboratorních nebo terénních měřících přístrojů.

Redox potenciál je veličinou se sezónní dynamikou. Závisí na vlhkosti půdy, provzdušněnosti, obsahu organické hmoty i pórovitosti půdy. Během roku může redox potenciál kolísat v intervalu 0,1-0,7 V. Pokles je spojený s nedostatkem kyslíku, což je situace, kdy půdní mikroorganismy nevyužívají O_2 , ale jiné oxidanty. Vysoký redox potenciál (E) mají nitráty (NO_3^-), Mn_2O_3 nebo MnO_2 , sloučeniny typické pro provzdušněné půdy s $E > 0,5$ V.

O_2 je v půdě obsažen pouze do hodnoty $E < 0,33$ V. Při zhoršení aerace dochází ke snížení E na 0,3-0,5 V, kdy dochází k redukci manganu na Mn^{2+} a dochází k barevným změnám půdy do modra. Při poklesu E na 0,2-0,3 V dochází k redukci železa z Fe^{3+} na Fe^{2+} , což je doprovázeno barevnými změnami půdy z hnědé na šedou. Při poklesu E na hodnotu 0,05 V dochází k redukci síry až na H_2S a FeS , což se projevuje černými barevnými odstíny. U permanentně zaplavených půd ($E = -0,12$ V) dominují anaerobní podmínky, tvoří se CO_2 ale zejména metan.

Pro zaplavené půdy platí, že mají nízký – záporný – redox potenciál. Po zaplavení vykazují určitou dynamiku a redox potenciál se nemění bezprostředně po nasycení vodou, nýbrž v závislosti na půdních vlastnostech:

- u „normální“ půdy je dosaženo stavu záporného redox potenciálu cca za 8-12 týdnů;
- při vysokém obsahu nitrátů v půdě (NO_3^-) trvá kladná hodnota redox potenciálu až několik týdnů;
- u půd s nízkým obsahem organické hmoty trvá kladná hodnota redox potenciálu po zaplavení až několik měsíců (půl roku);
- u půd s vysokým obsahem vícemocného Mn a podobně Fe a vysokým obsahem organické hmoty trvá kladná hodnota redox potenciálu po zaplavení až 7 měsíců;
- u půd s nízkou zásobou Mn a Fe a vysokým obsahem organické hmoty trvá kladná hodnota redox potenciálu po zaplavení cca 1-2 týdny.

5.2 Teplota půdy a tepelný režim

Tepelný (termický) režim znamená proces příjmu, pohybu a předávání tepla v půdě.

Zdroji půdního tepla jsou sluneční energie, atmosférický vzduch (teplo), rozklad organických látek (uvolňování tepla při metabolických procesech), vnitřní teplo Země. Hlavním zdrojem je sluneční záření, z něhož půda pohltí 50-80 % tepelné energie a část odrazí (*albedo*).

Sluneční energie pohlcená půdou půdu zahřívá jen do určité hloubky, která se mění v závislosti na klimatických pásech a podílí se na tepelném a hydrickém režimu půdy. Důsledkem prohřívání půdy je zčásti výpar, z části ohřev přízemní vrstvy atmosféry.

5.2.1 Faktory ovlivňující teplotu půdy

Vnější faktory jsou intenzita záření, úhel dopadu slunečních paprsků na půdní povrch a nadmořská výška (s ní související délka a mocnost sněhové pokrývky a klimatický režim dané oblasti).

Vnitřní faktory jsou měrné teplo a tepelná a teplotní vodivost půdy.

Intenzita záření a úhel dopadu slunečního záření jsou ovlivněny řadou faktorů, jako je zeměpisná šířka, nadmořská výška, roční období, denní doba, sklon svahu a expozice. S nadmořskou výškou stoupá podíl krátkovlnného ultrafialového záření s tím, že v rozmezí nadmořských výšek od 200 do 2000 m n. m. stoupne jeho podíl v létě cca o 30 %, v zimě cca o 45 %.

Měrné teplo nebo také měrná kapacita vyjadřuje v (Joulech) $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg půdy o $1^\circ C$.

J (Joule) vyjadřuje práci, kterou vykoná síla po dráze 1m za určitý čas; J = watt sekunda.

Ve smyslu měrného tepla
 $J = \text{kg/m}^2/\text{s} = \text{N/sm}$

Tepelná vodivost vyjadřuje schopnost půdy vést teplo v rámci půdního prostoru. Vyjadřuje se ve $\text{W/m}^\circ\text{C}$ a znamená množství tepla, které musí protéci za jednotku času (s) na jednotku tloušťky půdy (1 m) při jednotkovém tepelném spádu 1°C .

Teplotní vodivost potom ukazuje, jak látka (v tomto případě půda) vede teplo, tzn., jak snadno se tepelné rozdíly vyrovnávají v rámci tepelné difuze.

Tab. 5—1: Termické charakteristiky různých přírodních materiálů a prostředí. Samotné termické charakteristiky půdy jsou výslednicí spolupůsobení všech uvedených parametrů, které působí v různé míře podle jejich zastoupení v půdě.

Půdní prostředí	Měrné teplo $^\circ\text{C}$	Tepelná vodivost β (při 25°C) [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]	Teplotní vodivost [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]
Voda	4 180	0,606	0,000140
Vzduch	1 003	0,018	0,000018
Led	2 090	2,200	0,001100
Suché dřevo	1 450	0,04 – 0,30	0,000200
Humus	2 512	0,20	0,000080
Křemen	2 009	8,50	0,004200
Jílové nerosty	2 000	2,90	0,001450

Teplotu půdy lze zjišťovat více způsoby. Ambulantní zjišťování teploty představuje značné riziko v tom, že měření v daném čase je závislé na momentálním stavu počasí, denní době apod. a nelze většinou počítat s příliš signifikantními daty. Zvlášť u teploty je proto výhodnější instalace trvalých snímačů teploty s dataloggerem pro ukládání dat s dostatečně krátkým intervalem měření (zpravidla 15 min), aby byl podchycen denní chod teploty půdy.

Tepelná vodivost je silně závislá na vlhkosti půdy. Vlhká půda má až 2-3x vyšší vodivost než suchá půda a podobně má i 2-3x větší měrnou tepelnou kapacitu.

Špatnou vodivost mají písčité půdy, které obsahují velký podíl vzduchu a mají nízkou retenci pro vodu. Jejich povrch se rychle ohřeje, ale v hlubších vrstvách tyto půdy teplo neakumulují. Naopak, v noci rychle vychladnou a celkově jsou typické většími teplotními výkyvy v porovnání např. s jílovitými půdami, které mají dobrou vodivost. Obsahují méně vzduchu a kapilárami spolu s vodou jako médiem proudí teplo, které je více rozváděno v rámci půdního profilu. Jílovité půdy se pomaleji ohřívají během dne, ale teplo je více akumulováno v hlubších vrstvách, zatímco přes noc teplota klesá méně a teplo je z hlubších vrstev doplňováno.

písčité půdy	velké výkyvy teplot mezi dnem a nocí
jílovité půdy	malé výkyvy mezi dnem a nocí
hlinité půdy	nejvyrovnanější poměry

Dalším faktorem ovlivňujícím tepelné poměry v půdě je **barva**. Tmavé půdy jsou obecně teplejší, více teplo pohlcují (mají menší albedo). Rozdíly ve svrchních 20 cm u tmavých půd v porovnání se světlými může být až $0,5\text{--}3^\circ\text{C}$.

Mikrogeomorfologie ovlivňuje teplotu půdy v rámci lokálních nerovností a celkové pestrosti mikroreliéfu. Větší a souvislejší plocha se více zahřívá, zatímco pestrý reliéf omezuje přehřívání za teplého počasí a snižuje rychlost ochlazování za nízkých teplot.

Vegetace, zejména stromovitého vzrůstu, snižuje dostupnost záření na zemský povrch. Zároveň ale snižuje vyzařování akumulovaného tepla v půdě a celkově snižuje extrémnost mikroklimatických podmínek, zatímco na holé půdě je intenzivnější jak přijímání, tak vyzařování tepelné energie.

půda bez vegetačního krytu	vyzařuje 100 % záření
půda s trvalými travními porosty	vyzařuje 40-80 % záření
půda s porosty obilí	vyzařuje 10-30 % záření
půda pod smrkovými porosty	vyzařuje 5 % záření

Expozice svahu ovlivňuje tepelný režim z aspektu přiklonění svahu ke světovým stranám (Tab. 5—2). Půdy severních expozic se ohřívají méně ve srovnání s jižními expozicemi. Tyto rozdíly jsou patrné zejména ve vyšších nadmořských výškách; při horní hranici lesa na zemský povrch dopadá na jižních expozicích více UV záření a půda se více přehřívá. Jižní svahy jsou dotovány až 2,7x větším počtem záření než severní s tím, že při sklonech svahů, kdy sluneční paprsky dopadají nejvíce kolmo na povrch půdy má albedo nejnižší hodnoty.

Tab. 5—2: Příklad vlivu expozice svahu na průměrné hodnoty teploty půdy

hl.půdy	S+SZ	SV+V	JV+V	JZ+Z
5 cm	14,1°C	16,1°C	16,4°C	16,1°C
15 cm	12,7°C	14,9°C	15,0°C	14,8°C

Také **nadmořská výška** úzce souvisí s teplotním režimem půdy. Při teplotním gradientu atmosféry (pokles) 0,33°C v zimě a 0,76°C v létě na 100 m výšky je teplotní gradient teploty půdy (pokles) 0,1°C v zimě a 0,5°C v létě na 100 m výšky.

5.2.2 Tepelný režim a jeho dynamika

Teplota půdy je oproti teplotě ovzduší v minimech i maximech vždy opožděna a často u půdy nedochází k takovým fluktuacím jako v atmosféře.

Během vegetačního období je v podmínkách mírného klimatického pásu (ČR) půda během dne chladnější než vzduch, zatímco v noci je teplejší, neboť přes den půda teplo sorbuje a v noci vyzařuje. Roční výkyvy teploty se projevují nejvíce do hloubky půdy 15 cm; hlouběji je teplota stálější. Teplota půdního povrchu stoupá na jaře v závislosti na sněhové pokrývce (zpravidla v březnu až dubnu, kdy rychle stoupá, dosahuje maxima přibližně v červnu a až do ledna nejprve pozvolna, později rychleji klesá. S hloubkou půdy se také teplotní maxima opoždují oproti maximum teploty ovzduší – v hloubce 120 cm až cca o měsíc. Půda je v létě chladnější, v zimě naopak teplejší než ovzduší, vždy s menšími výkyvy ve vztahu k aktuálnímu chodu počasí.

Průměrná teplota je v hloubce půdy 20 cm cca o 1,5-2°C vyšší než průměrná teplota ovzduší.

Pro teplotní režim v zimním období má velký význam sněhová pokrývka. Sníh jako špatný vodič izoluje půdu od extrémních tepelných výkyvů a propouští ultrafialové záření, zatímco infračervené sorbuje z až 99 %. Pod sněhovou pokrývkou o mocnosti 20 cm již půda při standardním průběhu zimy nepromrzá (většinou od 5. LVS). Bez sněhové pokrývky (také na holinách) však půda může při extrémních mrazech promrznout až do 80-120 cm. Pod travním krytem bez sněhové pokrývky půda může promrznout až do 40 cm a pod lesním porostem do 10-20 cm. Vlivem rozpuštěných minerálních látek v půdním roztoku půda zamrzá při nižších teplotách, a to při -1 až -0,5°C. Vlhká půda také zamrzá později (pomaleji) než suchá, neboť voda zajišťuje vyšší tepelnou vodivost i vyšší přísun tepla z hlubších vrstev.

Půdní teplotní maxima se objevují pouze v tenké vrstvě půdy při povrchu do hloubky 1-2 cm typicky na jižních expozicích. Na vátých píscích mohou v těchto hloubkách teploty dosahovat až 55-

65°C. Na vysokohorských svazích (1400 m n. m.) v klečových porostech a zejména na volné ploše mohou teploty vystoupat dokonce až na 65-72°C, zatímco už v hloubce 5 cm je teplota o 20-30°C nižší a v hloubce 10 cm již teploty nevystupují nad 30°C.

Zamrznutí půdy má řadu dopadů. Promrznutím dochází ke zlepšení půdní struktury (koagulací a tlakem ledu), k rozkladu látek toxických pro mikroflóru a k migraci živočichů do hlubších vrstev půdy, kteří tak přispívají k větší provzdušněnosti. Negativní efekty zamrznutí půdy jsou zejména ve snížené propustnosti pro vodu a ke zvýšení povrchového odtoku a tím zvýšení rizika eroze proudící vodou. Omezují a zpomalují se také chemické procesy, mikrobiální aktivita a biochemické procesy a může dojít k vymrzání semenáčků, poškození jejich kořenů nebo „vzdvižení“ vlivem zvětšení objemu půdy. Nízké teploty půdy zpomalují růst kořenového systému, neboť se zvyšuje viskozita půdního roztoku a jeho vnitřní tření a je tak brzděn jeho pohyb směrem ke kořenům i permeabilita půdy.

Teplotní optima pro vybrané druhy lesních dřevin [°C]		
dřevina	optimum	spodní hranice růstu
buk	24	6-8
smrk	26	4-6
jedle	32	4-6
jasan	29	

(Optimální růst kořenů pšenice je při 12-20°C, brambor při 15-18°C, kukuřice při 20-28°C).
Vliv tohoto faktoru se umocňuje s hodnotou půdní reakce a provzdušněností.

Hraniční teplota pro klíčení semen u smrku a borovice [°C]			
dřevina	supraoptimum	optimum	spodní hranice klíčení
smrk	33	16-25	4
borovice	38	26	6

Tepelný režim je **klasifikován** podle poměru sumy aktivních teplot (nad 10°C) v půdě k sumě aktivních teplot (nad 10°C) v ovzduší. Z toho jsou tepelné režimy klasifikovány jako (a) vyzařovací, (b) rovnovážný, (c) ohřevný (kdy je zvyšována teplota půdního roztoku).

V závislost na chodu teploty je teplotní režim klasifikován za období březen až listopad v hloubce 20 cm a podle toho jsou vymezeny kategorie

- a) velmi chladný <7,5°C
- b) chladný 7,6-9,0°C
- c) mírně chladný 9,1-11,0°C
- d) velmi mírně chladný 11,1-12,5°C
- e) velmi mírně teplý 12,6-14,5°C
- f) mírně teplý 14,6-16,5°C
- g) teplý >16,5°C (u lesních půd se nevyskytuje).

Teplotní režim lze ovlivnit úpravou půdního povrchu nebo jeho krytu. Mulčováním kůrou, rašelinou nebo slámou lze omezit jak vyzařování tepla, tak ztrátu půdní vlhkosti. Při zakrytí půdního povrchu černou fólií dochází během vegetačního období k vzestupu teploty v hloubce půdy 20 cm o 0,4-2,7°C ve srovnání s volnou nekrytou plochou, při zakrytí čirou fólií hodnoty dosahují 3,2-3,9°C. Denní teploty se tímto způsobem mohou zvýšit až o 7°C.

6 PŮDOTVORNÉ PROCESY, PŮDNÍ TAXONOMIE

6.1 Půdotvorné procesy

V kapitole 2 jsme hovořili o základních procesech, které se podílejí na formaci půdního tělesa (přeměna, transport, obohacení, ztráta). Tyto procesy probíhají v půdě vždy alespoň v minimální míře. V této kapitole jsou popsány půdotvorné procesy, jejichž průběh, intenzita a vůbec přítomnost v půdě je podmíněna půdotvornými faktory a mírou jejich účinku na morfogenezi – utváření půdních horizontů v zákonitém sledu. Tyto procesy mohou v půdě probíhat individuálně nebo za souběhu a vedou ke složitější formaci půdního tělesa, tvorbě půdních horizontů a celého půdního profilu.

6.1.1 Procesy rozpadu a přeměny hornin

Tyto procesy vedou buď k utváření půdy „in situ“, tedy v místě zvětrávání horniny, která postupně přechází v půdotvorný substrát, nebo dávají vzniknout sedimentům, na kterých se po transportu a uložení na deponium utváří půda z alochtonních materiálů. Tyto jsou potom zpravidla jemnozrnnější. Zrnitostí odpovídají unášecím silám schopným přemístit sediment z místa vzniku do místa uložení.

ROZPOUŠTĚNÍ znamená přechod pevné fáze v kapalnou (která je homogenní) vlivem rozpouštědel. Zpravidla probíhá díky působení kyselin (např. ve formě CO_2 , který přechází v kyselinu uhličitou, nebo organických kyselin atd.). Rychle rozpustné (ve vodě) jsou např. soli (zejména chloridy) nebo sírany (zejména sádrovec nebo anhydrit), pomalu rozpustné (v kyselinách) jsou karbonáty.

HYDRATACE znamená obohacení nějaké látky na molekulární úrovni o vodu, např. vznik sádrovce z anhydritu podle rovnice $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nebo goethitu z hematitu podle rovnice $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{voda} \rightarrow 2\text{FeOOH}$.

HYDROLÝZA je chemický proces vyvolaný iontem H^+ nebo OH^- obsaženým ve vodě. Důsledkem je např. změna primárních minerálů, zejména primárních Al-křemičitanů, na (v konečném důsledku) jílové minerály. Kyselá hydrolýza probíhá díky účinku H^+ nebo organických kyselin nebo oxidu uhličitého, neutrální nebo alkalická hydrolýza probíhá za účinku aniontu OH^- , který se uvolňuje během intenzivního zvětrávání např. v tropickém klimatu. Hydrolýza je významný proces, který se podílí na rozpouštění minerálů a na změnách v rámci půdního profilu. Při hydrolýze jsou některé složky původní látky uvolněny z vazeb a stávají se v půdě mobilními (jako např. bazické kationty) nebo se bezprostředně po uvolnění stanou stálou součástí nových struktur a podílejí se na vzniku (neoformaci) nových minerálů (např. kaolinit).

6.1.1.1 Procesy přeměny hornin

Krystalické horniny podléhají zejména hydrolýze. Bazické horniny zvětrávají rychleji (obsahují součástky málo odolné ke zvětrávání), zatímco kyselé horniny – granitoidního typu – zvětrávají pomaleji.

Při zvětrávání některé součástky vytvářejí pouze mechanicky rozpadlé zbytky, např. křemík, některé jsou při zvětrávání přeměněny – např. živce nebo slídy. Ty potom přecházejí v jílové minerály zděděné, přeměněné nebo neoformované.

Sedimentární horniny podléhají zejména změnám z rozpouštění (vznikají tak zděděné jíly jako zbytky dekarbonizace) nebo změnám z mechanického rozpadu (pískovec v písek, jílovec nebo slínovec v jíl). Zvětráváním tak přecházejí zpevněné sedimenty v původní nezpevněné.

6.1.1.2 Změna a vývoj jílových minerálů

Během těchto přeměn dochází ke vzniku rozpustných produktů, koloidních gelů s chemickým složením (obecně R_2O_3) a nerozpustných zbytků (křemen, slídy). Intenzita a rychlost těchto procesů

závisí na teplotě a vlhkosti, kdy odlišné jílové minerály vznikají v tropickém podnebí, aridním podnebí, podnebí mírného pásu atd.

CELKOVÁ HYDROLÝZA probíhá v teplém klimatu a chemicky více méně neutrálním prostředí. Neoformace závisí na pH a vodním režimu, kdy při $\text{pH} < 5$ a v dobře odvodněném prostředí (např. na svazích) je vytěšňován křemík a v místě zvětrávání zůstává gibbsit (oxid hlinitý) a oxidy železa. V kyselém prostředí a středně intenzivním odvodnění se tvoří kaolinit a v místě zvětrávání zůstává zbytkový křemík a hliník. V prostředí špatně odvodněném a bohatém na báze dochází k tvorbě jílového minerálu montmorillonitu v procesu tzv. „neoformace“.

ČÁSTEČNÁ HYDROLÝZA probíhá v mírném klimatu a v prostředí s větším obsahem humifikované organické hmoty. Při slabé transformaci vznikají tzv. „zděděné“ jíly jako illit, při intenzivnější transformaci vznikají buď degradované jíly jako je vermikulit nebo smektit nebo agraované jíly (vznikající rekonstrukcí málo stabilních jíků) jako je chlorit. Pokud degradace (hydrolytická) neustává, proces postupně přechází v podzolizaci (viz dále).

Výše uvedené procesy jsou závislé zejména na vnějších podmínkách souvisejících s klimatem. Klima však není jediným faktorem ovlivňujícím změny v minerálním charakteru půdy: vedle klimatu je významná také topografie. Ta má na lokální úrovni za následek přesun chemicky aktivních roztoků a jejich koncentraci v depresích nebo naopak ochuzení v drénovaných částech reliéfu. Zejména v intenzivním klimatu (např. tropickém) je tak topografie významným faktorem podílejícím se na procesech spojených s neoformací či děděním jílových minerálů a s tím spojeným vznikem, změnou nebo vazbami dalších chemických sloučenin.

6.1.2 Migrace prvků a sloučenin

Migrace (pohyb v rámci půdního tělesa) může být **(A)** sestupná (převažuje v humidním klimatu, kdy vsakující voda hydrolyzuje půdní částice koloidního charakteru a transportuje je do nižších partií půdního tělesa), **(B)** vzestupná (převažuje v aridním klimatu, kdy půdní voda vlivem intenzivního výparu „stoupá“ půdním profilem a s ní jsou vynášeny rozpuštěné soli, které se sráží na půdním povrchu v podobě výkvětů nebo kůr) nebo **(C)** laterální (kdy je pohyb vody ovlivněn topografií, zejména pak větší svažitostí a voda se pohybuje částečně sestupně ve směru působení gravitace a částečně souběžně s půdním povrchem).

VYMÝVÁNÍ (LIXIVIACE) má za důsledek migraci rozpustných solí. Má za následek snížení saturace sorpčního komplexu půdy, acidifikaci a migraci solí do místa akumulace (vysrážení), zpravidla v řádu cm až desítek cm hlouběji než kde je místo rozpouštění. Rozpouštěnými solemi jsou nejčastěji sírany, chloridy a karbonáty (dekarbonizace); v tropických rovníkových oblastech také křemičité látky.

DEKARBONIZACE znamená změnu chemismu v důsledku rozpouštění karbonátů, jejich přechodu do půdního roztoku a odpavení. Při intenzivním promyvném režimu půdy mohou být karbonáty z půdy zcela vyplaveny, nebo se mohou srážet v hlubších horizontech ve formě konkrecí, nodulí, pseudomycelií, cicvárů apod. ve sprašových půdách. Dekarbonizace je iniciační proces pro ilimerizaci (viz dále).

PODZOLIZACE (CHELUVIACE) je acido-komplexolýza neboli hydrolýza v silně kyselém prostředí. Znamená chemický transport kovů (Fe^{3+} , Al^{3+}) ve formě chelátů (chemické sloučeniny, kdy je iont kovu pevně spojen s organickou molekulou v nerozpustnou sloučeninu), organických látek a částečně také kyseliny křemičité. Jejich pohyblivost je způsobena zejména přísunem okyselujících látek, což má za následek degradaci organické hmoty a destrukci krystalické mřížky jílových minerálů, tvorbu chelátů a jejich migraci do spodického horizontu. Jílové minerály se rozpadají vlivem výrazného přebytku vodíkových iontů H^+ , ve velké míře disociovaných z fulvokyselin. Ionty vodíku vytěšňují křemík Si^{4+} z krystalických struktur. Protože má však vodík přibližně poloviční velikost a není schopen navázat kyslíky ve vrcholech tetraedrů krystalů jílových minerálů, dochází k jejich rozpadu.

Při podzolizaci jsou z eluviálních horizontů přemisťovány také bazické kationty (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ apod.). Eluviální horizonty se vyvíjejí z horizontu Ah, který s postupující podzolizací přechází

v horizont Ahe (koloidy ochuzený humózní horizont s vybělenými křemennými zrny) až Ae, Ae/Ep, až je diferencován samostatně horizont Ep (podzolizací ochuzený), který je typický světle šedou až bílou barvou.

Pod eluviálním horizontem se vyvíjejí diagnostické spodické horizonty zbarvené pigmentujícími humusovými látkami do hnědých odstínů a seskvioxydů do rezivých odstínů: Bsd (ortštětňový ztvrdlý spodický), Bh (humusoluvialní), Bhs (humusoseskvioxydový), Bs (seskvioxydový). Tyto horizonty dokládají iluviační procesy srážení transportovaných látek. Spodické horizonty obsahují alespoň 30-40 % amorfního železa, což je sledováno tzv. poměrem Feo/Fet (oxalátové železo/celkové železo) alespoň 30 %. Půdy jsou silně kyselé a sorpčně silně nenasycené: ve spodickém horizontu je bazická saturace nižší než 30 %, saturace sorpčního komplexu hliníkem je nad 30 %.

Přechody horizontů jsou často zvlněné až kapsovitě a ostré.

Podzolizace probíhá za intenzivně promyvného režimu půdy, tedy při vysokých srážkových úhrnech, při vysoké propustnosti např. písčitých půd, na minerálně chudých horninách a při nízké biologické aktivitě půdy (z edafonu jsou zastoupeny zejména houby). Vyznačují se morovými formami humusu (viz kapitola 7.3.1) a zpomalenou humifikací. Podzolizaci podporuje kyselý, chudý a obtížně rozložitelný opad jehličnatých dřevin, např. smrku nebo borovice, při jehož rozkladu vznikají nízkomolekulární kyselá a nestabilní fulvokyseliny. Intenzita a rychlost podzolizace je značně závislá na vlastnostech matečné horniny. Na chudých písčích se může Ep horizont vyvinout i v rámci několika let. Tento materiál podzolizaci favorizuje, neboť se zde tvoří pouze nestabilní a celkově málo zastoupené vazby železa a organické hmoty. Naopak na minerálně bohatších a texturně těžších substrátech může podzolizace trvat stovky až tisíce let.

V půdní taxonomii má podzolizace vazbu na vývoj kambizemě dystické v iniciačních fázích; v pedogenezi dále navazují kryptopodzoly s vývojem organominerálního horizontu Ahe (popř. Ep) a spodického horizontu Bsv.

ILIMERIZACE (LESIVACE) je proces mechanického přemisťování jílu bez změny jeho stavby. Jedná se o fyzikálně-chemický proces, při kterém dochází za mírné acidifikace (které zpravidla předchází dekarbonizace) k peptizaci půdní struktury (rozmělnění na jednotlivé půdní částice, ztráta soudržnosti půdních částic). Následně je jíl dispergován na jednotlivá zrna a mechanicky translokován do spodních částí půdy s gravitační vodou. Zde dochází ke zpětné koagulaci jílu (tvorbě agregátů), neboť jsou zde ve větší míře obsaženy soli bohaté na dvojmocné báze jako Ca^{2+} . Jíl se zde sráží ve formě argilanů na kutanech, což jsou povlaky jílu a s ním spojené světlejší útvary na povrchu pedů (půdních agregátů).

Eluviální, ilimerizací ochuzené horizonty se označují El. Vyvíjí se v nich lamelární (lístkovitá) struktura, jsou chudé na jíl a nabývají světlých (plavých) barev. U šedozeří je eluviální horizont označován Ame. Vzniknul zpravidla vývojem z černozeří, které byly degradovány např. vlivem změny stepní vegetace na lesní, která má acidifikační charakter.

Horizont El přechází do luvického, jílem obohaceného horizontu Bt. Přechod je zvlněný při mírné ilimerizaci a klínovitý až jazykovitý při intenzivní ilimerizaci. Luvický horizont je texturně těžký, má tmavší odstíny a polyedrickou až prismatickou strukturu a je sorpčně nasycený s vysokou kationtovou výměnnou kapacitou. Při výrazné ilimerizaci je patrný výrazný přechod mezi El a Bt a vyvíjí se degradovaný horizont Btd. U šedozeří je luvický horizont obohacený také o humusové látky, má tmavé argilany a značí se Bth.

Mezi horizonty El a Bt je výrazná texturní diferenciacie, která udává poměr procentického obsahu jílu v horizontu Bt : procentickému obsahu jílu v horizontu El. Při vývoji luvických subtypů půd je texturní diferenciacie alespoň 1,2 až 1,8; při vývoji hnědozeří je texturní diferenciacie 1,6 až 1,8; při vývoji luvizemí 2,7 až 2,9 (min. 2,2).

Ilimerizace probíhá zejména na substrátech odvápněných spraší, sprašových hlín, polygenetických hlín nebo na substrátech zvětralin s eolickou příměsí.

Ilimerizace je vázána na vývoj luvických subtypů a půdních typů referenční třídy Luvisoly (šedozeří, hnědozeří, luvizemě). Ve smyslu polygeneze půd může na ilimerizační proces navazovat

oglejení, které dokládá periodickou stagnaci vody v půdním profilu: voda je v půdě s vývojem luvického horizontu zadržována na stále delší dobu a luvizem může přecházet v oglejené subtypy až v pseudogleje a stagnogleje (referenční třída Stagnosoly).

6.1.3 Metamorfické půdotvorné procesy

V podmínkách mírného klimatického pásu s humidním klimatem je dominantním metamorfickým půdotvorným procesem **brunifikace** neboli **hnědnutí**. Jde o vnitropůdní zvětrávání v místě rozpadu horniny (*in situ*) za vzniku diagnostického horizontu Bv.

Brunifikace probíhá ve slabě kyselém prostředí. Dochází k přeměně alumosilikátů a dalších silikátů, zejména obsahujících železo Fe^{2+} . Železo přechází do oxidované formy, kdy vzniká limonit (hnědel) a goethit jako Fe-oxyhydroxid a vznikají také další barvící složky, jako oxidy Mn a sekundární (jílové) minerály. Tyto složky podmiňují vývoj okrových až rezavohnědých barev difuzně rozptýlených v půdní matrix. Z celkového obsahu železa amorfní oxidy zaujímají až 25 %.

Brunifikaci dokládá diagnostický horizont Bv (kambický, vývoj kambizemí) nebo Bp (pelický, vývoj pelozemí). Ten obsahuje vyšší podíl jílové frakce, má červenější (rezivější) a sytější barevné odstíny a vyšší strukturnost (polyedrické struktury) než organominerální (A) nebo substrátové (C) horizonty. Na rozdíl od ilimerizace, jíl v B horizontu nepochází z migrace půdním profilem, ale ze zvětrávání primárních alumosilikátů (zejména živců).

Brunifikace je proces dokládající poměrně mladý vývoj půd s nepříliš vysokým stupněm zvětrání matečné horniny. V pedogenetické řadě je to proces, na který navazují (nemusí nutně) vývojově starší podzolové půdy v případě kyselých matečných hornin nebo ilimerizované půdy v případě eolických příměsí. Oproti podzolovým půdám jsou půdy s kambickým procesem bohatší na jíl. Železo uvolněné během podzolizačních procesů vytváří rychle vazby s organickou hmotou, neboť je zde nízký podíl jílu, zatímco během kambického procesu vytváří oxidy železa, jílové minerály a organická hmota v krycím souvrství nepohyblivé komplexy. Je-li v důsledku biologické degradace železo uvolněno z humuso-jílových komplexů, rychle se sráží do formy goethitu, který je v půdách značně stabilní. Brunifikace je také vázána na bohatší rostlinný opad, který brzdí acidifikační proces.

Brunifikace však není jediný metamorfický proces: v podmínkách vrchovin tropických oblastí probíhá proces **rubifikace**, který je doprovázen červenou pigmentací metamorfických partií půdního profilu. V těchto půdách je celkově nízký obsah organické hmoty, a proto železo nevytváří vazby s humusovými látkami, nýbrž se přímo sráží do formy hematitu nebo ferrihydritu. Rubifikace je diagnostikována prostřednictvím rubifikovaného – chromického horizontu Br, který je červenějších odstínů a sytějších než výše nebo níže položené partie půdního profilu.

6.1.4 Půdotvorné procesy v hydrických podmínkách

V hydrických podmínkách mohou probíhat dva půdotvorné procesy rozdílné podle míry stagnace vody v půdním profilu. Je-li voda v půdě trvale přítomna a hladina podzemní vody je blízko půdního povrchu, probíhá **glejový** půdotvorný proces, je-li voda v půdě přítomna periodicky a půdní profil je občasně zaplavován vodou, probíhá půdotvorný proces **oglejení**. Při stagnaci vody až na půdním povrchu a za celkově anaerobních podmínek probíhá proces **rašelinění** neboli **ulmifikace** neboli **paludizace**.

V každém případě dochází k procesům, které se projevují ve změně oxidačního čísla ve smyslu redukce – příjmu elektronů ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) nebo ve smyslu oxidace – ztráty elektronů ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$). Redukce probíhá za anaerobních (anoxických) podmínek, oxidace za aerobních (oxických) podmínek.

Při **glejovém procesu** jsou nastoleny převážně anoxické podmínky, přičemž je zaplněno více než 80 % pórů z celkové pórovitosti vodou. Glejový proces se projevuje změnou barvy diagnostických horizontů (viz kapitola 5.1.1), které se značí písmenem G (Gr, Gor, Gro) – viz kapitola 9.1.3.4. Glejový proces probíhá zpravidla v texturně těžkých půdách (jílovito-hlinité, jílovité) nebo ve stratifikovaném půdním profilu, s permanentní dotací půdního profilu podzemní vodou (terénní deprese, blízkost

vodních toků). Glejový proces je spojen s barevnými změnami vlivem redukce železa (šedé zbarvení), fosfátů (modravé, šedomodré zbarvení), siřníků (černohnědé až černé zbarvení) či alumosilikátů (zelenavé zbarvení), železa, hliníku a kyseliny křemičité (šedozelené zbarvení). Protože je dvojmocné železo rozpustnější nežli oxidované trojmocné, může dojít při glejovém procesu k jeho vymývání, zejména za intenzivnějšího laterálního pohybu podzemní vody. V takových případech se v půdním profilu vyvíjí hydroeluviovaný horizont Ew.

Glejový proces doprovází snížení biologické aktivity vlivem anoxických podmínek a tím akumulaci nedokonale rozložené organické hmoty za vzniku hydrogenních holorganických (Ot) nebo organominerálních horizontů At, Ahg nebo Aug a produkce metanu, sirovodíku, alkoholů atd.

Glejový proces je poután s půdami referenční třídy Glejsoly, tedy s půdním typem glej. Je to dvojfázová půda s více méně homogenním zbarvením diagnostických horizontů.

Při **oglejení** neboli **pseudoglejovém procesu** dochází k periodickému zamokření půdního profilu a ke střídání redukčních a oxidačních podmínek. Při redukčním stavu je zaplněno vodou více jak 80 % pórů z celkové pórovitosti. Kovy (Fe, Mn, Al) se za těchto podmínek dostávají do redukovaných forem – např. $\text{Fe}(\text{HCO}_3)$ a s nízkomolekulárními organickými látkami vytváří rozpustné, vysoce pohyblivé cheláty. V průběhu oglejení *neprobíhá* výraznější vertikální posun půdních částic. Vysvětlené (světle šedé až bílé odstíny) půdní horizonty jsou tedy důsledkem zbarvení půdního matrix do šedých odstínů v důsledku redukčních pochodů. Vyplněné póry, trhliny a štěrby zůstávají i po následných oxidačních procesech stále šedé (vytváří se tzv. *ferrany*); ostatní matrice se barví do hnědých až hnědorezivých odstínů, a to ve formě jednotlivých nodulů s vysokým obsahem železa a manganu, tzv. bročků, nebo ve formě skvrn, jazykovitých zátek a rourkovitých novotvarů podél kořenů, nebo v částech půdního profilu s vyšším pH (např. kolem vápencových inkluzí). V půdním profilu se tak vyvíjí typické mramorování s diagnostickým horizontem Bm (viz kapitulu 9.1.3.4) – mramorový redoximorfní horizont s mozaikovitou barevností se střídáním hnědorezivých, okrových až rezivých odstínů, k barvě šedé v poměru převážně 1:1 i méně (1:2).

Diagnostika *redukováného* železa (Fe^{2+}) se provádí pomocí ferrikyanidu draselného nebo také hexakynoželezitanu draselného ($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$), kdy se v kyselém prostředí (předcházející aplikace kyseliny chlorovodíkové HCl) půda zbarvuje do modra vlivem reakce s železnatými ionty Fe^{2+} a vzniká hexakynoželeznan železnatý neboli Turnbullova nebo také pruská modř). Diagnostika *reoxidovaného* železa (Fe^{3+}) se provádí pomocí ferrokyanidu draselného nebo také hexakynoželeznanu draselného ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), kdy se v kyselém prostředí (taktéž předcházející aplikace HCl) půda zbarvuje do modra vlivem reakce s železnatými ionty Fe^{3+} a vzniká hexakynoželeznan železitý neboli berlínská modř).

6.1.5 Zasolování a odsolování půd

Půdotvorný proces zasolení znamená zvýšení obsahu snadno rozpustných solí v půdním profilu. Jedná se především o chloridy (NaCl , KCl apod.) a sírany (CaSO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Tento proces je podmíněn vnějšími podmínkami, a to (1) přítomností solí v půdním roztoku, které jsou zpravidla vyluhovávány z geologického substrátu; (2) kapilárním zdvihem, který plyne ze vzestupného směru pohybu půdní vody. Druhá podmínka je typická pro oblasti s aridním nebo semiaridním klimatem, kde převažuje výpar nad srážkami a ve vodě rozpustné soli jsou vynášeny do svrchních vrstev půdy. Důsledkem pak je srážení solí v půdním tělese v podobě krystalů nebo jejich vynášení až na půdní povrch a tvorba solných kůr. Vyvíjí se salický horizont S, typický vysokými hodnotami elektrické vodivosti. Přítomnost NaCl v půdním roztoku má za následek přechod sodíku do sorpčního komplexu a vytěsnění ostatních živin. Půdy se tak vyznačují výrazně extrémním chemismem.

V případě poklesu hladiny podzemní vody může dojít k vyluhování solí z půdy v důsledku přerušení kapilárního zdvihu. Následně může dojít k vymývání solí z půdy a vývoji eluviálního horizontu Es, pod kterým se nachází na sodík bohatý natrický horizont Nn.

Důsledek zasolení je jednak ve zmíněném extrémním chemismu, jednak ve ztrátě půdní struktury a peptizaci půdy, jednak ke snížení dostupnosti vody rostlinám z důvodu vysokého koncentračního spádu.

K zasolení půdy může docházet také vlivem antropické činnosti – zimní údržby vozovek chemickým posypem –, a to nejen v urbanizovaném území. V takových případech je potom sledována koncentrace solí ve vodních tocích a obsah sodíku v sorpčním komplexu půdy (viz také kapitolu 15.1.5).

Elektronické zdroje (půdotvorné procesy)

Ústav geologie a pedologie, Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta

Atlas lesních půd

http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/ugp-files/atlas_pud/index.html

Procesy v půdě

http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/ugp-files/procesy_v_pude/

Rašeliny, jejich zdroje a využití

<http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/ugp-files/raseliny/>

6.2 Taxonomie půd

Tato kapitola pojednává o základních principech vybraných taxonomických systémů používaných pro klasifikaci půd. Neobsahuje vlastní výčty půdních jednotek, neboť tyto jsou vymezeny v příslušných klasifikačních systémech, na které jsou v daných podkapitolách uvedeny příslušné odkazy.

Účelem každé klasifikace je organizovat poznání na základě vlastností zkoumaných objektů a jejich vzájemných vztahů. Cílem je lépe porozumět zkoumaným objektům a najít jejich společné znaky. Bez klasifikace a systematického seskupování zkoumaných objektů, v tomto případě půd, by vznikalo nezměrné (prakticky nekonečné) množství individuálních jednotek. Seskupování půd podle jejich vlastností umožňuje zpřehlednit výčet půdních jednotek s co nejmenší ztrátou informace o jedinečnosti daného půdního profilu.

Pomocí taxonomie klasifikujeme individuální objekty a řadíme je do hierarchického systému na základě znaků, které příslušný taxonomický systém používá.

Podstatné je si uvědomit, že půda je časoprostorové kontinuum. To znamená, že v půdě probíhají změny v čase, kdy de-facto každou vteřinou každý cm² půdy nabývá jiné půdní vlastnosti, i v prostoru, kdy samotný každý cm² se liší od sousedního cm². Klasifikační systém by měl být „schopný“ vystihnout jedinečnost půdního tělesa a zároveň půdy sdružit do vymezených taxonomických jednotek na základě půdních vlastností a půdotvorných procesů.

Při klasifikaci je nutné celou řadu půdních procesů „ignorovat“ nebo lépe přistupovat k popisu půdních vlastností v hrubším měřítku – tak hrubém, aby vzniklo optimální množství půdních jednotek na všech úrovních taxonomického systému: ani příliš velké na to, aby byl systém příliš nepřehledný, ani příliš malé na to, aby uvnitř dané hierarchické úrovně (např. půdní typ nebo subtyp) byla příliš velká variabilita půdních vlastností.

Zařazením půdy do taxonomického systému by však práce pedologa končit neměla. Důležité je si uvědomit, že taxonomie by měla sloužit jako nástroj pro navazující práci s půdou na úrovni badatelské, inženýrsko-pedologické, lesnicko-pedologické, typologické, agronomické, environmentální, na úrovni ochrany půdy apod.

6.2.1 Mezinárodní systémy

Mezinárodní systémy jsou určeny pro univerzální použití. Měly by být schopné klasifikovat jakoukoli půdu na Zemi a najít společné znaky půd, které se vyvíjejí v různých částech světa.

6.2.1.1 World Reference Base for Soil Classification (WRB)

Je to mezinárodní standard pro klasifikaci půdy, vytvořený mezinárodním svazem půdoznalství (International Union of Soil Science – IUSS). Byl vyvinut ve spolupráci s International Soil Reference and Formation Centre (ISRIC) a financován organizacemi UISS a Food and Agriculture Organization – FAO.

<http://www.iuss.org/>
http://www.itc.nl/~rossiter/research/rsrch_ss_class.html
<http://www.fao.org/home/en/>
<http://www.isric.org/>

World Reference Base (WRB; Michéli et al., 2006) vychází z moderních konceptů půdní taxonomie, jako např. také americká Soil Taxonomy, legenda FAO Soil Map of the World, francouzský systém Référentiel Pédologique a Ruská klasifikace aj.

Klasifikace je založena zejména na půdní morfologii, která vyjadřuje genezi půdy. Hlavní rozdíl mezi WRB a Soil Taxonomy (viz dále) je, že WRB nezohledňuje vliv klimatu jako jednoho z hlavních klasifikačních kritérií. Klima je uvažováno pouze jako kontextuální faktor pro formaci půdy a jejích vlastností. Jakkoli se tak daná půdní jednotka může vyvinout v různých klimatických podmínkách, klasifikace půd není podřízena vlastnostem klimatu. Klasifikace půd je založena na zastoupených diagnostických horizontech, půdních vlastnostech a materiálech, tedy na znacích, které lze změřit nebo pozorovat při terénním průzkumu. Výběr diagnostických charakteristik systému zohledňuje jejich vztah s půdotvorným procesem. Na nejvyšší úrovni systému by diagnostické znaky měly být vymezeny bez vazby na management půdy (např. kultivaci). WRB je koncipován tak, aby umožňoval v maximální míře srovnání s národními klasifikačními systémy. Účelem WRB zároveň není suplovat národní taxonomické systémy, ale spíše podat přehled o půdách Země a zajistit univerzální jazyk pro pojmenovávání půdních jednotek. S tím také souvisí účelnost využití půdních dat pro plnění mezinárodních databází a mezinárodní spolupráce. Nomenklatura pro půdní jednotky z velké části vychází z tradičních a mezinárodně používaných názvů půd. Každá půdní jednotka je však v systému jasně definována, aby nedošlo k případné záměně při podobnosti názvů půd s jinými taxonomickými systémy.

Nejvyšší jednotkou je referenční skupina (**Reference Soil Group – RSG**). RSG sdružuje půdy podle vřdního pedogenetického procesu a s ním spojených diagnostických znaků, nebo podle význačných vlastností půdotvorného substrátu.

Nižší jednotkou systému (druhá úroveň systému) jsou tzv. předpony a přípony (*prefix qualifiers, suffix qualifiers*). Ty popisují souběžně probíhající, avšak méně významné procesy, případně specifické využití půdy. Každá RSG tak může mít jeden nebo více doplňujících *prefix* a/nebo jeden nebo více doplňujících *suffix*. Jejich účelem je detailněji specifikovat půdní jednotku. *Prefix* udává znaky typické pro danou RSG nebo slučuje vedlejší znaky půdy. *Suffix* upřesňuje specifické znaky diagnostického horizontu nebo půdního materiálu, chemické vlastnosti, fyzikální vlastnosti, mineralogické vlastnosti, vlastnosti půdního povrchu, texturní charakteristiky, specifika barvy aj.

Na úrovni RSG (v systému je vymezeno 32 RSG) jsou půdy rozčleněny na základě následujících principů:

Organické půdy jsou odděleny od minerálních v RSG *Histosols*. Antropicky ovlivněné půdy jsou seskupeny do RSG *Anthrosols* a *Technosols*. Dále jsou vymezeny půdy s omezeným prostorem pro kořenění rostlin (*Cryosols* a *Leptosols*), půdy silně ovlivněné vodou (*Vertisols*, *Fluvisols*, *Solonetz*, *Solonchaks*, *Gleysols*) a poslední skupinou jsou půdy s významnou účastí železa a/nebo hliníku v půdotvorných procesech (*Andosols*, *Podzols*, *Plinthosols*, *Nitisols*, *Ferralsols*).

6.2.1.2 Soil Taxonomy

Soil Taxonomy (USDA-NRCS 1999) je americký systém klasifikace půd. Systém byl poprvé publikován v r. 1975, v současnosti je aktuální 2. vydání z roku 1999. K systému jsou v různých časových intervalech vydávány aktualizace a uživatelské klíče (USD-NRCS 2010), které obsahují popisy diagnostických horizontů a půdních jednotek.

Soil Taxonomy je vystavená v principech hierarchického systému, který seskupuje půdy podle podobných znaků do kategorií od obecných vlastností po detailnější charakteristiky.

Soil Taxonomy je systém založený na jasně definovaných znacích půdy. Nepracuje tak výrazně s půdní genezí, jakkoli ji nelze ignorovat, neboť půdy svým vývojem spějí do stavu, který je klasifikací zastížen. Americká taxonomie však ve srovnání s morfogenetickými systémy, jako WRB, Francouzská taxonomie (Referentiel Pédologique, Baize et al. 2009) nebo český klasifikační systém (Němeček et al. 2011) více založena na exaktně zjištěných půdních parametrech, pomocí kterých jsou půdní jednotky jednoznačně definovány (teplotní a vlhkostní režim, barva, textura, struktura půdy nebo chemické a mineralogické vlastnosti, obsah organické hmoty, jílu, oxidů železa a hliníku, vlastnosti jílových minerálů, obsah solí, pH, bazická saturace, hloubka půdy aj.). Některé půdní vlastnosti jsou tak zjištěitelné v terénu, ale celá řada je dána až výsledky laboratorních rozborů půdy.

Klasifikace půd je dána vlastnostmi následujících parametrů:

- **Vlastnosti epipedonu:** epipedon je nejsvrchnější část půdy (která se ale nepřekrývá s pojetím A horizontu), která zahrnuje diagnostické povrchové horizonty. Zahrnuje jak organominerální vrstvu, tak eluviální vrstvu půdy a může zasahovat i do B horizontu, je-li výrazně obohacen o organickou hmotu. V klasifikaci je vymezeno celkem 7 epipedonů.
- **Diagnostické podpovrchové horizonty:** z množství půdních horizontů, které lze v rámci Soil Taxonomy determinovat, je 18 horizontů diagnostických. Z hlediska stratigrafie půdy je podstatné, že epipedon nemusí být vždy „ležící“ na podpovrchovém horizontu, nýbrž se může spodní hranice epipedonu a horní hranice podpovrchového horizontu překrývat (epipedon může zahrnovat např. i iluviální Bt horizont).
- **Vlhkostní režim půdy:** vlhkostní režim hodnotí přítomnost nebo absenci vody a její přístupnost rostlinám (více o vlhkostním režimu viz kapitolu 4.4).
- **Teplotní režim půdy:** klasifikace teplotního režimu se používá pro specifikaci půdních jednotek na nižších úrovních systému (kromě *cryic* – z řečtiny „mrazivý“ –, který se používá na vyšších úrovních systému. Klasifikace teplotního režimu vychází z roční průměrné teploty půdy, průměrné letní teploty půdy a rozdílu mezi průměrnou letní a průměrnou zimní teplotou půdy v hloubce 50 cm (více viz v kapitole 5.2.2).

Soil Taxonomy je hierarchický systém o šesti úrovních: (1) order (12x) jako nejvyšší úroveň popisující nejobecnější parametry pro klasifikaci půdy, (2) suborder (63x), (3) great group (319x), (4) subgroup (2484x), (5) family (cca 8000x), (6) series (cca 19000x) jako nejnižší úroveň s největší specifikací půdy. Protože systém je hierarchický, každá vyšší jednotka obsahuje jasně definovaný výčet nižších jednotek, podobně jako např. v botanickém systému rostlin, kde je třída, řád, čeleď, rod atd.

6.2.2 Taxonomický klasifikační systém půd České republiky

Taxonomický klasifikační systém půd ČR (Němeček et al. 2011) je klasifikace hierarchická, multikategorická a také taxonomická. To znamená, že systém je víceúrovňový, na každé úrovni obsahuje více kategorií a tyto kategorie jsou jasně definovány. Systém je založen především na morfologických znacích, které lze (stejně jako u WRB) zjistit v terénu, zatímco analytické znaky zjištěitelné laboratorními rozborů jsou méně preferovány.

Systém obsahuje klasifikaci diagnostických horizontů, které jsou hlavním nástrojem pro vymezení půdních jednotek a klasifikaci forem nadložního humusu. Obsahuje také výčet diagnostických znaků, které jsou při klasifikaci půd zohledňovány: stadia vyluhování půdy

(vyluhování karbonátů a živin ze sorpčního komplexu), znaky trofismu (minerální sílu půdy), hydromorfismu (ovlivnění půdy vodou), přítomnost solí v půdě, fluvické znaky (zohlednění fluválního procesu akumulace materiálu vodou), vertické znaky (ve vazbě na přítomnost smektitických jílu a s nimi spojenými vlastnostmi bobtnání a smršťování při přijímání nebo ztrátě vody), andické znaky (na specifických substrátech sopečných tufů a sopečného skla), znaky eroze, akumulace nebo překrytí půdy, antropogenní ovlivnění, kontaminace a intoxikace. Vedle půdních horizontů systém klasifikuje také půdotvorné substráty, které mají přímou vazbu na vývoj půd a půdních jednotek. Půdotvorné substráty jsou klasifikovány na úrovni půdní formy.

Systém obsahuje celkem 9 taxonomických úrovní:

- **Referenční třída:** vyjadřuje vůdčí pedogenetický proces nebo půdotvorný faktor. Vymezení referenční třídy je jednoznačnými znaky, jako je matečná hornina, skeletnatost, ovlivnění vodou, vůdčí půdotvorný proces, antropické ovlivnění. Referenční třída má název s koncovkou –sol.
- **Půdní typ:** je hlavní jednotkou klasifikačního systému. Je charakterizován určitým diagnostickým horizontem (např. kambizem – kambický horizont Bv) nebo sekvencí diagnostických horizontů (např. podzol – podzolizací ochuzený horizont Ep; humusoseskvioidový horizont Bh_s; seskvioidový horizont Bs).
- **Půdní subtyp:** vyjadřuje modifikace půdního typu. Označuje se přídavným jménem za označení půdního typu. Půda se může vyvíjet buď ve smyslu typické pedogeneze – v tom případě se označuje subtyp jako „modální“ neboli typický –, nebo v půdě probíhá více půdotvorných procesů (např. kambizem luvická, kde je diagnostickým horizontem kambický horizont Bv, avšak paralelně dochází k výraznému transportu jílu půdním profilem). Půdní subtyp dále poukazuje na výraznější ovlivnění vodou (např. kambizem oglejená poukazuje na periodické zamokření a s ním související vývoj znaků hydromorfismu, jako např. mramorování), na známky vyluhování profilu (např. kambizem vyluhovaná, která se vyvinula na karbonátových horninách, které ale byly z profilu vymyty perkolující vodou), na specifické znaky zrnitostního složení (např. kambizem pelická, která poukazuje na zrnitostně těžké substráty) nebo na antropické ovlivnění (např. kambizem antropická).

Do jisté míry slabým místem systému je zohlednění antropického vlivu na půdu, zejména ve svrchních partiích půdního tělesa, což může ztížit kompatibilitu systému s mezinárodními systémy. Nejvyšší kategorie (referenční třída, půdní typ, půdní subtyp) jsou proto hodnoceny v kontrolní sekci hlouběji 0,25 m v případě zemědělských půd a hlouběji 0,20 m v případě ostatních půd. Znaky, které jsou významné a půdně specifické do hloubky 0,25 resp. 0,20 m jsou zohledněny na úrovni variet a ekologických fází (např. výrazné humusové horizonty, mikropodzolizační procesy, humusové formy). Ve stejné hloubce jsou na úrovni subvariet a degradačních fází půdy hodnoceny znaky trofismu, kontaminace a degradace půdy.

- **Půdní varieta:** poukazuje na znaky v hloubce minerální půdy do 25-20 cm. Protože tyto znaky jsou u zemědělských půd „smazány“ kultivací půdy, variety se používají pouze u lesních půd. Vyjadřují méně výrazné ovlivnění vodou (např. kambizem modální slabě oglejená), méně výrazné okyselení (např. kambizem modální mezobazická), zasolení nebo specifické znaky substrátu (např. kambizem modální hořečnatá).
- **Půdní subvarieta:** vyjadřuje trofismus půdy, který vyplývá z kontextu humusové formy, minerální síly substrátu, nasycenosti sorpčního komplexu a složení vegetace. Např. kambizem modální mezobazická mezotrofní).
- **Ekologická fáze:** charakterizuje formu nadložního humusu. Protože u zemědělských půd je minerální část půdy obnažena a vývoj humusové formy prakticky neprobíhá, ekologické fáze se vymezují pouze u lesních půd.
- **Degradační a akumulační fáze:** tato úroveň systému vyjadřuje antropické ovlivnění, jako je kontaminace půdy, eroze, akumulace antropického materiálu nebo akumulace vlivem antropické činnosti v následku odlesnění, pedokompakce apod.

- **Hlavní substrátová půdní forma:** není v pravém slova smyslu hierarchickou jednotkou, neboť není jednotkou nejnižší. Substrátová forma u každé půdní jednotky vyjadřuje typ substrátu, jeho zrnitost, význam pro pedogenezi apod.

<http://klasifikace.pedologie.cz/>

http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/ugp-files/atlas_pud/index.html

7 ORGANICKÁ HMOTA LESNÍCH PŮD

7.1 Uhlík jako základní složka organické hmoty

Uhlík je v půdě obsažen ve dvou formách: anorganické a organické. Anorganická forma uhlíku je zastoupena zejména karbonáty. Organický uhlík vstupuje do půdy ve formě odumřelých těl rostlin a živočichů a exkrementů. Odumřelá organická hmota je rychle kolonizována a dekomponována půdními organizmy za účelem získání energie, nejlépe v aerobních podmínkách. Kombinace odumřelé a živé složky lesních půd se nazývá **půdní organická hmota**.

Během dekompozice jsou jednotlivé stavební součásti (prvky) převedeny ze strukturně složitě organické formy do jednoduché anorganické (mineralizace). V případě uhlíku vzniká oxid uhličitý (CO_2). Zbytek uhlíku je společně s dalšími prvky (P, N, S) využit pro výstavbu organických struktur mikroorganismů (mikrobiální uhlík, C_{mic}). Dochází tak k imobilizaci prvků (živin), které jsou po dobu života organismu v půdě nepřístupné rostlinám. Soubor procesů zahrnující blokování, syntézu, dekompozici uhlíku prostřednictvím půdních organismů, rostlin, zvířat a atmosféry představuje koloběh uhlíku. Pro uhlík představuje organická hmota velmi významný uhlíkový sink („zásobárna“, „vazač“). Spalováním fosilních paliv dochází k degradaci organické hmoty a tím uvolňování dlouhodobě vázaného uhlíku do atmosféry v podobě CO_2 , což podle převažujících soudobých tezí výrazně přispívá ke globálním klimatickým změnám (Samec et al. 2008, viz také kapitulu 15.4)

Vedle uhlíkového sinku organická hmota plní v půdě celou řadu funkcí, ve kterých je de facto nezastupitelná. Organická hmota

- **z hlediska fyzikálních vlastností**

- zlepšuje vlastnosti extrémně zrnitých půd (těžkých jílovitých i lehkých písčitých), kde působí jako provzdušňující nebo naopak tmelící a retenční složka;
- ovlivňuje pohyb (zadržování) vody (organická hmota je schopná vázat 7-10x větší množství vody, než sama váží;
- ovlivňuje technologické (z hlediska možností práce s půdou) vlastnosti půdy;
- vytváří vazby se seskvioxidy a tvoří cheláty (sloučeniny s kovy);

- **z hlediska chemických vlastností**

- pufruje vstupy látek měnících půdní chemismus, je více nasycena bazickými kationty (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), tvoří soli (humáty, fulváty, hymatomeláty) a udržuje stabilní hodnotu pH;
- má silné sorpční vlastnosti;
- působí detoxikačně;

- **z hlediska biologických vlastností**

- představuje substrát obývatelný většinou půdních organismů, pro které je navíc zdrojem energie;
- organické kyseliny pozitivně ovlivňují metabolismus rostlin, vyvolávají prodlužovací růst kořenů, zvyšují odolnost proti suchu, stimulují syntézu chlorofylu a klíčení semen.

Omezování množství organické hmoty v půdě nebo nedostatečná péče o její zastoupení je často zdrojem příčin snižování půdní úrodnosti a stability lesních i jiných ekosystémů. Zejména v lesním prostředí s dlouhodobými procesy a koloběhy látek a s více uzavřenými cykly je organická hmota naprosto klíčovou složkou půdy. Na rozdíl od agronomických systémů péče o organickou hmotu lesních půd většinou nespočívá v jejím dodávání z externích zdrojů např. ve formě kompostů a substrátů (nehovoříme-li o cíleném hnojení lesních dřevin na obtížně zalesnitelných stanovištích, které vyžaduje nikoli rutinní, ale zcela individuální projektový přístup ke každé lokalitě). Z lesnicko-pedologického hlediska by péče o organickou hmotu měla spočívat zejména v optimálním přístupu k lesnicko-pěstebním, hospodářsko-úpravnickým i lesnicko-těžebním otázkám (vhodná dřevinná

skladba, vhodné obnovní a pěstební postupy, šetrné těžební technologie, vždy volené s ohledem na přírodě blízké přístupy s minimálním narušením dlouhodobě nastolených cyklů).

7.2 Vznik a rozklad organické hmoty, humus

Organická hmota (O.H.) vzniká souběžně se vznikem a vývojem půdy. Půda je výsledkem spolupůsobení biotických a abiotických faktorů; bez účasti biotické složky by organická hmota a tedy ani půda nemohla dlouhodobě existovat. Komplexní molekuly organické hmoty po odumření podléhají mikrobiálním přeměnám, během kterých dochází k uvolňování prvků a jednoduchých sloučenin (NH_4^+ , SO_4^- , Ca^{2+} , CO_2 atd.). Tento proces se nazývá **primární mineralizace**, která je v biologicky aktivním prostředí poměrně rychlá. Ve fázi primární mineralizace je řada elementů buď vyplavena, nebo emitována do prostředí nebo asimilována rostlinami. Proces, kdy dochází za přísunu vzdušného kyslíku (v aerobním prostředí) k novotvorbě komplexních molekul, které jsou tmavě zbarvené a mají charakter koloidu a vzniká **humus**, se nazývá **humifikace**. Humusové látky se vyznačují větší stabilitou i složitostí vnitřních struktur. Vytvářejí často komplexy s minerálním podílem půdy, vyznačují se dlouhodobě stálým iontovým nábojem, který je v podmínkách mírného klimatu nejčastěji záporný (viz kapitulu 11.2), a pomaleji podléhají biologické degradaci. Dochází-li k rozkladu takovéto humifikované organické hmoty na jednoduché sloučeniny, hovoříme o **sekundární mineralizaci**. Proces, kdy dochází za nepřístupu vzdušného kyslíku (v anaerobním prostředí) ke změně organické hmoty se nazývá **ulmifikace**.

Uhlík tvořící organickou hmotu se nazývá organický uhlík (C_{org}). Při laboratorním stanovení se uhlík stanovuje jako tzv. oxidovatelný (C_{ox}), a to zpravidla ztrátou žíháním (v současnosti již opouštěná metoda) nebo v chromsírové směsi. V půdách na nekarbonátových horninách lze říci, že C_{ox} odpovídá obsahu C_{org} , zatímco v půdách s příměsí karbonátů je třeba tyto veličiny rozlišovat, neboť celkový obsah uhlíku je navýšen o uhlík ve formě CaCO_3 . Humusové látky (H.L.) jsou tvořeny uhlíkem C_{ox} přibližně ze 60 %. Pro vyjádření podílu obsahu humusových látek pomocí C_{ox} na lze použít uvedený ve .

$$\text{H.L.} = \text{C}_{\text{ox}} \times 1,724 \quad [\%]$$

Výpočet obsahu uhlíku ($\%\text{C}_{\text{ox}}$) při stanovení obsahu organických látek ztrátou žíháním ($\%\text{O.L.}$) s využitím empirických hodnot:

$$\%\text{C}_{\text{ox}} = 0,51 \cdot \%\text{O.L.} + 0,48$$

7.2.1 Aerobní procesy přeměny organických látek

Humus představuje odumřelé zbytky organismů jednotlivých generací rostlinného společenstva, které podléhají rozkladu (dekompozici) a celé řadě změn. Protože vznik humusu je vázán na dekompozici organické hmoty, z níž je většina zastoupena rostlinnou hmotou, vznik humusu v podstatě představuje „nahromaděnou“ sluneční energii a úzce souvisí s koloběhem uhlíku.

Humus je hlavním a téměř jediným zdrojem dusíku v lesních půdách

Tab. 7—1: Množství uhlíku obsažené v hlavních zemských systémech.

Typ „úložiště“ uhlíku na Zemi	Obsah C [mld. t]
Humus v půdě	2 500
Humus v mořích a oceánech	1 000
Rozpuštěný HCO_3^- v moři	38 400
Fosilní paliva	10 000
Atmosféra	700
Organizmy na souši	830
Organizmy v moři	50
Vápencové sedimenty	60 000 000

Humusotvorný materiál – **ektohumus** – představuje primární organickou hmotu (odumřelé dřevo, stonky, jehličí, listy atd.). Se stárnutím ektohumusu se postupně snižuje obsah vody (v čerstvém opadu je 30-50 %, v suchém – starším – opadu je 10-20 %).

Organická hmota je tvořena hlavními makrobioelementy v množství C = 45-48 %, O = 42-45 %, H = 6-6,5 %, N = 1,5 – 1,8 %, popeloviny = 5 %. Při spalování (mineralizaci) se z organické hmoty uvolňuje C, N, H a O, jejichž podíl na složení tedy klesá a zůstávají původně méně zastoupené prvky, jako Ca, Mg, K, P, Na, Al, Fe, Si (popeloviny).

Tab. 7—2: Procentuální složení dřeva a asimilačních orgánů jehličnatých a listnatých dřevin (orientační hodnoty nespecifikované pro konkrétní druhy).

Rostlinná část / její stavební složka	Celulóza	Hemicelulózy	Lignin	Tuky, vosky pryskyřice	Bílkoviny	Cukry	Popel
Jehličí	44	9	18	6	4	16	4
Listy	37	14	12	3	6	23	5
Dřevo jehličnanů	44	15	30	3	1	1	0,3
Dřevo listnáčů	47	24	20	2	2	1	0,3

Při přeměně odumřelé organické hmoty dochází k rozkladu humusového materiálu (ektohumusu). Během tohoto procesu vznikají nové látky jako meziprodukty a také jsou syntetizovány nové organické sloučeniny, u kterých už nelze rozpoznat výchozí materiál.

Rozklad (dekompozice) organické hmoty je ovlivňován řadou faktorů, které se podílejí jednak na intenzitě rozkladu, jednak na složení i fyzikálních vlastnostech výsledného produktu. Jsou jimi zejména půdní reakce (pH), obsah živin – zejména P a N –, textura půdy (lehké, střední nebo těžké), půdní vlhkost, teplota půdy, provzdušněnost půdy, enzymatická aktivita (zejména aktivita oxidáz, celuláz a fosfatáz), celková biologická aktivita a druhové složení půdní bioty.

V procesu přeměny a tvorby humusu zaujímá významný podíl na přeměně **mineralizace**, během které dochází k uvolňování energie a úplnému rozkladu výchozího materiálu (v tomto případě organické hmoty). Mineralizace je především aerobní proces, při kterém jsou produktem základní minerální látky (CO_2 , H_2O , NH_3 , H_2 , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , SO_3 apod.). Během přeměny organické hmoty mineralizaci podléhá téměř 50 % materiálu. Příznivé podmínky pro mineralizaci jsou dány zejména teplotou (optimum při 25°C), vlhkostí (spíše mírně vlhké půdy s dostatečným provzdušněním než vlhké). Provzdušněnost zajišťuje intenzivní rozvoj a činnost aerobních bakterií a jiné mikroflóry a tím intenzivní mineralizaci. Ta může ale probíhat i za anaerobních podmínek za vzniku stejných (avšak redukovaných) produktů. Takto dochází např. při kvašení celulózy (A) za aerobních podmínek ke vzniku $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ a (B) za anaerobních podmínek ke vzniku $\text{CO}_2 + \text{H}_2$.

Při **humifikaci** je energie naopak spotřebovávána. Za střídání anaerobního a aerobního procesu se tvoří tzv. pravý (nebo také aktivní nebo také vlastní) humus. Humifikace je především enzymatický a biochemický proces, kdy z meziproduktů dekompozice vznikají nové složité organické látky. Humusové látky (**endohumus**) mají větší podíl uhlíku než výchozí organická hmota (**ektohumus**), mají tmavohnědou až černou barvu a mají koloidní vlastnosti. Humifikace probíhá ve 4 procesních fázích, při kterých jsou podmínky optimální, dochází-li ke střídání aerace a anaerace (provzdušněnosti a deficitu kyslíku):

MINERALIZACE, která probíhá v počátečním stádiu. Během rozkladu nedochází k humifikaci veškerého výchozího materiálu, nýbrž vždy také částečně zmineralizuje.

ŠTĚPENÍ, při kterém dochází k rozkladu organických látek na meziprodukty – ze složitějších na jednodušší –, kterými jsou zejména fenolické sloučeniny. Ty jsou produktem enzymatického rozkladu ligninu, taninů, hemicelulóz a celulózy.

KONDENZACE strukturních jednotek, při které se vytvářejí vedlejší produkty důležité pro tvorbu humusových látek. Dochází ke kondenzaci (srážení) strukturních jednotek procesem oxidace výše

uvedených fenolů pomocí enzymů (např. fenoloxydáz) a vznikají chinony a kondenzační látky jako výsledek reakce chinonů s aminokyselinami a peptidy.

POLYKONDENZACE (polymerace), při které vznikají stabilní humusové látky. Jedná se o chemický proces bez vzniku meziproduktů. Vedlejším produktem polykondenzace je voda, která musí být z reakčního prostředí odváděna. V opačném případě dochází ke zpomalení až pozastavení procesu a nastolení podmínek hydrických půd. Polykondenzace vede ke vzniku specifických humusových látek – aktivního humusu. Humusovými látkami jsou huminové kyseliny, hymatomelanové kyseliny, fulvokyseliny a humíny a všechny tyto skupiny organických látek patří mezi tzv. **HUMUSOVÉ FRAKCE**.

BOX 7—1: Členění humifikačního procesu na základě vůdčích procesů a výsledných produktů.

Na formaci humusu se podílejí tři procesy, které vyúsťují do třech typů humusu dle charakteru humifikace:

- Při **humifikaci zděděním** jsou nejodolnější sloučeniny uvolňovány při rozpadu opadu (ligninu, pryskyřic, fenolických kyselin) a zabudovávány přímo do humuso-jílového sorpčního komplexu bez výrazných přeměn. Vzniká tak tzv. reziduální humus, který není v pravém slova smyslu neosyntetizován v místě vzniku. Tento typ humifikace je podpořena buď nízkou hodnotou pH nebo vysokým obsahem aktivního vápna. To představuje formu vápna ve frakci jílu nebo prachu lehce rozpustnou ve vodě bohaté na CO₂. Vápno pak obohacuje půdní roztok rozpustným bikarbonátem, který nasycuje postupně půdní sorpční komplex resp. jeho jílovou frakci ve smyslu chemické rovnice
$$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2;$$
$$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{jíl} \rightarrow \text{jíl} + \text{Ca} + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}.$$
Aktivní vápno se podílí na nerozpustnosti železa a blokaci jeho příjmu.
- Při **humifikaci polykondenzací** se fenolické sloučeniny, často odvozené z rozkladu ligninu nebo z polysacharidových řetězců a peptidů, pocházející z prvních fází depolymerace nebo jsou zděděné z opadu, polykondenzují na stále větší molekuly. Polykondenzací tak dochází k přeměně hymetomelanických kyselin na huminové kyseliny a až na nerozpustné huminy. Tato skutečná neosyntéza *in situ* je podpořena mírnými edafickými podmínkami – nepříliš kyselými a nepříliš bazickými.
- Při **humifikaci bakteriální neosyntézou** vznikají rozpustné organické molekuly jako výsledek enzymatické degradace nebo sekreční činnosti kořenů. Organické látky ve formě extrémně stabilních polysacharidů jsou vázány kohezními silami na bakteriální mikrokolonie v půdě, čímž podporují její strukturu. Optimální podmínky pro tento typ humifikace jsou jako u přechodného typu, tedy mírné edafické podmínky.

V **huminových kyselinách (HK)** převládá aromatické jádro, které je vysoce kondenzované a jeho periferní část je slabě vyvinutá; mají tedy méně funkčních skupin než fulvokyseliny (viz dále). Aromatické jádro je hydrofobní a váže pouze malé množství vody. Je velice málo rozpustné a je v něm omezená migrace látek. Molární hmotnost huminových kyselin je značná (od 2 000 do 300 000 g/mol i více). Obsahují více C a méně O₂, což značí vyšší stupeň transformace; dále obsahují 52-62 % C; 2,8-5,8 % H; 31-39 % O; 2-5 % N a 1-10 % popelovin (Si, Fe, S, P, K, Ca, Mg atd.). Huminové kyseliny mají tendenci koagulovat (snadno se vysráží), tvoří tmely a působí jako tmelivé látky – např. spojují prach a jíl do větších agregátů. Huminové kyseliny jsou rozpustné pouze v koloidních extraktech (alkalicky reagujících látkách), jako např. pyrofosfát sodný Na₄P₂O₇ o pH 9,8. Huminové kyseliny mají vysokou sorpční kapacitu – až 3 500-5 000 mmol·kg⁻¹. Mají méně výrazný kyselinový (acidifikační) charakter a nenarušují minerální podíl půdy. Vytvářejí cheláty (sloučeniny s kovy v pevných vazbách) méně intenzivně než fulvokyseliny, jsou tmavě zbarvené (tmavě hnědé až černé), vysoce kvalitní a vznikají zejména v podmínkách vhodných pro transformaci organické hmoty. Přebíhají v černozemních půdních typech (černozem, černice), ale v menších podílech vznikají i v méně úrodných půdách.

Hymatomelanové kyseliny mají žluté až spíše žlutohnědé zbarvení. Někteří autoři je řadí do jedné skupiny s huminovými kyselinami, zatímco někteří je vymezují jako samostatnou skupinu humusových látek, neboť svým charakterem tvoří přechod mezi huminovými kyselinami a

fulvokyselinami. Mají podobnou konstrukci jako huminové kyseliny a jsou rozpustné v alkoholu. Mají menší molekulovou hmotnost než huminové kyseliny (přibližně 150 000 g/mol). Skládají se z polykondenzátů s více aromatickými jádry, ale taky ze zděděných molekul se značným podílem alifatických sloučenin, jako mají např. bitumeny, časté v surovém humusu rašelin. Ve větší míře vznikají při procesu ulmifikace (odtud „ulmic acids“).

Fulvokyseliny (FK) mají slabé, málo vyvinuté aromatické jádro a více vyvinutou periferní část. Vytvářejí proto dlouhé řetězce a tím lineární molekuly rozličného složení s tím, že celá molekula fulvokyselin má vlastnosti podle převažující části. Periferní část fulvokyselin je hydrofilní a obaluje se tedy velkým hydratačním obalem a také obsahuje značné množství funkčních skupin, zejména COOH, OH. Molární hmotnost je cca 2000 až 60 000 g/mol a přibližné složení je C – 40-50 %, H – 4-6 %, O – 40-48 %, N – 2-3 %. Ve srovnání s huminovými kyselinami obsahují méně C a více O₂, jsou zbarvené do žluta nebo do hněda, vždy světlých barev. Fulvokyseliny jsou snadno rozpustné ve vodě a většinou se v půdě (i povrchových vodách) vyskytují v peptizovaném stavu – jsou rozptýlené a těžko se srážejí. Netvoří tmely příznivé pro spojování půdních částic; jejich tmely jsou nepříznivé, tvrdé a neporézní. Afinita fulvokyselin k vodě zvyšuje v prostředí obsah iontů H⁺. Vodíkové kationty v prostředí nahrazují centrální atomy sloučenin, a protože sorpční kapacita fulvokyselin (KVK je přibližně 3 000 mmol·kg⁻¹) je tvořena zejména výměnným vodíkem, fulvokyseliny mají acidifikační charakter. Také snadno tvoří cheláty. Fulvokyseliny vznikají ve všech typech půdního prostředí, nejlépe za nepříznivých podmínek (kyselá matečná hornina, kyselé humusové látky – např. pod smrkovým opadem –, za chladného klimatu). Jejich tvorba je charakteristická pro podzosoly a také ve spodních částech pseudoglejů.

Humíny jsou organické látky složité povahy pevně vázané na minerální půdní podíl s příměsí jednodušších organických látek. Jsou neextrahovatelné, z extraktu je nelze získat ani alkáliemi, ve kterých nejsou rozpustné. Humíny tvoří základ tzv. **humusojílového (organominerálního) sorpčního komplexu (HJSK)**. HJSK představuje spojení organických a minerálních částic zejména na základě elektrostatických sil. Elementární organické molekuly, které mají kondenzovaná aromatická jádra, vytvářejí poměrně stabilní spojení s jílovými částicemi. Jílové minerály o vysoké aktivitě, které váží ve větší míře látky jako aminokyseliny, peptidy a proteiny, se podílejí zejména na ochraně látek obsahujících dusík, u kterých tvorbou organominerálních sloučenin zabraňují mikrobiální degradaci. Organická hmota je vázána v mikroskopických pórech jílu (< 1 μm) nebo dokonce v mezivrstvách struktury jílových minerálů a tím se stává nepřístupnou pro půdní organizmy. Spojení mezi lamelami jílových minerálů a organickými molekulami je často zajištěno kationty jako Ca²⁺ nebo také Fe³⁺ a Al³⁺ (zejména v silně zvětralých půdách). Síla fixace je závislá na původu organických molekul, ale i jílových minerálů a kationtů a hydroxidů zajišťujících spojení a závisí také na vnějších podmínkách, jako je pH, hydrické podmínky atd. V mnoha půdách mohou být humusové látky vázány v HJSK až z více než 50 % jejich celkového podílu.

Zásadní rozdíly mezi huminovými kyselinami (HK) a fulvokyselinami (FK) lze shrnout do následujících bodů (jejich vzájemný vztah a vazba na půdní úrodnost – viz BOX 7–2):

- FK mají jednodušší stavbu makromolekul a odlišné chemické složení;
- FK jsou žluté až hnědé barvy, jsou lehce rozpustné a tudíž v půdě pohyblivé a lehce se přemisťují v půdním profilu;
- FK ovlivňují (zvyšují) kyselost půdního roztoku a podmiňují (umocňují) průběh podzolizačních procesů v půdě;
- základní složkou HK je aromatické jádro fenolického nebo chinoidního typu s účastí cyklických i alifatických dusíkatých sloučenin;
- HK jsou tmavé barvy a hromadí se většinou v místě vzniku;
- HK jsou považovány za nejhodnotnější produkt humifikačních procesů v půdě, výrazně ovlivňují (zlepšují) půdní vlastnosti a podmiňují vysokou úrodnost;
- HK ovlivňují zejména kationtovou výměnnou kapacitu, strukturu půdy a vysokou pufovritost.

Box

Z pohledu kvality organické hmoty a také úrodnosti půdy je důležité sledovat poměr huminových kyselin a fulvokyselin (HK/FK) zjištěných z výluhu v pyrofosforečnanu sodném $\text{Na}_7\text{P}_2\text{O}_5$. Jejich množství lze vyjádřit poměrem jejich procentického zastoupení. Humus o nízké kvalitě má poměr HK/FK nižší než 1, což indikuje převahu nestabilních a acidifikujících fulvokyselin (typické např. pro podzoly, které mají poměr HK/FK cca 0,4-0,5 a fulvokyseliny mohou zaujímat i více než dvojnásobný podíl na organické hmotě). Kvalitní humus se vyznačuje vysokým poměrem HK/FK (u černozemí je 2-3), což se projevuje vyšší strukturností půdy, její tmavší barvou a vysokými hodnotami kationtové výměnné kapacity.

Kvalitu organické hmoty lze také vyjádřit poměrem $Q_{4/6}$ (nebo také A_{400}/A_{600}), což je barevný kvocient, který se získá ze zjištění absorbance (pohlcování vymezeného spektra viditelného záření pomocí spektrofotometru při tzv. spektrofotometrickém stanovení koncentrace stanovované látky, jejíž množství ve výluhu se projevuje intenzitou barevné změny) při vlnové délce 465 a 665 nm. Při těchto vlnových délkách se proměří absorbance alkalických extraktů humusových látek a zjistí se poměr výsledných hodnot (λ). U tohoto parametru platí, že se zvyšující se hodnotou $Q_{4/6}$ se snižuje kvalita humusových látek (při 465 nm se zjišťuje množství rozpuštěných fulvokyselin, při 665 nm se zjišťuje množství rozpuštěných huminových kyselin). Hodnoty vyšší než 8,0 už vypovídají o silné převaze FK (HK/FK = 0,18), zatímco při $Q_{4/6}$ o hodnotě 3,0 HK/FK = 1,55 (více viz v Rejšek 1999).

7.2.2 Anaerobní procesy přeměny organických látek

Za vysoko položené hladiny spodní vody, tedy za nadbytečné vlhkosti, v anaerobním prostředí, probíhá totální anaerobní kondenzace, anatomická a morfologická destrukce za účasti enzymů a mikroorganismů. Dochází tak k rozkladu organické hmoty v procesu ULMIFIKACE nebo také PALUDIZACE nebo také RAŠELINĚNÍ.

Během ulmifikace se vytvářejí za nepřístupu vzduchu meziprodukty – **bitumeny** – jejichž hlavním zdrojem jsou tuky, vosky a pryskyřice. Mineralizace je výrazně omezena a probíhá zejména rozpad celulózy, hemicelulóz, pektinů, ligninu, bílkovin, sacharidů a minerálních látek na menší fragmenty.

Ulmifikace může probíhat **(A)** v oligotrofním prostředí (kyselé pH, nízké teploty, slabá aktivita půdní bioty a slabě mineralizovaná půdní voda) ve vrchovištních rašeliništích typických pro vysokohorské partie krajiny nebo **(B)** v mezotrofním prostředí (slabě kyselé až neutrální pH, vyšší teploty, vyšší aktivita půdní bioty a středně až silně mineralizovaná voda) ve slatinných rašeliništích typických pro nížinné oblasti a pánve. Slatinná rašelina obsahuje více huminových kyselin, méně hemicelulóz a bitumenů a má nižší vododržnost, než vrchovištní rašelina.

7.3 Lesní humus

7.3.1 Horizonty nadložního humusu

Akumulace a přeměny organických látek v půdě (neboli vytváření humusových forem) představuje jeden ze základních částečných půdotvorných procesů. Skládá se ze tří základních dějů: akumulace organické hmoty na povrchu a pod povrchem půdy, rozkladu a syntézy organických látek a rozkladu druhotných organominerálních sloučenin. Výsledkem dynamiky (změny vlastností v čase) je humusová forma, která je definována jako skupina organických a organickou hmotou obohacených horizontů na půdním povrchu. Organická a organominerální hmota se na půdním povrchu formuje specifickým způsobem, což udává specifický charakter nadložního humusu. Terminologie používaná

v oblasti půdní organické hmoty, klasifikace půdního humusu a humusových forem je značně komplikovaná a stejně jako v případě taxonomie půdních typů, i humusové formy jsou klasifikovány různými klasifikačními systémy.

Jako **celkový humus** (půdní organická hmota) je označen soubor odumřelých organických látek nahromaděných v půdě a na jejím povrchu, smíšených i nesmíšených s minerálním podílem. Patří sem organická hmota humifikovaná, částečně humifikovaná i nehumifikovaná. Dělí se na povrchový humus (ektohumus) a vlastní humus (endohumus). **Povrchový humus** (nadložní, pokryvný humus) je organická hmota uložená na povrchu půdy. Skládá se většinou z většího počtu dílčích horizontů či holorganických vrstev tvořených takřka výhradně organickou hmotou, s minimálním minerálním podílem. **Vlastní humus** (pravý, půdní humus) je tvořen komplexem specifických, tmavě zbarvených organických, většinou vysokomolekulárních, sloučenin, tzv. humusových látek (H.L.). Je výsledkem biochemických procesů přeměny organické hmoty v půdě, tedy výsledkem humifikace. Z podstatné části jej tvoří huminové látky, které mohou být promíšené s minerální frakcí půdy. Vlastní humus většinou nelze fyzicky oddělit od ostatní půdní organické hmoty, ze které postupně vzniká.

Pod pojmem **humusový profil** je rozuměn úsek půdního profilu, na jehož utváření se podstatnou měrou podílejí živé organizmy a jejich mrtvé zbytky. Tyto zbytky se nacházejí v různém stupni rozkladu. Humusový profil je tak tvořen holorganickým nadložním humusem a organominerálním horizontem Ah. Humusový profil je synonymum pojmu **humusová forma**. Pro určení humusové formy je rozhodující charakter jednotlivých horizontů humusového profilu, jejich složení, mocnost a biologická aktivita. Klasifikace humusových forem je tak dána a skladbou horizontů, jejichž determinace je dána klasifikačním systémem půd (Klinka 1997; Němeček et al. 2011; Zanella et al. 2011).

Humusové formy jsou tou složkou lesních ekosystémů, jež je často měněna antropogenními vlivy a představují v rámci půdního tělesa nejsnáze ovlivnitelnou složku půdy. Podléhají vlivům vázaným na lesnický management jako pěstební opatření, způsoby obnovy a výchovy porostů, hospodářské tvary a způsoby a dřevinné skladby i lesnické (mechanické, biologické, chemické) meliorace stanovišť.

Z přírodních podmínek je významným faktorem pro klasifikaci humusových forem a jednotlivých holorganických horizontů vodní režim.

Na propustných, nezamokřených půdách se vyvíjejí **anhydrogenní horizonty**, pro které je použito sumární označení **O**. V rámci horizontu **O** se může vyvinout **horizont opadanky L (litter)** který se může dělit na **Ln** (nová opadanka) a **Lv** (stará, změněná opadanka). Opadanka je tvořena čerstvým organickým materiálem (jehličí, listí, kůra, větvičky, obalné šupiny pupenů apod.), jehož původ je snadno rozeznatelný a materiál si stále zachovává původní tvar. Ln je tvořen čerstvě opadlým a málo rozrušeným materiálem, který se akumuloval na půdním povrchu převážně v období kratším než 1 rok. Dominantním procesem je akumulace (hromadění) opadaného materiálu. Lv je horizont, ve kterém jsou již patrné známky rozkladu (biologické aktivity). Ta se projevuje zejména v dekoloraci (odbarvení) materiálu, který se stává světlejším a vláčnějším a může být částečně pozměněn (např. skeletování listů) a bývá vlhčí. Přechod mezi Ln a Lv může být různě rychlý (od 1-3 měsíců po více než 1 rok), podle původu materiálu, klimatu, ročního období, úrovně biologické aktivity. Pod opadovým horizontem se vyvíjí **horizont drti F (fragmentovaný, fermentační)**. Ten je tvořen částečně rozloženými organickými zbytky, jejichž původ lze však vždy rozeznat s tím, že v F horizontu rozeznatelné zbytky převládají nad humifikovaným materiálem, jehož původ určit nelze a který je zastoupen z 10-70 %. **Fm** je mykogenní horizont, ve kterém převládá aktivita hub. Organická hmota je pokryta mycelii, horizont má plstovitý charakter a vytvářejí se vláknité, zpevněné struktury horizontu, který bývá značně prokořeněný. **Fz** je zoogenní horizont, v němž dominuje půdní fauna. Mycelium hub buď absentuje, nebo je velmi řídké zastoupené, zato jsou zde časté exkrementy zooedafonu. **Fz** je kyprý, nesoudržný a nemá plstnatý charakter. Amfigenní **Fa** horizont je přechodem mezi Fm a Fz. Biologická aktivita je zastoupena jak zoogenní tak mykogenní složkou a jsou zde přibližně rovnocenně přítomna jak mycelia hub, tak exkrementy půdní fauny. Horizont má částečně plstovitý charakter. Pod fermentačním horizontem se vyvíjí **humusový (humifikační) horizont H**

neboli měl. V tomto horizontu nelze rozeznat původ organické hmoty. Její charakter je dán organickými zbytky v silném stupni rozkladu, které mohou být jen řídce doplněny o méně rozložené částice, zastoupené zejména zbytky kořenů. Humusový horizont měli (**Hh**) je tmavý (hnědočerný až černý) a převládají v něm jemné amorfní částice. Ty jsou za vlhka kluzké a lze je roztírat mezi prsty, které špiní. Organický materiál je nestrukturní, celistvý a téměř zde chybí exkrementy půdní fauny. Zoogenní horizont měli (**H_z**) obsahuje velké množství drobných exkrementů půdní fauny, které tvoří podstatnou část organického materiálu. Ten je nejčastěji černý a má granulární strukturu. Reziduální horizont měli (**Hr**) je takový, ve kterém převládají jemné amorfní částice, ale jsou přítomny i rozpoznatelné rostlinné zbytky (kořeny, kůra, dřevo). Barva horizontu Hr je tmavě červenohnědá, avšak materiál při protírání prsty nešpiní.

Ze zmíněných horizontů mohou být v rámci sekvence horizontů nadložního humusu zastoupeny najednou oba horizonty L (Ln i Lv) – v případě zpomalené humifikace za dominance hub –, avšak vždy jeden ze jmenovaných typů horizontů F a H. Jejich formace závisí na složení půdního edafonu, který udává horizontům specifický charakter. Jednotlivé sekvence horizontů tak mají v jistém smyslu zákonitý charakter, což se projevuje ve formaci humusových forem (viz dále).

Na zamokřených stanovištích se utvářejí **hydrogenní horizonty**, ve kterých přetrvává zvýšená hladina podzemní vody po většinu bezmrazového období roku. Může se formovat **hydrogenní horizont fibrický Of**, který je tvořen zejména málo rozloženými rostlinnými zbytky, u nichž lze rozeznat jejich původ a které obsahují více než 40 % vláknitých zbytků, které nelze rozemnout mezi prsty; nebo **hydrogenní horizont mezický Om**, který se skládá jak z částečně rozložených zbytků, tak i z dobře rozloženého organického materiálu; nebo **hydrogenní horizont humusový Oh**, který je tvořen zejména dobře rozloženými humusovými látkami a vláknité zbytky zaujímají méně než 10 % objemu.

Pod holorganickými horizonty se utvářejí **organominerální povrchové horizonty** označované písmenem **A**. Obsahují v návaznosti na biogenní nebo antropickou akumulaci 20-30 % humifikovaných organických látek (nebo také cca 12-17,5 % organického uhlíku). A horizonty představují poměrně širokou skupinu horizontů, které jsou klasifikovány na základě vybraných kritérií. Těmito kritérii jsou konkrétně mocnost horizontu v cm, charakter přechodu A horizontu do spodních půdních vrstev, strukturnost, skladba rostlinného společenstva a prokořenění, obsah a charakter organické hmoty, který se odráží v barvě, obsahu huminových kyselin (HK), fulvokyselin (FK) a jejich poměru (HK/FK), fyzikálně-chemické vlastnosti jako půdní reakce, půdní sorpce a bazická saturace.

Stejně jako organické, i organominerální horizonty jsou děleny na anhydrogenní a hydrogenní podle míry ovlivnění podzemní vodou. **Anhydrogenní A horizonty** jsou vázány na normální vodní režim bez zvýšené hladiny podzemní vody a bez snížené biologické aktivity vlivem většího zamokření půdy. V půdách je rovnovážný stav koloběhu organické hmoty a nedochází k její akumulaci ve formě nedekomponovaných nebo pouze částečně dekomponovaných organických zbytků. V půdách s dominancí zooedafonu se formují A horizonty s výraznou strukturou. **Makrostrukturní** jsou v případě aktivity anecických a endogeických žížal. Tvoří se pedy různých velikostí, zastoupené zejména drobtý až hroudami o průměru až 10 mm i větší, pH/H₂O je vyšší než 5. **Mesostrukturní** jsou v případě aktivity endogeických a epigeických žížal. Průměr pedů je zpravidla do 5 mm. Ze zooedafonu jsou také v menší míře zastoupeni členovci a roupice, avšak zpravidla absentují anecické žížaly zodpovědné za tvorbu makrostrukturních pedů. **Mikrostrukturní** jsou v případě dominance členovců a roupicovitých. Průměr pedů je do 4 mm a jsou více zastoupeny pedy o průměru do 1 mm. Drobtý se snáze rozpadají už při mírném tlaku. Ze zoodedafonu dominují drobní členovci, roupice, larvy hmyzu, roztoči, chvostokoci atd. Takové horizonty se často formují na písčitohlinitých až písčitých půdách s vyšším podílem minerálních zrn, která zamezují formaci makrostruktury i masivní struktury. V horizontu jsou často přítomná mycelia. **Zrnité A horizonty** se tvoří na lehkých půdách s pH/H₂O nižším než 5. V malé míře jsou přítomny exkrementy drobných členovců a roupic (max. 10 %). Minerální zrna jsou často jednotlivá, oddělená od organického podílu.

Minerální zrna obalená organickým podílem indikují iniciační fázi podzolizace. V tom případě se utvářejí eluviální horizonty Ae nebo AE, které se postupně mohou zvětšovat a postupně přecházet v minerální eluviální horizonty Ep. Při sníženém zastoupení zooedafonu se tvoří **masívní** struktura. pH je zpravidla nižší než 5 a v horizontu jsou přítomna jednotlivá minerální zrna. Tvoří-li se strukturní agregáty, jejich velikost je do 1 mm. Při stlačení suchého vzorku se půda rozpadá na různorodé částice různých tvarů a složení, kdy dochází k oddělení organické a minerální složky. V půdách je snižena biologická aktivita a biogenní složka se jen nevýrazně podílí na tvorbě pedů.

Hydrogenní A horizonty jsou horizonty s obsahem humusu nad úroveň rovnovážného stavu okolních anhydrogenních půd až rašelinění, mohou obsahovat novotvary s Fe-Mn a mají zvýšenou mocnost. Organominerální horizonty lze rozdělit do dvou skupin podle charakteru jednotlivých složek, a to na **(1)** zrašelinělý horizont o mocnosti 0,1-0,5 m, který je zaplavený nebo plně vodou nasycený po dobu delší než 6 měsíců v roce, s obsahem organického uhlíku 8-12 % hmotnostních (%_{ohm}) bez zahrnutých živých kořenů a na **(2)** hydrický, který je zaplavený nebo plně vodou nasycený po dobu kratší než 6 měsíců v roce, s obsahem organického uhlíku méně než 8 %_{ohm} bez zahrnutých živých kořenů. Jako hydrický horizont může být klasifikován kterýkoli organominerální horizont, jako je humózní lesní, melanický, umbrický, černický atd., a to Ahn, Amn, Aun, Acn v případě tvorby mangano-železitých (Mn-Fe) broček (představují kulovité útvary o velikosti cca 2-15 mm, které představují sraženiny železa a manganu v podmínkách zvýšeného zastoupení vody) nebo Ahg, Amg, Aug, Acg v případě, že se bročky netvoří.

7.3.2 Humusové formy lesních půd

Jak bylo zmíněno již výše, klasifikace humusových forem se různí podle jednotlivých klasifikačních systémů (Brethes et al. 1995; Jabiol et al. 2007; Němeček et al. 2011, Zanella et al. 2011). Nejširší klasifikační rámec rozděluje humusové formy podle míry ovlivnění vodou na anhydrogenní (terestrické), které se tvoří v podmínkách s mírným vodním režimem a hydromorfní (semiterestrické), které se tvoří v případě výše položené hladiny podzemní vody.

7.3.2.1 Anhydrogenní humusové formy

Anhydrogenní formy humusu (Tab. 7—1) odpovídají podmínkám, kdy svrchní vrstvy půdy (topsoil) nejsou souvisle po více dní nasyceny vodou. Tyto formy jsou charakteristické vývojem organominerálních A nebo AE horizontů. Na základě stratigrafie horizontů nadložního humusu a A horizontu a jejich vlastností se rozdělují v rámci českého klasifikačního systému (Němeček et al. 2011) na mull, moder a mor. Zahraniční nebo mezinárodní klasifikační systémy mohou obsahovat další formy humusu, jako je amphi nebo tangel (viz Tab. 7—1).

MULLOVÉ HUMUSOVÉ FORMY vznikají za podmínek příznivých pro rozklad a transformaci organických zbytků. Tvoří se v listnatých nebo smíšených lesích v mírném a teplém klimatu, na půdách s příznivou trofností, provzdušněností a s mírným vodním režimem. Mullové formy humusu představují podmínky příznivé pro činnosti zooedafonu, čímž látky rychleji kolují ekosystémem. Organická hmota je soustředěna infiltrací nebo migrací a mísením půdní faunou zejména do svrchního minerálního horizontu namísto její akumulace na povrchu.

Nejpříznivější humusovou formou je **pravý mull**. Stratigrafie je (L)-(F). Mocnost opadu je do 1 cm a H horizont se netvoří. Bohatá přízemní vegetace poskytuje snadno rozložitelné organické zbytky, které jsou zdrojem potravy pro žížaly. Důsledkem intenzivní činnosti zooedafonu, bakterií a aktinomycet je rychlý rozpad a transformace organické hmoty. Z humusových látek se tvoří zejména huminové kyseliny, které vytváří s minerálními koloidy značně stabilní humáty. Významně se uplatňují i koprogenní exkrementy, především dešťovek, které přispívají k tvorbě drobtovité až hrudovité (zřídka krupnaté) struktury ve svrchní části humusového horizontu. Horizont opadanky L může v některé roční době chybět (zejména na konci léta, před opadem listů), pravidelně se vyskytuje v období pozdního podzimu. Horizont drti F tvoří na povrchu půdy jen slabou nesouvislou vrstvu,

kteřá může chybět a která bývá promísena s četnými exkrementy. Poměr C:N bývá 8-12, pH/H₂O je 5,5-7. Půdy mohou být i přechodně zamokřované. Mull má zpravidla dobře vyvinutý, strukturní A horizont, který je klasifikovaný jako Am (melanický), Aa (andický), Au (umbrický), Al (molický) a bývá černohnědý až hnědočerný.

Semimull vzniká na jilem chudších minerálních substrátech. Stratigrafie je L-(F). Mocnost opadu je cca 1 cm, pokryvný humus je tvořen hlavně horizontem opadanky L, častěji se také vyskytuje nesouvislý nebo kapsovitě distribuovaný horizont drti F. Organominerální horizonty jsou nejčastěji klasifikovány jako Au (umbrický) nebo Al (molický). U této humusové formy se vytváří méně humátů, A horizont je světlejší nebo méně mocný než u pravého mullu, bývá sušší a struktura je jemnější. Koprogenní exkrementy jsou zřetelně menší, chybí větší dešťovky. Ve zvýšené míře se uplatňují členovci.

Vápnitý mull se vytváří na karbonátových horninách, a to jako pravý mull nebo semimull. Je to humusová forma se stratografií L-(F) a s mocností opadových horizontů do 1 cm. Organominerální horizont A má vyšší obsah vápna a jsou v něm přítomny karbonáty. Má neutrální až alkalickou reakci a je více sorpčně nasycený s tím, že dominantní kationt vázaný v sorpčním komplexu je vápník. Organominerální horizonty jsou klasifikovány jako Au (umbrický) nebo Al (melanický).

Vermimul je typický vysokou biologickou aktivitou, zajištěnou zejména dešťovkami v A horizontu. Organická hmota je tak aktivně a intenzivně zapracovávána do větších hloubek půdy, což má za následek utváření mocnějšího A horizontu.

Paramull je humusová forma, pro kterou je charakteristické mechanické mísení jednotlivých vrstev. To je zajištěno více mechanismy, jako je koluvace (mísení na bázi svahu vlivem akumulace v deluviích), kryoturbace (mísení vlivem intenzivních objemových změn jako následku častého promrzání) nebo porostní mísení (vlivem přirozených disturbancí půdního povrchu v součinnosti s tvorbou vývrátů a tím promísení svrchních partií půdního tělesa).

Drnový mull (rhizomull) má stratigrafii (L) a je mocný 1-4 cm. Půdní povrch je pokrytý souvislým nebo rozvolněným krytem trav, jejichž jemné kořínky hustě prorůstají horní část půdy a vytvářejí drn. Mezi trsy trav bývá uložena rychle se rozkládající opadanka (hrabanka). Souvislý horizont opadanky (L) však chybí. Organominerální horizonty jsou nejčastěji klasifikovány jako Am (melanický), Aa (andický), Au (umbrický) nebo Al (molický).

MODEROVÉ HUMUSOVÉ FORMY tvoří přechod mezi mullem a morem (viz dále). V této humusové formě se vedle zooedafonu uplatňují také houby, plísňe a bakterie, výjimečně aktinomycety, které signalizují „příznivější“ rozklad humusu. Jsou to humusové formy s nižším pH, nižší strukturností a vyšším minerálním podílem v A horizontu. U moderu se vždy tvoří humusový H horizont a je zastoupen ve variantách Hf (jemný – horizont s velmi jemnou zrnitou strukturou, velmi drobným trusem půdní fauny), Hg (zrnitý – s jemnou strukturou a drobným trusem půdní fauny), Hh (humusový – s masívní nebo slabou, hrubě hranatou strukturou, tmavě šedou až černou barvou, materiál je mastný a při tření zabarvuje prsty). Na hranici H a A horizontu dochází k částečné migraci H horizontu do nižších vrstev (svrchních partií A horizontu, kde vzniká postupná hranice přechodu (mydát).

Typický moder vzniká za vlhčího a chladnějšího klimatu v podmínkách ne zcela vyrovnaných hydrických poměrů. Stratigrafie profilu je L-F-H, mocnost opadu je 2-3 cm. Organominerální horizont je zpravidla klasifikován jako Ah (humózní lesní), Ao (ochrický) nebo Al (molický). Transformace organických látek probíhá v kyselém prostředí (poměr C:N v H horizontu je 12-15, pH/H₂O je 4,0-5,0) za výrazné účasti půdní fauny. Dešťovky však chybí nebo jsou zastoupeny jen ojediněle, podíl koprogenních elementů v F a H horizontu je značný. V malém množství se vyskytují hyfy hub. Mocnost pokryvného humusu se zvyšuje v důsledku mírně zpomalené humifikace, dominuje horizont L. Přechod H do A horizontu je plynulý.

Mullový moder je přechodnou subformou k mullu. Opad je mocný 1-2 cm, stratigrafie je L-F-(H), nejčastějším organominerálním horizontem je Al (molický). Dominantními dekompozitory jsou zástupci zooedafonu, což se projevuje množstvím koprogenních elementů, zejména v H a A

horizontu. V menším množství se vyskytují žížaly, hojně jsou členovci. Pod horizontem opadanky je slabý horizont drti F, horizont H bývá slabý, často nesouvislý. Přechod do horizontu A je plynulý.

Vápnitý moder se tvoří na karbonátových horninách. Jeho mocnost je zpravidla 1-2 cm, stratigrafie L-F-(H), organominerální horizonty bývají Au (umbrický) a Al (molický). Humifikačními procesy vznikají tmavě zbarvené vápenaté humáty. A horizont má mírně kyselou až neutrální reakci, H horizont bývá nesouvislý, mezernatý.

Morový moder je přechodnou subformou k moru (viz dále). Je mocný 2-4 cm se stratografií L-F-H a se světlým ochrickým horizontem Ao. Ve větším množství se vyskytují houbové hyfy a opad tak mírně plstnatí a plesnivý. Dešťovky zcela chybí. Kromě horizontu L a F je dobře vyvinut horizont měli H, který je stejně hluboký nebo hlubší než F a je ostře oddělený od A horizontu. V H horizontu se nevyskytují vybělená minerální zrna.

Leptomoder je humusová forma, ve které dominuje Fz horizont s mocností do 3 cm, ve kterém jsou slabě agregována rezidua se ztrátou sypké konzistence jako výsledek fragmentace a rozdrčení půdní faunou. Trus fauny a rezidua trusu bývají někdy početná, houbová mycelia jsou nepočtená, ale lokalizovatelná. Je-li zastoupen amfigenní horizont drti Fa, organické zbytky jsou vlivem vyrovnaného zastoupení zooedafonu a hub agregovány do slabě až mírně, nekompaktně slepené vrstvy, která je spíše rozpadavá, s malým podílem mycelií. Hh horizont bývá masivní nebo se slabě hranolovitou strukturou, šedý až šedočerný, s mastným materiálem. Ve stratigrafii jsou zpravidla horizonty F+H mocnější než Ah.

Lignomoder má mocnost 10-30 cm, rozkládající se dřevo zaujímá >35 % objemu humusové formy. Dominantní je horizont Faw, který charakteristicky zastoupením rostlinných zbytků agregovaných do slabě až mírně, nekompaktně slepených látek, které jsou spíše rozpadavé, s malým podílem mycelií. Jemné kořeny jsou hojně zastoupené. Je-li zastoupen Fzw (zoogenní, dřevitý), jsou rezidua slabě agregována se ztrátou sypké konzistence jako výsledek fragmentace a rozdrčení půdní faunou. Trus fauny a jeho rezidua jsou početná, houbová mycelia jsou nepočtená a lokalizovaná. Humifikační horizont Hhw obsahuje vyšší podíl hrubých dřevěných pozůstatků a úlomků v různém stádiu dekompozice.

Drnový moder se tvoří v případě souvisle zapojeného travního drnu, tvořeného především metličkou křivolakou nebo třtinou chloupkatou. Horizont měli bývá nezřetelný. Celková mocnost je 4-10 cm, A horizont je Ah (humózní lesní) nebo Ao (ochrický).

MOROVÉ HUMUSOVÉ FORMY (surový humus) se vždy skládají ze všech třech hlavních organických horizontů, opad (L) je zpravidla víceletý. Organická hmota se v případě této humusové formy hromadí na půdním povrchu a její rozklad stagnuje. Mocnost moru se pohybuje mezi 8 a 10 cm (může být až 40 cm). Surový humus se vyznačuje nejnižší biologickou aktivitou, která zajištěna zejména houbami. Ty v myceliálních povlacích pokrývají odumřelou organickou hmotu a tvoří mykogenní fermentační horizont Fm. Humifikační horizont měli Hh sestává z dobře rozložených dekomponovaných rostlinných částí, které tvoří nestrukturní plstnatý materiál. L horizont se skládá z relativně čerstvých rostlinných zbytků, u kterých můžeme rychle identifikovat jejich původ, nebo S horizont (*Bryophyta* – mechorosty) skládající se z tkáně mechorostů, zejména *Sphagnum* spp. Celkově se tato humusová forma vyznačuje dobře odlišenými horizonty v jasné stratigrafii.

Typický mor vzniká za podmínek nepříznivých pro rozklad a transformaci organické hmoty. Celková mocnost organických horizontů je 4-10 cm, stratigrafie je L-F-H, organominerální horizont se tvoří nejčastěji Ae (ochuzený, eluviovaný). Častý je v horách s chladným klimatem, pod jehličnatými porosty s kyselým opadem jehličí, pod přízemní vegetací s kyselým opadem (borůvka, brusinka, vřes). Tvorba moru je zesilována chudým půdním podložím s nedostatkem bází a jílu. Probíhá v silně kyselém prostředí. Na rozkladu organické hmoty se v rozhodující míře podílejí plísňe a houby. Ze zooedafonu se ve větší míře vyskytují jen roztoči a chvostokoci. Nenastává intenzivnější mísení rostlinných zbytků s minerální půdou a procesy mineralizace a humifikace jsou značně omezené. Nadložní humus se hromadí ve zplstnatělé vrstvě propletené mycelii plísni, hyfami hub a kořínky rostlin. Tuto vrstvu lze zpravidla odtrhnout v celých kusech od minerální půdy. Při částečném

rozkladu opadu vznikají organické kyseliny, především nízkomolekulární fulvokyseliny. Ty spolu s dešťovou vodou (většinou navíc okyselenou v důsledku imisí) pronikají do půdy a vyvolávají podzolizační proces. Typický mor stejně jako většina dalších subforem je tvořen mocným horizontem opadanky L, v němž se někdy hromadí víceletý opad. Pod ním je mocný horizont drti F, horizont H je většinou méně mocný než L a F, a je ostře oddělený od horizontu Ae. Poměr C:N v Ae horizontu bývá >15, v H horizontu >22 (30-40). Hodnoty pH/H₂O jsou velmi nízké, v H horizontu i 3,0-4,0.

Mělký mor má mocnost 2-4 cm, stratigrafie je L-F-H, organominerální horizont je nejčastěji Ae. Všechny horizonty nadložního humusu mají malou mocnost, horizont měli H obsahuje zřetelně vybělená minerální zrnka. Jeho přechod do Ae horizontu je méně ostrý.

Drťový mor nebo také **hemimor** je mocný 4-10 (15) cm se stratografií L-F-H a Ae horizontem. Nejmocněji je vyvinut horizont drti Fm, který tvoří více jak 50 % tloušťky F+H horizontů. Horizont H bývá nevýrazný, a dá se špatně odlišit od horizontu F a zaujímá 25-50 % tloušťky F+H. Vyskytuje se spíše na sušších půdách.

Mělový mor nebo také **humimor** je mocný 4-10 (25) cm se stratografií L-F-H a At (rašelinným) nebo Ae horizontem. Nejmocněji je vyvinut horizont měli H (více než 50 % tloušťky F+H), který bývá vlhký, mazlavý, s masivní („prastarou“), hrubou, granulovitou až prismatickou strukturou za sucha; za vlhka je homogenní. Barva je typicky tmavě šedá až černá, materiál je mastný a při tření špiní prsty. Vyskytuje se zejména na stále vlhkých půdách, případně na půdách přechodně zamokřovaných.

Rezimor je humusová forma s dominancí horizontu Hc (obsahuje rezidua tlejícího dřeva), který tvoří více jak 50 % tloušťky F+H. Celková mocnost je 15-25 cm se stratografií L-F-H. V mikroskopické měli obsahuje makroskopicky rozpoznatelné zbytky kořenů, kůry a tlejícího dřeva, materiál je lehce mastný (kluzký), ale při tření jen zčásti špiní prsty. Rozkládající se dřevo je v rámci celé humusové formy zastoupeno z méně než 35 %.

Lignomor je humusová forma s dominancí Fm (mykogenní) nebo Frm (velký podíl kořenových zbytků – rhizo – s myceliem) nebo naopak někdy Hf (jemný s velmi jemnou zrnitou strukturou) nebo Hg (zrnitý, má jemnou až střední zrnitou strukturu, drobný trus fauny převládá) nebo Hh (humusový, s masivní, za sucha granulovanou až hrubou hranatou strukturou, šedě až černě zbarvený, materiál je mastný a při tření nechává skvrny na prstech) nebo Hc (rezidua tlejícího dřeva). Rozkládající se dřevo představuje >35 % objemu v profilu humusové formy, jejíž celková tloušťka je 15-40 cm.

Vápnitý mor má mocnost 4-10 cm se stratografií L-F-H a Al (molickým) nebo Ao (ochrickým) organominerálním horizontem. Vyskytuje se na karbonátových horninách v klimaticky sušších a teplejších oblastech. Hlavní příčinou váznoucího rozkladu organických látek je nedostatek vláhy a obtížná smáčivost pokryvného humusu.

Suchý rašelinný mor je mocný 5-15 cm, má stratigrafii L-F-H a Ao (ochrický) organominerální horizont. Vzniká především v teplejších a sušších oblastech na chudém podloží s nedostatkem živin. Pokryvný humus je těžce rozložitelný, obtížně smáčitelný. Má charakter suché rašeliny. Při tvorbě humusu se výrazně uplatňuje činnost hub. Jednotlivé částice opadanky a drti jsou pokryty houbovým pletivem. Suchý, práškovitý horizont měli H nasedá ostře na minerální půdu.

Karbonizovaný mor má mocnost 3-6 cm, stratigrafii L-F-H a je s Ao organominerálním horizontem. Vyskytuje se především v sušších a teplejších oblastech na chudém půdním podloží s nedostatkem živin. Vyznačuje se výraznou suchostí a naprostou nesmočitelností karbonizovaného nadložního humusu. Chybí povlaky houbových pletiv.

Drnový mor má mocnost 10-15 cm a má stratigrafii L-F-H, pod kterými je zpravidla utvořen Ao (ochrický) nebo Al (molický) organominerální horizont. Půdní povrch je pokryt více méně souvislým travním drnem, tvořeným především smilkou tuhou. Vyskytuje se hlavně v horských oblastech. Husté travní kořínky prostupují nadložním humusem a pronikají do humusového horizontu A, takže není vytvořen ostrý přechod mezi nadložním humusem a minerální půdou. Horizont A bývá dobře prohumózněný.

U jednotlivých **subforem** moru je možné vylišit také jejich variety označením „dystrofický“ (např. dystrofický mělový mor). Tím se vyjadřuje mimořádně vážnoucí humifikace organických zbytků a ohrožení výživy porostů vlivem poruchy koloběhu živin.

V rámci klasifikace humusových forem lze také vylišit **tanglový humus**. Jedná se o humusovou formu subalpínských rendzinových půd na karbonátových horninách (vápencích, dolomitech). Z opadu kosodřeviny a odumřelých bylin a keřů se vytváří často mocný (>10 cm) nadložní humus, který připomíná mor. Není však extrémně kyselý a obsahuje značné množství exkrementů živočichů. Přechod mezi nadložním humusem a minerální půdou je pozvolný, horizont A je dobře prohumózněný.

Amphi (používané jako **amphimull**) znamená humusovou formu se stratigrafií L-F-H, které leží na A horizontu s dobrou strukturností a vysokou biologickou aktivitou. S tímto protichůdným jevem se lze setkat na stanovištích s intenzivní akumulací opadu, ale současně s vysokou biologickou aktivitou (zejména endogeické žížaly). Vývoj této humusové formy není příliš častý. Lze se s ní setkat např. v horském prostředí, v mediteránním klimatu nebo na izolovaných svazích s karbonátovou horninou v podloží. Navzdory favorizujícím podmínkám pro zooedafon dochází k akumulaci opadu, patrně vlivem přílišné vysychavosti opadových vrstev a vysoké produkci opadu. Amphimull tak může být přechodnou formou moderu k mullu ve zlepšujících se podmínkách pro nástup anecických žížal (zvýšení teplot, kultivace půdy atd.) nebo mullu k moderu např. vlivem změny dřevinné skladby s obtížně rozložitelným opadem.

Tab. 7—1: Diagnostické horizonty a jejich vlastnosti pro 5 vybraných anhydrogenních humusových forem. V některých klasifikacích se vymezují také humusové formy Amphi (*) a Tangel (*), které představují specifické stratigrafické uspořádání organických horizontů. Upraveno podle Zanella 2011.

Diagnostický horizont	humusová forma				
	MULL	MODER	AMPHI*	MOR	TANGEL*
L	je možný	přítomný	přítomný	přítomný	přítomný
F	je možný, zoogeneticky přeměněný	je možný, zoogeneticky přeměněný, aktivní	je možný, zoogeneticky přeměněný, aktivní	nepřeměněný zoogeneticky, nízká biologická aktivita	přítomný, zoogeneticky přeměněný, aktivní
H	chybí	přítomný, aktivní, místy nesouvislý	přítomný, aktivní, slabý (avšak méně než 2x slabší než A)	přítomný i chybí, je-li přítomný, biologicky neaktivní nebo málo aktivní	přítomný, neaktivní nebo slabě aktivní, mocný (2x silnější než A)
Přechod O/A nebo O/AE nebo O/E	velmi ostrý (<3mm)	pozvolný (>5mm)	je-li A makrostrukturní, ostrý (<5mm); je-li A mezostrukturní, pozvolný (>5mm)	velmi ostrý (<3mm)	je-li A masivní: ostrý (<5mm), je-li A mikrostrukturní: pozvolný (>5mm)
A	makro nebo mezostrukturní	mikrostrukturní nebo individuální nebo masivní struktura	zejména makro nebo mezostrukturní, může být mikrostrukturní	chybí (=E) nebo přítomný; je-li přítomný, je nesouvislý mikrobiogenní, chybí zooedafon	masivní nebo mezostrukturní
Horizont dominance aktivity zooedafonu	A (anecické a endogeické žížaly)	F, H	F, H, A (žížaly)	H (slabě aktivní nebo se stopami minulé aktivity)	F, H
Žížaly	Organické horizonty	epigeické a anecické	epigeické	zřídka epigeické nebo chybí	zřídka epigeické
	Organo-minerální horizonty	endogeické a anecické	chybí	chybí	zřídka endogeické

7.3.2.2 *Hydrogenní humusové formy*

Z mullových humusových forem se může tvořit **rašelinný (slatinný) mull**. Mocnost opadu je do 1 cm, stratigrafie je (L). Organominerální horizont At (zrašelinělý, anmorový) má charakter kypré rašelinné (případně slatinné) zeminy nebo bahna a je tmavý až černý. Pokryvný humus většinou chybí, někdy se tvoří horizont opadanky L se slabou vrstvou do mocnosti 1 cm.

Z moderových humusových forem se formuje mocný morový moder a rašelinný moder. **Mocný morový moder** vzniká za ztížených podmínek pro rozklad a transformaci organické hmoty, zejména vlivem zvýšené humidity klimatu. Mocnost je 5-10 cm se stratografií L-F-H, organominerální horizont je klasifikován jako Ao (ochrický) nebo Ah (humózní lesní). S přibývajícím mocností nadložního humusu se většinou zvyšuje také jeho kyselost a sorpční nenasycenost a zvětšuje se poměr C:N. **Rašelinný moder** má mocnost zpravidla 3-6 cm se stratografií L-F-H a s utvářením organominerálního horizontu At (rašelinný) nebo jako hydrických horizontů s různě hojnými bročky.

Z morových humusových forem se tvoří mokrý rašelinný mor, sphagnový rašelinný mor, fibrimor a mesimor. **Mokrý rašelinný mor** je mocný 5-15 cm, má stratigrafii L-F-H a vyvíjí se Ae (ochuzený) nebo At (rašelinný) organominerální horizont. Tato humusová forma vzniká především v podmínkách střídavého zamokření půdy. Při rozkladu organické hmoty se výrazně uplatňují členovci, ale i houby a plísňe. Horizont měli H je tmavý až černý, většinou mokrý a mazlavý. V anaerobní fázi rozkladu zde probíhají hnilobné procesy. V přízemní vegetaci je charakteristická borůvka, brusinka, případně vlochyňe a další druhy vlhkých až mokrých, kyselých stanovišť. **Sphagnový rašelinný mor** je mocný 5-13 (40) cm a má stratigrafii L-F-H, pod nímž se tvoří rašelinný horizont T. V humusové formě dominuje horizont drti Fs (sphagnum – který je slabě agregován, houbová mycelia chybí nebo jsou řídké) nebo Fsm (mechy + mycelia). Horizont H zaujímá více než 50 % celkové mocnosti F+H a je v bezstrukturní formě. Tato humusová forma vzniká na trvale zamokřených půdách, kde převažuje rašelinistní půdotvorný proces. Charakteristický je silně zpomalený rozklad a humifikace organických látek v podmínkách přebytku vody a nedostatku atmosférického kyslíku. Probíhají zde pochody aerobně zoogenní i anaerobní. Na rozkladu se značně uplatňují houby a vyskytují se i členovci. V anaerobní fázi rozkladu nastávají hnilobné procesy. Přízemní vegetace je tvořena převážně rašeliníky a mechy. Pod pokryvným humusem většinou s mocným horizontem měli H se nachází vrstevnatá rašelina s různým sledem rašelinných horizontů T. **Fibrimor** obsahuje mocný fibrický organický horizont Of, který tvoří více jak 50 % celkové hloubky humusové formy, skládá se ze slabě rozložených organických rostlinných zbytků (reziduí), jejichž původ lze rychle identifikovat. Dále fibrimor obsahuje horizont Om (mesický, středně či mírně vlhký, složený z částečně rozložených organických zbytků ve stádiu dekompozice, které tvoří přechod mezi horizontem Of a Oh) a níže horizont Oh (humusový, složený z dobře rozložených organických zbytků, které byly z větší části přetransformovány do humusového materiálu). Tato humusová forma předznamenává špatně provzdušněné prostředí a vyvíjí se v podmínkách stálého zamokření. Celková mocnost je 40-50 cm. Může být vyvinut horizont S (bryophytes, mechy; skládá se z pletiv žijících mechů rodu *Sphagnum* a je smíšený v menším rozsahu s opadem). V **mesimoru** dominuje horizont Om (mesický, středně či mírně vlhký, složený z částečně rozložených rostlinných zbytků. Mesimor reprezentuje špatně provzdušněné mory, které se vyvíjí v podmínkách stálého zamokření, kdy hladina podzemní vody je 30 cm pod povrchem. Celková mocnost je 40-50 cm. I v této humusové formě může být vyvinut horizont S.

7.3.2.3 *Biologické aspekty problematiky humusových forem*

Ve vazbě na humusové formy lze vymezit 7 skupin živočichů (*Acari* – roztoči, *Collembola* – chvostoskoci, *Myriapoda* – stonožkovci, *Isopoda* – stejnonožci, *Annelida* – kroužkovci pouze ve smyslu žížalovitých), termiti a larvy hmyzu), z nichž se šest skupin vždy jistou měrou účastní na biologické aktivitě humusových forem. Roztoči a chvostoskoci převažují v morových humusových formách, chvostoskoci a larvy hmyzu dominují v moderu, stonožkovci a stejnonožci dominují v mullovém

moderu a žížaly (společně s termity) dominují v mullu (Wallwork 1970 in Zanella et al. 2011). Humusové formy tak mohou být členěny na dvě hlavní skupiny podle charakteru biologické aktivity: (1) mullový moder a mull, obývané zejména žížalami a bakteriemi, s nasyceným sorpčním komplexem a neutrální až mírně alkalickou půdní reakcí v A horizontu; (2) mor a moder s převahou roztočů, chvostoskoků a hub, s nenasyčeným sorpčním komplexem a kyselou půdní reakcí v A horizontu. V průběhu rozvoje poznání biologických aspektů humusových forem byly dále vymezeny roupice (*Enchytraeidae*) jako dominující složka zooedafonu v moru a průvodci roztočů a chvostoskoků v moderu.

Z žížalovitých vykazují největší ekologickou variabilitu epigeické žížaly, které preferují organické vrstvy půdy, pouštějí se pouze sezónně do minerálních vrstev půdy a snášejí i nižší hodnoty pH (<5). Anecické a endogeické žížaly jsou častější v mullových humusových formách, zatímco epigeické žížaly v kombinaci s roupicemi a členovci jsou častější v moderových formách humusu.

V morových formách humusu jsou nejvíce zastoupeny houby, které jsou tolerantnější vůči kyselému pH na rozdíl od bakterií, jejichž aktivita s poklesem pH ustává. Proto jsou v moru a moderu častá houbová mycelia, což má za následek snížení biotransformace opadu a jeho následnou akumulaci. Naopak v mullovém moderu a mullu dominují bakterie, které mají schopnost rychle mineralizovat organickou hmotu a přetvářet ji v kvalitnější humusový materiál.

Mullové humusové formy jsou typické pro mírné klima a živinami bohaté substráty. V nepříznivém klimatu se zvětšuje mocnost organických horizontů a aktivita žížalovitých se přesouvá do A horizontu.

Humusové formy představují interaktivní prostředí s výraznou dynamikou vázanou na vývojová stadia lesních porostů. Stejně jako s podmínkami ekotopu (teplota, srážky, minerální síla matečné horniny), formace humusových forem těsně souvisí s vývojovými fázemi lesních porostů a celkově s biogenní složkou lesního ekosystému. V průběhu vývoje lesního porostu se tak mění poměr holorganického a organo-minerálního podílu půdy a dochází k jejich kvalitativním změnám: po smýcení nebo přirozeném rozpadu porostu dochází obecně ke zvýšení biologické aktivity a zrychlení mineralizace surové organické hmoty, snižuje se jednak její celkové zastoupení a jednak klesne podíl surového humusu. Může také dojít dočasně k mírnému poklesu podílu A horizontu. Změny světelných a nutričních podmínek spojené s dospíváním porostu ovlivňují pedoklimatické podmínky a postupně spoluutvářejí prostředí vhodné pro rozvoj žížal, zejména anecických a endogeických. To má za následek jednak intenzivnější rozklad organické hmoty a její zapracování společně s živinami hlouběji do půdy, čímž se zvyšuje celková mocnost i podíl A horizontu, jednak změnu humusových forem směrem k příznivějším (k mullovému moderu, mullu). V momentě zatažení korunového zápoje se mikroklimatické podmínky mění a dřevinné populace využívají živiny zapravené do půdy během vyspívání porostu, čímž dochází postupně k opětovnému ochuzování o organickou hmotu a živiny v A horizontu a k redukci populací žížalovitých. Organominerální horizonty se ve smyslu dynamiky svého zastoupení vyznačují menšími fluktuacemi a vyrovnanějším podílem na celkovém obsahu organické hmoty v půdě.

7.3.2.4 Některé aspekty problematiky humusových forem z hlediska lesnické praxe

Nadložní humus a organické látky v půdě obecně podmiňují rozhodující měrou stav a dynamiku lesních ekosystémů. Jejich přeměny vlivem lidské činnosti nebo i odstranění např. buldozerovou přípravou půdy znamená devastaci lesního stanoviště, jež svou intenzitou může přesahovat význam jiných antropogenních vlivů, jako např. imise. To platí zejména proto, že je bezprostředně narušena výživa lesních dřevin, koloběh vody a biogenních látek a snížená ochrana kořenového systému dřevin proti působení biotických a abiotických činitelů a patogenů. Vrstvy nadložního humusu rovněž představují ochranu před toxickým působením některých látek, které jsou uvolňovány acidifikací půdního prostředí (např. sloučeniny hliníku, manganu, těžké kovy). Z hlediska lesnicko-pedologické praxe je důležité pamatovat v rámci péče o lesní stanoviště na tyto skutečnosti:

- Svrchní vrstva půdy a její dynamika hrají základní roli v koloběhu živin a obecně v geobiochemických cyklech elementů.
- Narušení vrstvy nadložního humusu vede k negativním změnám v cyklech bioelementů, jež se odráží v charakteru růstových podmínek stanoviště a tedy i ve stabilitě lesních ekosystémů.
- Humusová vrstva představuje základní prostředí pro jemné kořání lesních dřevin, které zde nalézají naprostou většinu potřebných živin.
- Humusová vrstva představuje ochranu před toxickým působením některých látek, které jsou uvolňovány acidifikací (až už přirozenou nebo – a zejména – antropicky podmíněnou) do půdního prostředí (např. sloučeniny hliníku, manganu, těžké kovy). Její odstranění jako následek mylného předpokladu, že se jedná o relevantní technologické opatření snižující toxicitu půdy, může vést k následné výsadbě sazenic do toxického prostředí minerální půdy, která se navíc vyznačuje naprosto extrémním vodním a tepelným režimem, který znamená pro většinu lesních dřevin limitující podmínky.
- Ze stejného aspektu jako v předchozím bodě je podstatné, že mechanická (mechanizovaná) celoplošná příprava půdy vede ve většině případů ke zhoršení podmínek pro následné výsadby, pokud nebyl zásah veden cíleně ke zlepšení právě limitujících hydrofyzikálních charakteristik půdy.
- Cílem lesnických a lesopěstebních meliorací má tedy být maximální ochrana vrstvy nadložního humusu, naopak její narušení je nutno posuzovat jako poškození a ohrožení stanoviště s negativním dopadem na vývoj ekosystému lesa (lesního porostu). Celoplošná příprava půdy je tak opatření, které by mělo být prováděno individuálně s předcházejícím detailním šetřením konkrétního stanoviště, nebo pro konkrétní hospodářské soubory, jako např. HS 13.

Ochrana, obnova a revitalizace vrstvy nadložního humusu je tedy jednou z nejdůležitějších podmínek revitalizace lesních ekosystémů a péče o jejich dobrý stav ve smyslu souladu půdního prostředí s přirozeně se vyskytující vegetací v kontextu makroklimatických a mezoklimatických podmínek ekotopu.

7.3.3 Klíč k určování skupin humusových forem

Klasifikace humusových forem se provádí podle celé řady systémů – podle přírodních podmínek, klimatického rázu a podle charakteru vegetace. V této kapitole je uveden klíč k určování humusových forem (upraveno podle Klinky, 1997), který vychází z morfologických vlastností sekvence organických horizontů a charakteru organominerálního horizontu A.

1a	Během vegetační sezóny není v půdě souvislá hladina podzemní vody a je-li, je > 40 cm hluboko, půda je minerální, ale ne glejová nebo vrchovištní organozem	2
1b	Souvislá hladina podzemní vody je během vegetace max. v hloubce ≤ 40 cm, půda je organická; není-li souvislá hladina podzemní vody, půda je glejová	16
2a	Mocnost Ah horizontu nepřesahuje 2 cm; pokud ano, mocnost horizontů F a H je větší než mocnost Ah horizontu	3
2b	Mocnost Ah horizontu je ≥ 2cm a mocnost horizontů F a H je < než mocnost horizontu Ah	15
3a	F horizont zahrnuje mykogenní (Fm mykogenní a/nebo Frm mykogenní s rezidui kořenů) horizonty; ostatní F horizonty, pokud jsou přítomné, jsou buď ≤ 2cm, nebo zaujímají ≤ 25 % mocnosti F horizontu	4
3b	F horizont se skládá z horizontů Fs (mechový) a/nebo Fsm (mykogenní mechový); ostatní F horizonty, pokud jsou přítomné, mají mocnost buď ≤ 2cm nebo zaujímají ≤ 25 % mocnosti horizontu F	9

3c	F horizont se skládá z horizontů Fa (amfigenní) a/nebo Fz (zoogenní); ostatní F horizonty, pokud jsou přítomné, jsou buď ≤ 2cm mocné nebo zaujímají ≤ 25 % mocnosti F horizontu	10
3d	F horizont se skládá z horizontu Fsa (mechový amfigenní) a/nebo Fsz (mechový zoogenní); ostatní F horizonty, pokud jsou přítomné, jsou buď ≤ 2 cm mocné, nebo zaujímají ≤ 25 % mocnosti F horizontu	13
3e	F horizont se skládá z obojího: mykogenního a amfigenního nebo zoogenního horizontu, přičemž je každý sled horizontů > 2 cm nebo zaujímá > 25 % mocnosti F horizontu	14
4a	rozkládající se dřevo zahrnuje > 35 % objemu v profilu humusové formy	Lignomor
4b	rozkládající se dřevo zahrnuje ≤ 35 % objemu v profilu humusové formy	5
5a	H horizont chybí, nebo pokud je přítomný, je buď ≤ 2cm mocný nebo zaujímá ≤ 25 % tloušťky F a H horizontu	6
5b	H horizont je > 2 cm mocný a zaujímá > 25 % tloušťky horizontu F a H.	7
6a	tloušťka horizontu Fm (mykogenní) je > horizontu Frm (mykogenní s rezidui kořenů)	Hemimor
6b	tloušťka horizontu Fm (mykogenní) je ≤ horizontu Frm (mykogenní s rezidui kořenů)	Resimor
7a	Jsou přítomné horizonty Hf (jemnozrný granulární) a/nebo Hg (granulární); ostatní H horizonty, pokud jsou přítomny, jsou buď ≤ 2 cm mocné nebo zaujímají ≤ 25 % tloušťky horizontu H	Modermor
7b	Jsou přítomné horizonty Hh (humusový) a/nebo Hr (reziduální); ostatní H horizonty, pokud jsou přítomné, jsou buď ≤ 2cm mocné, nebo zaujímají ≤ 25 % mocnosti horizontů H	8
7c	H horizont se skládá z obou sledů horizontů: Hf (jemnozrný granulární) a/nebo Hg (granulární) a Hh (humusový) a/nebo Hr (reziduální), přičemž každý sled horizontů zaujímá > 2cm nebo > 25 % mocnosti horizontu H	Lamimor
8 a	tloušťka horizontu Hh (humusový) je > horizontu Hr (reziduální)	Humimor
8b	tloušťka horizontu Hh (humusový) je ≤ horizontu Hr (reziduální)	Rhodomor
9a	rozkládající dřevo představuje > 35 % objemu v profilu humusové formy, celková hloubka humusové formy 15-40 cm	Lignomor
9b	rozkládající dřevo představuje ≤ 35 % objemu v profilu humusové formy	Sphagnomor
10a	rozkládající dřevo zaujímá > 35 % objemu v profilu humusové formy, celková hloubka humusové formy je 10-30 cm, dominuje horizont Faw (amfigenní s dřevitými zbytky), popř. Fzw (zoogenní s dřevitými zbytky)	Lignomoder
10b	rozkládající dřevo má ≤ 35 % objemu v profilu humusové formy	11
11a	Mocnost Ah horizontu ≥ 2cm, mocnost horizontů H a F je > horizont Ah	Mullmoder
11b	Ah horizont chybí, nebo, pokud je přítomný, je < 2cm mocný	12
12a	Mocnost horizontu Fa (amfigenní) je > horizontu Fz (zoogenní)	Mormoder
12c	tloušťka horizontu Fa (amfigenní) je ≤ horizontu Fz (zoogenní)	Leptomoder
13a	rozkládající dřevo zaujímá > 35 % objemu v profilu humusové formy, celková hloubka humusové formy je 10-30 cm, dominuje horizont Faw (amfigenní s dřevitými zbytky), popř. Fzw (zoogenní s dřevitými zbytky)	Lignomoder
13b	rozkládající dřevo představuje ≤ 35 % objemu v profilu humusové formy	Sphagnomoder
14a	rozkládající dřevo zaujímá > 35 % objemu v profilu humusové formy	Lignomoder
14b	rozkládající dřevo zaujímá ≤ 35 % objemu v profilu humusové formy	Lamimoder
15a	Je přítomný zoogenní horizont Ah a je zrnitý (obsazen žížalami)	Vermimull
15b	Je přítomný rhizogenní horizont Ah a drn nebo tráva	Rhizomull

15c	Ah horizont je vytvořený infiltrací nebo akumulací organického materiálu mechanickým smíšením (koluviace, eolické, kryoturbace, silvoturbace)	Paramull
16a	Mocnost organické vrstvy je > 40 cm nebo ≤ 40 cm tlustou, pokud se níže nachází litická, parlitická vrstva nebo permafrost (potom se rozlišují organické horizonty mokřadů)	17
16 a	Půda je minerální (organická vrstva je ≤ 40 cm mocná), (rozpoznat horní organické (LFH) horizonty) →Návrat k bodu číslo 2 a dodání předpony Hydro k identifikované skupině 2	2
17a	Mocnost holorganických horizontů (L,F,H) je < O horizont (v pojetí této klasifikace horizont mokřadů sestávající z horizontů Of – fibrický, složený z nedokonale rozložených rostlinných zbytků, u nichž lze rozpoznat jejich původ; Om – mezický, složený z částečně rozložených rostlinných zbytků ve stavu dekompozice na přechodu mezi horizonty Of a Oh; Oh – humický, složený z dobře rozložených rostlinných zbytků, které byly z většiny rozloženy na humusový materiál) →Návrat k bodu číslo 2 a dodání předpony Hydro-k identifikované skupině 2	2
17 b	Mocnost horního organického horizontu (L,F,H) je ≤ O horizont (jeho charakteristika viz bod 17a)	18
18 a	Oh horizont chybí, nebo pokud je zastoupen, mocnost ostatních O horizontů (jeho charakteristika viz bod 17a) je > horizont Oh	19
18 b	Oh horizont je zastoupen a mocnost ostatních O horizontů (jeho charakteristika viz bod 17a); pokud jsou zastoupeny, je ≤ Oh horizont	Saprimoder
19a	Mocnost horizontu Of je ≤ horizont Om (charakt. Of a Om viz bod 17a)	Fibrimor
19b	Mocnost horizontů Om je ≤ horizontu Of (charakt. Of a Om viz bod 17a)	Mesimor

8 PŮDNÍ ORGANIZMY A EKOLOGIE LESNÍCH PŮD

8.1 Diverzita půdních organizmů

Půdní edafon je termín označující soubor všech živých organizmů v půdě. Půdní organizmy jsou specifické tím, že většinu svého života tráví v půdním prostředí. V každé části půdního tělesa a zejména při půdním povrchu v organické vrstvě žijí půdní organizmy v enormních četnostech (řádově tisíce až miliardy jedinců na gram půdy).

Půdní organizmy lze klasifikovat podle nejrůznějších kritérií a jako nejčastější je používán na základě velikosti a systematické příslušnosti taxonomického členění organizmů (Tab. 8–1). Nejefektivnější rozkladnou schopnost v půdě plní mikroflóra, kam jsou řazeny bakterie, houby, aktinobakterie (dříve aktinomycety), sinice a řasy. Fytoedafon, kam patří zejména bakterie, houby, aktinomycety, sinice, řasy a kořeny rostlin, tvoří cca 80% podíl edafonu; zooedafon, kam jsou řazeny prvoci, hlístice, členovci, kroužkovci a savci, tvoří cca 20 %.

Základy ekologie půdy (skriptum)

Šantrůčková, H., JČU PF KBE

http://kbe.prf.jcu.cz/sites/default/files/prednasky/skripta/skripta_puda_metody_final.pdf

Bez živé složky by existence půdy nebyla dlouhodobě možná. Jakkoli je živá složka podmínkou vzniku a existence půdy, její objemový i hmotnostní podíl je velice nízký (zpravidla méně než 1 %) a je koncentrovaný do velmi tenké vrstvy půdy při půdním povrchu.

Tab. 8–1: Klasifikace půdního edafonu na základě velikosti těla, taxonomické příslušnosti a zdroje potravy.

<i>kategorizace</i>	<i>taxonomické skupiny</i>	<i>příklad</i>
Makrofauna (> 2 mm) Heterotrofní; herbivoři a detritovoři	obratlovci členovci kroužkovci měkkýši	sysel, králík, hraboš, krték mravenec, brouci a jejich larvy, stonožky, červi, mnohonožky, pavouci, termity, svinky žížaly slímáci, šneci
Makroflóra převážně autotrofní	cévnaté rostliny mechy	kořeny rostlin ploník
Mezofauna (0,1-2 mm) heterotrofní – detritovoři	členovci červi	roztoči, brouci roupice
heterotrofní – predátoři	členovci	roztoči, hmyzenky
Mikrofauna (< 0,1 mm) detritovoři, predátoři, fungivoři, bakterivoři	hlístice vířníci prvoci	hlístice vířníci měňavky, nálevníci, bičíkovci
Mikroflóra (< 0,1 mm) převážně autotrofní	cévnaté rostliny řasy	kořenové vlášení zelené, žlutozelené, rozsivky
převážně heterotrofní	houby aktinomycety	kvasinky, plísně, rzi mnoho druhů
heterotrofní a autotrofní	bakterie sinice (cyanobakterie)	aerobní a anaerobní modrozelené řasy

Zjišťování charakteristik o půdní biologii se provádí jednak jako kvantitativní (zjišťování počtu jedinců dané taxonomické skupiny) nebo kvalitativní (druhová diverzita a její příčiny).

Četnosti druhů půdních organismů na 1m²

prvoci	10 ⁴ -10 ⁹
hlístice	10 ⁴ -10 ⁷
roupice	10 ⁴ -10 ⁶
roztoči	10-10 ⁶
chvostokoci	10-10 ⁵
žížaly	10-10 ²

Půdní mikroflóra se vyskytuje zejména v hloubce průměrně 3-15 cm. Nejnížší teplota pro metabolismus mikroflóry je 4-7°C, optimální teplota pro většinu skupin je 25-35°C s tím, že metabolicky aktivní začínají být při 8-10°C. Navýšení teploty o 10°C zvýší rychlost metabolických procesů až 3x s horní hranicí 70-80°C, kdy dochází k poškození buněčných struktur.

Hlavní úlohou půdních organismů je dekompozice (rozklad) organických zbytků a účast v řetězci procesů vzniku humusových látek. Mikroorganismy rozměrem svého těla odpovídají rozměrům koloidního systému půdy a i tím se podílejí na půdní sorpci. Metabolickými procesy dochází k vývoji tepla, které může v celkovém součtu navýšit teplotu i o 1-2°C i mnohem více, s čímž se můžeme setkat např. u kompostovacích procesů, kde dochází k vzestupu teploty až na 70°C. Půdní organismy navíc poutají dusík a přispívají k jeho zadržení v půdě. Zajišťují uvolňování a koloběh dalších živin jako je fosfor nebo síra a přispívají tak k výživě rostlin. Dále se podílejí na změnách v půdním chemismu, např. dýcháním, kdy CO₂ přechází v kyselinu uhličitou HCO₃, čímž dochází k tzv. přirozené acidifikaci půdy a také k intenzifikaci zvětrávacích procesů. Po odumření organismu se také v půdě navyšuje podíl organické hmoty. Organická hmota je navíc některými organismy (např. žížaly) aktivně zapracovávána do půdy, což se projevuje umocňováním organominerálních horizontů, větší strukturností půdy a příznivější konzistencí. Svým pohybem v půdě navíc půdní organismy podporují aeraci a zvyšují kyprost půdy.

Biologickou aktivitu lze posuzovat na základě produkce enzymu katalázy nebo také na základě produkce CO₂ (**respirační efekt půdy** neboli množství CO₂ vydýchané z 1 kg půdy za 24 hodin při 20°C).

Ve vegetačním období vydýchá 1 ha

- a) ornice 30-100 kg CO₂ za den
- b) lesní půdy 50-250 kg CO₂ za den

8.2 Skupiny půdních organismů

ŽÍŽALY patří i přes své relativně nízké počty jedinců k jednomu z nejvýznamnějších půdních organismů. Živí se detritem, půdní organickou hmotou i mikroorganismy obývajícími tato mikroprostředí; neživí se však živými rostlinami nebo kořeny. Žížal je vysoký počet druhů (okolo 7 tis. známých) a dělí se do třech skupin: epigeické žijící v humusové vrstvě při půdní povrchu, endogeické s horizontálním pohybem v půdě v hloubce 10-30 cm a anecické s vertikálním pohybem do hloubky až několika metrů. Žížaly se podílejí na zlepšování půdních podmínek (1) budováním chodbiček ovlivňujících půdní ventilaci i vsak vody vytvářením souvislých makropórů, (2) exkrementy ve formě kulovitých agregátů typických značnou bakteriální aktivitou a obsahem polysacharidů stabilizujících půdní strukturu, (3) zvyšováním úrodnosti půdy a přístupnosti živin, zejména ve svrchních 30 cm půdy, (3) zlepšováním fyzikálních vlastností půdy snižováním kompakce (nakypřováním) půdy díky hloubení chodbiček a zvyšováním kyprosti zejména půdního povrchu, odkud je voda rychle odváděna do hlubších partií půdy, čímž je snižováno riziko eroze proudící vodou.

MRAVENCÍ A TERMITI ovlivňují půdu spíše lokálně budováním mravenišť a termitišť. Tvoří velkou taxonomickou skupinu zahrnující detritivory, herbivory i predátory. Půdu ovlivňují jednak změnou aerace a vodního režimu, jednak úpravou chemismu. Některé druhy termitů si pěstují také vlastní kultury hub, které mají za potravu, nebo z okolí obřích termitišť odstraňují velké množství půdy využívané na stavební materiál.

HLÍSTICE se vyskytují zejména ve vlhkých, písčitých půdách, které mají dostatečný podíl makropórů umožňujících jejich pohyb. Při proschnutí půdy hlístice přecházejí do kryptobiotického stavu. Hlístice se živí zejména predací. Konzumací jiných organismů se podílejí na uvolňování dusíku do koloběhu a zpřístupňování jej rostlinám, pokud je dusíku v potravě více než mohou hlístice biologicky využít. Hlístice mohou parazitovat na kořenech, což může vést ke krnění rostlin.

PRVOCI tvoří početnou skupinu pohyblivých jednobuněčných organismů s velikostí těla 6-100 μm . V půdě bylo izolováno více než 350 druhů, které také výrazně ovlivňují bakteriální populace. Prvoci preferují vlhké ale dobře odvodněné půdy a vyskytují se zejména v povrchových horizontech. Nejvyšší aktivita prvoků je v blízkosti kořenů rostlin. Ovlivňují v půdě dekompozici organické hmoty a uvolňování živin do systému predací na populacích bakterií.

BAKTERIE jsou skupinou organismů zejména heterotrofních a zčásti autotrofních. Autotrofní získávají energii chemickou oxidací minerálních sloučenin, chemosyntézou (NH_4 , N, S, Fe), heterotrofní jsou odkázány na výživu z odumřelých organických látek. O výskytu bakterií rozhoduje **(a)** kvalita organických látek, **(b)** minerální živiny (pH slabě kyselé až alkalické), **(c)** vodní a vzdušný režim půdy (45-65 % plné vodní kapacity). Bakterie jsou v zejména ve svrchních 5-15 cm půdy zastoupeny ve velkých počtech: ve smrkových porostech 1-3 mld/1g půdy, v bukových porostech na rendzinách i 15 mld/1g půdy, v zemědělských půdách 8-10 mld/1g půdy. Bakterie obsazují zejména prostředí v okolí kořenů a jsou proto koncentrovány v tzv. aktivní vrstvě – rhizosféře.

Bakteriální biomasa může dosahovat až 0,3 % hmotnosti půdy. Bakterie plní širokou škálu funkcí. Zejména se podílejí na rozkladu organických zbytků působením enzymů, např. celulóza, proteáza, fosfatáza (viz kapitola 8.3). Rozkládají tak složité organické látky (cukry, bílkoviny, celulózu, lignin, hemicelulózy, pektin) na jednoduché sloučeniny. Na rozkladu se podílejí aerobní i anaerobní bakterie.

Bakterie jsou klíčové z hlediska rozkladu bílkovin a koloběhu dusíku. Ten je bakteriemi přeměňován na amonnou a nitrátovou formu v procesech amonifikace a nitrifikace (kapitola 12.2.2.3), a to až z 98-99 % organického N, který je uvolněn z odumřelých těl organismů.

Dusík je v půdě přítomen jednak díky rozkladné činnosti výše zmíněných druhů bakterií, jednak se některé bakterie přímo podílí na poutání vzdušného N. Ten je poután buď bakteriemi přítomnými volně v půdě (aktinomycety rodu *Frankia*, bakterie rodu *Rhizobium* nebo v symbióze s kořeny rostlin na jejich povrchu a uvnitř kořenových pletiv: bakterie rodu *Azotobacter* žijící v symbióze s kořeny tropické trávy *Paspalum notatum* může fixovat i několik desítek kg N/ha/rok; nebo symbiotické bakterie rodů *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium* vázané na tzv. leguminózy, neboli hospodářské plodiny, z čeledi *Fabaceae* (bobovité) – jeteloviny, vikev, hrách, fazol, kozinec, komonice, akát, sója apod.

ŘASY jsou děleny do několika skupin, z nichž zde pohovoříme o fotosyntetizujících, tedy fotoautotrofních, organismech obsahujících chlorofyl. Ke svému životu potřebují světlo, a proto se vyskytují blízko půdního povrchu. Velikost těl řas je většinou od 2 do 20 μm . Řasy nejlépe prosperují ve vlhkých až mokřích půdách, ale jsou mezi nimi i druhy významné pro oblasti horkých nebo arktických pouští. Některé řasy tvoří symbiotická společenstva s houbami a formují specifickou skupinu organismů, lišejníky. Ty jsou významné z hlediska iniciačních stádií tvorby půdy tím, že jsou schopné kolonizovat i nepříznivé prostředí, jako je holá skála nebo exponované polohy.

V půdě bylo izolováno několik set druhů řas. Půdní řasy jsou členěny na zelené, žlutozelené a rozsivky. Zelené řasy jsou nejrozšířenější ve vlhkých, ale nezaplavovaných kyselých půdách, rozsivky jsou častější v dobře provzdušněném neutrálním až alkalickém prostředí bohatém na organickou hmotu. Populace řas čítají od 1 do 15 mld. jedinců na čtvereční metr do hloubky 15 cm.

HOUBY představují stabilnější společenstva než bakterie. Přestavují významnou skupinu reducentů a společně s heterogenními bakteriemi zaujímají dominantní postavení v přeměnách organické hmoty. Houby mají vyšší nároky na vlhkostní podmínky. Optimální vzdušná vlhkost je 80 %, proto jsou časté v lesních půdách, které představují vlhkostně stálější prostředí. Naopak snáší kyseléjší prostředí.

zemědělské půdy:
poměr bakterie : plísň = 10-20 : 1

lesní půdy
poměr bakterie : plísň = 1-2 : 1

Houby jsou heterotrofní aerobní organizmy. Odumřelé látky jsou pro ně zdrojem energie a uhlíku pro budování pletivových struktur. Na rozkladu celulózy se podílí houba rodu *Fusarium*, houba schopná produkovat silnější kyseliny, nezbytné k rozložení složitých polysacharidů.

Celulóza se rozkládá v kyselém prostředí (pH 4,3-4,5).
Při pH > 5 celulóza přechází v primární protein, ten v aminokyseliny, ty v amoniak NH₃.

Houby dále rozkládají polyfenoly, které rozkladem přecházejí v proteiny. Ty vytvářejí impregnační struktury, které bývají příčinou hromadění humusu na půdním povrchu. Plísň jsou schopné efektivnější asimilace uhlíku z rozkládaných látek (až 50 %), což je podstatně víc než u bakterií (1-30 %) a přijímají také více dusíku z bílkovin než bakterie. Houby přemění na své pletivo přibližně 50-60 % původního substrátu.

Při kvantifikaci hub v půdě nelze počítat jedince jako u bakterií, neboť houbové mycelium představuje prostorovou síť, u které je často obtížné identifikovat, ke kterému konkrétně jedinci přísluší. Biomasa hub se tak vyjadřuje v délce mycelia, zpravidla na 1m² do určité hloubky půdy.

Houby jsou však významné nejen z hlediska rozkladu organické hmoty, ale také z hlediska výživy rostlin. Zejména v lesních půdách jsou nastolené symbiotické vztahy hub a kořenů rostlin zvané **MYKORHIZA**. Takovýmto soužitím houba zajišťuje rostlině minerální výživu (např. fosforem nebo dusíkem) a rostlina houbě výživu organickými látkami. V borových porostech s aktivní mykorhizou je tak např. v půdách obsaženo o 75 % K a až o 240 % více P než v porostech bez mykorhizy. Často je mykorhiza klíčovou podmínkou pro růst rostlin. Mykorhizní houby patří mezi houby stopkovýtrusé, vřeckovýtrusé i spájkivé a mnoho z nich patří mezi známé druhy jedlých lesních hub (hříby, růžovky, muchomůrky, bedly, pavučince aj.). U většiny lesních dřevin jsou nečastějšími typy mykorhizy arbuskulární mykorhiza a ektomykorhiza.

BOX 8-1: Některé typy mykorhizní symbiózy

Arbuskulární mykorhiza je nejrozšířenější a vývojově nejstarší typ, je charakteristická mezibuněčnými i vnitrobuněčnými vlákny (hyfami) a zvláštními bohatě větvenými vnitrobuněčnými útvary zvanými arbuskuly.
Orchideoidní mykorhiza se vyskytuje pouze u orchidejí. Je charakteristická závitými hyf (smotky, pelotony) uvnitř buněk hostitele a jeho dvojitou kolonizací.
Erikoidní mykorhiza se vyskytuje u vřesovitých rostlin (řád *Ericales*). Průběh kolonizace je podobný jako v předchozím případě, ale je působený jinými houbami.
Ektomykorhiza je charakteristická tím, že houba neproniká buněčnou stěnou do buňky hostitele. Kolonizovaný úsek kořene je často zduřený a tak snadno determinovatelný. Je známá výlučně u dřevin.

Mykorhizní houby jsou specificky distribuovány v rámci půdy coby heterogenního prostředí. Je tak možné determinovat houby specifické pro L, F a H horizonty, a to i v rámci různých druhů dřevin. I v rámci půdního mikroprostředí mohou být mykorhizní houby specificky distribuovány a rozmístění konkrétních mykorhizních společenstev může být v půdě značně nehomogenní.

Kuřátka stejnobarvá (*Ramaria concolor*): v opadu *Pinus resinosa*;

Pestrec obecný (*Scleroderma citrinum*), kuřátečko hřebenité (*Clavulina cristata*), *Cenococcum geophilum*: ve všech půdních horizontech;

Muchomůrka růžovka (*Amanita rubescens*): v H horizontu a hlouběji.

Mezi základní charakteristiky mykorhizních hub patří (1) velký povrch mycelia a současně schopnost zasahovat i do nepatrných půdních prostor, které jsou kořenovému systému rostlin nedostupné; (2) schopnost přímé výměny látek s hostitelskou rostlinou i s půdním prostředím; (3) existence vláknité stélky (mycelia), umožňující přenos látek cytoplazmou na významné vzdálenosti. Pro rostlinu znamená mykorhiza až několika set násobné zvětšení sorpčního povrchu kořenů.

Mykorhiza účinně propojuje rostlinu s jejím prostředím a podílí se na tvorbě specifických ekologických podmínek. Mykorhizní houba do značné míry zprostředkovává výměnu hmoty, energie i informace mezi rostlinou a půdou. Mykorhizní houby zajišťují obousměrný transport látek půda $\rightleftharpoons$ rostlina. Do půdy je tak rozváděn asimilovaný uhlík, což má velký význam pro snížení kompetice mezi jednotlivými rostlinnými druhy, které jsou propojeny myceliem mykorhizních hub. Mykorhiza také významně ovlivňuje vodní režim půdy (aktivní povrch mycelia představuje významný prostředek odběru vody) a její pohyblivost a tím také její biologickou aktivitu spojenou s činností dalších půdních organismů. Ektomykorhizní houby také produkují řadu enzymů, které se uplatňují při rozkladu organických látek; tyto enzymy však nepatří do skupiny fenoloxidáz a peroxidáz, které produkují saprotrófní houby rozkládající dřevní hmotu. Mykorhiza kladně ovlivňuje stabilitu půdních agregátů, zejména produkcí glykoproteinu glomalinu, který přispívá k tvorbě půdní struktury. V přítomnosti mykorhizy se také snižuje mezidruhovú konkurence rostlin tím, že mykorhizní houby jsou málo selektivní ve výběru rostlinného partnera a mohou propojovat sítě hyf rostliny různých druhů, velikostí a vývojových stádií. To se projevuje např. zdárnějším odrůstáním semenáčků řady lesních dřevin, které jsou v růstu podpořeny mykorhizní výživou (nurse effect). Mykorhiza se také účastní na změnách rostlinného společenstva v čase (sukcesi). Vývoj půdního prostředí, stejně jako samotná biodiverzita, jsou spojeny s mykorhizními společenstvy ve smyslu těsného obousměrného vztahu pedon $\rightleftharpoons$ mykorhiza $\rightleftharpoons$ rostlina v daném čase, neboli: sukcesní vývoj společenstva na daném stanovišti je doprovázen i změnou druhové skladby mykorhizy, vždy s určitou časovou prodlevou (řádově roky až decennia).

AKTINOMYCETY představují „přechodnou formu“ mezi bakteriemi a houbami. Dříve byly aktinomycety systematicky řazeny k houbám, neboť některé aktinomycety tvoří vláknité kolonie, připomínající mycelium hub, avšak jejich myceliální sítě jsou mnohem jemnější. Významnými rody jsou *Actinomyces*, *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Frankia*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Streptomyces* aj.

Vyžadují teplé půdy, neutrální až mírně bazické pH (7-8) a jsou citlivé na nadměrnou půdní vlhkost. Jsou tolerantní k nízkému osmotickému potenciálu a jsou významnou složkou půd v aridních oblastech nebo v zasolených půdách.

Rozkládají řadu látek, které jsou vůči jiným skupinám organismů rezistentní (lignin, chitin, fosfolipidy) a jsou významným článkem v koloběhu uhlíku a tvorbě humusu. Při rozkladných procesech vzniká řada aromatických látek a půda tzv. „voní“, což je způsobeno produkcí geosminů, volatilních derivátů terpenů (typická např. pro chuť červené řepy).

Coby aerobní heterotrofové, aktinomycety žijí na rozkládající se organické hmotě v půdě. Některé druhy utváří s rostlinami parazitické nebo symbiotické vztahy. Mnohé druhy produkují antibiotické sloučeniny likvidující jiné mikroorganismy (aktinomycin, neomycin, streptomycin aj.). Mnoho aktinomycet v lesních půdách je schopných poutat vzdušný dusík do amonné formy přístupné rostlinám.

KOŘENY ROSTLINY jsou řazeny mezi makrofytoedafon a jsou významnou půdní ekosystémovou složkou. Ovlivňují zvětrávání matečné horniny, strukturu a konzistenci půdy, rychlost infiltrace i zapravování humusu do půdy (podél kořenů se vsakující vodou).

Kořeny s průměrem do 0,3 mm jsou soustředěny u většiny lesních dřevin ve svrchních 10 cm půdy. Tento fakt je třeba brát v úvahu při posuzování rizik přísušků, zrychlené mineralizace humusu, který výrazně zabraňuje ztrátám vody z půdy výparem apod.

Kam sahají kořeny?

Průměrné hloubky kořenového systému se pohybují kolem 0,5-1 m; maximálních hloubek dosahuje např. borovice nebo dub na písčitých půdách nebo hlubokých zvětralinách krystalických hornin (i 10 m).

Rekordmanem v hloubce kořenů je např. eukalyptus (61 m).

Vedle fyzikálních vlastností půdy kořeny také ovlivňují půdní chemismus. V nejbližším okolí kořenů dochází v důsledku metabolických procesů a exsudací (vylučování) organických kyselin ke snižování hodnoty pH – někdy až o 0,2-0,4 stupně pH –, z půdy jsou odebírány živiny, ale na druhou stranu je půda o živiny obohacována účinkem kořenů na minerální podíl půdy, kde jsou uvolňovány při zvětrávacích procesech.

Acidita rhizosféry může být i 10x vyšší (nebo nižší) než půdy mimo kořenovou zónu.

Celková délka kořenů: až 10 000 km/ha.

Celková plocha kořenů: cca 15 000-30 000 m²/ha.

Kořeny tvoří významný podíl z celkové biomasy lesních ekosystémů: 10-60 t/ha, což je 1-6 kg/m². Dohromady s hmotou kořenů travobylinného patra činí kořenová biomasa cca 30-100 t/ha. Kořenový systém narůstá nejvíce v průměru do 30 let věku porostu. Ve svrchních půdních horizontech tvoří kořeny podíl 15-20 % celkového objemu půdy a obsazují cca 30-40 % půdních pórů.

Hustota prokořenění půdy:

horské louky 30-300 cm/cm³

obiloviny 1-6 cm/cm³

lesní ekosystém 0,5-2 cm/cm³

Rozvoj kořenů v půdě závisí na řadě faktorů, zejména na provzdušnění půdy a vodní bilanci. Pro rozvoj kořenů jsou příznivé vzdušné lehké, čerstvě vlhké půdy, kde může kořenový systém dosahovat i značných hloubek. Naopak rozvoj kořenů se zpomaluje ve špatně prokysličených, zamokřených a zhutněných půdách. Hloubka prokořenění vymezuje fyziologickou hloubku půdy, tedy hloubku, kam sahají kořeny rostlin. Zpravidla je menší než genetická hloubka (po matečný substrát), ale kořeny mohou prorůstat C horizontem i do horninového podloží, zejména u mělkých, nevyvinutých půd. Menší fyziologická hloubka než genetická je také typická právě pro hydrické půdy s vysokou hladinou podzemní vody, která způsobuje zabahnění, a kořeny v důsledku nedostatku kyslíku odumírají již při přechodu do G horizontu.

Rozvoj kořenů závisí také na půdním chemismu a půdní genezi. Vyvinutější kořenový systém je tak u stejné dřeviny na chudých půdách, kde je k získání potřebných živin zapotřebí větší sorpční povrch, naopak na živných půdách (např. v moravskoslezském flyši) se lze setkat s buky s málo rozvinutým kořenovým systémem. Dřevina na takových stanovištích nemusí investovat tolik energie do rozvoje kořenového systému. Na podzolovaných půdách se lze setkat s dvojetážovým kořenovým systémem, který je rozvinut u smrku koláčovitě nad a pod eluviálním horizontem Ep, kterým prorůstá v co nejkratší vzdálenosti, kolmo k zemskému povrchu.

8.3 Půdní enzymy

Obecně se věda o enzymech nazývá enzymologie, problematiku enzymů v půdě řeší půdní biochemie. Enzymy jsou bílkoviny s katalytickou aktivitou. Urychlují průběh chemických a biochemických reakcí s tím, že ze samotné reakce vycházejí nezměněné. Skládají se z proteinů, na které se často vážou další molekuly zvané kofaktory nebo prostetické skupiny, které se podílejí na katalýze. Enzymy snižují aktivační energii chemických reakcí, a to v intenzitě v závislosti na koncentraci substrátu, teplotě a pH prostředí a přítomnosti aktivátorů a inhibitorů. Enzymy určují rychlost a povahu chemických reakcí v tělech organismů i v mimotělním prostoru, tedy i v půdě. Zde jsou hlavními činiteli procesů, jako je rozklad organických látek, mineralizace a recyklace látek (živin jako fosfor, dusík, síra aj.). Názvy enzymů jsou složeny zpravidla ze dvou částí, a to z kořene slova názvu svého substrátu (látky, kterou katalyzují) nebo z názvu biochemické reakce, která vlivem enzymu probíhá, a z přípony -áza.

V půdě mají enzymy nezastupitelnou roli z hlediska rozkladu a přeměny látek, koloběhu živin, humifikace i mineralizace. Enzymy se v půdě vyskytují ve více formách v závislosti na místě výskytu. **Celulární enzymy (endoenzymy)** jsou takové, jejichž aktivita je kontrolována buňkou nebo organismem a které jsou v daném okamžiku izolované v živém těle. Některé bakterie mají bílkoviny izolované v periplazmatickém prostoru, kde plní roli v transportu živin nebo kontrolní funkci při detekci určitých látek vně buněčného prostoru. **Ektoenzymy** se vyskytují na vnější straně buněčné stěny. **Extracelulární enzymy (exoenzymy)** se nacházejí mimo prostor živých buněk a organismů. V půdě jsou přítomny buď vlivem aktivní sekrece organismu do prostředí, nebo rozpadem buňky. Jsou vázány na sorpční komplex půdy a účinkují bezprostředně po dodání příslušného stimulu.

Většina enzymů v půdě je extracelulárních. Avšak enzymy uvolněné do půdy z rozpadu buňky, i když jsou v daném okamžiku extracelulární, jsou původu celulárního a jako takové ztrácí v půdě účinnost – např. protože vyžadují přítomnost koenzymu nebo spouštěče, který je ale přítomný a aktivní pouze v buněčném prostředí, neboť vyžaduje specifický substrát nebo specifické fyzikálně-chemické podmínky pro svou aktivitu. Proto jsou tyto enzymy zpravidla degradovány a rozloženy.

Vedle extracelulárních enzymů coby zbytků rozkladu buněčných těl jsou v půdě enzymy vázané na sorpční komplex, které mohou být změněny nebo i nabýt nové vlastnosti. V půdě jsou enzymy vázány na půdní koloidy – jílové nebo humusové látky, které mají na enzymy ochranné i stabilizační účinky. Enzymy jsou tak odolné vůči fyzikálně-chemickým změnám prostředí, které volné enzymy degradují i vůči účinkům proteázy neboli enzymům štěpícím bílkoviny. Adsorpce enzymu na koloidním systému půdy je závislá na třech faktorech:

- vlastnosti koloidů: vnitřní náboj, kationtová výměnná kapacita, charakter výměnných iontů, stupeň hydratace;
- charakteristika daného enzymu: molekulární hmotnost, izoelektrický bod, množství fixačních míst, rozpustnost, koncentrace;
- charakteristika prostředí: pH, redox potenciál, vlastnosti půdního roztoku, složení a koncentrace iontů v půdě.

Půda je také schopná absorbovat jisté maximální množství enzymů a nadbytek je v půdě rychle degradován. Tuto kapacitu je možné zvýšit dodávkou organických hnojiv, např. kompostu. Také je možné zvýšit aktuální enzymatickou aktivitu půdy dodáním specifického enzymu nebo souboru enzymů jako bioremediační opatření s cílem zvýšení vitality kultur na nepříznivých stanovištích a překlenutí kritického období.

Enzymy jsou zpravidla specializované na specifické substráty neboli chemické sloučeniny, které jsou účinkem enzymů katalyzovány. Některé enzymy jsou tzv. **konstitutivní** (základní), které jsou v půdě přítomné i za absence příslušného substrátu. Jejich koncentrace v půdě se nezvyšuje bezprostředně po zvýšení množství jejich substrátu. Takovým enzymem je např. kataláza, která je vázána na sorpčním komplexu půdy a je de facto neustále „k dispozici“ v případě zvýšení

koncentrace peroxidu vodíku (H_2O_2), který představuje vysoce toxickou chemickou látku jako vedlejší produkt metabolismu. Kataláza má jedno z nejvyšších čísel přeměny ze všech enzymů (jedna molekula může převést na vodu a kyslík miliony molekul peroxidu vodíku za sekundu). Lze tak říci, že půda disponuje mechanismy, kterými nebezpečné sloučeniny odbourává bez přímé vazby na aktuální biologickou aktivitu. Koncentrace konstitutivních enzymů je v půdě relativně stálá. Dále jsou enzymy **indukované**, které se v půdě objevují až po vstupu odpovídajícího substrátu. Ty jsou tvořeny půdními organismy až na základě přítomnosti nebo zvýšení množství daného substrátu. Ten svou přítomností vyvolává u půdních organismů příslušné biochemické pochody a tím syntézu daného enzymu a případně jeho vyloučení do půdy. Mezi indukované enzymy patří např. depolymerázy. Jsou aktivně vylučovány živými mikroorganismy, které nemohou přijímat potravu jinak než ve formě monomerů nebo dimerů. Koncentrace indukovaných enzymů se s neustávající přítomností substrátu v půdě zvyšuje. Indukované enzymy mohou při dlouhodobé produkci obsazovat vazebná místa sorpčního komplexu a stávat se konstitutivními.

Hodnocení výsledků stanovení aktivity půdních kataláz v Jankově vápnoměru (produkce O_2 účinkem peroxidu vodíku H_2O_2) [ml O_2 /5g sušiny/15 min]		
zemědělské půdy	stupeň aktivity	lesní půdy
≥ 300	velmi silná aktivita	≥ 60
150 – 300	silná aktivita	30 - 60
50 – 150	střední aktivita	15 - 30
20 – 50	slabá aktivita	5 - 15
≤ 20	velmi slabá aktivita	≤ 5

Půdní enzymy lze rozdělit na (1) depolymerázy, (2) enzymy spojené s mineralizací organických sloučenin; (3) enzymy spojené s humifikací (Tab. 8–2).

Tab. 8–2: Hlavní typy půdních enzymů a jejich funkce (upraveno podle Gobat et al. 2010)

Depolymerázy			<i>Štěpení polymerů na monomerní nebo dimerické jednotky</i>
	Celulázy		Hydrolyza celulózy (celulolýza)
	Amylázy		Hydrolyza škrobů (amylolýza)
	Pektinázy		Hydrolyza pektinů (pektinolýza)
	Xylanázy		Hydrolyza xylanu
	Laminarinázy		Hydrolyza laminarinu a licheninu
	Chitinázy		Hydrolyza chitinu
	Invertázy		Hydrolyza sacharinu
Esterázy	Lipázy		Hydrolyza lipidů
Proteázy			Hydrolyza proteinů
Nukleázy			Hydrolyza nukleových kyselin, štěpení DNA, RNA
Mineralizační enzymy			<i>Mineralizace organických monomerů nebo oligomerů</i>
Mineralizace aminokyselin	Asparaginázy		Asparagin → kyselina asparagová a amoniak
	Glutaminázy		Glutamin → kyselina glutamová a amoniak
Mineralizace močoviny a kyseliny močové	Ureázy		Močovina → NH_3 a CO_2
	Urikázy		Kyselina močová → allantoin
Mineralizace sloučenin fosforu	Fosfatázy		Organický fosfor → ortofosfát
	Polyfosfatázy, pyrofosfatázy		Polyfosfáty → ortofosfát
Mineralizace sloučenin síry	Sulfatázy		Organické sulfáty → minerální sulfáty
Humifikační enzymy			<i>Degradace fenolických polymerů a syntéza huminů</i>

Fenol-oxidázy (oxidace fenolických sloučenin)	Peroxydázy	Redukčně-oxidační katalytické reakce mezi peroxidy a fenoly, aromatickými aminy, kovy atd.
	Mangan-peroxidáza	Katalytická oxidace $Mn^{(II)}$ a $Mn^{(III)}$
	Polyfenoloxidáza	Katalyzují oxidaci fenolických sloučenin pomocí kyslíku
	Tyrosinázy	Hydroxylace monofenolů a oxidace ortodifenolů a ortochinonů
	Lakázy	Oxidace mono-, di- a polyfenolů a aromatických aminů (anilinů)

BOX 8-2: Stanovení aktivity některých enzymů – hlavní principy a problematika.

Box 8-2

Stanovení aktivity některých enzymů

- Na rychlost dekompozice organické hmoty lze usuzovat z aktivity půdních celuláz, což je soubor enzymů rozkládajících celulózu a významně se tak podílejí na degradaci odumřelé dřevní hmoty. Jako optimální se jeví použití tzv. přímých metod, které sledují úbytek předem známého množství organické hmoty coby substrátu buď v laboratorních nebo v terénních podmínkách. V laboratorních podmínkách (1) se běžně využívá bezpopelovinový filtrační papír, který představuje materiál s vysokým procentem celulózy. Filtrační papír se rozprostře na čerstvý půdní vzorek v Petriho misce, kde se průběžně zavlažuje a po stanovené době inkubace (zpravidla několik týdnů) se vyjádří jeho plošný úbytek. Rychlost rozkladu lze vyjádřit také v terénních podmínkách (2) s využitím tzv. litter bags (opadové sáčky), které představují silonové sítky s oky cca 1-1,5 mm sešité do podoby sáčku o rozměrech cca 16x8 cm. Do sáčků se dá buď filtrační papír, nebo přímo opad o známé hmotnosti sušiny z dané lokality. Sáčky se umístí přímo do půdy do cílové hloubky (zpravidla nehlouběji do organominerálního horizontu A) a po stanovené době (cca 1-2 měsíce během vegetace a 6 měsíců během zimy) se opět zjišťuje váhový úbytek substrátu (Vaněk 2005).

Další série stanovení enzymatických aktivity spočívá ve zjišťování produktů katalytických reakcí.

- Stanovením aktivity katalázy se zjišťuje schopnost půdy vyrovnat se se zvýšeným přísunem toxického peroxidu vodíku. Stanovuje se laboratorně s využitím Jankova vápnoměru, kde se do vyvíjecí nádoby na půdní vzorek vlije H_2O_2 , čímž je okamžitě nastartována katalytická reakce a dochází ke štěpení peroxidu vodíku na vodu a kyslík. Míra produkce kyslíku v daném čase vyjadřuje míru aktivity půdních kataláz (Rejšek 1999).

Takto se stanovuje aktivita celé řady enzymů, které se podílejí na uvolňování živin z půdní zásoby do dostupných forem.

- Fosfomonoesterázy jsou jedním ze základních článků cyklu fosforu. Fosfomonoesterázy mohou být buď produkované houbovými cenózami (v kyselém půdním prostředí) nebo bakteriálními cenózami (v neutrálním a slabě alkalickém prostředí). Ke stanovení aktivity enzymu se používá jako substrát p-nitrofenylfosfát (p-NPP), jehož štěpením vzniká p-nitrofenol (p-NP). Vyprodukované množství p-NP je přímo úměrné s enzymatickou aktivitou a je zjišťováno spektrofotometricky (Holišová 2005).
- Proteázy jsou enzymy významné pro přeměny dusíkatých látek v půdě. Nejčastěji degradují proteiny na peptidy a aminokyseliny a podílejí se tak významně na koloběhu dusíku v ekosystému. Při stanovení se jako substrát používá kasein, kdy se zjišťuje produkce L-tyrosinu, což je jedna z aminokyselin s aromatickým postranním řetězcem (Holík 2007).

9 PŮDNÍ HORIZONTY, PŮDNÍ PROFIL

9.1 Horizonty lesních půd

Půdní horizonty si lze představit jako vrstvy rovnoběžné s půdním povrchem, které lze vylišit na základě rozpoznání jejich specifických znaků. Horizont však neznamena totéž v pedologickém slova smyslu jako v geologickém. Zatímco v geologii horizonty značí vrstvy horniny, které jsou výsledkem geologických procesů jako je např. sedimentace, v pedologii je sedimentace pouze jeden z řady pedogenetických procesů, vedle kterého probíhá řada jiných (viz kapitola 6), díky nimž dochází k diferenciaci půdního profilu a vylišování půdních horizontů.

Půdní horizonty lze rozdělit na **(A) pedologické** nebo také **půdní**, které představují veškerý výčet horizontů, které obsahuje daný půdní profil. Jsou vylišené na základě pozorovatelných vlastností, jako je barva, konzistence, textura, skeletnatost, obsah organické hmoty, chemismus, biologická aktivita, prokořenění atd. Představují základní jednotku členění a popisu půdního profilu. Někdy se také označují jako **genetické** horizonty, neboť jsou výsledkem geneze (vývoje) půdního profilu.

Druhou skupinou jsou horizonty **(B) diagnostické**. Diagnostické horizonty jsou užší skupinou horizontů, jsou to *pouze některé* pedologické horizonty. Na základě diagnostických horizontů jsou půdy pojmenovávány v rámci taxonomických systémů. Diagnostické horizonty jsou tak klíčové pro vymezení půdně-taxonomických jednotek. Je-li tak stratigrafie (sled horizontů) půdního profilu např. Ah-Bv-IIC, všechny tyto horizonty jsou půdní, ale právě horizont Bv je diagnostický. Bv značí kambický metamorfovaný horizont a je-li v půdě vylišen, na základě něj se půda pojmenuje jako kambizem. Lze říci, že každý horizont je půdní, ale ne každý už je diagnostický.

Každý taxonomický klasifikační systém má daný výčet půdních horizontů, které lze na jeho základě vymezit a pomocí kterých lze na jeho základě půdy pojmenovávat – vymezovat půdní jednotky. Lze říci, že taxonomické systémy, ať už národní (jako např. český taxonomický systém, francouzská taxonomie apod.) nebo mezinárodní (jako např. klasifikační systém FAO-UNESCO, americká Soil Taxonomy apod.) si do značné míry zachovávají podobnou logiku vylišování půdních i samotných diagnostických horizontů. Tak např. kambický metamorfovaný horizont bude kambickým metamorfovaným jak podle Němečka (2011), kde se značí kódem Bv, tak podle americké Soil Taxonomy (1999), kde se značí kódem Bw (jakkoli v pojetí americké Soil Taxonomy kambický horizont představuje širší škálu podmínek, ve kterých vzniká). Na druhou stranu ale šíře výčtu půdních horizontů se mezi jednotlivými systémy liší. V českém systému např. nebude vymezen půdní horizont Gypsic (s vysokou koncentrací sádrovce v půdním profilu), který je typický pro pouštní a polopouštní oblasti nebo horizont Ferralic (typický vysokou koncentrací oxidů a hydroxidů Fe, Al, Mn a Ti v půdním profilu), který je typický pro tropické a subtropické oblasti.

Pro potřeby lesnické pedologie se budeme zabývat půdními horizonty vázanými na český taxonomický systém půd (Němeček et al. 2011, viz také <http://klasifikace.pedologie.czu.cz/> a http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/ugp-files/atlas_pud/index.html). Na těchto webových odkazech a v uvedené publikaci jsou uvedeny specifikace všech typů půdních horizontů vymezených taxonomickým systémem půd České republiky, včetně fotodokumentace. Proto se jejich opisem do této publikace nebudeme zabývat a omezíme se na obecnou charakteristiku půdního profilu.

9.1.1 Organické horizonty lesních půd

Organické horizonty jsou takové, které obsahují více než 12-18 %_{ohm} (hmotnostních) organické hmoty v podobě oxidovatelného uhlíku (Cox) nebo 20-30 %_{obj} (objemových) organické hmoty.

Organické horizonty v lesních půdách tvoří jejich nejsvrchnější vrstvy a v podstatě přímo podmiňují existenci lesní půdy. Organické horizonty tvoří typické sekvence (stratigrafie), na základě kterých jsou definovány tzv. humusové formy. Detailně se problematikou organických horizontů zabývá kapitola 7.3.1 a 7.3.2.

V porovnání s minerálními horizonty, organické mají podstatně nižší objemovou hmotnost redukovanou, a to cca 7x.

9.1.2 Organominerální povrchové horizonty

Jsou povrchové horizonty s biogenní, případně antropickou akumulací humifikovaných organických látek do obsahu 20-30 %_{hm}. Nerozložená organická hmota by v případě organominerálních horizontů neměla zaujímat více než 5 %. V organominerálních horizontech se utváření specifické vazby organické a minerální části půdy a vzniká tzv. humuso-jílový sorpční komplex, kdy organická hmota tvoří vazby s minerálními koloidy.

Organominerální povrchové horizonty se v pojetí českého systému označují jako epipedony. Někdy se horizont A nebo o organickou hmotu obohacená svrchní vrstva půdy nazývá *topsoil*. V případě zemědělských půd povrchovou vrstvu půdy (*topsoil*) nezaujímá humózní lesní horizont, ale kulturní horizont Ap, který je výrazně pozměněný kultivací půdy – orbou, vláčením, hnojením apod.

Vedle obohacení o organickou hmotu je pro A horizont v humidním klimatu typický proces ztráty nebo vymývání. Ten plyne ze sestupného pohybu vody půdním profilem, což za spoluúčinků zvětrávacích procesů a kyselého prostředí půdního roztoku způsobuje degradaci půdních složek při spodní hranici A horizontu a jejich sestup do minerálních částí půdního profilu. Tento proces může být natolik intenzivní, že se při spodní hranici horizontu A vytvoří nový horizont E (eluviální), který označuje ztrátu nebo vymývání částic z této partie půdního profilu.

9.1.3 Podpovrchové horizonty

Podpovrchové horizonty tvoří tzv. *subsoil*. Za normálních okolností nejsou na půdním povrchu vidět, což nemusí být pravda při zrychlené erozi, která odnese povrchové části půdy nebo při jejich mechanickém odstranění.

Podpovrchové horizonty jsou čistě minerální, s obsahem organické hmoty do 1-2 %. Pokud obsahují více organické hmoty, je to v důsledku tzv. iluviace, čili obohacení o organickou hmotu vlivem jejího vertikálního transportu půdním profilem z výše položených horizontů, nebo v důsledku organického charakteru půdotvorného substrátu

V podpovrchových horizontech se odehrávají půdotvorné procesy eluviace, iluviace, metamorfózy, vnitropůdního zvětrávání apod.

9.1.3.1 Eluviální horizonty

Za intenzivního zvětrávání, v okyseleném prostředí a za intenzivního promyvného režimu, se vytváří (diferencuje) zpravidla pod A horizontem horizont eluviace, který se označuje písmenem E. V tomto horizontu dochází ke ztrátě nebo vymývání půdních složek, kterými může být jíl, organická hmota, ionty, koloidy, karbonáty, soli nebo seskvioxidy (oxidy kovů) a ty v sestupném směru migrují půdním profilem.

Eluviální horizonty se vyznačují zpravidla světlejší barvou a odlišnou strukturou než výše a níže položené horizonty. Mívají písčitéjší texturu, vyšší aciditu, nižší obsah bazických kationtů nebo solí.

E horizonty se výrazněji vyvíjejí pod lesními porosty, které působí acidifikačně na půdní prostředí. Oproti tomu pod travními porosty je vývoj eluviálních horizontů málo častý.

9.1.3.2 B horizonty

Horizonty B se formují pod horizonty O, A nebo E. Jsou typické akumulací nebo také obohacením o látky migrující půdním profilem z výše položených horizontů.

Jsou také často zvány jako iluviální horizonty, v případě obohacení o humus je B horizont *humusový*, v případě obohacení o seskvioxidy *seskvioxidový*, nebo při kombinaci *humusoseskvioxidový*, nebo také *spodické* v případě obohacení o jíl je B horizont *lůvkový*, v případě obohacení o karbonáty je *kalcikový* nebo *kalcický*, při obohacení o snadno rozpustné soli (zejména NaCl) je B horizont *natrický*

apod. Vedle obohacení probíhá v B horizontech proces vnitřní přeměny neboli metamorfózy a vyvíjí se horizont metamorfický.

B horizonty se vyznačují zpravidla vývojem barev: odstíny směrem k okrovější, červenější, sytost barvy směrem k sytější v porovnání s výše a níže položenými horizonty. B horizonty jsou také strukturnější (polyedrická, prismatická struktura).

9.1.3.3 Substrátové horizonty

Substrátové C horizonty představují vrstvy rozpadu matečné horniny. Zpravidla se nacházejí pod horizonty A nebo B. V C horizontu ustávají půdotvorné procesy a probíhá zejména zvětrávání. Důsledkem je ztráta barvy B horizontu, a tedy ztráta červenosti nebo rezivosti a ztráta sytosti barvy. C horizont má barvu bližší barvě matečné horniny, stává se nestrukturním, nepravidelně rozpadavým a více ulehlým. V C horizontu také ustává biologická aktivita, která je zde omezena zejména na kořeny rostlin. Pokud nepřesáhne intenzita eroze rychlost pedogeneze, v průběhu vývoje půdy se horní hranice C horizontu posouvá do větší hloubky půdy.

Pod C horizonty se nacházejí zpravidla *horizonty Cr a R*, které představují zejména mechanický rozpad matečné horniny a její zvětrávání.

V případě tzv. litologické diskontinuity lze také vylíčit horizont D, který se výrazně liší od půdotvorného substrátu. Neúčastní se půdotvorných procesů a ovlivňuje půdní vlastnosti jako chemismus, zrnitost apod.

Substrátový horizont může také vznikat jako sediment vlivem účinnosti povrchové vody. K tomu dochází v lužních oblastech a v blízkosti vodních toků, kde voda např. při povodních a jarních táních opouští koryto toku a rozlévá se do krajiny. Ve vodě obsažené sedimenty se pak usazují a vytváří se *horizonty půdních sedimentů M*. Jsou půdní profil je pak typický vyšším obsahem organické hmoty do velké hloubky, jejím nerovnoměrným rozmístěním v půdním profilu a často také výraznou stratifikovaností, která se odvíjí od rychlosti sedimentace a od charakteru sedimentovaného materiálu.

9.1.3.4 Vodou ovlivněné horizonty

Za intenzivního vodního režimu se vytváří horizonty v redukčním prostředí (viz také kapitulu 5.1.1). Při dlouhodobém (více méně permanentním) převlčení půdního profilu se vytvářejí *glejové horizonty G*. Hladina podzemní vody je trvale zvýšená a její zdroj je zpravidla „vespod“ neboli např. v přilehlých vodních tocích nebo vodních plochách, mokřadech apod. Jsou typické zpravidla větším podílem jílu a změnou barvy v důsledku redukčních procesů ztráty oxidačního čísla (např. $\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$). Barva v G horizontu je souvislá, bez výrazných tzv. novotvarů odlišných barev. Ty se mohou vytvářet v důsledku většího prokysličení např. podél kořenů. V G horizontu se také ale mohou střídát barvy dokládající procesy redukce, které se střídají s procesy oxidace. Potom se vyvíjejí tzv. Gor (oxidačně-redukční) nebo Gro (redukčně-oxidační) horizonty, podle míry zastoupených oxidačních procesů.

Při periodickém zamokření půdního profilu se vytvářejí *mramorové horizonty*. Jsou typické mozaikovitou barevností, ve které se střídají rezivě zbarvené oxidované polohy s šedou matricí redukovaných partií horizontu. V případě mramorových horizontů dochází k dočasné stagnaci povrchové vody, např. srážkové. Příčinou je zpravidla málo propustná jílovitá vrstva v půdě, která zadrží vodu při průtoku půdou. Pro takový půdní profil je typická výrazná texturní diferenciacie (výrazná rozdílnost textury níže položené, o jíl obohacené, a výše položené, o jíl ochuzené, vrstvy půdy).

Texturní diferenciacie může mít příčinu buď geologickou, kdy je jílovitá vrstva sedimentárního původu a na ní nasedá mladší, texturně lehčí vrstva půdy, nebo pedogenetickou, kdy se jílovitá vrstva vyvinula v důsledku ilimerizace. Během té dochází k migraci jílu půdním profilem a jeho sestoupení do horizontu B. Vytváří se tak sekvence horizontů typická pro pseudogleje, kdy pod horizontem Ew (hydrogenní vybělený) nebo En (vybělený nodulární) se vytváří zprvu luvický horizont Bt. V něm je

s přibývajícím podílem jílu na stále delší dobu zadržována voda a dochází tak ke stále výraznějšímu periodickému zamokřování. Luvický horizont, typický pro půdy z referenční třídy Luvisolů (šedozem, hnědozem, luvizem), postupně přechází v mramorový horizont Bm, který je diagnostickým horizontem referenční třídy Stagnosolů. Toto je typický příklad progresivní polygeneze půd, kdy na sebe půdní jednotky ve svém vývoji navazují v logickém sledu.

9.1.3.5 Přechodové horizonty

Přechodné horizonty se v půdním profilu vylišují, pokud je přechod dvou horizontů výrazně pozvolný nebo pokud v dané hloubce půdy jsou zastoupeny vlastnosti obou horizontů bez toho, že by jedna výrazně dominovala. Přechodové horizonty se mohou tvořit mezi všemi hlavními horizonty půdy O, A, E, B, C. Přechodové horizonty bývají označeny kombinací písmen obou zastoupených horizontů. V případě, že je přechodový horizont více méně homogenní a není možné vylišit, která konkrétní partie v horizontu patří horizontu výše položenému a která níže položenému, přechodový horizont se označuje jako BC. V případě, že v přechodovém horizontu lze jasně vymezit znaky výše položeného horizontu a níže položeného horizontu a tyto znaky jsou ve více méně nezměněné podobě jako v hlavním horizontu, přechodový horizont se značí B/C.

9.1.3.6 Vícenásobné horizonty

Každý půdní horizont může mít zachované základní znaky pro jejich diagnostiku a zároveň může obsahovat jiné znaky, které jej rozdělují na více horizontů. Tak např. může být v půdě vylišen kambický horizont Bv, pro který je typický kambický metamorfický proces, ale z důvodu jeho značné mocnosti nebo např. různé míry skeletnatosti nebo výrazné změny ve struktuře je Bv horizont rozdělen na Bv1-Bv2 atd.

Něco jiného je to v případě tzv. litologické diskontinuity, kdy vlastní půdní těleso je utvořeno z jednoho, mladšího, substrátu, zatímco půdní podloží je tvořeno starším substrátem s odlišným složením a původem. V tom případě je substrátový horizont označen jako IIC a znamená to např. že je půda vytvořena na sprašové hlíně kvartérního stáří s horizonty Ah-El-Bt, které ale leží na granodioritu nebo jiné nesouvisející hornině, která se na pedogenetických procesech neúčastí. Kompletní sekvence horizontů tak může být Ah-El-Bt-Bt/C-IIC.

9.1.3.7 Fosilní horizonty

Fosilní nebo také pohřbené horizonty jsou v půdě přítomny v důsledku překrytí původního půdního povrchu novým materiálem, např. fluvialními nebo eolickými sedimenty, při svahových pohybech nebo jako důsledek vzniku vývrátů stromů. Potom se lze setkat se situací, kdy je A horizont položený pod B nebo dokonce pod C horizontem. Dalo by se říci, že se jedná do jisté míry o anomálii. Nicméně vzhledem k dynamice procesů, které probíhají na zemském povrchu v souvislosti s tektonickými pohyby, zvětrávacími procesy, klimatickými podmínkami, ale také ve vztahu k zejména stromovité vegetaci, je přítomnost pohřbených horizontů spíše očekávatelnou skutečností. Zejména v přírodních a přírodě blízkých lesních ekosystémech s tzv. vývrátovou dynamikou dochází často k promíchávání půdního profilu a k převrácení jeho stratigrafie. Jedná se tak o zcela přirozený proces, který ale může být lidskou činností pozměněn na intenzitě i způsobu vzniku fosilních horizontů: vedle zmíněných příčin dochází vlivem antropické činnosti také k vrstvení půdy, jejímu promíchávání a vzniku antropozemí a několikanásobně pohřbených horizontů.

Fosilní horizonty se značí symbolem *f* za velkým písmenem označujícím hlavní horizont, např. Af.

9.2 Stratigrafie půdního profilu

Půdní profil se vyznačuje stratigrafií půdních horizontů. Ta je dána půdotvornými procesy, které půdní horizonty diferencují a vyvíjí se tak jejich zákonitý sled (sekvence, stratigrafie). Stratigrafie se pak značí kódem půdních horizontů, např. Ah-Bv-C znamená sekvenci horizontů Ah (organominerální humózní lezní)-Bv (minerální metamorfovaný kambický)-C (minerální substrátový). Stratigrafie se značí vždy od půdního povrchu směrem do větší hloubky půdy.

Formace půdního profilu neznamena nutně jeho vývoj směrem k vyššímu počtu půdních horizontů a jejich větší diverzitě. Evoluční procesy mohou být **(A)** progresivní, které probíhají zejména za účasti vegetace, zahrnují vestavbu organické hmoty, přeměnu minerálů a pohyb látek (eliminace jejich pevného skupenství). V takovém případě se půdní profil a jeho horizonty vyvíjí ve směru

(A)-C → A-C → A-B-C

nebo ve směru

(A)-C → A-C → A-B-C → A-Bt-C → A-E-B(t,s,h)-C

nebo mohou být evoluční procesy **(B)** regresivní, které zpravidla znamenají přerušení progresivního vývoje půdy jako důsledek destrukce vegetace, změny klimatických, desertifikace nebo topografických podmínek a v geologicky nejmladším období také antropogenní vlivy. Tyto vlivy lze obecně označit jako eroze v širším slova smyslu, kdy dochází k obnažení do té doby podpovrchových horizontů minerální části půdy – B nebo i C za vzniku suspenzí, se kterými je odnášen půdní materiál.

Při popisu půdního profilu se vyliší kompletní stratigrafie půdních horizontů. Každý horizont se popíše z hlediska půdních vlastností, jako je barva, textura, konzistence, skeletnatost, vlhkost, biologická aktivita, prokořenění, přítomnost novotvarů nebo vysrážených solí, vylišení hranic a charakter přechodu mezi sousedními horizonty. Stratigrafie je tak významným nástrojem pro popis půdního tělesa. Od jejího vylišení se dále odvíjí určení hloubek pro odběr půdních vzorků. Popis půdního profilu by měl být doplněn o tzv. terénní posudek, který půdu hodnotí v kontextu daného stanoviště, vazby na dřevinnou složku lesního ekosystému, na geologické a topografické aspekty apod.

10 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PŮD

Fyzikální vlastnosti představují soubor půdních vlastností podmíněný rozptýlením (disperzí) půdních částic, jejich vzájemnými vztahy a také charakterem a vzájemnými vztahy pevné, kapalné a plynné složky půdy. Fyzikální vlastnosti lze rozdělit do dvou skupin: na vlastnosti (1) základní: zrnitost, měrná a objemová hmotnost (ty, které jsou zjišťovány přímým měřením) a (2) odvozené: pórovitost, vodní, vzdušný a tepelný režim, barvu a strukturu půdy (zpravidla jsou stanoveny výpočtem nebo jsou jinak odvozené od základních vlastností).

10.1 Barva půdy

10.1.1 Barva jako indikátor půdních vlastností

Barva půdy odráží složení půdy, půdní vlastnosti a půdotvorné procesy.

- **Z hlediska půdních složek** je významný zejména obsah organické hmoty a dále obsah celé řady pigmentujících minerálů. Organická hmota zbarvuje půdu v závislosti na kvalitě humusových látek do hněda, do šeda a do černa, oxidy manganu zbarvují půdu spíše bodově než stejnoměrně v podobě povlaků půdních agregátů a v puklinách minerální části půdy do šedočerna, glaukonit do zelena, karbonáty, soli a sírany dávají půdě světlý, bělavý nádech. Z pigmentujících složek je významný také samotný geologický substrát. Tak např. v případě sprašových hlín může být barva odrážející půdotvorné procesy zastřena pigmentací šedookrového prachovitého materiálu.
- **Z hlediska půdních vlastností** se na barvě půdy podílí zejména půdní vlhkost. Vlhké půdy se jeví jako tmavší, zatímco suché půdy jako vybledlé a vlastní barva nemusí být za vlhka vždy zcela patrná. Při určování barvy je proto třeba zohlednit a zaznamenat, zda je určována barva suché půdy nebo vlhké půdy. Vlhkost se ale také podílí na půdotvorných procesech a ovlivňuje barvu půdy v dlouhodobějším měřítku a nejen v rámci zavlhčení nebo vysušení půdního vzorku. Celá řada minerálů a prvků mění barvu v závislosti na oxidaci nebo redukci, tedy na změně oxidačního čísla, jako např. železo, které má v oxidované formě Fe^{3+} okrově rezivou barvu, zatímco v redukované formě Fe^{2+} je zbarveno do šeda.
- **Z hlediska půdotvorných procesů** se množství barevných změn odehrává jednak v minerální části solu v průběhu metamorfického procesu, jednak ve výše zmíněné vazbě na hydrický režim půd. V podmínkách humidního klimatu mají metamorfické procesy důsledek vývoje barvy směrem k sytější a okrové v případě srážení limonitu (brunifikace) červenější v případě srážení hematitu (rubifikace). Červené barevné odstíny např. v tropickém klimatu a dobře provzdušněných půdách odrážejí oxidační procesy. Vývoj barvy půdy končí s přechodem do půdotvorného substrátu. Substrátový horizont C je tak charakteristický ústupem barvy půdotvorného procesu před barvou matečné horniny. Její pigmentace však může být natolik výrazná, že může barevný projev půdotvorných procesů překrýt, a to např., i redukční podmínky. Ty se podílejí vedle šedé barvy redukováného železa také např. na vývoji modré barvy (redukováný fosfor), černé barvy (redukováná síra).

Barva půdy se podílí na dalších půdních vlastnostech, jako je např. teplota půdy: tmavé půdy, zejména tmavý povrch, má tendenci k většímu přehřívání, zatímco světlé půdy více odrážejí světlo a půdní povrch se méně prohřívá.

10.1.2 Klasifikace barvy půdy

K popisu barvy půdních horizontů lze zvolit dva přístupy: **(A)** barvu lze popsat na základě slovního hodnocení jako „hnědá“, „čokoládově hnědá“, „okrovo-rezivá“, „šedohnědá“ apod., nebo **(B)** lze barvu popsat pomocí klasifikace Munsell Color System, který definuje barvu pomocí kódu založeného na klasifikaci třech vstupních parametrů: *Hue* – odstín, *Value* – jas a *Chroma* – sytost. Tyto

parametry jsou sestaveny do trojrozměrného diagramu (zrnitostní trojúhelník). České výrazy se však v případě Munsellových tabulek v pedologické praxi nepoužívají. *Hue* vyjadřuje barevný odstín, jako je modrý, zelený, žlutý a červený a jejich přechody. *Value* vyjadřuje jas barvy v rámci daného odstínu (světlá nebo tmavá barva) a *chroma* vyjadřuje intenzitu nebo také sytost barvy, tedy je-li barva „skutečně modrá“ nebo v ní je zastoupen určitý podíl šedé v daném odstínu.

Barva se označuje kódem, např. 7,5YR 3/4, což znamená, že příslušný horizont má barvu o *Hue* 7,5YR – yellow-red stupně 7,5 –, hodnota *Value* je 3 a hodnota *Chroma* je 4.

Při popisu půdního tělesa by barva měla dokumentovat typ a intenzitu půdotvorných procesů. Tak např. v případě brunifikačního procesu lze očekávat, že při půdním povrchu bude barva nízkého *Chroma* a *Value*, zatímco v kambickém horizontu je *Hue* červenější a výraznější *Chroma*. S přechodem do substrátového horizontu tyto znaky ustupují a půda se stává bledší.

Vedle barvy půdního tělesa se v rámci daného horizontu vylišují také **barevné anomálie** – skvrny, konkrce apod. U těch se sleduje jejich abundance (četnost), velikost a barva (kontrast)

Tab. 10—1: Hodnocení abundance barevně odlišných skvrn v půdním profilu.

Abundance	Klasifikace
< 2 %	Ojedinělé
2-20 %	Středně zastoupené
> 20 %	Hojně zastoupené

Tab. 10—2: Klasifikace velikosti barevně odlišných útvarů v čele půdního profilu.

Velikost útvarů (mm)	Klasifikace
< 2	Drobné
2-5	Střední
5-20	Hrubé
20-76	Velmi hrubé
> 76	Extrémně hrubé

Intenzita kontrastu barevných skvrn se hodnotí jako nezřetelný, zřetelný nebo výrazný.

10.2 Zrnitost půdy

Zrnitost neboli textura vyjadřuje vzájemný poměr velikostních skupin půdních částic (půdních frakcí). Ty jsou obecně klasifikovány jako jíl, prach a písek s tím, že tyto částice jsou vždy menšího průměru než 2 mm. Samotnou texturu je pak možné stanovit na základě dvou kritérií: **(a)** z poměrného množství jílu (v tomto případě o průměru částic < 0,01 mm) (Pelíšek, 1964) v půdě resp. v půdním vzorku; **(b)** poměrného zastoupení jílové, prachové a písčité frakce.

Stanovení těchto parametrů pak vyjadřuje **půdní druh**. Vylišení jednotlivých zrnitostních frakcí, stejně jako půdního druhu, se děje na základě různých klasifikačních systémů: podle Kopeckého (Pelíšek, 1964), podle mezinárodního, amerického, britského, francouzského systému (Duchaufour, 1960; Šimek 2005; White, 2006). Z hlediska potřeb lesnické pedologie lze zrnitostní frakce vylišit jednak podle Tab. 10—4 (Pelíšek, 1964), která vychází z českého systému klasifikace půdního druhu a podle **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**– tzv. trojúhelníkový diagram, který vychází z americké klasifikace půdní textury (Němecek, 2001; USDA-NRSC, 2010).

Ve vazbě na mezinárodní klasifikace lze půdní druh na základě stanovení textury klasifikovat podle Tab. 10—3, která popisuje obecná označení půdních druhů.

Tab. 10—3: Klasifikace půdního druhu na základě textury vycházející z trojúhelníkového diagramu (upraveno podle Brady & Weil, 2002).

obecné pojmenování			
<i>obecný název půdního druhu</i>	<i>textura</i>	<i>název textury podle trojúhelníkového diagramu</i>	
písčité půdy	hrubá	{ písek hlinitý písek	
	{ středně hrubá střední středně jemná	písčitá hlína	
prachové (hlinité) půdy		{ hlína prachovitá hlína prach	
		{ písčitá jílovitá hlína prachovitá jílovitá hlína jílovitá hlína písčitý jíl prachovitý jíl jíl	
			jílovité půdy

Textura půdy se významně podílí na spoluutváření půdního prostředí, které ovlivňuje zejména v těchto aspektech:

- Půdotvorné pochody**, jako je zvětrávání, kdy jemnozrnější půdy zvětrávají rychleji;
- Pohyb vody v půdě**: písčité půdy jsou význačné promyvným režimem s intenzivně prosakující (perkolující) vodou, jílovité půdy jsou náchylné k zamokřování a stagnaci vody apod.
- Chemické, fyzikální a biologické vlastnosti**: na textuře závisí intenzita procesů (čím menší jsou půdní částice, tím větší mají vnitřní povrch a tím jsou také reakce intenzivnější).

Zrnitost (půdní druh) lze stanovit pomocí více metod. Klasickou a dnes méně užívanou metodou je stanovení zrnitosti plavením pomocí Kopeckého plavícího aparátu. Ten sestává ze třech nádob o průměrech 30, 56 a 178 mm, ve kterých se za konstantního průtoku vody 1 l za 3 min 22 s mění rychlost proudění vody ($7; 2$ a $0,2 \text{ mm.s}^{-1}$). Následkem toho dochází k setřídění zrnitostních frakcí, jak je uvedeno v Tab. 10—4 a Tab. 10—5 s tím, že frakce I (jíl) nezůstává v žádné z nádob, nýbrž jako nejlehčí uniká z plavící soustavy s odtékající vodou. Její podíl se pak stanovuje dopočtem do 100 % resp. dopočtem do navážky vzorku užitého ke stanovení (Rejšek, 1999).

Tab. 10—4: Klasifikace zrnitostních frakcí podle Kopeckého (Pelíšek, 1964)

zrnitostní frakce		velikost částic [mm]
I. jíl	koloidní jíl	<0,0001
	fyzikální jíl	0,0001-0,002
	hrubý jíl (jemný prach)	0,002-0,01
II. prach		0,01-0,05
III. práškový jemný písek		0,05-0,1
IV. písek		0,1-2

Tab. 10—5: Klasifikace půdní textury dle procentického zastoupení jílovitých částic < 0,01 mm (Pelíšek 1964).

Obsah částic jílu (< 0,01 mm) [%]	Klasifikace textury půdy
< 10	Písčítá (lehká)
10-20	Hlinito-písčítá (lehká)
20-30	Písčito-hlinitá (střední)
30-45	Hlinitá (střední)
45-60	Jílovito-hlinitá (těžká)
60-75	Jílovitá (těžká)
> 75	Jíl

Mezi další metody patří metody pipetovací založené na principu různé rychlosti usazování částic v kapalině. Rychlost „pádu“ vychází ze Stokesova zákona, který je vyjádřen pomocí vzorce).

$$v = \frac{2r^2}{9} \times \frac{(d_1 - d_2)g}{\eta}$$

kde

r je průměr částice;

d₁ je měrná hmotnost částice (pro půdy je obecně stanovena hodnota 2,65);

d₂ je hustota kapaliny (pro vodu má hodnotu 1);

η je dynamická viskozita kapaliny (voda o teplotě 20°C má hodnotu 0,010 Pa.s);

g je gravitační zrychlení (9,81 m.s⁻²).

Tak lze spočítat hloubku, ve které se nachází částice daného průměru v daném čase měření. Z této hloubky se potom při pipetovací metodě odebírá suspenze obsahující částice o stanoveném a menším průměru.

V každém případě však je třeba pamatovat, že v půdě se částice nacházejí ve formě agregátů a zřídka jednotlivě. Protože texturní analýzy zjišťují zastoupení půdních částic a nikoli půdních agregátů (shluků), je třeba půdu dispergovat, tedy rozptýlit. To se děje buď mechanicky, třepáním vzorku v lahvi s ocelovými kuličkami nebo fyzikálně-chemicky, zalitím vzorku dispergačním činidlem (např. uhličitán sodný), čímž dojde k oslabení elektro-negativních vazeb mezi částicemi a ty se rozptýlí v suspenzi.

Textura se významně podílí na půdní mechanické stabilitě. Ta vyjadřuje odolnost půdy vůči rozrušení půdních agregátů a vazeb mezi částicemi, viz také BOX 15—5. Půdní textura také do značné míry souvisí se složením půdy, jak ukazuje. Z hlavních složek půdy zaujímá nejčastěji dominantní podíl obtížně zvětratelný (chemicky i mechanicky odolný) křemen, který je směrem k jílovitým půdám (těžším texturám) nahrazován produkty zvětrávání živců – jílovými minerály. Humusové látky jsou zastoupeny více méně rovnoměrně, vždy s minoritním podílem.

$$I_{st} = \frac{j(0,002\text{ mm})[\%]}{pr(0,002-0,05\text{ mm}) + pk(0,05-0,1\text{ mm})[\%]}$$

kde

j je procentický obsah jílu;

pr je procentický obsah prachu;

pk je procentický obsah písku.

Hranicí stability je hodnota 0,5, kdy $I_{st} < 0,5$: nestabilní půdy; $I_{st} > 0,5$: stabilní půdy.

Půdní textura je používána také v půdní taxonomii. Poukazuje na transport jílu v rámci půdního profilu, na neoformaci jílu nebo destrukci jílových minerálů, jako tzv. texturní diferenciace, která

hovoří o rozdílech v obsahu jílu u jednotlivých půdních horizontů. Zpravidla půdotvorné procesy vedou k tomu, že jíl sestupuje do nižších partií půdního tělesa, kde se objevují např. luvické (více v kapitole 6.1.2), jílem obohacené horizonty typické pro hnědozemě a luvizemě, obecně ilimerizované půdy. Texturní diferenciaci je potom podíl obsahu jílu a lze ji stanovit dvěma způsoby: buď jako texturní diferenciaci profilu (TD_p) nebo texturní diferenciaci horizontu (TD_h):

$$TD_p = \frac{j_{\max}[\%]}{j_{\min}[\%]}$$

kde

$j_{\max}$ je % jílu v horizontu s největším obsahem jílu;

$j_{\min}$ je % jílu v horizontu s nejmenším obsahem jílu.

$$TD_h = \frac{j_h[\%]}{j_{\min}[\%]}$$

kde

j_h je % jílu ve sledovaném půdním horizontu;

$j_{\min}$ je % jílu v horizontu s nejmenším obsahem jílu.

Tab. 10—6: Kategorie texturní diferenciaci

Hodnota texturní diferenciaci	Charakteristika texturní diferenciaci
<1,2	Velmi slabá
1,2-1,6	Slabá
1,6-2,2	Střední (hnědozemě)
>2,2	Silná (luvizemě)

10.3 Půdní struktura

Půdní struktura vyjadřuje vnitropůdní uspořádání elementárních půdních částic do určitého celku tmelených ionty (např. Ca^{2+}), půdními koloidy a z nich vznikajícími koloidními svazky, humusovými látkami a seskvioxydy.

Kategorie půdní struktury:

1. **elementární** (půdní částice – elementy – jsou volné a nejsou mezi nimi vytvořeny vzájemné vazby). Patří sem struktura zrnitá, prašná, moučná a slitá.

2. **agregovaná** (vzniká biologickými pochody, jimiž jsou půdní elementy stmeleny do agregátů zpravidla oblých tvarů; vznik závisí na přítomnosti exkrementů půdního edafonu a koloidního humusu). Tato struktura náleží k nejpříznivějším strukturám: zajišťuje dobrou provzdušněnost a vodní režim. V rámci agregace půdních částic se tvoří hrudky, drobtý, krupnané nebo krupičkovité agregáty. Základními mechanismy tvorby agregované struktury je flokulace (fyzikálně-chemogenní tvorba), stmelování (chemogenní tvorba) a koagulace (biogenní tvorba). Flokulace je vratný proces, kdy mohou být agregáty už velmi mírným zásahem převedeny zpět na koloidní systém (proces peptizace), ale agregáty mohou také přecházet v pevněji vázané shluky. Koagulace je pochod, při kterém agregáty vznikají z pevně vázaných částic (vzdálenost částic je řádově rovna velikosti molekul). Tento proces není vratný a vytvořený koagulát tak nelze bez vynaložení dostatečně velké energie převést zpět na koloidní systém.

3. **segregovaná** (vzniká v důsledku fyzikálních a chemických pochodů oddělováním větších celků, v nichž zpravidla převažuje minerální podíl půdy a je proto často typická pro minerální horizonty). Zahrnuje strukturu kostkovitou (mnohostěnné – polyedrické – tvary s ostrými hranami a hladkými plochami), hranolovitou (protáhlé ve svislém směru se zarovnanou horní a dolní stěnou; často v hlinitých a jílovitých půdách v luvických a mramorovaných horizontech) a deskovitou (segregáty jsou horizontálně deskovitě protažené; vyskytují se zejména na oglejených půdách a v eluviálních horizontech ilimerizovaných půd). Segregovaná struktura je výsledkem rozpadu a štěpení (A) kryoturpace – rozpad agregátů vlivem mrazu, B) pedoturpace – také bioturpace – rozpad agregátů vlivem půdních organismů, C) stříhových tlaků – bobtnání a smršťování půdních složek při zvlhčování a vysychání u vertisolů, D) technoturpace – vlivem obdělávání půdy).

Půdní struktura významně ovlivňuje poměr půdních částic a pórů a tím také vodní, vzdušný a tepelný režim, stejně jako půdní pórovitost. Mezi struktury příznivé z těchto aspektů patří zejména kulovité, typické pro organické a organo-minerální horizonty.

Půdní struktura je ovlivňována řadou aspektů, z nichž některé způsobují degradaci půdní struktury (mechanický tlak, přesoušení a přemokření půdy, acidifikace aj.) a některé přispívají k jejímu zlepšování (organická hmota, vápnění, kultivace půdy).

10.4 Měrná hmotnost

Nebo také specifická hmotnost nebo také hustota se značí symbolem ρ_s . Znamená hustotu tuhé fáze půdních částic, tedy hmotnost objemové jednotky půdy dokonale k sobě přiléhajících částic. Průměrné hodnoty se pohybují mezi 2,4-2,6 g·cm⁻³. Sama o sobě hodnota nemá velký význam, avšak je důležitá k výpočtu dalších půdních parametrů, jako např. pórovitost. Měrnou hmotnost zvyšují zejména minerály, jako hematit ($\rho_s=5-5,3$ g·cm⁻³), muskovit ($\rho_s=2,8-3,1$ g·cm⁻³), pyrit ($\rho_s=4,9-5,2$ g·cm⁻³). Jiné příměsi měrnou hmotnost snižují, jako surový humus ($\rho_s=1,2-1,6$ g·cm⁻³), rašeliny ($\rho_s=0,9-1,4$ g·cm⁻³), nerozložené organické zbytky ($\rho_s \approx 0,3$ g·cm⁻³).

Stanovení měrné hmotnosti se provádí nejčastěji pyknometricky (Rejšek, 1999); Zbiral et al., 2004), pomocí Gay-Lussacova pyknometru. Metoda vychází z toho, že ke zjištění hustoty pevné fáze půdy je třeba z půdy odstranit fázi jak plynnou, tak kapalnou. K odstranění plynné fáze dojde povařením vzorku po dobu 20-45 min (v závislosti na půdní textuře, kdy k vytěsnění vzduchu varem dochází rychleji u písčitéch než u jílovitých půd). Podíl kapalně fáze se eliminuje tím, že stanovení probíhá ve vodním prostředí a voda je tak faktor s konstantním vlivem.

10.5 Objemová hmotnost (ρ_w), objemová hmotnost redukováná (ρ_d)

Objemová hmotnost je hmotnost objemové půdní jednotky v přirozeném stavu [g·cm⁻³]. Na rozdíl od měrné hmotnosti, v hodnotě objemové hmotnosti jsou zahrnuty také mezery mezi půdními částicemi (půdní póry) obsahující vzduch a vodu, a proto jsou hodnoty objemové hmotnosti vždy nižší než měrné hmotnosti. Objemová hmotnost závisí na půdní struktuře, pórovitosti a celkovém složení půdy.

Objemová hmotnost je vztažena k čerstvé půdě, a proto se jedná o hodnoty popisující aktuální stav půdy, závislý na půdní vlhkosti a na aktuálních klimatických podmínkách. Proto je tato hodnota relativně proměnlivá. Potenciální a stálější hodnotou je objemová hmotnost redukováná, která vyjadřuje hmotnost objemové jednotky půdy v přirozeném stavu, avšak po odstranění kapalně fáze půdy. Vysušení vzorku se provádí při teplotě 105°C, kdy je z půdy vytěsněna nekrytalická voda, tedy voda, která není zabudována do struktur minerálů apod.

Hodnoty ρ_w se pohybují zpravidla mezi 1,2 a 1,5 g·cm⁻³, u spodních a více ulehklých horizontů mezi 1,5 a 1,9 g·cm⁻³. Objemová hmotnost redukováná je nepřímo úměrná s půdní pórovitostí. Proto jsou písčité půdy význačně vyšší hodnotou ρ_w než půdy jílovité (písky 1,7 g·cm⁻³, hlíny 1,6 g·cm⁻³, jíly 1,5 g·cm⁻³). Hodnota objemové hmotnosti redukováné je závislá na obsahu organické hmoty, která její

hodnotu snižuje (ρ_w svrchních horizontů je mezi 0,9 a 1,2 g·cm⁻³, u povrchového surového humusu $\rho_w = 0,2-0,4$ g·cm⁻³).

Stanovení objemové hmotnosti a objemové hmotnosti redukované se provádí např. pomocí **fyzikálního válečku**. Jedná se o ocelový kroužek, z pravidla jednotného objemu 100 cm³, (ale také 500 cm³ u skeletnatých půd nebo v geotechnice) pomocí kterého lze odebrat půdu v přirozeném stavu. Objemová hmotnost se stanoví pomocí vzorce .

$r_{w(d)}$ = hmotnost vzorku ve válečku v čerstvém (*suchém*) stavu / objem válečku

[g · cm⁻³]

10.6 Pórovitost (P)

Pórovitost je vedle půdní struktury hlavní faktor prostorového uspořádání půdy. Póry jsou v půdě jednak mezi půdními částicemi, jednak mezi strukturními prvky (agregáty). Označíme-li hodnotu pórovitosti mezi agregáty (hrudky, dropty apod.) symbolem A a hodnotu pórovitosti v rámci agregátů symbolem B, optimum pórovitosti půdy je možno vyjádřit vztahem A:B = 1:2.

Póry vznikají primárně z rozpadu matečné horniny, kdy na vzniku sutí a drobnějších frakcí až samotného substrátu se podílí změny teplot, kořeny rostlin i půdní edafon. Půdní póry se neměří přímo. Jejich velikost, resp. zastoupení různých velikostních tříd pórů se vyjadřuje podle sil, které působí v pórech na půdní vodu (statické a dynamické síly). Podle toho, jakými silami je voda v půdě poutána, póry se rozdělují na:

1. kapilární (<0,0002 mm), v nichž pohyb vody není vázán na směr působení zemské gravitace a voda se v nich může pohybovat všesměrně. Tyto póry převládají v jílovitých půdách s „těžkou“ texturou. Sací tlak, jakým je voda poutána v kapilárních pórech vyjadřuje $p_F > 4,20$, což je voda fyziologicky nepřístupná pro většinu rostlin. Tyto póry jsou významné zejména z hlediska pohybu vody půdou a podmiňují také průběh chemických, fyzikálně-chemických a biochemických reakcí. Kapilární voda zároveň omezuje pohyb vzduchu, neboť jsou stále vyplněny vodou, kterou ztrácí pouze při extrémním vysušení půdy.

2. semikapilární (0,0002-0,01 mm), tzv. střední póry (někteří autoři udávají horní hranici 0,05 mm, White 2006). p_F je 2,54-4,20, což je voda fyziologicky přístupná. Semikapilární póry vznikají v důsledku růstu kořenového vlášení, drobných laterálních kořínků a houbových hyf. V těchto pórech se na směr vody podílí i gravitace, zejména v pórech většího průměru. Se zmenšováním průměru pórů se zvyšuje nasávací tlak a tím také síla, kterou je voda v půdě poutána. Kapilární a částečně semikapilární póry disponují napětím, kterými vodu poutají. Jejich objem se zjišťuje pomocí analýzy fyzikálního válečku a vyjadřuje jej **maximální kapilární kapacita (Θ_{MKK})**.

3. nekapilární póry (0,01-0,5 mm) jsou póry bez napětí a nedisponují žádným nebo velmi slabým sacím tlakem, který je snadno překonán gravitací. Tyto póry vznikají v důsledku růstu jemných kořenů a pohybu drobné mezofauny. Voda obsažená v nekapilárních pórech se nazývá gravitační voda a je přítomna v půdě, je-li dodávána ze soustavného externího zdroje. Po ustání přítoku vody se nekapilární póry bezprostředně vyprazdňují.

4. makropóry (0,5-5 mm a větší) lze vymezit jako samostatnou kategorii nekapilárních pórů. Vznikají jako pukliny v půdě nebo v důsledku pohybu žíhal a hrubých kořenů a představují cesty koncentrovaného toku vody půdou.

Nekapilární póry jsou významné z hlediska vzdušného režimu, zejména pro dýchání kořenů rostlin, půdních živočichů a mikroorganismů. Objem nekapilárních pórů vyjadřuje **minimální vzdušná kapacita (A_{MKK})** s tím, že optimální poměr kapilárních : nekapilárním pórům z hlediska vodního a vzdušného režimu 2-3 : 1.

Pórovitost se pohybuje přibližně mezi 40 a 60 % s tím, že vyšší je v půdách s jemnozrnnější texturou (jílovité půdy cca 55 %, hlinité půdy cca 50 %, písek cca 40 %). Ačkoli jílovité půdy mají vyšší pórovitost, mají také nízkou minimální vzdušnou kapacitu a tím extrémní vzdušný režim. Při zaplňování pórů dochází k objemovým změnám půdy, kdy se ztrátou vody se zejména jílovité půdy smršťují, s přijímáním vody bobtnají. Tyto změny dosahují v písčítých půdách hodnot 10 %, u hlinitých půd 25 %, u jílovitých půd 35, ale i 100 % (u montmorillonitu).

Pórovitost lze vyjádřit výpočtem z hodnot měrné hmotnosti a objemové hmotnosti redukované .

$$P = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \times 100 \quad [\%]$$

kde

ρ_s je měrná hmotnost;

ρ_d je objemová hmotnost redukovaná.

Minimální hodnoty pórovitosti jsou kolem 25 %, kdy tato hodnota je dána nejtěsnějším pravidelným uspořádáním kulovitých částic. Pórovitost se klasifikuje podle Tab. 10—7.

Tab. 10—7: Klasifikace pórovitosti u lesních půd.

Podíl pórů (%)	Klasifikace pórovitosti
25-30	Velmi slabá
30-35	Slabá
35-45	Mírná
45-55	Střední
55-70	Silná
> 70	Velmi silná

Hodnoty pórovitosti se zpravidla pohybují v těchto rozmezích:

lesní půdy	35-55 %
povrchový humus	60-70 %
rašeliny	90 %
glej (spodní vrstvy)	30 %

Hodnoty pórovitosti se zpravidla pohybují v těchto rozmezích:

- lesní půdy	35-55 %
- povrchový humus	60-70 %
- rašeliny	90 %
- glej (spodní vrstvy)	30 %

10.7 Objemová vlhkost, momentální provzdušněnost, minimální vzdušná kapacita

Objemová vlhkost (Θ) vyjadřuje, jaké procento objemu půdy zaujímá voda. Vyjadřuje tedy objem pórů, zaplněných vodou (viz také kapitolu 4.2). Objemová vlhkost se vyjádří pomocí vzorce (viz níže). Je-li hodnota objemové vlhkosti vyšší než hodnota maximální kapilární kapacity, jedná se o zamokřené stanoviště, kde jsou v půdě zaplněny vodou jak kapilární, tak nekapilární póry.

$$\Theta = w \cdot \rho_d \quad [\%]$$

kde

w je hmotnostní vlhkost;

ρ_d je objemová hmotnost redukována.

Provzdušněnost (A) vyjadřuje okamžitý obsah vzduchu v pórech. Součet hodnoty provzdušněnosti a objemové vlhkosti udává hodnotu pórovitosti a provzdušněnost se tedy spočítá jako

$$A = P - \Theta \quad [\%]$$

Minimální vzdušná kapacita (A_{MKK}) vyjadřuje objem pórů zaplněných vzduchem, dosáhla-li půda hodnot maximální kapilární kapacity.

$$A_{MKK} = P - \Theta_{MKK} \quad [\%]$$

Hodnocení provzdušněnosti uvádí Tab. 10—8. U lesních a lučních porostů lze považovat půdy za extrémně neprovzdušněné při hodnotě nižší než 5 %, kdy jsou půdy náchylné k zamokření např. v období srážek. Naopak vysoké hodnoty A_{MKK} způsobují vyšší záhřevnost provzdušněné vrstvy, čímž se zvyšuje výpar a dochází k nedostatku vody v půdě.

Tab. 10—8: Charakteristiky minimální vzdušné kapacity

Hodnota A_{MKK}	Charakteristika minimální vzdušné kapacity
8	Dolní mezní hodnota
10	Průměrné hodnoty pro lesní půdy (hraniční pro zemědělské
20	Půdy náchylné k vysychání; mohou být přechodně až trvale vysušné
25	Horní mezní hodnota

Za mezní hodnoty lze považovat minimální vzdušnou kapacitu 8 %, za průměrnou hodnotu (u ornice) 10 %. Při nadměrném provzdušnění půdy se půda snáze prohřívá, zvyšuje se výpar a půdy jsou naopak vysušné. Proto za horní, ale únosnou mez lze uvažovat s hodnotou nad 20 %, za rizikovou při 25 %.

11 FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ VLASTNOSTI PŮD

11.1 Půdní reakce

Půdní reakce vyjadřuje stupeň acidity nebo alkalinity půdy; ustálená značka je pH (z francouzského „potentiel hydrogène“) a vyjadřuje sílu vodíku jako kyselý působícího kationtu. V podstatě se jedná o iont H_3O^+ , pro zjednodušení značený jako H^+ . pH je vyjadřováno ve stupnici od 0 do 14 s tím, že pH může nabývat hodnoty kyselé ($\text{pH} < 7$), neutrální ($\text{pH} = 7$) a alkalické (zásadité) ($\text{pH} > 7$). Samotné množství vodíkových iontů však nevystihuje půdní reakci docela přesně, nýbrž pH je vyjádřeno poměrem vodíkových kationtů (H^+ nebo H_3O^+) a hydroxylových aniontů (OH^-), a které je dáno koncentrací vodíkových kationtů (označovaném jako pH, potenciál vodíku) v poměru ke koncentraci hydroxylových aniontů (které je možné označit jako pOH, potenciál hydroxidu).

Pro zjednodušení se půdní reakce udává pouze pomocí obsahu vodíkových iontů, které jsou vyjádřeny v hodnotách záporného dekadického logaritmu koncentrace vodíkových iontů. Pro upřesnění tento vztah znamená toto:

pH 3 je $-\log 0,001 \text{ mol H}^+$
pH 4 je $-\log 0,0001 \text{ mol H}^+$
pH 5 je $-\log 0,00001 \text{ mol H}^+$
pH 6 je $-\log 0,000001 \text{ mol H}^+$
pH 7 je $-\log 0,0000001 \text{ mol H}^+$
pH 8 je $-\log 0,00000001 \text{ mol H}^+$
atd.

BOX 11—1: Kvantitativní vyjádření koncentrace vodíkových iontů H^+ s využitím logaritmického vztahu.

Box

Kvantitativní vyjádření se udává v hodnotách **pH**

Premisa: pH = záporný dekadický logaritmus vodíkových iontů

$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ dle rovnice platí $[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}}$

Např. (1) Jaká je koncentrace vodíkových iontů v roztoku o pH = 1,25 ?

$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$

$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-1,25} \rightarrow -1,25 = \log [\text{H}^+]$

$\log [\text{H}^+] = 0,75 - 2$

$[\text{H}^+] = 5,62 \cdot 10^{-2}$

Hledaná koncentrace: $5,62 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$
 $0,0562 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$

Vynásobí se atomovou nebo molekulovou hmotností $\rightarrow \text{H} = 1 \text{ g}$

Obsah $\text{H}^+ = 0,056 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$

Např. (2) Jaká je koncentrace vodíkových iontů v roztoku o pH 2,36?

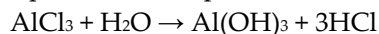
Analogicky s příkladem 1 $[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-2,36}$

Hledaná koncentrace je $0,004365 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$

Z příkladu, který uvádí BOX 11—1 plyne, že je velký rozdíl, změní-li se pH o jednotku z 3 na 4 nebo z 6 na 7. V prvním případě dojde ke změně obsahu mol H^+ z jedné tisícinu na jednu desetitisícinu molu, kdežto v druhém případě z jedné miliontiny na jednu desetimiliontinu molu. V případě poklesu pH ze 7 na 6 je tak zapotřebí menšího množství iontů H^+ ($0,0000009 \text{ mol H}^+$), v případě poklesu pH ze 4 na 3 je zapotřebí $0,0009 \text{ mol H}^+$, o 3 řády větší množství. Z toho plyne, že v kyselých půdách probíhá pokles pH pomaleji, což ale neznamená pomalejší okyselování (acidifikaci).

Dalším zdrojem půdní acidity jsou v půdním roztoku přítomné kyseliny (organické nebo minerální HCl, H₂SO₄ atd.). Ty disociují (rozštěpí se na H⁺ a zbylý aniont) a se vzniklými ionty se slučují ionty obsažené v půdním roztoku, dokud se nevytvoří rovnovážný stav. Kyselým kationtem je také amonný iont (NH₄⁺), který je vázán na půdním sorpčním komplexu (viz dále) a po jeho uvolnění dochází k disociaci na vodík a amoniak.

Významným zdrojem půdní acidity jsou ionty Al³⁺ a Fe³⁺ v podobě solí. Při jejich sloučení s vodou může proběhnout např. tato reakce:



Vzniká tedy kyselina chlorovodíková. Hliník a železo vstupují do procesů acidifikace až při výrazném snížení pH (viz také kapitulu 11.1.2). V tomto prostředí hydrolyzují a stávají se mobilními.

Kyselé kationty jsou na sorpčním komplexu vázány silně a tedy i relativně dlouhodobě, a tak dochází k výměně za báze – živiny – (např. při přihnojování) relativně obtížně.

BOX 11 – 2: Využití stanovení kyselých kationtů v půdě k vyčíslení potřeby vápnění (viz také kapitulu 15.1.2).

Stanovení pH potenciální se provádí zpravidla v suspenzi o poměru půda:reakční činidlo 1:2,5 (např. na 10 g vzorku 25 ml 0,01M CaCl₂ nebo 1M KCl).

Samotné stanovení obsahu kyselých kationtů se provádí:

1. elektrometricky – vytěsněním H⁺ (Al³⁺, Fe³⁺) iontů neutrální solí (KCl, CaCl₂) a následným měřením kalomelovou elektrodou

2. titračně – působením neutrální solí (KCl, CaCl₂) vzniká v roztoku HCl, která je následně titrována (neutralizována) hydroxidem sodným (0,1M NaOH) do neutrální půdní reakce. Pro indikaci bodu ekvivalence se používá acidobazický indikátor fenolftalein:

- navážka vzorku je 40 g, 100 ml 1M KCl
- suspenze se třepé 40 min a zfiltruje
- titruje se 50 ml filtrátu

$$V_a = a \cdot c(\text{NaOH}) \cdot 25 \cdot 1,75 [\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

kde

V_a je iontová výměna;

a je koncentrace NaOH (0,1 M);

25 je přepočet na 1 kg;

1,75 je koeficient (při jednorázovém použití se nevytěsní veškeré kyselé ionty).

- vyhodnocení

>11,4	velmi silně kyselá
5,6-11,4	silně kyselá
4,0-5,6	středně kyselá
2,3-4,0	mírně kyselá
<2,3	slabě kyselá

Pomocí titračního měření lze stanovit **potřebu vápnění**:

- do filtrátu ze suspenze 40 g a 100 1M KCl; přidává se vždy 1ml 0,1M NaOH a po každém přidání se měří pH na pH metru
- NaOH se přidává až do požadované hodnoty pH
- uplatní se vztah:

$$1 \text{ ml } 1\text{M NaOH} = 1 \text{ ml } 0,5 \text{ M CaO} = 28 \text{ mg CaO}$$

vychází z molární hmotnosti Ca a O podělené 2x (40,08 + 16 = 56/2 = 28);

odtud 1 ml 0,1M NaOH = 2,8 mg CaO

- přepočet na 1g: 1 ml 0,1M NaOH = 2,8 mg CaO/40 (navážka)
- výpočet hmotnosti 1 ha vápněné zeminy:

$$M_o = 10\,000\,000 \cdot v \cdot \rho_d [\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}]$$

kde

M_o je hmotnost ornice;

$$10\,000\,000 \text{ je } \text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 1\,000;$$

v je hloubka ornice/hnojené půdy;

ρ_d je objemová hmotnost redukovaná [g·cm³ = kg·dm³]

- obecné množství CaO na 1 kg půdy při titraci 0,1M NaOH 1 ml:

$$M_{\text{CaO}} = 2,8/40 \cdot 1\,000 = 70 [\text{mg}_{\text{CaO}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

- potřeba vápnění do neutrální reakce:

$$\text{PV} = V_a \cdot M_{\text{CaO}} \cdot M_o / 1\,000\,000 [\text{t}_{\text{CaO}} \cdot \text{ha}^{-1}]$$

11.1.1 Formy půdní reakce

Půdní reakce vyjadřuje koncentraci iontů. Ty se v půdě mohou vyskytovat v několika formách, a to jednak jako ionty obsažené v půdním roztoku, jednak ionty vázané na půdním sorpčním komplexu (viz kapitolu 11.2.4). V prvním případě hovoříme o půdní reakci **aktivní**, ve druhém případě o půdní reakci **potenciální (výměnné)**.

Aktivní reakce je zjišťována v suspenzi půdního vzorku s vodou. Do vody se uvolní pouze ionty volné, obsažené v půdním roztoku, které nejsou vázané na půdní koloidy sorpčního komplexu.

Potenciální reakce je zjišťována v soli, a to v 0,01M CaCl₂ nebo 1M KCl. Po rozštěpení uvolněný kationt, který je ve výrazném přebytku, vytěsňuje vodíkové ionty vázané na sorpčním komplexu. Sloučeniny nebo látky, které podmiňují proces výměny iontů, jsou nerozpustné ve vodě a jsou tedy nepatrně disociované. Jsou jimi **(a)** huminové sloučeniny organických kyselin – vyměňují H⁺ ionty ze svých karboxylových skupin (COOH) za kationty neutrálních solí (KCl, CaCl₂); **(b)** minerální částice – jílové minerály, které vyměňují H⁺ ionty ze svých sorpčních vazeb za kationty neutrálních solí. Při vyšší kyselosti půdy se na okyselení vyluhovacího roztoku více podílejí ionty Al³⁺ a Fe³⁺, které jsou hydrolyzované (přešly do rozpustné formy a staly se mobilními). Tato skutečnost však neplatí v plné míře v případě vyššího obsahu humusu, kdy vznikají cheláty (sloučeniny kovů a organických látek) a hliník a železo se na okyselení roztoku neuplatňuje.

V lesnické pedologii má tato výměnná vlastnost půdy dopad v případě použití *fyziologicky kyselých hnojiv*, např. KCl pro dodání draslíku. Jeho aplikace má za následek po rozštěpení KCl rychlé navázání iontu K⁺ na sorpční komplex a tím uvolnění iontů H⁺ a silné okyselení půdního roztoku. Zakyselování je také důsledkem vyššího obsahu vody v půdě, který podmiňuje půdotvorný proces oglejení (viz kapitolu 6.1.4): zakyselování je zde důsledkem redukce Fe³⁺ na Fe²⁺ nebo Mn³⁺ na Mn²⁺.

Stanovení v CaCl₂ je standardní metodický postup z hlediska mezinárodních taxonomických systémů např. v americké klasifikaci – Soil Taxonomy (USDA-NRSC, 1999). Je více „tolerantní“ vůči sezónní dynamice pH způsobené změnami koncentrace vodorozpustných solí. Stanovení v KCl je vhodné použít v případě kyselých půd s vysokým obsahem hliníku, který je přítomen v půdách s hodnotami pH < 5,2 (ve vyšších hodnotách pH je hliník vázán s ionty OH⁻ a je nevýměnný). KCl je v suspenzi ve výrazném přebytku a disociovaný draslík je schopen lépe vytěsnit hliník ze sorpčního komplexu. Uvolněný hliník potom spotřebovává ionty OH⁻ a zvyšuje koncentraci H⁺. Výsledná hodnota je tak ještě nižší.

Porovnání pH aktivní a potenciální umožňuje stanovení hodnoty čistého náboje na koloidním systému. V půdách mírného klimatického pásu (v podmínkách střední Evropy a humidního klimatu) platí, že pH/H₂O > pH/CaCl₂ (KCl), a to zpravidla o 0,3-1 stupeň pH.

Půdní reakce se stanoví v suspenzi půdy a reakčního činidla v poměru 1:2,5 (hmotnost půdy:objem reakčního činidla). Reakčním činidlem je H₂O v případě stanovení půdní reakce aktivní a 1M KCl (nebo 0,01M CaCl₂) v případě půdní reakce potenciální.

H⁺ iont je významný acidifikant a může zapříčinit vyplavení živin (vytěsnění ze sorpčního komplexu). Vzhledem k tomu, že H⁺ ionty jsou vysoce aktivní (s vysokou elektronegativitou, a to i jako hydratované, kdy mají nejmenší poloměr z kationtů, mají schopnost vytěsnit báze ze sorpčního komplexu. To je také důvod, proč je voda účinné přírodní rozpouštědlo (H₂O → H⁺ + OH⁻).

Třetí formou je **půdní reakce hydrolytická (Ha)**. Vedle výměnných H⁺ iontů, které jsou vytěsnitelné neutrální solí (KCl, CaCl₂) jsou v sorpčním komplexu vázány ionty vytěsnitelné až ve výrazně alkalickém prostředí. Jsou součástí ve vodě nerozpustných vícesytných organických kyselin nebo kyselých solí (CaHPO₄). K vytěsnění těchto vodíkových iontů se používá např. octan sodný (CH₃COONa), který má vyšší hodnotu pH než KCl. Z reakce vzniká kyselina octová (CH₃COOH) je málo disociovaná a do roztoku se tedy mohou vytěsnit všechny ionty H⁺. Půdní reakce hydrolytická

tedy vyjadřuje schopnost půdy poutat silnou alkálii (octan sodný) a uvolňovat ekvivalentní množství slabé kyseliny (kyselina octová). Hydrolytická půdní reakce vyjadřuje méně mobilní část půdní acidity, která je tedy i méně škodlivá (riziková z hlediska acidifikace půdy).

Tab. 11—1: Hodnocení hydrolytické acidity.

charakt. půdní reakce	mmol·kg ⁻¹
velmi silně kyselá	>13,7
silně kyselá	9,2-13,7
středně kyselá	6,3-9,2
mírně kyselá	2,9-6,3
slabě kyselá	1,7-2,9
velmi slabá	<1,7

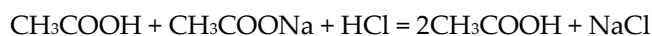
Tab. 11—2: Hodnocení aktivní a potenciální půdní reakce pro půdy různého využití (pH/KCl). Srov. s tabulkou Tab. 13—8, která uvádí univerzální klasifikaci pH.

charakt. půdní reakce	lesní půdy	lesní školky	zemědělské půdy
velmi silně (extrémně) kyselé	<3,0	<4,1	<4,5
silně kyselá	3,0-3,8	4,1-4,8	4,5-5,0
středně kyselá	3,8-4,7	4,8-5,5	5,0-5,5
mírně kyselá	4,7-6,0	5,5-6,5	5,5-6,5
neutrální	6,0-7,0	6,5-7,2	6,5-7,7
alkalická	>7,0	>7,2	>7,7

11.1.2 Půdní pufrovitost

V půdě se vyskytuje velké množství látek, které jsou schopné zabezpečovat stálou půdní reakci. Těmito látkám se říká tlumivé roztoky nebo také pufrý. Obecně je půdní pufrovitost schopnost půdy odolávat změnám pH vyvolaným změnami v obsahu kyselin nebo zásad v půdě.

Pufrovitost je v půdách zajišťována např. tlumivými roztoky. Mezi ty patří slabé organické kyseliny (humínové kyseliny, fulvokyseliny (viz kapitulu 7.2.1), kyselina uhličitá) a jejich soli. Jsou typické zejména pro humusové horizonty. Principiálně se jedná o to, že volné ionty H⁺ se vymění za bazické kationty (Na⁺, K⁺, Mg²⁺ apod.). Tím vznikne další slabá kyselina, která je velmi málo disociovaná, a sůl silné kyseliny. pH se tedy nemění nebo jen velmi pomalu. Tento mechanismus lze vyjádřit následujícím vztahem:



Analogický princip spočívá ve schopnosti půdy odolávat neutralizaci (přísunu zásady):

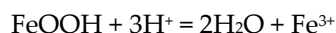


Volné hydroxylové ionty OH⁻ se dostanou do roztoku např. z procesu vápnění a bazické kationty se vymění za vodíkové v organických kyselinách. Ionty OH⁻ se spojí s vodou a hodnota pH se nemění nebo jen velmi pomalu.

Jiný způsob, jak půda odolává změnám pH spočívá v typu a množství koloidních částic obsažených v půdě. V minerální části humuso-jílového komplexu je tato vlastnost úzce spojená s texturou (zrnitostí). Z koloidních jílových částic se do půdy uvolňují báze výměnou za vodíkové ionty a pH půdy se nemění nebo jen velmi pomalu, což je typické pro jílovité půdy, zatímco v písčitéch půdách s nízkým obsahem jílu dochází ke změně pH rychleji.

Půdní pufrovitost je účinná celkem v šesti zónách, které se liší podle mechanismu, jakým se půda se změnami pH vyrovnává. Se zvyšujícím se množstvím vodíkových iontů se půda postupně dostává do zón nižšího pH.

1. **Karbonátová (uhličitanová) zóna**, účinná při pH 8,6-6,2. Je aktivní pouze v případě, že jsou v půdě přítomny volné karbonáty (CaCO_3). Ty ve vodném roztoku reagují na hydrogenuhličitan CaHCO_3 , které jsou dále rozpouštěny a vyplavovány.
2. **Křemičitanová zóna**, účinná při pH 6,2-5,0. Je aktivní v půdách, z nichž již byly uhličitany vyplaveny nebo které primárně žádné neobsahovaly a které primárně obsahují silikáty (zejména živce). Přítomnost iontů H_3O^+ vyvolává hydrolytické zvětrávání křemičitanů, z nichž se uvolňují bazické kationty a vznikají druhové jílové nerosty.
3. **Výměnná zóna** (zóna sorpčního komplexu), účinná při pH 5,0-4,2. Tato zóna je aktivní, když půda „vypotřebuje“ volně dostupné pufrovací nárazníky. pH je vyrovnáváno tím, že jsou vytěšňovány bazické kationty ze sorpčního komplexu půdy a nahrazují nadbytek kyselých kationtů, které se váží na místa bází.
4. **Zóna hliníku**, účinná při pH 4,2-3,8. Je aktivní v kyselých půdách, kde hliník vytváří v půdě sloučeniny s hydroxylovými anionty (OH^-). S těmi se při přebytku vodíkový kationt váže a přechází tak na vodu.
5. **Zóna hliníku a železa**, účinná při pH 3,8-3,0. Je aktivní ve velmi kyselých půdách, kde se kombinuje a prolíná odolnost sloučenin hliníku a železa ve vztahu k dalšímu procesu zakyselování.
6. **Zóna železa**, účinná při pH < 3. Dochází k rozpadu sloučenin železa za vzniku vody podle následujícího vztahu:



Živiny jsou z takových půd nekontrolovatelně vyplavovány, v půdním profilu roste koncentrace toxických látek a biologická aktivita bývá zpravidla soustředěna pouze do mohutné vrstvy surového nadložního humusu.

Box

Vstupní půdní parametry za daného stavu dvou půd – písčité a jílovité:

Bazická saturace 70 %

pH 6,5

Kationtová výměnná kapacita (T):

u písčité půdy je $T = 50 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$

u jílovité půdy je $T = 200 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$

Hmotnost ornice je 3 mil. kg/ha

Obsah koloidních částic a jejich množství – souvisí s texturou (zrnitostí). Změna pH u jílovitých půd je velmi pomalá – spíše stagnující, písčité půdy mění pH velmi rychle.

např.: je-li hodnota bazické saturace $V \text{ (BS)} = 70 \%$ (pH cca 6,5) u dvou různých půdních druhů – *písčité a jílovité*

hodnota T písčité = $50 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$

hodnota T jílovité = $200 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$

(při hmotnosti ornice zjištěné z objemové hmotnosti redukované = 3 mil kg·ha⁻¹)

(vztaheno na vápník Ca jako hlavní kationt používaný pro úpravu pH)

$V = 70 \%$ u písčité půdy: $T = 50 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, kde je $35 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ bazických kationtů („kladných nábojů“) ($50 - 0,7 = 35$);

Musíme přepočítat na jednomocný jednoduší vápník → $17,5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($35/2$);

Pro přepočet na mg/kg použijeme molární hmotnost vápníku (40,08): $17,5 \cdot 40,8 = 714 \text{ mg}_{\text{Ca}} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Pro přepočet množství vápníku na ha použijeme hmotnost ornice: $0,0007 \cdot 3\,000\,000 = 2100 \text{ kg Ca} \cdot \text{ha}^{-1}$, kde 0,0007 je množství mg Ca v 1 kg půdy; 3 000 000 je hmotnost zeminy na ploše 1 ha.

$V = 70 \%$ u jílovité půdy: $T = 200 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, kde je $140 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ bazických kationtů („kladných nábojů“) ($200 - 0,7 = 140$);

Musíme přepočítat na jednomocný jednoduší vápník → $70 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($140/2$);

Pro přepočet na mg/kg použijeme molární hmotnost vápníku (40,08): $70 \cdot 40,8 = 2856 \text{ mg}_{\text{Ca}} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Pro přepočet množství vápníku na ha použijeme hmotnost ornice: $0,0028056 \cdot 3\,000\,000 = 8416,8 \text{ kg Ca} \cdot \text{ha}^{-1}$, kde 0,0028056 je množství kg Ca v 1 kg půdy; 3 000 000 je hmotnost zeminy na ploše 1 ha.

$$V_{\text{Ca}} = \frac{S \times \left(\frac{M}{m}\right)}{1000000} \times R$$

kde

V_{Ca} je množství vápníku jako živiny v půdě na rozloze 1 ha do stanovené hloubky [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$],

S je obsah bazických kationtů [$\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$], který se spočítá jako $S = T \cdot V / 100$, kde T je kationtová výměnná kapacita, V je bazická saturace;

M je molární hmotnost daného kationtu;

m je mocenství daného kationtu (oxidační číslo);

1000000 je přepočet obsahu živiny na kg živiny v 1 kg půdy;

R je hmotnost ornice na ploše 1 ha do vymezené hloubky [kg].

při zakyslení půdy např. na pH 4 → klesne nasycení V na 20 %

U písčité zeminy: při $T = 50 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ je množství vápníku

$V_{\text{Ca}} = (10 \cdot (40,08/2)) / 1000000 \cdot 3000000 = 601,2 \text{ kg Ca} \cdot \text{ha}^{-1}$

V tomto případě se vymylo 2100-600, tj. 1500 kg Ca·ha⁻¹

U jílovité zeminy: při $T = 200 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ je množství vápníku

$V_{\text{Ca}} = (40 \cdot (40,08/2)) / 1000000 \cdot 3000000 = 2404,8 \text{ kg Ca} \cdot \text{ha}^{-1}$

V tomto případě se vymylo 8400-2400, tj. 6000 kg Ca·ha⁻¹

- pro vymytí Ca z jílovité půdy je třeba delší dobu a více vody než u písčité

- naopak když půdu vápníme, potřebujeme na úpravu pH u jílovité podstatně více Ca.

11.2 Půdní sorpce

Půdní sorpce představuje schopnost půdy zadržovat (poutat) ionty nebo celé molekuly z půdního roztoku. Omezuje tak jejich vyplavení do spodních, pro kořenovou výživu nepřístupných, vrstev. Také snižuje nežádoucí koncentrace solí v půdním roztoku. V případě půdní sorpce se jedná o specifické vlastnosti pevné fáze půdy, která má schopnost dočasně poutat různé látky a opět je uvolňovat ze svých vazeb.

Z hlediska vazby půdy a rostliny půdní sorpce představuje základní zdroj živin, a to proto, že půdní sorpční komplex představuje rezervoár lehce přijatelných živin. Obecně půdní sorpce působí v několika formách, a to jako mechanická, fyzikální, chemická, fyzikálně-chemická (výměnná), organická a biologická).

11.2.1 Mechanická sorpce

Mechanická sorpce je závislá na přítomnosti jemných (zejména kapilárních) pórů v půdě. Zde jsou půdní částice zadržovány jako na filtru, a to i a živinami, které jsou na částicích vázány. Tento druh půdní sorpce má omezený význam.

11.2.2 Fyzikální sorpce

Částice jsou v půdě zadržovány a poutány vlivem fyzikálních sil. Fyzikální sorpce může být kladná nebo záporná.

1. Kladná sorpce nastává v případě, jsou-li molekuly určité rozpuštěné látky (K) přitahovány k půdním částicím většími fyzikálními silami nežli molekuly vody. Kolem těchto půdních částic se potom vytváří vyšší koncentrace rozpuštěné látky. Tento stav nastává např. u některých organických sloučenin.

2. Záporná sorpce nastává, jsou-li naopak přitahovány více molekuly vody nežli molekuly rozpuštěné látky. V tomto případě je roztok, který přitéká k hraniční vrstvě půdní částice, méně koncentrovaný nežli roztok okolní. Z hlediska poutání látek v půdě se jedná o nepříznivý stav, kdy jsou látky z půdy snadno vyplavovány (chloridy, nitráty).

11.2.3 Chemická sorpce

Jedná se o schopnost půdy zadržovat některé živiny v půdním tělese v důsledku chemických reakcí molekul za vzniku nerozpustných sraženin. Z hlediska výživy rostlin je to významný druh půdní sorpce, kterou se poutá celá řada aniontů i kationtů. Chemická sorpce může být různě pevná. Některé ionty (NO_3^- , Cl^-) nerozpustné sraženiny netvoří a této chemické sorpci nepodléhají. Podobně některé další anionty (CO_3^{2-} - uhličité, SO_4^{2-} - sírové) nevytvářejí sraženiny s jednomocnými kationty.

Dvojmocné kationty (Ca^{2+} , Mg^{2+}) vytvářejí s HCO_3^- , CO_3^{2-} a SO_4^{2-} málo rozpustné uhličitany – vápenaté, hořečnaté (CaCO_3 , MgCO_3) a sírany (CaSO_4 , MgSO_4), které jsou v půdách s neutrálním pH zadržovány v adsorpčních pórech. V prostředí slabých kyselin (jako jsou organické lesní půdy) jsou však tyto vazby slabé a dochází k částečnému rozpouštění karbonátů: $2\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{Ca}(\text{HCO}_3)$.

V případě fosforu se anionty kyseliny ortofosforečné (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) reagující s jednomocnými kationty (K^+ , Na^+) chemicky nesorbují. Chemická sorpce za vzniku sraženin tak převládá zejména u dvojmocných a trojmocných kationtů (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}).

V neutrálních až alkalických půdách se vytvářejí různé sraženiny založené na spojení fosforu s Ca a Mg. Takto v těchto půdách vzniká např. málo rozpustný dihydrogenfosforečnan vápenatý $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ nebo nerozpustný (pouze ve slabých kyselinách) hydrogenfosforečnan vápenatý CaHPO_4 nebo nerozpustný apatit.

V **mírně kyselých až kyselých půdách** se tvoří sraženiny založené na spojení fosforu s Fe a Al. Takto vzniká např. nerozpustný strengit $\text{Fe}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ze kterého vzniká $\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$ nebo nerozpustný variscit $(\text{Al}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O})$, ze kterého vzniká $\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$.

11.2.4 Fyzikálně-chemická sorpce

Neboli výměnná sorpce; její podstatou jsou elektrostatické síly. Ty společně s difundovanými (rozptýlenými) kationty způsobují vzájemnou neutralizaci opačných elektrických nábojů nacházejících se na pevné fázi půdy a v půdním roztoku. V pevné fázi půdy převažuje záporný elektrický náboj (jehož vznik je popsán dále v textu). Tento náboj je podmíněn přítomností koloidů v půdě, což jsou půdní částice typické malou (mikroskopickou) velikostí, velkým vnitřním povrchem (až několik desítek m^2 na 1g půdy, viz také kapitola 3.3.1) a právě existencí náboje, zpravidla záporného. Vedle koloidů se na sorpci podílí také sorbovaná látka, která je typická opačným nábojem, tedy zpravidla kladným, která se nazývá kationt (H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , NH_4^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+) ale také záporným, zvaná aniont (Cl^- , NO_3^- apod.). Ionty jsou obsaženy v půdním roztoku jako médium, který zprostředkovává pohyb iontů k opačnému náboji. Záporným nábojem jsou typické zejména jílové minerály a humus (resyntetizované organické látky).

Ke vzniku záporného náboje na jílovitých částicích dochází zejména tzv. **izomorfní substitucí neboli záměnou**, což znamená záměnu atomu jiným atomem. Výchozí materiál pro vznik jílových minerálů (primární silikáty) je za normálních okolností elektricky negativní. V jeho struktuře je vyrovnaný počet kladných a záporných nábojů. Během zvětrávání ale dochází mimo fyzikální rozpad minerálů také k jejich chemické přeměně, která se odehrává na úrovni krystalické mřížky tvořené tetraedrickými a oktaedrickými tvary. Tyto procesy jsou vázány na velikost centrálních atomů (viz BOX 11–4). Jílové minerály představují soubor (a) tetraedrů, kdy jeden křemík je obklopen čtyřmi atomy kyslíku nebo (b) oktaedry, kdy je atom hořčíku, železa nebo lithia obklopen šesti atomy kyslíku resp. hydroxidů. Ve skutečnosti však jsou struktury jílových minerálů komplexnější, než jak je schematicky naznačeno v kapitole 3.3 (viz také BOX 11–4). V průběhu zvětrávání je v okolním roztoku přítomna řada prvků a při zvětrávání může dojít k výměně centrálního atomu krystalické mřížky, pokud je centrální atom nahrazen atomem stejné nebo podobné velikosti, avšak vyšší elektronegativity, aniž by došlo ke změně základní krystalické stavby silikátu. V tomto procesu spočívá příčina změny elektrického náboje: např. v případě tetraedru má krystalická mřížka neutrální náboj, kdy okolo čtyřvázného křemíku jsou čtyři dvouvazné atomy kyslíku. Poměr nábojů je tedy 4x kladný : 8x záporný. Přebývajících čtyři záporné náboje jsou vyrovnány sousedícím křemíkem atd. a molekula je tak neutrální. Nahradí-li však v této molekule atom hliníku (Al^{3+}) původní atom křemíku (Si^{4+}), jeden záporný náboj nemůže být neutralizován a nový poměr nábojů je 3x kladný : 8x záporný. Stejně tak může ve středu mřížky Mg^{2+} nebo Fe^{2+} nahradit Al^{3+} nebo Li^+ nahradit Mg^{2+} v případě oktaedrů. Takto dochází k přebytku záporného náboje, který dává charakter celému krystalu jílového minerálu resp. jeho vnitřnímu povrchu.

Ke vzniku záporného náboje dochází u jílovitého podílu půdy také na vnějším povrchu částic. Jednak jako důsledek pronikání půdního roztoku (voda s rozpuštěnými látkami) mezi lamely krystalové mřížky jílových minerálů. Tím dochází k oddisociování a k výměně kationtů za jiné. Druhý způsob spočívá v oddisociování na vnějším povrchu, zejména na okrajích a hranách krystalických mřížek.

BOX 11—4: Vznik záporného náboje na jílovitých částicích.

Záporný náboj vzniká na jílových částicích neboli v sekundárních Al-křemičitanech, a to

- A)** izomorfní substitucí v silikátových tetraedrech čtyřmocného křemíku trojmocným hliníkem podle schématu $(\text{SiO}_2) \rightarrow [\text{SiO}_2]_n\text{-SiO}^{4+} + \text{Al}^{3+}]$
B) izomorfní substitucí v silikátových oktaedrech – nahrazení iontů Al^{3+} ve vnitřní oktaedrické vrstvě jílového minerálu dvojmocným kationtem Mg^{2+} (u montmorillonitu) podle schématu $[\text{Al}(\text{OH})_6]_u \rightarrow \{[\text{Al}(\text{OH})_6]_u\text{-Al}^{3+} + \text{Mg}^{2+}\}^-$

Poloměry některých iontů: Ca 1,94 Å; Mg 1,45 Å; K 0,76 Å (Å = angström, což je délková jednotka, která je rovna 0,1 nm = 10^{-10} m).

Záměna v silikátech a alumosilikátech je způsobena poloměrem iontů.

Poloměr atomů a poloměr iontů vybraných prvků aktuálních při izomorfní záměně [nm]

prvek	Si^{4+}	Al^{3+}	Mg^{2+}	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Li^+	Na^+	Ca^{2+}
atom	0,111	0,118	0,145	0,156	0,156	0,167	0,190	0,194
iont	0,041	0,050	0,065	0,060	0,075	0,060	0,095	0,099
zastoupení v	tetraedrech	tetraedrech oktaedrech na výměnných místech	v oktaedrech na výměnných místech	tetraedrech oktaedrech na výměnných místech			na výměnných místech	na výměnných místech

Atom se skládá z atomového jádra s protony a neutrony a z elektronového obalu s elektrony, kterých je stejně jako protonů a jsou součástí poloměru atomu

Iont-kationt je menší částice než atom. Je to atom, který odevzdal z elektronového obalu některé elektrony (elektronů je méně než protonů) a mají tedy menší poloměr.

Iont-aniont je částice, která přijala elektron. Je tedy větší než atom příslušného prvku a má větší poloměr.

Křemíku (jeho iontu Si^{4+}) je poloměrem nejbližší Al^{3+} . Jiné kationty jsou větší a nevměstnají se mezi lamely v tetraedrické mřížce. Ostatní ionty (Na^+ , Ca^{2+} apod.) potom již křemík nemohou v tetraedrech nahradit.

- C)** na vnějším povrchu částic, a to vlivem

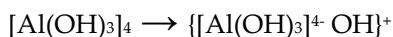
- a) pronikání půdního roztoku (voda s rozpuštěnými látkami) mezi lamely krystalické mřížky jílových minerálů, čímž dochází k oddisociování a k výměně za jiné kationty;
b) oddisociováním na vnějším povrchu, zejména na okrajích a hranách krystalických mřížek.

Při tom platí, že

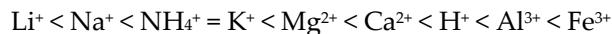
- Intenzivněji jsou adsorbovány ionty o vyšší valenci.
- Ve větší míře jsou adsorbovány ionty ve větší koncentraci (vlivem vyšší iontové síly).
- Intenzita adsorpce iontů o stejné valenci (mocenství) je závislá na jejich hydratačním obalu (Tab. 11—3).

Koloid tak nabývá charakteru záporně (nebo kladně, podle charakteru izomorfní substituce) nabitě částice, která přitahuje částice opačného náboje, čímž se kolem koloidu tvoří shluk atomů. Takto se tvoří tzv. **micely**, což je molekulární „oblak“ ve formě nahloučených atomů, které mají kladný náboj v případě záporně nabitého koloidu, nebo záporný náboj v případě kladně nabitého koloidu. Micela má navenek vyrovnaný náboj, což plyne z toho, že vazebná místa jádra micely jsou obsazována ionty s opačným nábojem. Povrch micely není přesně ohraničen, nýbrž se vzdáleností od jádra s postupně se snižujícím vlivem elektrostatických sil klesá hustota neustále vířících iontů. To také zapříčiňuje její veliký specifický povrch.

V kyselém prostředí, např. u jílových minerálů jako kaolinit, vzniká náboj kladný. To je způsobeno disociací (oddělováním) funkčních skupin, např. hydroxylová skupina OH^- a vzniká tak na povrchu koloidu kladný náboj, který může být kompenzován záporným iontem z půdního roztoku (např. Cl^- , NO_3^-). Kladný náboj může také vznikat v amorfních gelech, což je beztvárá, nekrytalizující rosolovitá hmota. Její sraženiny vykazují určitou výměnnou schopnost aniontů



Výměna kationtů probíhá neustále. Půdní sorpce neznamená ustálený stav, nýbrž ionty neustále difundují, mění pozice na okraji micely v závislosti na koncentraci iontů v půdním roztoku, na působení organických kyselin, enzymů kořenových exsudátů apod. Ionty jsou vázány na povrchu koloidu různou silou. Ta je vyjádřena *liotropní řadou*, která udává sorpční schopnost kationtů podle následujícího schématu:



Vazebná síla závisí na valenci (mocenství) iontů, ale také na jejich hydratačním obalu. Ionty s malým poloměrem přitahují větší množství vody a mají tedy větší obal (jsou více hydratované) než ionty s většími poloměry. Více hydratované ionty stejného mocenství jsou tedy vlivem silnější izolace vrstvy (vody) přitahovány slaběji.

Tab. 11—3: Průměr nehydratovaných a hydratovaných iontů [nm]

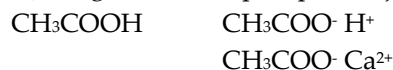
stav iontu/iont	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ⁺
nehydratované	0,098	0,133	0,143	0,078	0,106	0,035
hydratované	0,38	0,26	0,27	0,32	0,28	0,14

Hydratované ionty jsou ze sorpčního komplexu lehčeji vytěšňovány, protože jsou slaběji poutány. Výjimkou je iont H⁺, neboť váže pouze H₂O. Ve spojení s vodou vzniká iont H₃O⁺ o poloměru 0,135 nm, čímž je nejmenším hydratovaným iontem. Proto je H⁺ absorbován silněji než jednomocné a dvojmocné kationty. Praktický význam je např. na jaře, kdy při dostatku vláhy půda intenzivněji adsorbuje dvojmocné kationty (mají větší hydratační obal). Jednomocné kationty jsou potom vytěšňovány a přecházejí do půdního roztoku. Při vysychání půdy (v letním období) je tomu naopak.

11.2.5 Organická sorpce

Minerální a organické částice dohromady tvoří koloidní systém – zprostředkovaný částicemi o velikosti 0,000 25 – 0,001 mm. Soubor všech koloidů se nazývá sorpční komplex.

A) Organickou sorpci způsobují karboxylové skupiny (kyselina octová, jednosytná):



COOH má kyselé vlastnosti, čili disociuje iont H⁺, který může být nahrazen bazickým kationtem (Ca²⁺, K⁺, Na⁺ apod.).

V molekule huminové kyseliny (HK) se může kationt H⁺ zaměnit za jiné kationty, což je podmíněno mírou půdní acidity:

1 iont H⁺ se vytěsňuje při pH < 4,5 (typické pro lesní půdy)

2 ionty H⁺ se vytěsňují při pH 7 (zemědělské půdy)

3 – 4 ionty H⁺ se vytěsňují při pH 8,5 (vznikají humáty)

B) Organickou sorpci způsobují fenolové skupiny C₆H₅O-H⁺

U fenolových skupin se H⁺ vyměňuje pouze v neutrálním prostředí. H⁺ z OH skupiny disociuje a na jeho místo může být navázána báze.

Orientační zastoupeníází v sorpčním komplexu je přibližně následující:

Ca ²⁺	50-70 %
Mg ²⁺	20-30 %
K ⁺	2-6 %
NH ₄ ⁺	5-6 %
Na ⁺	2-3 %

11.2.6 Biologická sorpce

Biologická sorpce je zajištěna půdními organizmy (neboli půdním edafonem). V tomto případě jsou živiny poutány v půdě v tělech živých nebo odumřelých organismů. Tímto způsobem jsou živiny imobilizovány, nejsou přístupné rostlinám a po rozkladu těla organismu a jeho úplné mineralizaci se navracují zpět do oběhu, do půdního prostředí.

Intenzita biologické sorpce, stejně jako množství biologicky poutaných (sorbovaných) živin závisí na obsahu organických látek v půdě, na poměru C/N, vlhkostních a teplotních poměrech půdy, provzdušnění aj.

Z hlediska interakce půdních organismů s rostlinami může vlivem biologické sorpce dojít k fixaci živin a jejich imobilizaci v buněčných strukturách a tím ke znepřístupnění rostlinám a poruchám jejich výživy. Tento jev nastává často v případě dusíku, jehož dynamika je biologickou sorpcí výrazně ovlivňována.

11.2.7 Charakteristiky sorpčního komplexu

Půdní sorpční komplex lze charakterizovat pomocí níže uvedených veličin. Sorpční komplex je charakterizován obsahem kationtů, které jsou v půdě výměnně poutány a které jsou při laboratorních analýzách vylouženy pomocí extrakčních činidel do eluátu. Následně se obsah kationtů dělí na obsah kyselých kationtů a obsah bazických kationtů a tyto veličiny slouží jako jeden z hlavních ukazatelů fyzikálně-chemických vlastností půdy.

S = okamžitý obsah výměnnýchází [mmol·kg⁻¹]: vyjadřuje množství kationtů, které jsou poutány v půdním sorpčním komplexu v době stanovení (okamžitý stav). Hodnota se stanoví laboratorně.

T = maximální množství všech kationtů, které půda může poutat (kationtová výměnná kapacita, **KVK**) [mmol·kg⁻¹]: vyjadřuje sumu všech kationtů vázaných na sorpčním komplexu. Zahrnuje tedy jak bazické kationty (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺) tak kyselé kationty (H⁺, Al³⁺). Hodnota se stanoví laboratorně.

V = procentický podíl výměnných bazických kationtů (bazická saturace, **BS**) [%]: vyjadřuje poměrné množství bazických kationtů vzhledem k celkové kationtové kapacitě. Stanovuje se výpočtem.

$$V = \frac{S}{T} \cdot 100 [\%]$$

Ha = hydrolytická acidita [mmol·kg⁻¹]: vyjadřuje celkové zastoupení kyselých kationtů (H⁺, Al³⁺), které jsou poutány v sorpčním komplexu. Více je o této problematice viz kapitulu 11.1.1.

Sorpční komplex je tedy složen ze dvou komponent: bazických kationtů a kyselých kationtů a platí tedy vztah $T = S + Ha$.

Tab. 11 – 4: Hodnocení hydrolytické acidity a bazické saturace (porovnané pro lesní vs. zemědělské půdy)

hydrolytická acidita (Ha)	mmol·kg ⁻¹	maximální sorpční kapacita (T)	mmol·kg ⁻¹	stupeň nasycení V (BS) (%)	les. půdy (%)	zeměd. půdy
velmi silná	> 137	velmi silná	> 300	plně nasycená	80-100	90-100
silná	92–137	vysoká	250–300	nasycená	65-80	75-90
střední	63–92	středně vyšší	180–250	slabě nasycená	50-65	50-75
mírná	29–63	středně nižší	130–180	slabě nenasycená	20-50	40-50
slabá	17–29	nízká	80–130	silně nenasycená	10-20	30-40
velmi slabá	<17	velmi nízká	< 80	extrémně nenasycená	0-10	< 30

Tab. 11—5: KVK jednotlivých složek v půdě [mmol·kg⁻¹]

Kaolinit	30 - 120	Huminové kyseliny	3500 - 5000
Illit	200 - 400	Fulvokyseliny	2000 - 3000
Vermikulit	1200 - 1500		
Montmorillonit	700 - 1100		
Chlorit	300 - 500		

**Optimální zastoupení bazí - bazických kationtů –
(Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺) v sorpčním komplexu**

Ca ²⁺	50 - 70 %
Mg ²⁺	20 - 30 %
K ⁺	2 - 6 %
NH ₄ ⁺	5 - 6 %
Na ⁺	2 - 3 %

12 CHEMICKÉ VLASTNOSTI PŮD

V tomto učebním textu jsou chemické vlastnosti půd pojaty z hlediska chemického složení a významu jednotlivých minerálních složek půdy. Půdní chemismus představuje zásobu potenciálních chemických složek, které se účastní na půdotvorných prosech, na výživě rostlin a rozvoji půdního edafonu.

Půdní chemismus závisí na minerální síle matečné horniny, množství a vlastnostech humusu a jílu v půdě, biologické aktivitě i na půdotvorných faktorech. Primárně je půdní chemismus dán chemismem matečné horniny. Její minerální síla a charakter zvětrávání určují půdní trofnost a hydrofyzikální vlastnosti, na kterých závisí další vlastnosti půdy. Z hlediska chemického (minerálního) složení půd je významný jednak obsah daného minerálu, jednak forma, v jaké je v půdě obsažen. Na formě závisí, je-li daný element využitelný jako živina či nikoli.

Ke specifickým lesních půd v porovnání se zemědělskými patří charakter koloběhu živin. Zatímco agrikultury fungují více méně jako otevřený systém s antropicky podmíněným koloběhem živin (hlavní přísun spočívá v hnojení a živiny jsou z půd odnímány se sklízni a to v horizontu max. dvou let), lesní půdy jsou specifické různou mírou uzavřenosti koloběhu živin. Tato míra závisí na „míře zkulturnění“ lesních porostů, kdy přírodě blízké lesy jsou blíže pokročilejším sukcesním stádiím ekosystému typickým nižšími ztrátami látek a těsnějšími vazbami v jejich koloběhu. Avšak i v případě čistě hospodářského lesa jsou procesy cyklů prvků výrazně dlouhodobější, ve vazbě na obmýti porostů, v rámci kterého minerální látky v půdním roztoku, v opadu a jeho dekompozici, podstupují jistou formu koloběhu. Z toho důvodu je třeba respektovat při pěstebních postupech přírodní specifika stanoviště, která by měla být v souladu s ekologickými nároky pěstěných lesních dřevin.

Koloběh živin v lesních půdách a porostech zahrnuje tyto dílčí pochody:

1. fyziologické využití a pohyb minerálních složek lesní vegetací a půdním edafonem;
2. fyziologické obohacení minerálních složek opadem a přeměnou humusu;
3. hydrologický transport a ukládání minerálních složek (vyuhování, akumulace);
4. transport, ukládání a promísení minerálních složek půdním zooedafonem.

Se snižující se mírou koloběhu živin stoupá riziko jejich vyplavení a naopak. Není však pravdou, že toto riziko stoupá s mírou zkulturnění lesních porostů. Naopak, hospodářský les je často typický vysokou mírou stabilizace organické hmoty v podobě humusu a na něm vázaných minerálních látek. Např. v otázce koloběhu uhlíku náleží hospodářský les k systémům s výrazným *uhlíkovým sinkem*, což je zejména v současnosti aktuální z hlediska ukládání uhlíku coby složky CO₂, spojované s globálními změnami klimatu. Tato skutečnost vyplývá z hospodářského využívání dřevní hmoty tvořené uhlíkatými řetězci, v rámci kterého je uhlík „odstraněn“ z přírodních koloběhů. V případě lesa přirozeného dřevní hmota mineralizuje a uhlík je v tomto procesu prodýchán a uvolňován zpět do atmosféry.

12.1 Základní aspekty koloběhu živin v lesních ekosystémech

Dynamika nebo také proměnlivost minerálních látek je pro jednotlivé elementy specifická. Vysokou dynamikou je typický uhlík, dusík, lehce přístupné minerální živiny, sloučeniny železa, hliníku, vápníku apod., dále enzymy, antibiotika, procesy spojené s půdní sorpcí nebo biochemické procesy.

Celková dynamika je dána zejména (1) chemismem matečné horniny; (2) dřevinou skladbou lesního porostu; (3) mikroedafonem; (4) klimatem; (5) vodním režimem. Mateční hornina představuje primární vstup minerálů do oběhu, které jsou specifické svou reaktivností, s jakou se účastní na chemických procesech. Mezi vysoce reaktivní patří lehce rozpustné soli a sloučeniny jednomocných prvků (K⁺, Na⁺), amonné sloučeniny, dusičnany, kyselina uhličitá, huminové kyseliny, fulvokyseliny a CaCO₃. Dřeviny jsou specifické obsahem živin v opadu a rychlostí resp. charakterem jeho dekompozice. Tak např. smrk, borovice nebo modřín mají na živiny chudý opad a jsou tedy

pokládány spíš za dřeviny s „kyselým opadem“, zatímco opad melioračních dřevin, jako lípa, buk nebo dub obsahuje také báze, které „vynáší“ prostřednictvím kořenů ze spodních vrstev půdy do listů, se kterými se dostávají na půdní povrch a dále do koloběhů. Klima se na koloběhu podílí zejména teplotou, která podmiňuje biologickou aktivitu a sestavu půdní mikroflóry a dále srážkovým režimem, který podmiňuje perkolaci vody a případné vyluhování půdních horizontů a transport látek v rámci půdního profilu (o vodním režimu více v kapitole 4.4).

Intenzita koloběhů závisí také na roční době. Nejintenzivnější procesy probíhají na jaře a počátkem léta, kdy lesní porosty z půdy čerpají vodu a živiny a probíhá intenzivní humifikace. Z tohoto pohledu je vhodné půdní průzkumy a zejména odběry půdních vzorků směřovat do období konce léta a podzimu, kdy se půdní procesy vyznačují menší dynamikou. Z dlouhočasového hlediska probíhají nejintenzivnější procesy v kulturách, zatímco ve starších porostech se koloběhy zpomalují. Stejně tak jsou koloběhy závislé na fenologické fázi porostů, kdy dřeviny v době fruktifikace vyžadují zvýšený přísun živin.

Cykly mohou být buď velké, kdy je prvek sledován od místa primárního uvolnění z horniny až po místo finálního uložení nebo malé, kdy je prvek sledován v rámci daného ekosystému. Protože koloběhy živin se v půdě a v lesních ekosystémech zpravidla neobejdou bez živé složky, hovoříme o *biochemických cyklech*. Biochemický cyklus představuje soubor reakcí, kterými je prvek (živina) přeměňován a transportován v rámci ekosystému.

Prvky se podle zastoupení v biomase rostlin dělí na makroprvky/makroživiny (makrobioelementy), jejichž obsah je v rostlinných pletivech je v jednotkách až desítkách $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ sušiny (patří sem C, O, H, N, P, S, Ca, Mg, K, Cl) a mikroprvky/mikroživiny (mikrobioelementy), jejichž obsah je zpravidla nižší než $0,1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ sušiny rostlinných pletiv (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl). Další prvky nejsou pro rostliny nezbytné, avšak jsou v biomase obsaženy (Si, Na, Al, Co, Ni). N, C, H jsou obsaženy v nadbytku v atmosféře jako N_2 , CO_2 a H_2O a chlór jako iont Cl^- ; ostatní živiny jsou uvolňovány zejména v procesu zvětrávání hornin.

12.2 Makroelementy lesních půd

12.2.1 Koloběh a přeměny uhlíku v půdě

Uhlík je základní stavební složkou organické hmoty, ať už živé, odumřelé nebo přeměněné na polymerizované organické substance. Všechny tři zmíněné formy, ve kterých se uhlík v půdě nachází, se dohromady nazývají půdní organická hmota. V průběhu dekompozice je vlivem organismů odumřelá organická hmota přeměňována. Stavební složky přecházejí do minerální formy (NH_4^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} apod.) a uhlík je emitován ve formě CO_2 v procesu dýchání. Uhlík z oxidu uhličitého je následně zabudováván do organické hmoty zelených rostlin, odtud částečně vydýchán, s opadem se s ostatními prvky dostává na půdní povrch, do půdy atd. Procesy, v rámci kterých je uhlík zabudováván do organické hmoty, následně je z ní uvolňován a translokován v minerální podobě, se nazývá globální cyklus uhlíku.

V průběhu uplynulých cca 200 let emise uhlíku přesáhla jeho inkorporaci v tělech živých organismů nebo v neživé organické hmotě, zejména vlivem spalování fosilních paliv, dýcháním organismů, odlesňováním a žďářením lesů (viz také kapitolu 15.4.2).

Koloběh uhlíku se výrazně liší v závislosti na typu suchozemského ekosystému a je zprostředkován zejména uvolňováním z odumřelé organické hmoty, v lesních půdách tzv. opadu. K opadu jako zdroji uhlíku přispívá také podzemní organická hmota z odumřelých kořenů, kořenových exsudátů a půdních organismů, na karbonátových horninách také zvětrávací procesy. Kořeny přispívají k celkovému množství z rostliny uvolňovaného CO_2 5 až 10 % (White 2006), se zahrnutím celkové živé biomasy je z kořenové vrstvy uvolňováno 20-40 % z celkové produkce CO_2 .

Tab. 12—1: Množství uhlíku každoročně navraceného do půdy prostřednictvím opadu v různých typech ekosystému (pro přepočet na organickou hmotu se používá koeficient v rozmezí 1,7-2,5). Upraveno podle White 2006.

Typ suchozemského ekosystému	Organický uhlík (t/ha)
Vysokohorské a arktické lesy	0,1-0,4
Zemědělské systémy	1-2
Travní porosty	2-4
Jehličnaté lesy	1.5-3
Listnaté lesy	1.5-4
Tropické lesy (Kolumbie)	4-5
Tropické lesy (západní Afrika)	10

Vedle významu jako základní stavební složky organické hmoty má uhlík v půdě mnoho dalších významů. Protože spoluutváří humusové látky, je významným nositelem živin v podobě humusu, významně přispívá k vododržnosti půdy a některé živiny se váží zejména na organickou hmotu, jako např. draslík.

V půdě je většina uhlíku uložena ve svrchní vrstvě půdy, tedy ve rhizosféře, která má mocnost cca 15-20 cm. S hloubkou obsah uhlíku (organické hmoty) strmě klesá cca pod 1 %. Tento uhlík je z převážné části uložen ve formě polymerizovaných organických molekul (humusových látek). Vlivem disturbancí, jako např. odlesnění, orba a kultivace půdy může tato vrstva půdy velmi rychle zmineralizovat, uhlík se pak uvolní do atmosféry ve formě CO₂ a humusový materiál je degradován. Důsledkem je narušení stability půdy ve smyslu vodního režimu i výživy rostlin a změny podmínek pro edafon.

12.2.2 Cyklus dusíku a jeho přístupnost v půdě

Podrobně popsany cyklus dusíku a jeho přeměny v suchozemských ekosystémech uvádí Šimek (2003), Samec et al. (2009), Brady and Weil (2002) nebo White (2006).

Dusík patří k nejrozšířenějším prvkům; je přítomen v atmosféře, hydrosféře i litosféře. Celkový obsah dusíku (N_t) v půdě se pohybuje v rozmezí hodnot 0,1-0,2 %. Koncentrace dusíku v rostlinné biomase se pohybuje nejčastěji v hodnotách nad 13 g/kg sušiny u jehličnanů, 24 g/kg sušiny u listnáčů. Hlavním zdrojem dusíku je atmosféra, kde se nachází zejména v dvouatomové formě jako N₂. Tato forma dusíku však není přístupná rostlinám. Organická hmota v půdě představuje největší zásobárnu dusíku. Zde je dusík obsažen ve formě **organického dusíku** potenciálně přístupného rostlinám, je-li přeměněn činností mikroorganismů na minerální formu. Organický dusík se na celkovém obsahu dusíku v půdě podílí z 85-95 %. Z toho může být až 50 % aminokyselin a cukrů. Zbytek dusíku je ve formě komplikovaných heterocyklických sloučenin stabilních organických molekul. Dusík do těchto forem pochází zejména z čerstvé organické hmoty. Mikrobiální biomasa (živá složka půdy) obsahuje 4-8 % celkového půdního dusíku. Představuje nejlabilnější zásobárnu dusíku v půdě.

Minerální dusík představuje přístupnou formu dusíku v půdě. Je obsažen cca z 10 % z celkového obsahu dusíku. V půdě se rostlinám přístupný dusík vyskytuje ve dvou anorganických formách, a to jako amonný iont (NH₄⁺) nebo jako nitrát (NO₃⁻). Nitráty jsou typické zejména pro oxické podmínky, zatímco amoniakální forma dusíku je přítomna v anoxických podmínkách. Některé bakterie a sinice mají schopnost asimilovat molekulární dusík (N₂).

Dusík má význam při tvorbě chlorofylu. Podílí se také na stavbě aminokyselin a tím také bílkovin a protoplazmy, DNA a RNA, dále chitinu, peptidoglykanů tvořících buněčné stěny, enzymů a mnoha dalších látek. Poměr dusíku a draslíku N:K v biomase je přibližně 2:1.

12.2.2.1 Zdroje dusíku v ekosystémech

Cyklus dusíku spočívá v obousměrných přechodech půdního dusíku a atmosférického dusíku. Přechod z plynného N_2 do sloučenin se děje díky biologické fixaci, přechod z formy organické v anorganickou se děje díky mineralizaci. Biologická fixace představuje okolo 60 % celkového fixovaného dusíku, cca 15 % pochází účinků UV záření a z atmosférických elektrických výbojů a zbytek je industriálního původu v podobě hnojiv a eutrofizace.

Biologická fixace dusíku je po asimilaci CO_2 druhým nejvýznamnějším biochemickým procesem. Představuje redukcí plynného N_2 na NH_3 (amoniak) a zabudování do aminokyselin za účelem syntézy proteinů. Bakterie schopné asimilace dusíku tvoří úzkou skupinu organismů a patří sem:

- volně žijící půdní bakterie (*Klebsiella*, *Clostridium*, *Azotobacter*) a cyanobakterie (modrozelené řasy nebo také sinice);
- symbiotické rhizobakterie žijící v asociaci s kořeny rostlin. Zde lze vymezit tři hlavní typy asociace: (1) hlíznaté druhy zemědělských plodin čeledi *Fabaceae* hostící bakterie rodu (*Rhizobium* a *Bradyrhizobium*); (2) nezemědělské rostliny rodu olše (*Alnus*), voskovník (*Myrica*), hlošina (*Eleagnus*) a přesličníkovitě (*Casuarina*) hostící zejména aktinomycety (*Frankia*); (3) lišejníky a kapradiny tvořící asociace s houbami a modrozelenými řasami.

Skladba mikrobiálního společenstva fixujícího N_2 závisí na řadě faktorů jako provzdušnění, pH, obsah organické hmoty, koncentrace minerálního dusíku a přístupnost dalších živin, zejména Cu, Mo a Co. *Azotobacter* a modrozelené řasy vyžadují neutrální a vápnité půdy, zatímco sporulující organismy jako *Clostridium* jsou k pH značně tolerantní.

Biologická fixace je katalyzována enzymatickými komplexy (nitrogenázou a hydrogenázou). Umožňuje organismům rozvíjet se nezávisle na minerálním N.

Atmosférický dusík: do atmosféry je dusík uvolňován jako čpavek (NH_3) volatilizací (těkáním z povrchu) z organických hnojiv, vegetace a půdy, ale i jako nitrátový (NO_3^-) a amoniakální (NH_4^+) iont nebo ve formě organických dusíkatých sloučenin. Oxidy dusíku reagují s volnými hydroxylowymi radikály a tvoří kyselinu dusičnou (HNO_3), která přispívá ke kyselým deštům. Do půdy dusík vstupuje jako suchý nebo mokrá spád ve formě NO_x (NO , NO_2 apod.) pocházejících ze spalování fosilních paliv nebo rostlinné biomasy.

Dalším vstupem dusíku do půdy je **hnojení**. Tento zdroj je významný zejména pro agrosystémy a svým podílem na obohacení půdy se v současnosti vyrovná biologické fixaci, což znamená výrazný vliv na celkový koloběh dusíku a možnou eutrofizaci půd a vod. Mezi hlavní dusíkatá hnojiva využívaná v lesnictví patří ledky a močovina (více v kapitole 13).

V lesních ekosystémech je výrazným zdrojem dusíku **rozpad (mineralizace) organické hmoty**. Proces uvolňování dusíku tímto způsobem se nazývá amonifikace, což je zásadní proces obnovy koloběhu dusíku v ekosystému. Opačný proces, kdy je dusík zabudováván do živých struktur, se nazývá imobilizace.

12.2.2.2 Ztráty dusíku z ekosystémů

Denitrifikace představuje anaerobní proces přeměny nitrátů (NO_3^-) na nitrity (NO_2^-), dále na amonné sloučeniny a ve výsledku na plynný dusík a oxidy dusíku. Favorizující podmínky pro denitrifikaci jsou neutrální nebo mírně zásadité pH, teplota okolo $25^\circ C$ a anaerobní prostředí.

Volatilizace je ztráta dusíku zpravidla jako důsledek hnojení, a to ve formě N_2 , oxidů dusíku nebo amoniaku (NH_3). Tento proces je urychlován v alkalických půdách s nízkou kationtovou výměnnou kapacitou nebo v suchých půdách. Volatilizace nastává zpravidla po hnojení močovinou, ale i jinými dusíkatými organickými hnojivy (keřda, močůvka). Z hlediska lesnické pedologie je tato forma ztráty tedy aktuální zejména v lesních školkách.

Vymývání dusíku probíhá ve formě nitrátů (NO_3^-), které jsou v půdě značně mobilní. Nitráty se akumulují zejména ve svrchních vrstvách půdy (20-25 cm) coby produkt mineralizace nebo hnojení,

odkud mohou být vyplavovány do nižších vrstev půdy. Obsah nitrátů a tím také mobilita dusíku je ovlivněna řadou vnějších faktorů:

(1) Teplota – nízké teploty zpomalují nitrifikaci, která se tak umocňuje zejména na jaře a v časném létě.

(2) Půdní vlhkost a vodní režim – promyvný vodní režim propustných půd přispívá k vyplavování dusíku z ekosystémů a tím k eutrofizaci spodních vod. Naopak na nepropustných půdách dochází k redukci nitrátů (denitrifikaci).

(3) Rostlinná společenstva – dominantní formou dusíku v půdách travinných a lesních společenstev je NH_4^+ , což značí, že nitrifikace je potlačena pravděpodobně díky inhibičně působícím sekretům kořenů některých rostlin. Za normálních okolností vstupy N se srážkami více méně vyrovnávají ztráty z vymývání; při odlesnění se však nitrifikace zrychluje a tím také stoupá riziko vyplavení nitrátů s půdní vodou.

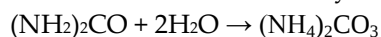
(4) Fyzikální vlastnosti půdy – vymývání nitrátů závisí na textuře a struktuře půdy. Písčité půdy s vysokou hydraulickou vodivostí a nízkou vododržností ztrácejí NO_3^- rychleji, zejména za převažujících srážek nad výparem. Z tohoto hlediska jsou pro udržení dusíku v půdě ideální strukturní jílovitohlinité až jílovité půdy.

Odnos dusíku s biomasou představuje riziko ztráty zejména v agrosystémech a lesních školkách (systémech s rychlou rotací kultur), kde je nutné stav živin v půdě sledovat a doplňovat.

12.2.2.3 Vnitřní cykly dusíku (přeměny forem)

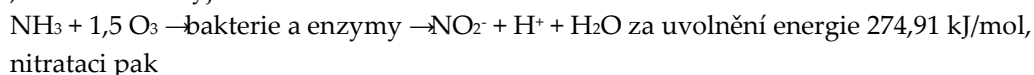
Základní dva protichůdné biologické procesy jsou mineralizace a imobilizace dusíku. **Mineralizace** představuje všechny procesy, při kterých dusík přechází z organické formy do minerální a stává se přístupným biologickým procesům. Odehrává se ve dvou etapách, jejichž výsledným produktem je buď amonný dusík (amonifikace) nebo nitrátový dusík (nitrifikace).

Předně jsou mikroorganismy hydrolyzovány proteiny a aminokyseliny, které jsou v procesu *amonifikace* nebo také *amonizace* přeměněny na amoniak. Tento proces může probíhat za širokého rozpětí teploty, vlhkosti a pH půdy. Amonifikace představuje fázi proteolýzy, při které je močovina redukována na uhličitán amonný a na amoniak. Obecná rovnice procesu je



Amonifikace, která probíhá za redukčních podmínek, je zajišťována proteolytickými enzymy (proteináza, peptidáza), které rozkládají bílkoviny (proteiny) coby hlavní zdroj dusíku z živé složky ekosystému na aminokyseliny.

Amoniak je následně v procesu *nitrifikace* oxidován na nitrit a nitrát. Nitrifikace je přísně vázána na aerobní podmínky coby oxidační proces. V tomto procesu lze vylíčit fázi (1) nitritace (podílejí se na ní bakterie rodu *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira* přizpůsobené půdním podmínkám lesního prostředí) a (2) nitratace (bakterie rodu *Nitrobacter*, které nesnášejí přítomnost amonné formy dusíku NH_3). Nitritaci lze vyjádřit chemickou rovnicí



V lesních půdách je nitrifikace potlačována vnějšími podmínkami nutnými pro přítomnost nitrifikačních bakterií. Optimální pH je 6,2-8,2, nitrifikace je potlačována vysokým obsahem tříslovin a pryskyřice, typickým pro smrkové (i jiné druhy jehličnanů) porosty. Nitrifikace se také zpomaluje za sníženého pH. Jak vyplývá z rovnice, při nitrifikaci je uvolňován vodík. To znamená, že nitrifikace je acidifikační proces, jehož důsledkem je snižování pH půdy. A protože jsou nitráty v půdě značně mobilní, nitrifikace také znamená zvýšené riziko vymývání dusíku a s ním vázaných kationtů na aniontovou skupinu NO_3^- .

Naopak **imobilizace** znamená přeměnu nitrátové a amonné formy dusíku na organickou formu. Proces může být biotický i abiotický. Biotická imobilizace dusíku je širším slova smyslu to syntéza

minerálního dusíku do formy organických látek nebo jejich resyntéza. Úzce souvisí s obsahem uhlíku, resp. s poměrem uhlíku a dusíku v půdě (C/N). Je-li široký poměr C/N (cca >20), během dekompozice mikroorganismy mohou při výstavbě buněčných struktur (jako jsou proteiny) požadovat více dusíku, než je obsaženo v rozkládané organické hmotě. V těchto případech dochází k tomu, že mikroorganismy čerpají minerální dusík z půdního roztoku ve formě NO_3^- a NH_4^+ a tím jej činí nepřístupný rostlinám. Přístupný se stane až po smrti mikroorganismu a rozpadu jeho buněk.

12.3 Poměr uhlíku a dusíku, C/N

Poměr C/N je významným ukazatelem kvality dekompozice a humifikace a trofnosti půd. Uhlík jako základní stavební složka organické hmoty, utvářející polymerizované řetězce na jedné straně a dusík jako hlavní složka výživy rostlin i půdních mikroorganismů na straně druhé. Z hlediska jejich poměru je podstatné, že uhlík je vždy v přebytku, poměr se proto označuje jako 15 (15/1), 20,7 (20,7/1 apod.). Se zvyšujícím se poměrem C/N lze usuzovat na snižující se trofnost půdy a zápornou korelaci s pH.

Nepříznivé humusové formy, jako je mor, se tak vyznačují kyselým pH (3,8-4,0 i méně) a naopak vysokým poměrem C/N (<30). Moder je typický širším rozpětím pH (cca 5-7) a poměrem C/N cca 20, mull s vysokou biologickou aktivitou, značnou zásobou živin a jejich rychlou rotací v ekosystému má pH zpravidla vyšší než 5-5,5 a nízký poměr C/N (cca 10-20).

S poměrem C/N a vývojem humusových forem také souvisí dřevinná skladba. Jehličnany (smrk, borovice, modřín aj.) mají obtížně rozložitelný opad obsahující nízké koncentrace živin (které jsou navíc ze stárnoucích jehlic translokovány do mladších) a přispívají ke zvyšování poměru C/N a tím k vývoji morových humusových forem. Naopak opad listnatých dřevin bohatší na minerální živiny podporuje vývoj příznivějších humusových forem typických užším poměrem C/N.

V průběhu dekompozičních procesů a přeměn surové organické hmoty na humus dochází ke snižování poměru C/N: zatímco uhlík je z velké části „vydýcháván“ při metabolických procesech a uniká z organické hmoty ve formě CO_2 , dusík je dočasně imobilizován v tělech půdních organismů a opět se vrací zpět do koloběhu. Vlastní mineralizace dusíku je proces, při kterém dochází k přeměně organického N na anorganický, zejména NH_4^+ a NO_3^- . Amonný iont může být dále oxidován činností chemoautotrofních organismů v procesu nitrifikace a může být dále redukován na NO, N_2O nebo N_2 a v plynné formě unikat do atmosféry v procesu denitrifikace.

Při rozkladu dusíku v půdách s vysokým poměrem C/N je dusík ihned vázán v tělech mikroorganismů a mykorrhizních hub a hovoříme o **biotické imobilizaci** dusíku. Při té je podstatné, že kořeny rostlin jsou až „v zadních řadách“ v pořadí příjmu živin v porovnání s mikroorganismy a může v takových situacích tedy docházet k deficitu ve výživě rostlin dusíkem. Amonná i nitrátová forma N může být také vázána na půdních částicích, potom hovoříme o **abiotické imobilizaci**.

Při biotické imobilizaci dusíku rostliny zajišťují dostatečnou výživu tím, že translokují dusík v rámci rostlinných těl do míst spotřeby. To také přispívá k vysokému poměru C/N v asimilačních orgánech, zejména právě jehličnanů s nepříznivými humusovými formami. Zároveň ale nedochází k vyplavování dusíku z ekosystému, neboť tento je bezprostředně po uvolnění z biomasy opět fixován.

Tab. 12—2: Poměr C/N v různých materiálech a v různých typech suchozemského ekosystému. Upraveno podle White 2006.

Typ organické hmoty	Rozmezí hodnot
Zelenina	15-25
Obiloviny	40-120
Tropické druhy	27-32
Druhy mírného pásu (JM, JS, LP, DB, BR)	25-44
BO	cca 70-90
Statková hnojiva	cca 20
Lesní půda	11-44
Pastviny	11-12
Zemědělská půda	8-10

12.4 Charakteristika dalších makroživin (Mg, P, S, Ca, K)

HOŘČÍK

V půdě je draslík přítomný zejména jako výměnný, navázaný na humuso-jílovém sorpčním komplexu, odkud je rostlinami z půdy odnímán. „Doplňování“ do půdy probíhá prostřednictvím zvětrávacích procesů, zejména z dolomitu, serpentinu, amfibolu a dalších bazických a ultrabazických hornin obsahujících primární Mg-Fe silikáty a sekundární Mg silikáty. Podobně jako vápník, hořčík je významný jako koagulát pro tvorbu půdní struktury. Zpravidla je hořčík obsažen v půdě v menší míře než vápník: Mg na sorpčním komplexu zaujímá 5-20 %, zatímco Ca cca 69-90 %, krom půd vytvořených na hadcových substrátech, kde je hořčík obsažen v 3-9x vyšších koncentracích než vápník. V takových případech nastává porucha výživy rostlin vlivem nedostatku vápníku a toxicity hořčíku.

Hořčík je významnou součástí chlorofylu. Je tak nezbytný pro průběh fotosyntézy, ale také pro syntézu olejů a pro aktivaci enzymů účastnících se na metabolických procesech. Hraje roli v přijímání energie a tvorbě rostlinného těla. Je také důležitý pro regulaci a udržování turgoru, pro funkci stomat, podobně jako vápník a draslík. Také aktivuje ATPázy – enzymy, které se podílejí na přenosu fosforylových skupin.

Na rozdíl od vápníku, hořčík migruje v rostlině do mladších orgánů ze starších, na kterých se také nejprve projevuje karence – narušení výživy (viz BOX 13—2).

FOSFOR

Fosfor je nezbytný makrobiogenní prvek. Jeho obsah v půdě je poměrně nízký (0,0+-0,15 %) a vytváří často sloučeniny s vodíkem za vzniku kyseliny trihydrogenfosforečné (H_3PO_4) a následně fosforečnanů (např. $Ca_3(PO_4)_2$ – přírodní fosforečné minerály jako apatit, podolit nebo vivianit $Fe_3(PO_4)_2$). Atomy fosforu jsou v půdě vždy v oxidovaném stavu a nepodléhají oxidaci ani redukci, jako např. N nebo S.

Fosfor je významnou součástí DNA a tedy se podílí na stavbě genomu, dále ATP, čímž je klíčovým zdrojem energie a také je stavební součástí ribulosa-1,5-bifosfátu (Rbu-1,5-P2), molekuly nezbytné pro průběh první fáze fotosyntézy. Je také zastoupen ve fosfolipidech, které hrají významnou roli v transportu živin přes buněčnou stěnu. Fosfor je významný prvek pro fruktifikaci.

Běžné koncentrace fosforu se pohybují u listnáčů v hodnotách cca 15 nižších než hodnoty dusíku (1,3-1,5 g/kg sušiny), u jehličnanů je obsah P oproti N nižší cca 10x (1,3-1,6 g/kg sušiny).

SÍRA

Navzdory své neblahé historii zejména 2. poloviny 20. století spojené s průmyslovými exhalacemi a rozsáhlými imisemi je třeba tomuto prvku věnovat vyšší pozornost, a to právě z opačného důvodu, než tomu bylo před odsířením zdrojů atmosférického znečištění.

Celkový obsah síry v půdách značně kolísá, a to od 0,01 do 0,5 % (méně v písčitých půdách, nadlimitně v organických půdách, v půdách humidních oblastí cca 0,02-2 %). Ve vyvěřelých horninách je síra obsažena v podílu 0,02-0,3 % (více v bazických, kde je zejména ve formě sulfidů Fe, Zn, Cu a Ni). **Anorganická síra** se v půdě vyskytuje zejména ve formě solí a iontů. Sulfidy zvětrávají na sírany, které tvoří zejména sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), v anaerobních podmínkách pak sulfidy (FeS , FeS_2). Podíl síranů na celkovém obsahu síry v půdě činí cca 10-15 %. Sírany jsou obsaženy v půdě buď jako vodorozpuštěné nebo jako absorbované půdními koloidy s tím, že míra retence závisí na charakteru koloidního systému, pH, koncentraci sulfátů a obsahu dalších iontů. Sírany jsou adsorbovány hydratovanými oxidy železa a hliníku, ale také na hranách aluminosilikátů, elektrostaticky i prostřednictvím chemické sorpce. Adsorpce síranů je efektivnější se zvýšeným obsahem hliníku, proto jsou sírany obsaženy zejména v kyselých půdách (s klesající hodnotou pH a humiditou jejich podíl roste až po hodnotu pH 4, níže jsou adsorbovány hlavně do hydratovaných oxidů železa). Při vyšších hodnotách pH jsou sírany desorbovány, ve zvýšené míře mineralizují a přecházejí do půdního roztoku, odkud mohou vyplavovány, např. v důsledku vápnění.

Organická síra tvoří v půdě podíl až 95 % z celkového obsahu síry a je úzce vázána na obsah organických látek v půdě. Nachází se v rozmanitých sloučeninách, jako jsou sirné aminokyseliny, methionin, cystein, cholinsulfát, sulfolipidy, sulfonové kyseliny, sulfátované polysacharidy aj. Její přeměny jsou zajišťovány bezbarvými, purpurovými nebo zelenými sirnými bakteriemi v procesu oxidace a dále během biologické a biochemické mineralizace, kdy je síra uvolňována z těl odumřelých organismů.

Optimální bilance uhlíku, dusíku a síry:
C:N:S
78-126 : 8-13 : 0,5-1,5

Rostliny přijímají síru kořeny ve formě aniontu SO_4^{2-} . V rostlinách je síra přítomna zejména v sirnatých aminokyselinách (methionin, cystein, cystin), které se podílejí na stavbě některých enzymů nebo tripeptidu glutathionu. Ten vstupuje do acidobazických reakcí, chrání rostlinu před oxidačním stresem a podílí se na odstraňování peroxidu vodíku.

Koncentrace v rostlinných pletivech jsou přibližně stejné jako u fosforu (cca 1-1,5 g/kg sušiny). Hmotnostní podíl S/N v sirnatých proteinech je 0,068.

Síra se vyznačuje v půdě výraznou dynamikou. Největší ztráty jsou vyplavováním ve formě síranů, což značně závisí na textuře půdy nebo imobilizací půdními organismy nebo odběrem rostlinami.

Průměrné ztráty síry z půdy vyplavováním:
1-60 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$

Atmosférická depozice byla v posledních decenních takřka výhradním zdrojem síry v půdě, a to jako suchá depozice (SO_2) nebo mokrá depozice (SO_4^{2-}) (Darwinkel, Kusters 1998; Matula 1999; Preiningrová 1994; Schnug et al. 1998; Zelený, Zelená 2002). Pokles depozice síry o 21-58 % (až 88 % v letech 1986-1999) spojený s odsířením tepelných elektráren měl za následek zcela paradoxně vedle snížení kyselosti dešťů a zmírnění acidifikace půdy také deficit ve výživě sírou u kulturních plodin. V případě agrosystémů jsou tyto deficity saturovány prostřednictvím minerálních hnojiv, nicméně v lesních porostech je třeba výživě sírou věnovat zvýšenou pozornost. Riziko deficitu síry se zvyšuje se zrnitostí lehkou texturou, se zvyšujícími se srážkovými úhrny a s celkově se rozšiřujícím poměrem srážky : evapotranspirace. Tyto situace nastávají především v horských oblastech, které, jsou-li tvořeny kyselými horninami krystalinika, představují polohy s možným výskytem karence a narušením výživy.

Deficit síry (karence viz BOX 13—2) ve výživě lesních dřevin se neprojevuje zpomalením růstu, nýbrž hromaděním nesíratých aminokyselin, zejména argininu. Ten je hojně využíván foliálními houbovými patogeny (např. *Dilodia pinea*, *Dothistroma septospora*) jako zdroj potravy, podporující jejich rychlý růst. Houbový patogen je v takových případech sekundární příčinou deformace růstu a defoliace jako následek narušené výživy (Johnson 1984).

VÁPŇÍK A DRASLÍK

Jsou přítomny zejména v rozpustné formě ve vakuolách a podílejí se na regulaci osmotických a stomatárních procesů. Vápník je významnou složkou některých buněčných membrán (kalcium pektát) a stejně jako draslík a hořčík hraje významnou roli v elasticitě membrán: snižuje jejich propustnost a zpomaluje vstup draslíku, železa a těžkých kovů do buněk. Snižuje tak intoxikaci rostliny (váže a neutralizuje organické kyseliny), avšak také může bránit ve výživě některými oligoelementy kovů (Fe, Zn, Cu, Mn). Také potlačuje příjem H^+ , Mg^{2+} a NH_4^+ ; na druhou stranu stimuluje příjem NO_3^- a Cl^- . Vápník a ještě více draslík přispívají k elektroneutralitě mízy a doprovázejí nitráty až na místo, kde jsou v rostlině redukovány – v kořenech nebo v listech. V rámci těchto funkcí jsou tyto dva prvky absorbovány v přebytku, podle fyziologických potřeb rostliny. Vápník je přijímán méně než draslík, jakkoli je v půdě více obsažen.

Běžný obsah draslíku v asimilačních orgánech dosahuje 4,5-6 g/kg u jehličnanů, 8 g/kg u buku a dubu a do 20 g/kg u topolů.

V půdách má draslík podíl 0,5-3,2 %, nižší je pouze v písčích a rašelinách. Je obsažen jako nevýměnný (v silikátech aj primárních minerálech) nebo výměnný (2-7 %). Výměnně je fixován zejména na jílové minerály typu illit a vermikulit; v montmorillonitu jsou ionty draslíku za sucha stahovány mezi vrstvy krystalických mřížek jílových minerálů a tak jsou pevněji fixovány. Pro výživu je optimum 10-20 mg/l výměnného draslíku obsaženého ve výměnné formě (cca 1-10 %). Obsah draslíku (koncentrace K^+) jako jednomocného kationtu je závislá na mobilních aniontech (chemosorpce). Z toho plyne, že výživu draslíkem může výrazně ovlivnit hnojení dusičnanovými ionty, popř. koncentrace dalších aniontů (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}).

Draslík je důležitý pro dělení a růst buněk, pro fotosyntézu, podílí se na regulaci vodního režimu a také zvyšuje elasticitu buněk (zvyšuje odolnost při mrazových a jiných klimatických excesech). Stimuluje příjem PO_4^{3-} , NO_3^- a Cl^- , naopak potlačuje příjem Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} a NH_4^+ . Je důležitý pro růst a rozvoj kořenového systému.

12.5 Mikroelementy lesních půd

Pro výživu rostlin lze vyjmenovat sedm nezbytných mikroelementů (oligoelementů): železo, mangan, zinek, měď, molybden, bór, chlór. Navzdory jejich nízkému podílu v rostlinné biomase hrají klíčovou roli ve fyziologii rostlin. Vstupují do enzymatických reakcí, účastní se fotosyntézy (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo) i respirace (Cu, Fe). Železo a molybden jsou také významné pro redukcí nitrátů absorbovaných rostlinou nebo pro fixaci atmosférického dusíku. Zinek a bór jsou důležité pro rezistenci rostliny vůči patogenům, zinek se účastní na růstu rostliny, měď na tvorbě ligninu (např. u douglasky se může nedostatečná výživa mědi projevit ohýbáním kmínků nebo prýtlů k zemi vlivem nedostatečné lignifikace dřeva).

Nedostatek oligoelementů se nejvíce projevuje nejvíce na karbonátových půdách s extrémním, jednostranným chemismem. Oligoelementy jsou značně mobilní v kyselých půdách; jejich nedostatek se zde ale projevuje méně často, jakkoli se projeví v zejména případe celkově nízkého trofismu matečné horniny. Jednotlivé oligoelementy mají do jisté míry zástupnou funkci, a tak může nastat případ, kdy se i při nízkém obsahu mědi v půdě vlivem minerálně slabé horniny její karence neprojeví např. je-li její nedostatek vynahrazen přísunem bóru např. se sedimenty v sedimentační oblasti. Zároveň jsou některé oligoelementy (zejména mangan) jímány v humusových látkách v humusové formě mul. Z méně příznivých humusových forem je však mangan snadno vymýván.

13 VÝŽIVA A HNOJENÍ ROSTLIN V LESNÍM HOSPODÁŘSTVÍ

Hnojení představuje cílenou činnost prováděnou za účelem dodávání hnojivých látek a zahrnuje dva typy přístupů: (1) úpravu zásoby živin v půdě (jejich množství a poměr); (2) přímou úpravu výživy bezprostředně dřevinám pomocí aplikace živných roztoků nebo rychle působících vodorozpuštěných hnojiv na asimilační aparát (tzv. hnojení na list).

Základními metodami hnojení jsou (viz také Tab. 13—1)

- základní hnojení, kterým se upravují produkční schopnosti půdy ve smyslu působení na fyzikálně-chemické vlastnosti;
- operativní hnojení, kterým se ovlivňuje půda ve vztahu ke konkrétnímu porostu. Je tak upravován stav výživy v různém stádiu vývoje (hmotová produkce) a fyziologický (zdravotní) stav.

Jak na zemědělských, tak na lesních půdách se základní hnojení provádí při nevyhovujících půdních vlastnostech, operativní hnojení při poruchách ve výživě a regenerační hnojení při abiotických nebo biotických škodách s cílem jednorázového rychlého zlepšení stavu lesních kultur nebo porostů. Produkční hnojení se provádí výjimečně s cílem zvýšení produkce dřeva a biomasy lignikultur. V imisních polohách se provádí hnojení s cílem eliminace poruchy výživy a zdravotního stavu – provádí se odlišně v jednotlivých regionech.

Tab. 13—1: Hlavní úlohy hnojení ve vztahu k základním hnojícím metodám a cílům hnojení.

úpravy	a) poruchy ve výživě (<i>operativní</i>)
	b) nevyhovující stav půdních vlastností (<i>základní</i>)
	c) jednorázové rychlé zlepšení – biotické a abiotické škody (<i>regenerace - operativní</i>)
	d) revitalizace na imisních polohách – odlišně v jednotlivých regionech (poruchy výživy a zdravotního stavu – <i>operativní</i>)
výjimečně	e) zvýšení produkce dřeva a biomasy (produkční - <i>základní</i>) – lignikultury

Dle funkce se hnojení dělí na (a) produkční, (b) diagnostické a (c) regenerační.

Dle doby aplikace z hlediska vývojové fáze porostů se hnojení dělí na (a) hnojení lignikultur, (b) hnojení lesních kultur a (c) hnojení předmětných porostů.

Dle vegetační doby se hnojení dělí na (a) přihnojení a (b) pozdní hnojení.

Dle umístění hnojiv v rámci hnojené plochy se hnojení dělí na (a) lokální, (b) pruhové, (c) celoplošné, (d) vrstevnaté a (e) bodové.

Dle způsobu aplikace se hnojení dělí na (a) pozemní a (b) letecké.

V rámci rozpoznávání místních poměrů se pak přistupuje k vyrovnání nedostatku dané živiny (např. Mg, K atd.), posílení ekologické stability (např. dodáním dusíku do systému) nebo kompenzace kyselých depozic (vápnění, dodání bazických kationtů) – to však je v současnosti značně komplikovaný a kontroverzní úkon (viz dále).

13.1 Metody hnojení

13.1.1 Základní hnojení

Touto metodou se upravují fyzikální, chemické a s tím související biologické vlastnosti půdy. Používá se také pro nastartování regradčních a revitalizačních procesů. Před hnojením je vždy třeba provádět pedologické šetření na dané lokalitě. Základní hnojení lze rozdělit podle dílčího účelu na meliorační, udržovací, kompenzační, startovací a zásobní. Na základě výsledků šetření a účelu, za jakým je hnojení prováděno, se k hnojení přistupuje

- při zjištění nevhodných forem humusu
- při výrazném nástupu acidifikace půdy s extrémně nenasyceným sorpčním komplexem
- při výrazném ochuzení půdy o živiny

- při negativních projevech fyziologického stavu rostlin a snižování produkce.

Kritérii pro posuzování potřeby hnojení je (1) hodnota pH a s tím spojené šetření dalších fyzikálně-chemických vlastností (kationtová výměnná kapacita, bazická saturace, obsah jednotlivých bazických kationtů), (2) hloubka vrstvy nadložního surového humusu (který může hrát významnou roli v dávkování množství aplikovaných hnojiv, neboť se vyznačuje velikou sorpční kapacitou schopnou zamezit sestupu živin z hnojiva do kořenových vrstev), (3) sklon svahu, který představuje možná rizika spojená s povrchovým splachem hnojiva z meliorované lokality.

Hnojiva se používají buď jako dlouhodobě působící vápenatá nebo hořečnatá hnojiva, u kterých se upřednostňují bazické moučky. Dále se pro základní hnojení používají fosforečná hnojiva.

Vápenatá hnojiva se aplikují v množství 400-1600 kg č.ž. (čisté živiny) Ca na 1 ha (cca 1,2-4,8 t vápence), výjimečně o 25-30 % víc, max. však 2000 kg na 1 ha. V bukových a přehoustlých smrkových porostech se dávky zvyšují o 25-35 % (max. 2000 kg); na jílovitých půdách o 10-15 %.

Fosforečná hnojiva se aplikují v množství 40-80 kg č.ž. P-ha⁻¹, nejčastěji s cílem aktivace půdní mikroflóry jako regradacní proces.

Upřednostňované formy hnojiv:	
Ca	jemně mleté vápence
Mg, K	bazické silikátové moučky
P	přírodní fosfáty (které se obtížněji vyplavují), jako Thomasova moučka

Obecně se ke **zvyšování** hnojivých dávek o 25-30 % (max. 2000 kg č.ž./ha nebo také cca 6t vápence) přistupuje na půdách jílovitých a jílovitohlinitých substrátů, v případě, že je vytvořena více než 10-15 cm mocná vrstva surového humusu, zpravidla v chladném klimatu horských oblastí a v případě přehoustlých smrkových porostů při plánovaném převodu na bukové hospodářství.

Ke **snižování** hnojivých dávek o 25-30 % lze přistoupit v případě prosvětlených a prořezujících se porostů, v porostech před pěstebními zásahy (prořezávky, probírky), při mechanickém zapracování hnojiva do půdy a u kultur a nárostů bez souvislého zápoje. U kultur a nárostů bez zapojení se od vápnění upouští úplně.

BOX 13—1: Vybrané principy plánování a projektování hnojení

Box 13-1

Plánování a projektování hnojení:

- Karbonátové i silikátové moučky: v kterékoli roční době; z aspektu ochrany přírody a turistiky v předjaří a na podzim.
- V mýtních porostech: 5 – 10 let před započatím obnovy, za nepříznivých klimatických podmínek 20 let před obnovou.
- Pro zmlazování: jen tehdy, když nedochází při prosvětlení k mineralizaci humusových a organických látek.
- Při slabé vrstvě surového humusu (5 cm) se od vápnění u mýtních porostů upouští, vápní se až tyčkoviny následné generace.
- Holiny nevápnit z důvodu zahuštění a ztráty humusu a živin.
- Silikátové moučky: lze aplikovat téměř na všech stanovištích, ale vyšší dávky, nedochází k rizikovému vyplavování N.

Z hlediska meliorace lesních půd degradace půdy znamená degradaci látkového koloběhu a tím degradaci přeměn organické hmoty. Meliorační opatření mají dopad v uvolnění tzv. vázaných procesů, které jsou procesy přeměn látek a energií, jejichž tok se díky melioračním opatřením obnovuje. Meliorační opatření znamenají počáteční impuls regeneračních procesů stanoviště a v návaznosti na to také rostlin, resp. lesních dřevin. V rámci chemické a fyzikálně-chemické meliorace zaujímá zvláštní postavení dusík, na jehož obsah a formy je třeba klást zřetel: hnojení dusíkatými hnojivy a doplňování dusíku do systému má význam až po doplnění živin jako vápník, hořčík nebo fosfor.

Každé hnojení by mělo mít vazbu na pěstební opatření, které představuje právě obnovení a uzavření koloběhů látek. Vždy je tak třeba mít jasný provozní a pěstební cíl a v návaznosti na to také ujasněný meliorační postup a pěstební přístupy v porostech rostoucích již v regradovaných podmínkách (do věku 20-40 let). Má-li být meliorace účinná, měla by zahrnovat jak v rámci šetření, tak v rámci následných konkrétních úkonů melioraci chemickou (dodání hnojivých látek a úprava chemismu, doplnění chybějících živin), mechanickou (zpracování látek do systému – v tomto případě do půdy) a biologickou (vhodná volba dřevinné skladby).

13.1.2 Operativní hnojení, karence

Znamená přímé ovlivnění stavu a podmínek výživy rostlin. Provádí se zejména při akutním nedostatku živin, při zhoršeném zdravotním stavu, který se projevuje na fyziologii dřevin, v obsahu živin v asimilačním aparátu a karenčními jevy (viz dále) a jako následek imisí.

Diagnostickými metodami pro zjištění potřeby, míry a formy hnojení jsou (a) vizuální symptomy (růst, morfologie, karenční jevy), (b) listové analýzy, (c) doplňující analýzy (fyzikální analýzy, biologické testy, doplňující chemické testy).

BOX 13—2: Karenční jevy (změny na asimilačním aparátu při výrazném nedostatku živin)

Box

Dusík (N)

Celoplošná změna světle zelené, žlutozelené zabarvení na celé listové ploše rovnoměrně bez ostrých přechodů listy i jehlice zmenšené, celkové zpomalení růstu; naopak nadbytek dusíku způsobuje bujný růst, tmavě zelené zbarvení v důsledku zvýšení množství chlorofylu a riziko nedostatečného vyžrání rostlinné hmoty před začátkem zimního období.

Fosfor (P)

Celoplošná změna, nejprve nestandardní ztmavnutí listů, později zbarvení do šedozelena, při postupující karenci jsou listy načervenalé, fialově červené skvrny na listech, výraznější na okrajích listové čepele, opad jehlic z koncových částí výhonů.

Draslík (K)

Změna v části listu (jehlice) žluté i hnědé zabarvení na koncích jehlic nebo okrajích listů – zavinuté později hnědnou a ostře přecházejí do žluté a zelené. Karenci draslíkem je obtížné rozeznat od karence hořčíkem; pouze u smrku při deficitu hořčíku zůstává letošní ročník jehličí zelený, zatímco u draslíku žloutnou všechny ročníky.

Vápník (Ca)

Karence se projevuje pouze při extrémním deficitu, při obsahu pod 1 g/kg, a to prosycháním vyhonů a snížením exsudace pryskyřice. Obsah Ca v sušině biomasy nižší než 2,5 g/kg značí nedostatek asimilovatelného vápníku v půdě a možnou kořenovou disfunkci vlivem vzestupu následného obsahu hliníku.

Hořčík (Mg)

- *nerovnoměrné žloutnutí*
- projevy nejprve na starších orgánech
- jehličí – nažloutlé jehličí u starších ročníků (3. – 4.), především konce jehlic, mladé ročníky – zelené
- listy – zažloutlé mezi nervaturou, později hnědnou a tvoří se sklerózy
- jednoděložné – žluté pruhování
- borovice - pouze špičky jehlic – žluté s přechodem do oranžové

Síra (S)

Nedostatek síry vyvolává enzymatické reakce, zejména syntézu chlorofylu. Karenci se projevuje podobně jako u dusíku: žloutnutí listů.

(Posouzení chemické: listová analýza – vycházíme z limitních a karenčních hodnot.)

Tab. 13—2: Optimální obsah živin v asimilačním aparátu zjištěný z listových analýz.

dřevina		%					(mg·kg ⁻¹)
		N	P	K	Ca	Mg	Mn
smrk	optimum	1,3 – 1,7	0,13 – 0,25	0,5 – 1,2	0,3 – 0,8	0,08 – 0,3	50 – 500
	karenční	1,0	0,1	0,2	0,05	0,06	30
buk	optimum	1,9 – 2,5	0,15 – 0,30	1,0 – 1,5	0,3 – 1,5	0,15 – 0,30	30 – 100
	karenční	1,1	0,1	0,4	0,05	0,08 (0,1)	10
borovice		1,4 – 1,7	0,14 – 0,30	0,4 – 0,8	0,25 – 0,6	0,10 – 0,20	50 – 500
modřín		1,6 – 2,3	0,15 – 0,30	0,5 – 1,1	0,6 – 0,9	0,12 – 0,30	35 – 200
jedle		1,3 – 1,8	0,13 – 0,35	0,5 – 1,1	0,4 – 1,2	0,15 – 0,40	50 – 500
douglaska		1,1 – 1,7	0,12 – 0,30	0,6 – 1,1	0,2 – 0,6	0,10 – 0,25	50 – 500
tis		1,6 – 2,5	0,14 – 0,25	0,9 – 2,0	0,25 – 1,0	0,10 , 0,25	40 – 500
dub		2,0 – 3,0	0,15 – 0,30	1,0 – 1,5	0,30 – 1,5	0,15 – 0,30	35 – 100
javor		1,7 – 2,2	0,15 – 0,25	1,0 – 1,5	0,3 – 1,5	0,15 – 0,30	30 – 100
bříza		2,5 – 4,0	0,15 – 0,30	1,0 – 1,5	0,3 – 1,5	0,15 – 0,3	30 – 100
jasan		1,7 – 2,2	0,15 – 0,30	1,1 – 1,5	0,3 – 1,5	0,2 – 0,4	30 – 100
lípa		2,3 – 2,8	0,15 – 0,30	1,0 – 1,5	0,2 – 1,2	0,15 – 0,30	35 – 100
topol		1,8 – 2,5	0,18 – 0,30	1,2 – 1,8	0,3 – 1,5	0,2 – 0,3	35 – 100

BOX 13—3: Vybrané aspekty stanovení potřeby hnojení.

(viz také BOX 13—4)

Jak bylo již řečeno výše, potřeby hnojení a s tím spojené navazující úkony (aplikace hnojiv, dávkování atd.) je třeba provádět na základě zjištěných aktuálních půdních a rostlinno-fyziologických parametrů, k čemuž se provádějí rozbory vzorků půdy nebo částí rostlin.

Pro **analýzu minerální půdy** lze použít celou řadu metodických postupů. V principu se vždy jedná o využití extrakčních roztoků, které mineralizují daný půdní vzorek. Tím dojde k uvolnění stanovovaných prvků/živin/iontů, jejichž koncentrace v extrakčním roztoku je zjišťována titračně, spektrometricky, plamennou absorpční spektroskopií (FAAS – Flame Atomic Absorption Spectroscopy) aj. Jako extrakční roztok se používá např. 1 % kyselina citronová o pH 2,2 nebo roztoky podle Mehlicha (Zbírál 2002) (Mehlich II a Mehlich III).

Pro **analýzu organických substrátů** se používá mineralizace na suché cestě. Takto se stanovují jednotlivé prvky (K, Mg, Ca, P) tzv. uzančnými metodami po vyloučení zpopelněného materiálu při 450°C pomocí HCl o koncentraci 1 mol.l⁻¹ s detekcí AAS. Dusík se stanoví z eluátu coulometricky, kdy se mineralizací převede na amonné ionty, které jsou titrovány bromanem.

Dále se provádějí **analýzy fyzikálních vlastností**, jako pórovitost, objemová hmotnost rekukovaná, minimální vzdušná kapacita, poměr kapilárních a nekapilárních pórů a další vlastnosti spojené s šetřením vodního a vzdušného režimu půdy. Tyto analýzy se zpravidla neprovádějí ambulantně v terénu, ale s použitím fyzikálních válečků nebo pokročilých analytických metod.

Operativní hnojení se provádí prakticky ve všech věkových stádiích porostů a to (1) plošně pro mlaziny, střední a starší porosty s normálním vývojem; (2) lokálně u mladých nebo starých a prořezávaných porostů nebo (3) bodově, a to více méně ojediněle, převážně v arboretech.

Aplikaci je nejvhodnější provádět na jaře, kdy je u rostlin nejefektivnější příjem. Hnojiva N, K a K+Mg je vhodné aplikovat před započítáním aktivity kořenů. Dusíkatá hnojiva je třeba aplikovat nepříliš pozdě v rámci vegetační sezóny: při aplikaci cca po přelomu poloviny července vzniká riziko nedostatečného vyzrání dřeva a tím poškození rostlinných pletiv mrazem. Vápník a fosforečnany lze aplikovat po celý rok.

13.2 Úprava zásob živin v půdě

Úprava zásob živin v půdě se provádí v případě zhoršené výživy zjištěné prostřednictvím výše zmíněných ukazatelů karence, listových analýz nebo deficitu živin v půdě. Samotnému přihnojování musí vždy předcházet komplexní rozbor půdy, který pomůže odhalit bilanci zásoby živin v půdě, ale zpravidla také rozbor asimilačního aparátu, neboť to, že je jistá živina v půdě obsažena v dostatečném množství, ještě nemusí znamenat, že je rostlinou přijímána. Živiny mohou být v příjmu blokovány např. svým antagonismem, specifiky půdního prostředí, nebo také imobilizovány půdní mikroflórou.

Vzorky pro listové analýzy by měly být odebírány v době vegetačního klidu (cca říjen až únor), u listnáčů a modřínů cca od konce července do konce srpna, v závislosti na aktuálním průběhu počasí, vždy však před nástupem senescence, která se projevuje barevnými změnami. Vzorky se odebírají z horní části koruny, např. u smrku ze zóny mezi 3.-5. horním přeslenem, vždy z většího počtu jedinců. Pro zjištění stavu „letošní“ výživy se odebírají koncové prýty. V ideálním případě se odebírají zvlášť vzorky z jedinců vyznačujících se blízkými karencními jevy. Listové analýzy se provádějí laboratorně, kdy je stanoven celkový obsah živin v jehlicích nebo listech po předchozí mineralizaci sušiny koncentrovanou kyselinou sírovou, vyhodnocení lze provést podle Tab. 13—2.

Půdní analýzy by se pak měly provádět na vzorcích odebraných z kořenové vrstvy, ať už sadebního materiálu v lesních školkách, nebo jedinců kultur a nárostů v lesních porostech. Přitom je třeba dbát na to, že půda se skládá z minerální a z organické části. A právě organickou složku půdy (humus) je třeba při stanovení živin zohlednit, jsou-li živiny stanoveny ve výluhu Mehlich II. Při klasifikaci obsahu živin např. podle

Při plánování hnojení je třeba pamatovat na to, že zde jsou uváděny hodnoty obsahu čisté živiny, zatímco na expedičních obalech hnojiv je množství vyjadřováno zpravidla v oxidech (P_2O_5 , MgO , K_2O apod.), což je nutné zohlednit!

Tab. 13—4 je pak nutné provést předchozí zohlednění obsahu humusu (BOX 13—4).

Při stanovení obsahu přístupných živin je nutné dbát na obsah organické hmoty ve vzorku. U půd s nízkým podílem organických látek se analýzy provádějí ve výluhu Mehlich II. a Mehlich III. (Zbíral 2002). Obsah humusu pro analýzu pomocí metody Mehlich II. a Mehlich III. by neměl v půdním vzorku přesáhnout 12,5 (max. 15) hmotnostních procent (%_{hm.}), což představuje 50-55 objemových procent (%_{obj.}) humusu v půdě. Za vyššího obsahu humusu je třeba použít jiné analytické postupy (např. podle Gölera), nebo použít pro **zohlednění obsahu organické hmoty**, aby bylo možné použít klasifikační tabulky dle Mehlicha II (Vavříček 2011):

$$Sž = \frac{\bar{Z}(MII.)}{\frac{1}{(100 - Shum)/Shum} \times 7}$$

Tento lze v tabulkových kalkulátorech v jednořádkovém zápise napsat následujícím způsobem
 =Ž(MII.)/(1/((100-Shum.)/Shum.)*7)

kde

Sž je obsah dané živiny v přepočtu z Mehlicha II pro hodnocení dle klasifikačních tabulek (zpravidla v mg·kg⁻¹);

Ž(MII.) je obsah dané živiny zjištěný z extraktu Mehlich II. (zpravidla v mg·kg⁻¹);

Shum je obsah humusu zjištěný dle vzorce Shum = Cox·1,724 [%], kde Cox (nebo také TOC – total organic carbon) je obsah oxidovatelného uhlíku, 1,724 je empirická konstanta.

7 je empirický koeficient zohledňující rozdíl mezi objemovými a hmotnostními procenty humusové a minerální části půdy.

pro přepočet obsahu humusu je nutné použít v případě obsahu humusu větším než 12,5 %_{hm.} (cca 7,25 %_{hm.} Cox). Při nižším obsahu se bere obsah živin zjištěný laboratorně jako konečný, bez přepočtu. Použitím vzorce pro přepočetak lze získat hodnoty obsahu živin odpovídající složení půdy, neboť humusové látky jsou jednak natolik sorpčně účinné a jednak se vyznačují natolik nižší měrnou i objemovou hmotností ve srovnání s minerální půdou, že v případě nepoužití tohoto vztahu lze získat zcela zkreslené výsledky!

Vztah objemového a hmotnostního podílu humusu a minerálu v půdě

Ke vztahu hmotnostních a objemových poměrů humusové a minerální části půdy je třeba zmínit ještě několik souvislostí:

Vycházíme z premisy, že humus má cca 7x nižší hmotnost, nežli stejný objem minerální půdy, neboli minerální půda o stejném objemu je 7x těžší nežli humus.

Neboli je-li objemový poměr humus:minerál 1:1, potom hmotnostní poměr je u stejného půdního vzorku 1:7. V tom případě obsahuje půdní vzorek 50 %_{obj.} humusu a 50 %_{obj.} minerálu, avšak 12,5 %_{hm.} humusu a 87,5 %_{hm.} minerálu, což plyne ze vztahu vycházejícího z poměru 1:7, kdy 1+7=8, odtud 100/8=12,5 a odtud 1×12,5=12,5 (%_{hm.} humusu) a 7×12,5=87,5 (%_{hm.} minerálu).

Analogický příklad:

Laboratorně zjištěná hodnota Cox = 10,62 %_{hm.}

Obsah humusu je 10,62×1,724 = 18,3 %_{hm.} a obsah minerálu je tedy 100-18,3=81,7 %_{hm.}

Procentický podíl humus:minerál je 18,3:81,7, neboli 1:4,46

Za předpokladu, že humus je 7x „lehčí“ než minerál (stejná hmotnost humusu má 7x větší objem), objemový poměr humus:minerál je 7:4,46, neboli 1:0,64.

Procentický obsah každé z frakcí potom bude 60,98 %_{obj.} humusu (100/(1+0,64)×1) a 39,02 %_{obj.} minerálu (100/(1+0,64)×0,64).

Při použití odpovídající analytické metody Göhler se využívá kyselého charakteru extrakčního roztoku, který se blíží aciditě kořenových exsudátů (pH 3,6). Je zde patřičně nastaven poměr směsi octanu sodného CH₃COONa a koncentrované kyseliny octové CH₃COOH s tím, že směs je dána poměrem v roztoku, kde v 10 l směsi je 67 g CH₃COONa a 300 ml CH₃COOH. Směs vytěsňuje všechny živinové kationty (K, Mg, Ca, Na), včetně aniontu fosforu (P). Koncentrace přístupných živin v organických půdách a substrátech dosahuje jiných hodnot, které jsou také klasifikovány podle vlastních kritérií (Tab. 13—5).

13.2.1 Normativy pro obsahy živin v půdě

Dosycovací dávka čisté živiny v půdě (M č.ž.) se stanoví podle vzorce

$$M = O \cdot (b-a) \cdot 10^{-6} \quad [\text{kg č.ž./ha}]$$

kde

O je hmotnost ornice (objemová hmotnost redukována) na 1 ha [kg];

b je požadované množství živiny (Tab. 13—2) [mg·kg⁻¹];

a je aktuální obsah živin (zjištěný) [mg·kg⁻¹];

10⁻⁶ je koeficient přepočtu (1mg = 10⁻⁶kg).

Množství aplikovaného hnojiva (hnojivá dávka) se pak vyjádří podle vzorce

$$H = (M \cdot 100) / z$$

kde

M je potřebná dávka živiny [kg·ha⁻¹] v oxidech;

z je procentický podíl živiny v hnojivu.

Tab. 13—3: Maximální a minimální dávky hnojiv: dávkování hnojiv by se mělo pohybovat v intervalu efektivních hnojivých dávek.

živina	Maximální dávky hnojiv [kg č.ž.·ha ⁻¹]	Nejnižší jednorázové dávky [kg č.ž.·ha ⁻¹]
N	100 – 150	
P	150 – 180	10
K	250	25
Mg	120	10

Při plánování hnojení je třeba pamatovat na to, že zde jsou uváděny hodnoty obsahu čisté živiny, zatímco na expedičních obalech hnojivy je množství vyjadřováno zpravidla v oxidech (P₂O₅, MgO, K₂O apod.), což je nutné zohlednit!

Tab. 13—4: Hodnocení obsahu přístupných živin v lesní půdě a v edatopu přirozeného stanoviště (Nt v %, P, K Ca, Mg v mg živiny/kg zeminy).

Obsah živin	Nt	Extrakt Mehlich II			
		P	K	Ca	Mg
velmi nízký	pod 0,05	pod 20	pod 20	pod 150	pod 20
nízký	0,05-0,12	20-50	20-50	150-300	20-40
střední	0,12-0,25	50-80	50-90	300-500	40-60
vysoký	0,25-0,40	80-120	90-140	500-800	60-80
velmi vysoký	nad 40	nad 120	nad 140	nad 800	nad 80

Tab. 13—5: Hodnocení obsahu přístupných živin v půdách s vysokým obsahem organických látek a v organických substrátech na přirozených stanovištích i v lesních školkách (zjištění obsahu přístupných živin metodou Göhler).

Obsah živin	P	K	Mg	Ca
	mg·kg ⁻¹			
extrémně nízký	≤ 5	≤ 100	≤ 60	≤ 50
nízký	5-10	100-250	60-100	50-150
střední	10-30	250-400	100-400	150-500
vysoký	30-130	400-650	400-900	500-1000
velmi vysoký	≥ 130	≥ 650	≥ 900	≥ 1000

Tab. 13—6: Hodnocení obsahu přístupných živin dle půdního druhu pro produkce sadebního materiálu v lesních školkách [mg·kg⁻¹].

Obsah živin	Fosfor (P) mg·kg ⁻¹			Draslík (K) mg·kg ⁻¹			Hořčík (Mg) mg·kg ⁻¹		
	Lehká	Střední	Těžká	Lehká	Střední	Těžká	Lehká	Střední	Těžká
velmi nízký	do 35	od 25	od 15	do 40	do 50	do 60	do 35	do 55	do 70
nízký	35-50	25-40	15-30	40-60	50-80	60-100	35-55	55-80	70-100
střední	51-70	41-60	31-50	61-100	81-120	101-200	56-90	81-120	101-150
dobrý	nad 70	nad 60	nad 50	nad 100	nad 120	nad 200	nad 90	nad 120	nad 150

Tab. 13—7: Hodnocení obsahu přístupných živin v orních zemědělských půd (důležité srovnání s lesními půdami i půdami lesních školek).

Obsah živin	Fosfor (P) mg·kg ⁻¹			Draslík (K) mg·kg ⁻¹			Hořčík (Mg) mg·kg ⁻¹		
	Lehká	Střední	Těžká	Lehká	Střední	Těžká	Lehká	Střední	Těžká
velmi nízký	do 40	do 30	do 20	do 50	do 80	do 110	do 40	do 60	do 80
nízký	41-60	31-50	21-40	50-90	81-130	111-170	41-70	61-100	81-130
střední	61-130	51-100	41-90	91-230	131-300	171-400	71-180	101-230	131-310
dobrý	131-160	101-130	91-120	231-350	301-400	400-550	181-270	231-310	311-430

Tab. 13—8: Klasifikační kritéria pro půdní reakci aktivní a výměnnou.

půda	Půdní reakce (pH)	
	aktivní (pH/H ₂ O)	výměnná [pH/KCl]
extrémně kyselá	pod 3,5	pod 3,0
silně kyselá	3,5-4,5	3,0 - 4,0
středně kyselá	4,5-5,5	4,0 - 5,0
mírně kyselá	5,5-6,5	5,0 - 6,0
neutrální	6,5-7,2	6,0 - 7,0
mírně alkalická	7,2-8,0	7,0 - 7,5
středně alkalická	8,0-8,5	7,5 - 8,0
silně alkalická	8,5-9,0	8,0 – 8,5
velmi silně alkalická	nad 9,0	nad 8,5

Tab. 13—9: Kritéria pro hodnocení sorpčních poměrů v lesní půdě: (a) sorpční nasycení (bazická saturace); (b) kationtová výměnná kapacita (maximální sorpční kapacita stanovená dle Kappena).

a) Stupeň sorpčního nasycení		b) Maximální sorpční kapacita (T) (Kappen)	
Hodnocení	V [%]	Hodnocení	T [mmol·kg ⁻¹]
extrémně nenasycená	0-10	velmi nízká	pod 80
silně nenasycená	10-25	nízká	80-130
slabě nenasycená	25-50	nižší střední	130-180
slabě nasycená	50-65	vyšší střední	180-250
nasycená	65-80	vysoká	250-300
plně sorpčně nasycená	80-100	velmi vysoká	nad 300

Tab. 13—10: Kritéria pro hodnocení obsahu organické hmoty v lesních půdách: hodnocení obsahu humusových látek (Hox) a obsahu oxidovatelného uhlíku (Cox).

Hodnocení	Obsah humusu (Hox)	
	Hox [%]	Cox [%]
velmi nízký (slabě humózní)	do 1,7	do 1,0
mírný (mírně humózní)	1,7-3,0	1,0-1,7
střední (středně humózní)	3,0-4,5	1,7-2,6
dobrý (humózní)	4,5-7,0	2,6-4,0
vysoký (silně humózní)	7,0-10,0	4,0-5,8
velmi vysoký (velmi silně humózní)	10,0-12,5	5,8-7,3
humusové půdy (rašeliny)	12,5-25	7,3 – 14,5
rašeliny	nad 25	nad 14,5

Tab. 13—11: Hodnoty spotřeby živin pro vybrané dřeviny (pro 1 strom za 1 rok) při různém stádiu vývoje. Při hnojení starších porostů je nutné uvažovat se ztrátami živin v jednotlivých ekosystémových složkách a adekvátně zvyšovat hnojivé dávky.

dřevina	věk	N	P	K	Ca	Mg
		g · strom ⁻¹ · rok ⁻¹				
sm	4	0,23	0,03	0,09	0,09	0,01
	70	23	6	8	45	8
md	4	0,45	0,06	0,17	0,18	0,05
	70	35	8	9	85	15
jd	4	0,11	0,02	0,05	0,08	0,01
	70	14	6	9	75	5
bk	4	0,50	0,01	0,24	0,52	0,07
	70	45	5,2	11,3	62,2	8,0
db	4	0,51	0,09	0,24	0,44	0,06
	70	30	12,2	21,9	127	4,4
js	4	0,95	0,14	0,73	0,57	0,10
	70	83	5,0	12,3	89,0	40,0
ol	4	0,40	0,26	0,75	0,96	0,42
	70	34,0	2,0	3,0	42,0	18,0
jm	4	1,60	0,23	0,55	0,85	0,60
	70	95,0	9,0	9,5	110	80

13.2.2 Plánování hnojení (používané v zemědělství)

Plánování hnojení se používá odděleně pro travní porosty, zeleniny, chmel, ovocné sady, révy.

Normativ představuje průměrnou spotřebu čistých živin v kg na výnos 1 t hlavního produktu. Hnojení se provádí dle normativu korigovaného podle půdně-klimatických charakteristik. U *velmi nízké* zásoby živin se upravuje (navyšuje) dávka normativu o 50 % ze základního normativu. U *nízké* zásoby živin se upravuje (navyšuje) dávka normativu o 25 % ze základního normativu. U *vyhovující a dobré* zásoby se normativ neupravuje.

Základní postup při zemědělském hnojení zahrnuje

1. Přípravné práce,
2. Plán aplikace organických hnojiv (normativních produktů jako kejda nebo chlévská mrva),
3. Plán úpravy půdní reakce,
4. Plán hnojení jednotlivými živinami.

Stanovištně-půdní charakteristiky (šetření v rámci přípravných prací) zahrnují půdní druh: L (lehké půdy), S (střední půdy), T (těžké půdy), klimatické charakteristiky a obsah živin dle výše uvedených kritérií.

Složení normovaných organických hnojiv [%]:

Hnojivo/živina	N	P/P ₂ O ₅	K/K ₂ O
hnůj	4,2	1,01/2,03	5,0/6,0
kejda	2,8	0,57/1,3	3,1/3,7

Z hlediska ovlivnění povrchových a spodních vod je podstatné, že fosforečná a dusíkatá hnojiva mohou při větším splachu např. v důsledku přívalových dešťů způsobit výraznou eutrofizaci vodotečí.

13.3 Typy hnojiv

13.3.1 Průmyslová hnojiva a jejich použití

Tab. 13—12: Výčet základních speciálních hnojiv současnosti, jejich chemických parametrů (obsahu jednotlivých živin), způsobu a termínu aplikace.

hnojivo	živina [mg·kg ⁻¹]					určení pro aplikaci	termín aplikace
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	suma		
Silvamix	10,3	16,4	6,3	5,0	38,0	udržovací	průběžně
Silvamix MG	9,0	13,0	6,0	17,0	45,0	bodová úprava Mg	průběžně
Silvamix Forte	17,5	17,5	10,5	9,0	54,5	start, zákl. hnojení	do pol.VII
Silvamix A	18,0	17,5	4,0	13,0	52,5	úprava Mg, start	do pol. VII
Silvamix R	10,0	6,0	16,0	6,0	38,0	kořeny, vyzrávání	VI-VIII
Silvamix J	4,5	5,5	20,0	5,5	35,5	kořeny, vyzrávání	VII-IX
Silvamix W	10,0	13,0	16,0	14,5	53,5	bodová úprava	průběžně
Kristalon-Spec.	18,0	18,0	18,0	3,0	54,0	proti chloróze	začátek
Kristalon-Modrý	19,0	6,0	20,0	3,0	48,0	celkový vývoj	do VII.vč
Kristalon-Oranž.	6,0	12,0	36,0	3,0	57,0	kořeny, vyzrávání	VIII-IX
Kristalon-Žlutý	13,0	40,0	13,0	-	66,0	fruktifikace	dle potřeb
PG Mix	12-15	10-16	18-24	1-3	Mn, Cu	zákl.hnoj.substrátů	před výsad.
Preform I	11,0	10,0	11,5	2,0	Mn, Cu	bodové přihnoj. podzim	jaro, podzim
Preform II	11,0	10,0	7,0	7,0	B, Mn	listnaté dřeviny	jaro, podzim
Preform Z	11,0	10,0	7,0	7,0	B, Mn	obalovaná sadba	začátek

Strom Konifer-j.	19,3	3,5	5,6	5,1	1,3 % Stimul.	obaly, bodově	začátek
Strom Folixyl-l.	11,0	3,5	5,6	5,1	1,3 % Stimul.	obaly, bodově	začátek

Tab. 13—13 až Tab. 13—19 uvádějí klasická hnojiva využívaná v lesním hospodářství, která jsou v současné době registrovaná v seznamu používaných hnojiv. V zápatí jednotlivých tabulek pro jednotlivé živiny jsou uvedeny základní poznámky ke způsobu aplikace.

Tab. 13—13: Vlastnosti a podmínky aplikace dusíkatých hnojiv.

(A) DUSÍKATÁ							
Hnojivo	N %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	MgO %	CaO %	Vlastnosti	Použití
Dusičnan amonný	34,0	-	-	-	-	dvě formy dusíku – ½ nitrátový, ½ amonný; hygroskopický, fyziologicky neutrální, velmi dobře rozpustný	rychlé dodávky dusíku
Ledek vápenatý (LV)	15,2 NO ₃ ⁻	-	-	-	28,0	granulovaný, dobře rozpustný, není nutné zapravovat – před začátkem vegetace, hnojení i na list	půdy lehké, kyselé
Ledek amonný s vápencem (LAV)	27,0 NH ₃ + NO ₃ ⁻	-	-	-	18,7 - CaCO ₃ lépe 20 CaCO ₃	50 % nitrátová, 50 % amonná forma, nutno zapravit do půdy před i v průběhu vegetace, okamžitě působí, granulovaný, mezotrofní stanoviště	všechny druhy půd (nepatrně okyseluje)
Ledek amonný s hořčíkem amono-vápenatý	27,0 NH ₃ ⁺ NO ₃ ⁻	-	-	9,0 MgCO ₃ , t.j. MgO – 4,3 %	-	obsahuje hořčík pro okamžité působení, zapravit do půdy na začátku i v průběhu vegetace do VII., granulovaný, oligo-mezotrofní stanoviště	všechny druhy půd s nedostatkem Mg, okyseluje
Ledek vápenatohořečnatý (LAH)	13 15					5 % Mg, Ca(NO ₃) ₂ , Mg(NO ₃)	

Močovina 46 % N	CO(NH ₂) ₂				organická sloučenina s pomalu rozpustnou formou N, je intenzivně poutána humusem, i ve formě granulované je tvrdá (drahá) kerbamid-uhličitán- amoniakální N	lesní půdy, substráty pro dlouhodobé působení. Ne pro kyselé, neprovzdušněné a mírně alkalické půdy
--------------------	-----------------------------------	--	--	--	--	---

Hnojení a především dávkování N – hnojiv je značně problematické. Velmi nízké dávky v lesnictví neumožňují plný rozvoj nadzemní biomasy, na kořenový systém působí nepatrně. Vysoké dávky – půdně-ekologické riziko a luxusní výživa dusíkem vede k nevyzrání dřevní hmoty.

Hnojení dle:

- půdního druhu – písčité – rozdělení dávek s častější aplikací do VII. (lesní školky)
- dle pásma hygienické ochrany (I – III)
- dle obsahu N-min v půdě A-horizont (dobrá zásoba 20 – 25 mg.kg⁻¹, nízký - pod 8 mg.kg⁻¹)
- nelze dost dobře aplikovat na lesní půdy s vrstvou nadložního surového humusu všech forem)
- rozdělení dle výměnné půdní reakce, na kyseléjší fyziologicky neutrální a na mezotrofní fyziologicky kyselé hnojiva

Poznámky k dusíkatým hnojivům:

DAM (dusičnan amonný): výroba spočívá v neutralizaci HNO₃ plyným NH₃ → NH₄NO₃.

LV (ledek vápenatý), LA (ledek amonný), LAV (ledek amonný s vápencem) a SF (močovina s hořčíkem) jsou silně hygroskopická hnojiva, a proto se nesmí mísit. Hnojiva s amonným dusíkem uvolňují čpavek NH₃ při denitrifikaci – po kontaktu s půdou ((NH₄)₂ SO₄ + CaO = CaSO₄ + H₂O + 2NH₃).

Tab. 13–14: Vlastnosti a podmínky aplikace fosforečných hnojiv.

(B) FOSFOREČNÁ							
Hnojivo	N %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	MgO %	CaO %	Vlastnosti	Použití
Superfosfát granulovaný	2,0	19,0			20,0	obsahuje další živiny z neutralizace NH ₄ -vodou, vápencem, dále obsahuje 9,5 % S (obsah sádry až 50 %), granulovaný, rozpustný v H ₂ O	rychlé působení vodorozpustné formy
Hyperkorn +Magnezium	-	26,0	-	3,0	50,0	obsahuje mikroelementy Mn, Zn, Mo, B, z měkkých fosfátů, pozvolné uvolňování P (část rozpustná ve 2% kys. citr., vlhké půdní prostředí – rozbíjí se na prach,	kyselé a vlhké až podmáčené půdy
Camfos	-	25,0	-	13,0	35,0	speciální hnojivo používané pro doplnění hořčíku	mírně kyselé půdy s deficitem Mg
Thomasova moučka V současné době není v registru hnojiv		10-18	+	2-10	35-49	P je z 80-90 % rozpustný v 2% kys. citr., těžký tmavě šedý prášek z výroby oceli, obsahuje dále 4 % Si 5 % Mn, 5 % Fe, stopy dalších prvků, zásadité hnojivo	zásobní šírokospektrál ní hnojiv. pro velmi kyselé satan

Při rozhodování o použití hnojiva je třeba zohlednit texturu hnojiva, rozpustnost (H₂O, 2% kys. citronová H₃C₆H₅O₇·H₂O); Využití P přímo z vodorozpustných hnojiv je nízké, v lesních půdách je P saturován především z humifikované frakce nadložního surového humusu. V P-hnojivech je třeba zohlednit i množství Cd (ekologické riziko – 50 mg · kg⁻¹ hnojiva.

Podstata hnojení P:

- kyselé půdy (většina lesních půd) – nehnojit hnojivem s vodorozpustnou frakcí P
- neutrální půdy hnojit materiály s vodorozpustnou formou P
- při aplikaci P využívat současné přihnojování organickým materiálem
- nejefektivnější využití hnojiva probíhá při jeho zapravení do půdy
- při rekultivacích u N-deficitu bobovitými rostlinami (Krušné hory) je třeba dostatek P
- při vysokém obsahu CaCO₃ - retrogradace (nerozpustná sůl), podobně i v silně kyselých
- nerozpustné fosfáty omezené použití (komposty, chlévská mrvá)

Poznámky k fosforečným hnojivům:

Je-li do půdy dodávána organická hmota s nízkým obsahem P, toto má za následek rychlý nárůst mikroflóry a tím zvýšenou spotřebu fosforu pro její metabolismus. Důsledkem je dočasná imobilizace půdního fosforu.

Chemosorpce P z fosforečných hnojiv v půdě představuje proces tzv. „zvrhávání“ P a Ca do forem nepřístupných pro rostliny za vzniku fluorapatitu (Ca₃ PO₄)₂CaF₂), chlorapatitu (Ca₃ PO₄)₂CaCl₂) nebo hydroxyapatitu (Ca₃PO₄)₂Ca(OH)₂ + Ca) → (1) CaHPO₄ (hydrogenfosforečnan vápenatý – nepříliš rozpustný ve vodě) nebo (2) Ca₃(PO₄)₂ (trikalciumfolfát – rozpustný pouze při vysokém pH) nebo (3) Al(OH)₃·H₂PO₄ variscit nebo Fe(OH)₃·H₂PO₄ strengit za vzniku oxi- a hydroxifosfátů jako meziproduktů, které vznikají a krystalizují při nízkém pH.

Superfosfáty jsou hnojiva obsahující CaO s fosforečným a vodorozpustným fosforem: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaO} = 2\text{CaHPO}_4 + \text{H}_2\text{O}$. Pro výrobu superfosfátů se používá nerost (hornina) apatit nebo fosforit, a to jejich rozkladem kyselinou sírovou: 1. fáze: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4$ (kyselina fosforečná) + 2CaSO_4 (sádra) + HF; 2. fáze: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + 2 \text{HF}$. Tato reakce při výrobě trvá 4-6 týdnů a jejím cíleným produktem je dihydrogen fosforečnan vápenatý, který se jako hnojivo nazývá superfosfát. Vyrábí se jako práškový (mletý), dovážený z Afriky s obsahem 7,26 % P (16,6 % P_2O_5) nebo z Koly s obsahem 8,14 % P (18,5 % P_2O_5). V granulované formě vzniká při neutralizaci s práškovým amoniakem dihydrogenfosforečnan amonný, který má lepší vlastnosti – nespéká se a může se aplikovat současně při setí v lesních školkách $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{CaHPO}_4 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ dihydrogenfosfát amonný + 2-4 % N).

Dihydrogenfosforečnan vápenatý je rozkládán v reakci s hydrogenuhličitanem vápenatým na hydrogen fosforečnan vápenatý a kyselinu uhličitou: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 2\text{CaHPO}_4 + 2\text{H}_2\text{CO}_3$.

Hyperkorn představuje superfosfát s vyšším obsahem fosforu (jednoduchý obsahuje 28 % P_2O_5 , dvojitý obsahuje 26 % P_2O_5 + 3 % MgO, trojitý obsahuje 29 % P_2O_5 + 3 % MgO).

Tvorba produktů ve směsi močoviny a superfosfátů: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 = \text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{CHPO}_4 + \text{H}_2\text{O}$.

Při vysokém obsahu vápníku v půdě vzniká trikalcium fosfát: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + 2\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 4\text{H}_2\text{CO}_3$.

Thomasova moučka obsahuje P rozpustný v kyselině citronové. Vzniká oxidací fosforu v železných rudách a jeho vazbou na vápník ($\text{P}_2\text{O}_5 + 4 \text{CaO} \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaO}$). Rudní struska se mele a jako hnojivo obsahuje tyto živiny: 6 % P (10-18 % P_2O_5); 35-49 % CaO; 2-10 % MgO; 9 % MnO; 10-12 % Fe.

Tab. 13–15: Vlastnosti a podmínky aplikace draselných hnojiv.

(C) DRASELNÁ (v lesnictví nepoužíváme K-hnojiva chloridového typu)							
Hnojivo	N %	P_2O_5 %	K_2O %	MgO %	CaO %	Vlastnosti	Použití
Síran draselný granulovaný			50,0	3,0		Obsahuje nepatrnou příměs Cl^- , v hnojivu vysoký podíl S (18 %) jako makrobioelementu, fyziologicky kyselé hnojivo (na 100 kg hnojiva 40 kg CaO)	různé druhy půd, pozor na lehké, písčité půdy – vyplavování
Pentakali	-	-	30,0	10,0	-	90 % K je vázáno v síranové formě, s celkovým obsahem S – 18 %, granulovaný, fyziologicky kyselé hnojivo	různé druhy půd
Dřevěný popel		10-15				K je zde ve formě K_2CO_3 , produkt spalování nehroubí při těžbě, nebo využití z otopu dřevem, obsahuje další makrobioelementy	ekologicky významné hnojivo
<u>Chloridová</u> KCl 40 % (46 % Cl^-); 10 % vázaného Na KCl 50 % (47 % Cl^-); 5 % vázaného Na Kainit (10 % S, 29 % Cl, 15 % Na, 3 % Ca) <u>Síranová</u> Síran draselný (47 % N_2O , 19 % S, 2 % Cl) Reformkali Síran vápenatý (14 % S)			37 50 10 22	5 8	25	U KCl je třeba použít 28 Kg CaO na 100 kg hnojiva jako eliminaci fyziologicky kyselého hnojiva. U síranových hnojiv je třeba použít 53 Kg CaO na 100 Kg hnojiva jako eliminaci fyziologicky kyselého hnojiva K_2SO_4 . Reformkali je možné využít i při deficitu hořčíku.	nelze v lesnictví používat, ani na těžkých půdách (kornatění vlivem Na); v zeměd. při orbě, přesadbě.

Syn. „kalium“ – z arabského „alkali“ (do 19. stol. se používal pro hnojení draslíkem popel). Jako draselná hnojiva se používá také odpad ze solných dolů nebo mletí nízkoprocenních surových solí, jako sylvinit (10-18 % K) nebo karnalit. Draselná hnojiva se upravují tzv. flotací – vazba recyklovaného KCl na organické látky a na povrch jílových minerálů. Draselná hnojiva jsou dobře rozpustná ve vodě, používáme sice dražší, ale pro lesní dřeviny bezpečnější síranová hnojiva. Všechna jsou fyziologicky kyselá – eliminace CaO. Při použití Cl⁻ hnojiva bezpodmínečně zohlednit podzimní termín aplikace – rychlé vyplavení Cl⁻ v době vegetačního klidu.

Podstata hnojení K:

- na lehkých půdách pouze jednoleté dávky vodorozpustného P na začátku vegetační doby
- na těžších půdách (hlinité, jílovitohlinité), možno hnojit i na podzim se zapravením do půdy
- efektivnost se zvyšuje se současným hnojením P-hnojivem a organickým materiálem
- ve vztahu k obsahu Mg udržovat poměr zásoby K v půdě (Mg : K = 3 : 1 % KVK-chem.ekv.)

Tab. 13—16: Vlastnosti a podmínky aplikace hořečnatých hnojiv.

(D) HOŘEČNATÁ							
Hnojivo	N %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	MgO %	CaO %	Vlastnosti	Použití
Kieserit				27,0		MgSO ₄ ·H ₂ O – granulované hnojivo, dobře rozpustné ve vodě, možno přihnojovat v průběhu vegetace, možno použít i k základnímu hnojení, fyziologicky kyselé hnojivo, obsah S 21 %.	především na půdy mírně kyselé a neutrální při deficitu Mg
Síran hořečnatý (hořká sůl)				16,5		Velice čisté, hrubě práškovité hnojivo, velmi dobře rozpustné ve vodě, možné použití i pro foliální výživu (4% roztok). MgSO ₄ ·7H ₂ O, obsah S 11 %, fyziologicky kyselé.	rychlá korekce Mg deficitu
Romag				24,0	3,0	Oxidová složka hnojiva umožňuje postupné působení živiny, v podstatě emise magnezitek (Košice), na trhu nedostatek.	výborný pro lesní půdy
Dolomit - B				21,0	28,3	Mleté částice pod 0,5 mm (min 90 %), pomalu působící málo rozpustné hnojivo.	půdy s nedostatkem Mg
Vápnitý dolomit granulovaný				17,0	28,0	Granulované hořečnatovápenaté hnojivo ve formě CaCO ₃ +MgCO ₃ .	pozvolná úprava půdní reakce a Mg
Dumag	20,0 NO ₃ NH ₄			8,0		Kapalné hnojivo s možností aplikace a zapravení do půdy, Mg(NO ₃) ₂ , NH ₄ NO ₃ , Mg vázaný na nitrátovou složku – efektivnější využití na kyselých půdách.	možnost použití i na kyselé půdy, aplikace do půdy
Hořečnatá hnojiva výrazněji nepůsobí na změny výměnné půdní reakce. Dochází k určité korekci při optimalizaci Mg v KVK, a úpravě bazické saturace. Při použití vycházíme z druhu hořečnatého hnojiva (síranová-dobře rozpustná, uhličitánová-pozvolna rozpustná, oxidová-reaktivní až postupně rozpustná). Podstata hnojení Mg: - síranové formy aplikovat na mírně kyselé až neutrální půdy nebo eliminovat Ca hnojivem - využívat Mg v nitrátové vazbě při aplikaci na kyselé půdy - pro výrazně kyselé půdy (podzolované) využít oxidovaných, pomalu rozpustných, neutralizovaných forem hnojiva - při výrazném nedostatku Mg v biomase bodově použít foliální výživu							

Poznámky k hořečnatým hnojivům:

Mohou být síranová nebo žíravá.

Kieserit (síran hořečnatý) je fyziologicky kyselé hnojivo se složením 27 % MgO a 54 % SO₄.

Tab. 13—17: Vlastnosti a podmínky aplikace vápenatých hnojiv.

(E) VÁPENATÁ							
Hnojivo	N %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	MgO %	CaO %	Vlastnosti	Použití do půdy
Vápenec mletý-A				2,2	50,0	Mg i Ca v uhličitánové složce, MgCO ₃ v minimální příměsi pod 10 %, pozvolna rozpustné hnojivo, jemnější-účinnější, možnost využití i do kompostů, mletý na frakce 0,09-0,5 mm.	přednostně lehké, kyselé půdy s nízkou bazickou saturací, dále všechny
Vápenec mletý-B				2,2	47,0	Hnojivo v uhličitánové složce, mletý na frakce pod 0,5 mm.	všechny se zapravením

Varinit			3,0	6,0	52,0	Kombinace hnojiva v uhličitánové a oxidové formě, mletý pod 0,5 mm.	středně těžké, kysel.
Pálené vápno				4,0	90,0	Výrazně hygroskopické, mění se z oxidové formy na hydroxidovou, je reaktivní; aplikace mimo vegetaci, kromě likvidace mechů, rychlé působení a alkalizace.	pouze pro těžké půdy a s rovnoměrným zapravením
Kaly – cukrovarská šáma	0,2	0,4	0,4	2,0	26,0	Podobá se organickému hnojivu a získává se při čištění řepné šťávy. Efektivní využití jako odpadu s příznivými fyzikálními vlastnostmi.	specifická dobře přístupná stanoviště lehké až střední půdy
Sádra					32,5	Fyziologicky kyselé hnojivo, nepoužívá se pro úpravu půdní reakce, ale pouze k desalinizaci.	zasolené půdy nad 10 % Na v KVK

Vápnění je základním opatřením pro eliminaci půdní acidity a vytváření optimálnějších podmínek pro výživu. I velmi kyselá půda ještě nemusí být extrémním stanovištěm. V lesních ekosystémech musíme upřednostňovat aplikaci se zapravením do minerální půdy. Při povrchovém vápnění vždy dodržujeme kritéria humusu.

Podstata hnojení Ca

- lehké půdy – uhličitánovou formou hnojiv, nebo pozvolna rozpustnou (struska, šáma, dolomit)
- oxidové reaktivní formy využíváme pouze při úpravě reakce těžkých půd (třetihorní jíly)
- vápníme především na konci vegetačního období
- povrchovou aplikaci vápenatých hnojiv neprovádíme při vrstvě nadložního surového humusu pod 5 cm
- tzv. udržovací – kompenzační vápnění max. 300 kg · ha⁻¹
- meliorační vápnění na středně těžkých půdách 2,0 t CaO · ha⁻¹

Tab. 13—18: Vlastnosti a podmínky aplikace kombinovaných hnojiv.

(F) KOMBINOVANÁ							
Hnojivo	N %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	MgO %	CaO %	Vlastnosti	Použití
Amofos	12,0	50,0				Granulované hnojivo, velmi dobře rozpustné ve vodě, možno použít pro foliální výživu, i k další výrobě NPK.	půdy s dobrou zásobou K
Hydro NP26-14 B	26,0	14,0				Dvousložkové hnojivo, které obsahuje příměs bóru (0,2 %), granulované.	všechny půdy, začátek vegetace
DC 45 PK DC 36 PK DC 45 PK		15,0 18,0 15,0	30,0 18,0 30,0			Dvousložkové hnojivo s vysokým obsahem K pro zajištění optimální kořenové distribuce a odolnosti proti klimatickým stresům, granulované.	půdy a substráty s nízkým obsahem K
NPK NPK DC 39 NPK DC 42 NPK DC 37 NPK Grower NPK Sprinter NPK Hydrokomp	15,0 9,0 6,0 12,0 16,0 20,0 12,4	15,0 15,0 12,0 10,0 6,0 10,0 11,4	15,0 15,0 24,0 15,0 21,0 10,0 17,7	14 % S 2,0 2,0 2,7	B, Mn B, Mn	Celá řada hnojiv s různou trojsložkovou kombinací NPK a s možností dalších přísad (Mg, B, Zn); uvedená hnojiva jsou všechna granulovaná.	různé druhy půd hnojit patřičnými kombinacemi dle obsahu čisté živiny v půdě a hnojivu
Ceririt	8,0	13,0	11,0	2,0	B, Mo	Klasické vícesložkové hnojivo, s příměsí mikroelementů (B, Mo, Cu, Zn), granulované.	základní hnojení začátek vegetace

Hnojiva obsahující ve vyšší koncentraci 2 a více prvků (živin). Významnou vlastností těchto hnojiv je vzájemná kombinace zabudovaných živin určující specifikaci hnojiva. Umožňují tak stejnoměrnou aplikaci, kdy odpadá pracné míchání jednoduchých hnojiv. Nevýhodou zůstává neměnný poměr jednotlivých živin. Proto je vždy na trhu z jedné varianty celá škála různých kombinací. Jsou to hnojiva především pro základní hnojení. Při používání kombinovaných hnojiv je nezbytné nutně posoudit stav živin v půdě na základě analýz, aby nedošlo k případnému přehnojení některým ze základních bioelementů. Následná luxusní výživa některého z prvků může mít významný vliv na vývoj a zdravotní stav jedince.

Poznámky ke kombinovaným hnojivům (dusíkatá+vápenatá hnojiva):

- Karbiamid je amid kyseliny uhličité: hnojivo využitelné i v kompostech. Po aplikaci hnojiva $(\text{CO}(\text{NH}_2)_2)$ nastává v půdě hydrolytické štěpení: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$ (za působení ureázy) $\rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.
- DAM 390 je vodný roztok dusičnanu amonného + močovina (26 % N). Je to kyselé hnojivo, pro jehož kyselost se používá 30 kg CaO na 100 kg hnojiva (celkový obsah 42,2 % NH_4NO_3 , 32,7 % $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, 30 % N. Pro aplikaci 1,3 g · m⁻³ se zapravuje do půdy 100 l hnojiva (39 kg N na 1 ha).
- Dusíkato-fosforečná hnojiva: Pensol, Fostin, Amofos, Duslofos, Synso.

- Dusíkato-hořečnatá hnojiva: Folimag (11,5 % N, 5,7 % MgO), Fytovit (8,5 % N, 3,6 % MgO), Premag N-10 (10,0 % N, 5,0 % MgO), Dumag (9,5 % N, 7,8 % MgO), MgN_{-sol} (8,0 %, N 10 % MgO).
- Kapalná dvousložková hnojiva: XP_{-sol} (8,0 % N, 24 % P₂O₅), PK_{-sol} (20,2 % N, 8,9 % P), MgN_{sol} (8,0 % N, 6,0 % Mg, 0,7 % Ca).

Tab. 13—19: Další hnojiva používaná v lesnictví a množství zastoupených živin.

hnojivo	složení
LAD	27,0 % N, 4,0 % MgO
DAM 30	30 % N
LOVODASA	25 % N+ 10 % S
YARA SULFAN	24 % N 6 % S
Síran amonný	21 % N
Močovina big-bag	46 % N
Močovina, pytlovaná	46 % N
POLIDAP, Big-beg : 0,5 t (fosforečno-dusíkaté hnojivo), granule: 0,9-1,0 kg·dm ⁻³ , NP(S) 18-46(5)	
Dolophos 26	26 % P ₂ O ₅ , 40 % CaO, 3 % MgO
NPK 15-15-15	15 % N, 15 % P ₂ O ₅ , 15 % K ₂ O
NPK 16-16-16 bag 0,5 t	16 % N, 16 % P ₂ O ₅ , 16 % K ₂ O
NPK 8-24-24	8 % N, 24 % P ₂ O ₅ , 24 % K ₂ O
Kamex	40 % K ₂ O, 5 % MgO
Krista MGS- hořká sůl	16 % MgO, 13 % S

Tab. 13—20: Základní pravidla míchání jednotlivých průmyslových hnojiv.

Název hnojiva	AM	KIE	SD	SF	LV	LAV	MO
síran amonný (AM)	vždy	mt	vždy	vždy	ne	ne	mt
močovina (MO)	mt	ne	vždy	mt	ne	ne	
ledek amonný + Ca (LAV)	ne	ne	ne	ne	ne		
ledek vápenatý (LV)	ne	ne	ne	ne			
superfosfát (SF)	vždy	mt	vždy				
síran draselný (SD)	vždy	mt					
kieserit (KIE)	mt						

Příjem živin je výrazně ovlivněn půdním chemismem, resp. hodnotou pH.

13.3.2 Nové typy hnojiv používaných v lesním hospodářství

Tabletovaná forma hnojiv řady **STROM KONIFER** pro jehličnaté dřeviny a **STROM FOLIXYL** pro listnáče je zaměřena především pro aplikace a výživu *krytokořenného* sadebního materiálu a pro aplikaci do *kořenového balu* těsně před výsadbou. Předpokladem využití tohoto komplexního tabletovaného hnojiva, které na rozdíl od běžně používaných hnojiv obsahuje vedle základních makroživin i příměs **stimulátoru kořenového růstu**, je hnojení cílené především na kvalitní a bohatý vývoj kořenového systému. V rámci zalesňování, kde působí jednak jako významný vklad do počáteční výživy jedince, má i významný vliv na dobré zakořenění a další optimální vývoj kořenového systému. Urychlí tak zajištění kultury a stromkových jedinců při dostatečném nárůstu kořenové a z toho vyplývající i nadzemní biomasy, s konečným efektem snížených ekonomických nákladů na pěstební činnost.

Tablety jsou určeny především pro aplikaci k sadebnímu materiálu se substrátem s upravenou reakcí (pH) pro obě skupiny lesních dřevin (jehličnaté, listnaté). Obalovaná sadba v tomto případě umožňuje nejefektivnější využití živin z tabletovaného hnojiva. Poměr a dávkování živin je odvozeno od nároků jehličnatých a listnatých dřevin dle druhu a stáří sazenic. Byly navrženy a vyvinuty

2 varianty tabletovaných hnojiv – *STROM KONIFER* pro jehličnaté dřeviny a *STROM FOLIXYL* pro listnaté dřeviny.

Tab. 13—21: Parametry hnojiva Strom Konifer

průměrná hodnota celkového min. dusíku jako N	min. 19,3 %
průměrná hodnota draslíku jako K ₂ O	min. 5,6 %
průměrná hodnota hořčíku jako MgO	min. 5,1 %
průměrná hodnota fosforu jako P ₂ O ₅	min. 3,5 %
průměrná hodnota vápníku jako CaO	min. 5,7 %
stimulátor kořenového růstu	1,3 %

Dávkování hnojiva Strom Konifer: Podle vývojového stádia a stáří sazenice se doporučuje aplikovat 1 tabletu k jedné sazenici u jehličnanů do 2 – 3 letého věku sazenice. U nevyzrálých rašelinokůrových substrátů s širokým poměrem C : N je nutné aplikovat 2 tablety. U 3 až 5 letých používáme 2 až 3 tablety, u starších pak dle potřeby. Tablety se zapravují do substrátu k okraji obalu po obvodu sazenice nad kořenový systém cca 2 – 3 cm pod povrch. Při výsadbě a hnojení přímo v terénu zvyšujeme výše uvedené dávkování 2 – 4 x.

Tab. 13—22: Parametry hnojiva Strom Folixyl

průměrná hodnota celkového min. dusíku jako N	min. 11,0 %
průměrná hodnota draslíku jako K ₂ O	min. 5,4 %
průměrná hodnota hořčíku jako MgO	min. 8,8 %
průměrná hodnota fosforu jako P ₂ O ₅	min. 1,8 %
průměrná hodnota vápníku jako CaO	min. 15,1 %
stimulátor kořenového růstu	1,6 %

Dávkování hnojiva Strom Folixyl: Podle vývojového stádia a stáří sazenice se doporučuje aplikovat 2 tablety k jedné sazenici u 1-2 letých sazenic buku a dubu. Pro 3 – 4 leté sazenice a pro extrémní, nevyzrálé rašelinokůrové substráty doporučujeme aplikovat zvýšené množství tablet (3 – 5 ks).

Uvedená tabletovaná hnojiva byla odzkoušena a zaregistrována do seznamu schválených hnojiv ÚKZÚS Praha OAPVR na základě rozhodnutí č. O - 98 – 116. Výrobce CHEMEKO Slušovice

Tabletová a prášková hnojiva řady SILVAMIX: Jsou to speciální hnojiva s vysokým obsahem živin. Ty se z nich pozvolna a dlouhodobě uvolňují po dobu minimálně dvou let. Hnojiva jsou určena k hnojení a dohnojování široké škály kultur i sazenic ve školkách. Vyrábějí se ve formě tablet různých hmotností a v práškové formě pod obchodním názvem Silvamix:

Hnojiva obsahují hlavní živinu – dusík – ve formě močovinoaldehydových kondenzátů (ureaform), vyznačujících se různou rozpustností ve vodě v závislosti na délce polykondenzátového řetězce. Poskytují zdroj pomalé dusíkaté výživy, což je pro terénní podmínky lesních porostů velmi důležité. Na počátku hnojení se nevytváří nežádoucí koncentrace dusíku v půdním roztoku a nezvyšují se jeho ztráty z půdy.

Výraznou předností hnojiv Silvamix jsou málo rozpustné podvojně fosforečnany draselnohořečnaté, které zaručují pozvolné uvolňování i dalších základních živin: fosforu, draslíku a hořčíku. Snížená rozpustnost všech živin v hnojivech je tedy způsobena chemickými vlastnostmi účinných látek a není v principu ovlivněna fyzikálními úpravami hnojivé hmoty – např. tabletováním. Z tohoto důvodu se zásadně neliší rychlost rozpouštění živin z tablet a z práškové formy.

Živiny jsou využívány nejenom po dobu jedné vegetace, ale i po dobu vegetací následných. Důsledkem nízké rozpustnosti je dobrá využitelnost živin z hnojiv Silvamix a jejich eliminace průniku do povrchových a spodních vod. To má význam pro bezpečnou aplikaci v oblastech ochrany vodních

zdrojů. V evropských klimatických podmínkách se živiny z hnojiv řady Silvamix uvolňují po dobu minimálně dvou let.

Hnojiva neobsahují nežádoucí příměsi ani chloridy. Tablety jsou výhodné především pro aplikaci k rostlinám na hůře dostupných stanovištích nebo tam, kde nelze použít obvyklé způsoby hnojení. Aplikace je jednoduchá a lokalizovaná, umožňuje přesné dávkování k rostlině a minimalizuje neproduktivní hnojení půdy mimo dosah kořenového systému.

Použití hnojiv řady Silvamix je v zásadě univerzální. Ideálně jsou však tato hnojiva vhodná především pro hnojení a dohnojování lesních kultur a v práškové formě i lesních školek. Další využití spočívá v přípravě různých druhů substrátů.

1. Aplikace tabletovaných hnojiv řady Silvamix do půdy:

Používá se nejméně 4-5 desetigramových tablet ke každé sazenici. V horských oblastech až 8 ks 10 g tablet. Nejlépe se uplatnilo tabletované hnojivo, které bylo zapraveno 3-5 cm do půdy v prostoru kořenového balu do místa menšího, než je průměr obvodu koruny a větší než jeho polovina.

2. Aplikace práškových hnojiv řady Silvamix:

Prášková hnojiva řady Silvamix jsou velmi vhodná pro hnojení a dohnojování sazenic v lesních školkách. V roce setí se prášek aplikuje posypem v dávce nejméně 200-300 g/m². V následujícím roce se doporučuje hnojení opakovat minimálně v poloviční dávce: 100-150 g/m². Při výrobě substrátu z rašeliny nebo jiných materiálů se používá dávka 3 kg práškového hnojiva na 1m³.

Doba aplikace tabletových i práškových hnojiv řady Silvamix:

Optimální hnojení a dohnojování tabletami i práškovým hnojivem se provádí do konce měsíce července. Při jarní výsadbě je lépe tato hnojiva aplikovat 1 – 2 roky po vysazení než k sazenicím ještě v témže roce. Důvodem je neefektivní využití v období post výsadbového šoku. Podle místních podmínek je možné u prostokořenných sazenic hnojivo aplikovat v krajním případě i v podzimních měsících, září a říjnu. Pokládání tablet na sníh je nevhodné.

13.3.3 Růstové stimulatory používané v lesnictví

Růstové stimulatory představují pevné přípravky s hnojivým účinkem (granulované nebo tabletované, zpravidla aplikované do půdy) nebo přípravky v kapalném stavu (zpravidla výluhy z kompostů, vermikompostů apod. jako hlavní médium, aplikované jako postřik na list), vždy ale ve směsi s regulátory růstu, s cíleně podpurným účinkem na intenzivnější rozvoj listů, kořenů, fruktifikaci, vitalitu, imunitu aj.

Růstové stimulatory se již dlouhodobě používají v agronomii pro zvýšení výnosů, nicméně v lesnictví mají mnohem kratší tradici. S rozvojem poznání, že vápnění lesních porostů nevede vždy pouze k pozitivním výsledkům, se lesnický výzkum zaměřil na nalezení dalších způsobů meliorace lesního stanoviště, které by však s sebou nenesly rizika dlouhodobé degradace nejsvrchnějších částí půdy, jak je tomu zpravidla právě v případě vápnění (viz kapitoly 15.1.1, 15.1.2).

Vedle hledání optimálních přípravků je také významná technologie jejich aplikace a cílenost použití. Fytostimulační přípravky tak lze používat v těchto případech:

- a) semenáčky a sazenice lesních školek;
- b) kultury a nárosty na nepříznivých stanovištích s extrémním účinkem abiotických činitelů (klimatické extrémy, extrémní chemismus či vodní režim půd);
- c) eliminace houbových patogenů;
- d) stanoviště poznamenané antropogenními vlivy.

Využití tak lze rozdělit na dvě hlavní skupiny:

- (A) zvýšení produkce biomasy, ať nadzemní nebo podzemní – dosažení větších dimenzí a rychlejšího odrůstání stromků v lesních školkách, rychlejší zajištění kultur apod.;

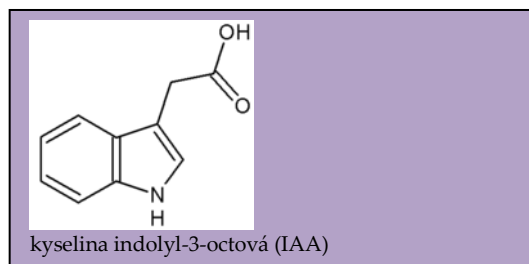
- (B) zvýšení vitality dřevin pro zdárnější odrůstání v nepříznivých podmínkách a pro urychlení regenerace po poškození – za spoluúčinku primárních vlivů, jako jsou abiotické faktory (přísušky, mrazíky, minerálně chudá stanoviště) a sekundárních činitelů chřadnutí porostů (houbové patogeny, hmyzí škůdci).

13.3.3.1 Fyziologické účinky fytohormonů

Fytohormony se obecně dělí na stimulatory růstu (auxiny, gibereliny, cytokininy, ethylen) a inhibitory růstu (kyselina abscisová, brasinosteroidy, kumarin), z nichž se v této kapitole budeme zabývat zejména první skupinou.

AUXINY

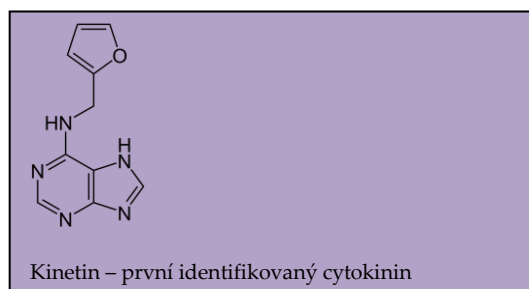
Patří sem kyselina indolyl-3-octová (IAA), kyselina indolyl-3-máselná (IBA), 4-chlor-IAA, kyselina fenylactová (PAA). U syntetických auxinů je společným znakem aromatický kruhový systém (s výjimkou alkyliodarbamatů), v jehož postranním řetězci je umístěna karboxylová skupina (nebo skupina na karboxylovou snadno převaditelná). Syntetické auxiny jsou slabé organické kyseliny. Mezi aromatickým kruhem a karboxylovou skupinou musí být alespoň jeden uhlíkový (nebo kyslíkový) atom.



Auxiny účinkují při stimulaci prodlužovacího růstu, regulaci tropizmů (gravitropismus, fototropismus) – např. nerovnoměrná distribuce IAA pod vlivem gravitace nebo nerovnoměrného osvětlení, v důsledku čehož nastává nerovnoměrný růst a ohyb; stimulace růstu nadzemních částí rostliny. Auxiny se vyznačují také polárním účinkem, kdy vlivem jeho koncentrace v terminálním výhonu jsou inhibovány postranní prýty v růstu, podílejí se na regulaci opadu listů a plodů, na zakořeňování a dělení kambiaálních buněk.

CYTOKININY

Známych je cca 30 přirozených cytokininů, přičemž všechny vycházejí z adeninu substituovaného na aminoskupině v poloze 6. Cytokininy jsou syntetizovány zejména v kořenech, odkud jsou transportovány do nadzemní části xylémem. Nejvíce jsou obsaženy v dělicích a rostoucích pletivech s tím, že jejich akumulaci potlačuje zvýšená hladina auxinu a etylenu (ten vzniká jako produkt při vysokých hladinách auxinu).



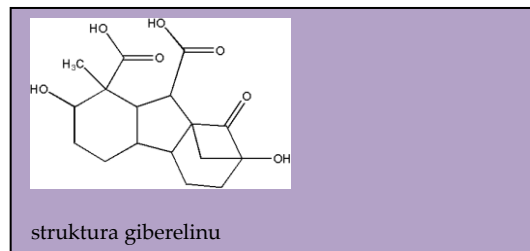
Účinek cytokininů spočívá zejména ve stimulaci buněčného dělení (vysoká koncentrace ve všech meristematických, intenzivně se dělicích pletivech), ovlivňují také některé reakce v rámci buněčného

cyklu, replikaci DNA ve fázi S-mitózy a spolu s auxiny působí na regenerační procesy jako výsledek jejich vzájemné interakce: vyrovnaný poměr vede k tvorbě nediferencovaného pletiva (kalusu), nadbytek cytokininů vyvolává regeneraci prýtů a nadbytek auxinů vyvolává regeneraci kořenů.

Po cílené aplikaci cytokininů lze pozorovat větší větvení stonku, zpomalení stárnutí, nárůst biomasy, zvýšenou toleranci vůči stresu (teploty, zasolení, sucho apod.), iniciaci tvorby semen, inhibici zakořeňování.

GIBERELINY

Je známo více než 100 molekul s giberelinovou strukturou – derivátů základního giberelinového skeletu – a mají lipofilní charakter (váží se na lipidy). Nejaktivnějším giberelinem v aktivaci prodlužovacího růstu je GA1.



Fyziologické účinky spočívají zejména ve stimulaci prodlužovacího růstu, pouze však nadzemní části rostliny. Ta je důsledkem jednak zvýšeného prodloužení (elongace) buněk, jednak zvýšeného dělení buněk. Gibereliny také ovlivňují pohlaví květů. Jejich aplikace zvyšuje u řady rostlin tvorbu samčích květů a potlačuje tvorbu samičích květů.

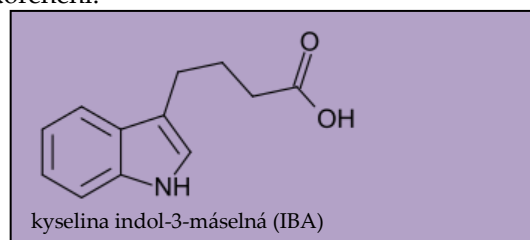
Ze synteticky vyráběných růstových stimulátorů jsou při obohacování lesnicky využívaných hnojiv používány následující:

Nitrofenolát sodný (SNP) – podporuje růst kořenů;

Diethylaminoethyl hexanoát (DA-6) – podporuje růst kořenů;

kyselina Na-a naftyloctová (Na-NAA) – v kombinaci s ostatními látkami zlepšuje zakořeňování;

kyselina K-indolylmásečná (K-IBA) – stimuluje prokořenění.



13.3.3.2 Přípravky s fytostimulačním účinkem: účinky a způsob aplikace

Ve výživě a produkci sadebního materiálu se uplatňují zejména přípravky řady **Silvamix**: Silvamix R se stimulanty, které účinně podporují příjem živin obsažených v hnojivu, zejména dusíku, draslíku a hořčíku. Příjem dusíku účinně podporují přípravky Silvamix F+stimulanty a Silvamix A+stimulanty (Agluform). Silvamix R+stimulanty také účinně podporuje tzv. *influx* (příjem) dusíku a zároveň působí významně na rozvoj kořenového systému.

Příjem draslíku je podporován zejména draselnou řadou hnojiv Silvamix R, příjem hořčíku přípravky Silvamix R+stimulanty.

Optimálního účinku je dosaženo při aplikaci granulované nebo práškové formy přípravku v dávkách 250 g na 1 m², a to v první polovině vegetační sezóny. Při pozdější aplikaci vzniká riziko nedostatečného vydřevnatění pletiv a poškození rostlin mrazem.

Pro podporu vitality lze použít účinné přípravky řady **Wormsaktiv** nebo **Vermaktiv**. Jedná se o kyselé alkoholicko-vodní výluh vermikompostu obsahující enzymy, fytoestimulátory, humusové látky, aminokyseliny, auxiny a další látky (kyselina anthranilová, kyselina aminooctová, auxin, cytokininy, organicky vázaný fosfor, dusík a draslík a stopové prvky). Tyto látky vznikají při procesu vermikompostování a jsou přirozeně stabilizovány a fixovány. Základní výluh lze použít buď přímo pro postřiky na list, nebo jako médium pro aditivní látky používané s cílem eliminace houbových patogenů (např. síra, měď, mangan aj. v nízkých koncentracích).

Optimálního účinku v prostředí lesních školek a kultur lze dosáhnout při ředění přípravku s vodou 1:50, s dávkováním na sazenice s nadzemní výškou do 60 cm 5,4 l koncentráту na 1 ha, na sazenice s nadzemní výškou 60-90 cm 7,2 l koncentráту na 1 ha. Aplikaci je vhodné provádět postřikem s dostatečným zmlžením, bez srážek min. 2 hod po aplikaci.

Podstatné v účincích přípravků řady Wormsaktiv a Vermaktiv je, že jejich účinnost je zejména fyziologická, nikoli hnojivá a na extrémně chudých stanovištích nebo v substrátech lesních kolek je třeba pamatovat na souběžnou dodávku živin. Jejich stimulační účinek na rozvoj kořenů je jednou z forem prevence na stanovištích ohrožených přísušky, kdy kořenový systém postupuje do větších hloubek půdy.

Nutno dodat, že stejně jako v případě hnojiv, tak i v případě výše zmíněných i dalších přípravků je nezbytné předcházející šetření, které odhalí stav výživy rostlin i obsahu živin v půdě!

13.4 Kompostování

Kompostování znamená biochemickou přeměnu (transformaci) organických látek v aerobních podmínkách (za přístupu vzdušného kyslíku), zejména za účasti mikroflóry, na stabilní humusový produkt – **hnojivý substrát**. Při kompostování vznikají stabilní humusové látky, za zvýšené teploty se snižuje hmotnost, objem a obsah vody.

Schematicky lze kompostovací proces vyjádřit podle vztahu



Během kompostování se hmotnost původního materiálu snižuje až o 50-60 %. Ještě více se snižuje objem kompostovaného materiálu, zatímco se zvyšuje jeho objemová hmotnost (z cca 400-500 kg/m³ na 700-800 kg/m³).

13.4.1 Fáze kompostování

Kompostování je kontinuální proces, u něhož nelze přesně vymezit jednotlivé fáze tvorby kompostu. Dochází k rozkladu organických látek za průběhu podobných procesů jako v půdním prostředí, kdy základními procesy přeměny jsou mineralizace a humifikace. U kompostů však lze jednotlivé procesy technologicky ovládat, a proto lze kompostování definovat jako řízený proces, který zabezpečuje optimální podmínky potřebné pro rozvoj žádoucích mikroorganismů a lze tak získat humusové látky rychleji a produktivněji ve srovnání s podmínkami lesního stanoviště.

Konečným produktem kompostovacího procesu je kompost. Je to univerzální organické resp. organo-minerální hnojivo, které obsahuje všechny složky důležité pro výživu: jak makrobioelementy (živiny) tak kvalitní humusové látky, tak půdotvorné látky obsazené edafonem. Zralý kompost se vyznačuje drobtovitou strukturou, bez zápachu a bez možnosti identifikace původních vstupních materiálů.

(1) Fáze rozkladu trvá cca 3-4 týdny. Působí při ní termofilní organizmy a teplota dosahuje 60-65°C (může vystoupat až na 70°C, v závislosti na původu jednotlivých komponent). Teplota se během fáze rozkladu reguluje občasným přehazováním kompostu, neměla by klesnout pod 55°C po celých 21 dní. Během této fáze dochází zároveň k hygienizaci (zániku hnilobných patogenů a likvidaci semen plevelných rostlin). V této fázi dochází k rozkladu lehce rozložitelných sloučenin (cukrů, bílkovin,

škrobů), jejichž konečným produktem je hlavně NO_3^- , NH_3 , CO_2 , aminokyseliny a polysacharidy. Živiny mohou být dekomponovány až do minerální formy (mineralizace). Během 1. fáze klesá rychle objem hmoty jako důsledek zhutňování, produkce CO_2 a dalších plyných sloučenin, také klesá hmotnost (až 30 %) a rychle se množí mikroflóra, která respirací přispívá k produkci CO_2 , ale i k zakyselení (poklesu pH) vlivem produkce H_2CO_3 a organických kyselin. Během 1. fáze kompost nenabývá vlastností humusu a není tedy vhodné jej aplikovat do půdy – v této fázi rozkladu může působit až fyto toxicky. V momentě, kdy teplota trvale poklesne pod 40°C , 1. fáze kompostování je ukončena.

(2) Fáze přeměny trvá 4-8 týdnů. Během ní teplota klesá postupně na cca $25\text{--}30^\circ\text{C}$ a termofilní bakterie jsou nahrazeny odlišnou mikroflórou. Během 2. fáze probíhá kondenzace strukturních jednotek, jejich reakce s aminokyselinami a zabudovávání živin do struktur. Utváří se humusový komplex hnědé barvy a drobtovité struktury a tvoří se aromatické látky, čímž humus nabývá vůně po lesní půdě. Dekompozice organické hmoty je na takové úrovni, že nelze rozpoznat původ původních organických látek. Ve druhé fázi klesá hmotnost již mírněji, cca o 10 %. Ztrácí se také riziko toxicity a lze kompost již použít jako hnojivo nebo pro hnojivé výluhy. Kompost se překopává zpravidla 2x nebo vícekrát, podle potřeby.

(3) Fáze syntézy trvá různě dlouhou dobu – 8-12 (11-16) i více týdnů (až $\frac{1}{2}$ -1 rok). Teplota kompostu je cca 20°C . Dochází k polymeraci – syntéze organické hmoty na složité humusové látky – huminové kyseliny, humáty atd.) a utváří se vazby mezi anorganickými a organickými látkami. Kompost má zemitou strukturu a obsahuje zejména *trvalý humus* s vyšším účinkem. Ve 3. fázi se kompost překopává zpravidla 2x.

13.4.2 Zakládání kompostů, zásady pro kompostování

Kompost by měl být založený tak, aby byly navozeny optimální podmínky pro rozvoj organismů. Zpravidla je formován do dlouhých hromad lichoběžníkového průřezu s výškou 1,1-2,5 m a šířkou základny 3-4 m. Kompostovací hromady se zakládají buď na volné ploše, k těmto účelům speciálně upravené nebo do zakládek se stěnami z betonových panelů.

Ve směsi by měl být poměr organické hmoty:země 5-10:1. Kompostovací hromady by měly mít komponenty o poměru C:N cca 20-30:1. Z tohoto aspektu je třeba dávkovat úměrně podíl surové rostlinné hmoty, jako jsou piliny, dřevní štěpka nebo papír, které mají vysoký poměr C:N (až 100-120).

Poměr C:N u vybraných komponentů při zakládce kompostu:

listí	30-60:1 (lípa 37:1, dub 47:1, bříza 50:1, buk 51:1, javor 52:1, habr 23:1, jasan 21:1, olše 15-19:1, akát 14:1, smrk 48:1, borovice 66:1, douglaska 77:1, modřín 113:1)
kůra	40-120:1 (je vhodné ji předfermentovat)
sláma	90:1
dřevo	140:1
piliny	300-500:1
papír	350 (až 1000):1
větve	100-200:1
hnůj	24:1
drůbeží hnůj	10:1
močůvka	2:1
tráva	8-20:1

Úprava poměru C:N je důležitý faktor úpravy substrátů zejména v lesních školkách.

Příklad: k dispozici je 100 t pilin a 30 t hnoje

	Sušina (%)	org. látky (%)	uhlíku (C) (%)	dusíku (N) (%)
100 t pilin	60	98	50	0,1
30 t hnoje	22	77	50	2,2

Podle obsahu sušiny je obsah C ve 100 t pilin $60 \times (50/100) = 30$ t C

Podle obsahu sušiny je obsah N ve 100 t pilin $60 \times (0,1/100) = 0,06$ t N

Podle obsahu sušiny je obsah C ve 30 t hnoje $22 \times (50/100) = 11$ t C

Podle obsahu sušiny je obsah N ve 30 t hnoje $22 \times (2,2/100) = 0,484$ t N

	Sušina (t)	org. látky (t)	uhlíku (C) (t)	dusíku (N) (kg)
Piliny	60,0	58,8	30,0	60,0
Hnůj	6,6	5,1	3,3	145,2
Celkem	66,6	63,9	33,3	205,2

Skutečný poměr C:N (ve směsi piliny+hnůj) je $33,3 \text{ t} : 0,2052 \text{ t} = 162,44 : 1$!!!

obecný pro výpočet poměru C:N je potom následující:

$$C : N = \frac{\%C_1 \times m_1 \times (1 - w_1) + \%C_2 \times m_2 \times (1 - w_2) + \dots + C_n \times m_n \times (1 - w_n)}{\%N_1 \times m_1 \times (1 - w_1) + \%N_2 \times m_2 \times (1 - w_2) + \dots + N_n \times m_n \times (1 - w_n)}$$

kde

$\%C_1, \%C_2, \dots, \%C_n$ je procentický obsah uhlíku v sušině první až n-té suroviny / 100;

$\%N_1, \%N_2, \dots, \%N_n$ je procentický obsah dusíku v sušině první až n-té suroviny / 100;

$m_1, m_2, \dots, m_n$ je celková hmotnost první až n-té suroviny;

$w_1, w_2, \dots, w_n$ je hmotnostní vlhkost první až n-té suroviny / 100.

Stanovení dodávaného množství dusíku pro zajištění optimálního poměru C:N

Pro humifikaci a kompostování je třeba dosáhnout hodnoty alespoň **30:1**.

30 t C 1 t N

33,3 t C x t N

$x = 1,11 \text{ t N} \Rightarrow 130 \text{ t substrátu musí obsahovat } 1,11 \text{ t N}$

Pro dosažení poměru C : N 1 : 30 je potřeba dodat $1,11 - 0,2052 = 0,9048$ t N, který lze dodat buď již použitou nebo další surovinou. Při výpočtu navýšení podílu směsi obohacující substrát o dusík je však třeba pamatovat na to, že dodáváme-li s přídatným materiálem dusík, dodáváme současně uhlík. Výpočet dodávky hnojivé příměsi proto bude následující:

$$P = \frac{C_t - N_t \times C/N_c}{C/N_c \times \left[N_p \times \left(1 - \frac{w_p}{100} \right) \right] - \left[C_p \times \left(1 - \frac{w_p}{100} \right) \right]}$$

pro potřeby tabulkových kalkulátorů lze vyjádřit v jednořádkovém zápise takto:

$$= (C_t - N_t \times C/N_c) / (C/N_c \times (N_p/100 \times (1 - w_p/100)) - (C_p/100 \times (1 - w_p/100)))$$

kde

P je hledané množství přídatné suroviny, použité pro snížení poměru C/N [t];

C_t je celkový obsah uhlíku v dosavadním substrátu s nevhodným poměrem C/N [t];

N_t je celkový obsah dusíku v dosavadním substrátu s nevhodným poměrem C/N [t];

C/N_c je cílový poměr C/N (zpravidla se pohybuje mezi hodnotami 30 až 35);

C_p je procentický podíl uhlíku v přídatné surovině použité pro snížení poměru C/N / 100;

N_p je procentický podíl dusíku v přídatné surovině použité pro snížení poměru C/N / 100;

w_p je hmotnostní vlhkost přídatné suroviny použité pro snížení poměru C/N.

V použitém příkladě, kde je v substrátu celkový obsah uhlíku (C_t) 33,3 t a dusíku (N_t) 0.2052 t, by tak bylo zapotřebí pro snížení poměru C/N ze 162,44 na 30 (C/N_c) zapotřebí při použití prasečí kejdy s parametry obsah uhlíku (C_p) 60 %, dusíku (N_p) 5,5 %, s hmotnostní vlhkostí (w_p) 78 % dodat 89,60 t přídatné suroviny.

Mezi významné parametry pro správné kompostování patří **vlhkostní charakteristiky**. Optimální vlhkost kompostu je 40-60 %, u více zemitých kompostů je to 50-55 %, u kompostů s vyšším

obsahem organických látek je to 50-60 %. Zemědělské odpadní hmoty mají obvykle kompostovací vlhkost 50-60 %, kůra a dřevní odpad 60-70 %.

Při nedodržení **optimálních vlhkostních podmínek** se prodlužuje doba kompostování a navíc vzniká riziko nastoupení odlišných biologických a biochemických pochodů. **Nedostatek vlhkosti** působí negativně na metabolismus a život mikroflóry, na hydrolýzu a způsobuje neúměrné zahřívání materiálu (špatné odvádění tepla). Tím jsou vyvolávány termické procesy a suchá destilace, což může vést až k samovznícení. Navíc se dominantním rozkladným procesem stává mineralizace na úkor humifikace a rozložené látky, zejména živiny, se stávají nestabilními. **Nadbytek vlhkosti** působí intenzivnější odvádění energie vlivem výparného tepla. Kompostovaná hromada se tak příliš ochlazuje a zpomaluje (až zastavuje) se činnost termofilní mikroflóry. Mění se také charakter biochemických procesů a nastupují procesy kvašení nebo hnití. Voda z kompostovací hromady může prosakovat do spodních vrstev hromad a kontaminovat spodní vody. Neúměrně vlhký kompost lze rozpoznat podle hnilobného zápachu.

Z hlediska **chemismu** je důležité dbát o dostatečný podíl fosforu (optimálně 0,2 % P_2O_5 v sušině), který lze doplnit zejména dodáním kůry, štěpky nebo pilin. Půdní reakce (pH) by se u kompostů měla pohybovat mezi 6-8. U příliš kyselých kompostů je vhodné dodat $CaCO_3$ (1-3 % hmotnostního podílu).

Z hlediska **fyzikálních charakteristik** by kompost měl představovat strukturní materiál o objemové hmotnosti nižší než 1, tedy s převahou organické složky. Komposty z rašelino-kůrových, kůrových a bezjílnatých materiálů by měly mít objemovou hmotnost redukovanou 0,20-0,30 g/cm³, komposty s jilem cca 0,31 g/cm³, zahradní substráty 0,70 g/cm³.

Kompost by měl být dostatečně **provzdušněn**. Neměl by být proto přikryt fólií a měl by se v nepřítomnosti dlouhých intervalech přehazovat. Stanovení provzdušnění kompostu je relativně drahé, avšak lze vycházet z předpokladu, že je-li v optimu vlhkost kompostu, je v optimu také jeho provzdušnění (kompost by měl obsahovat cca 8-12 % kyslíku). Špatná aerace může mít příčinu v přílišné vlhkosti nebo vysokém podílu minerální složky. Pro zvýšení provzdušnění se do kompostu přimíchává sláma, větve nebo kůra, kompost se přehazuje nebo se do kompostovacích hromad zarážejí kůly, které slouží jako drén.

V průběhu kompostování je třeba kontrolovat a popř. regulovat **teplotu**. Orientačně lze při odhadu teploty vycházet z pozorovatelných znaků, a to (1) barvy – hnědá, šedohnědá až černá, (2) struktury – drobtovitá až hrudkovitá a (3) vůně – zdravý kompost neuvolňuje pachy svědčící o přítomnosti nežádoucích látek a nemá houbovitou nebo nakyslou vůni. V závěru kompostovacího procesu teplota kompostu klesá a ustaluje. Ustálenou teplotu má kompost tehdy, odpovídá-li teplota kompostu teplotě okolního ovzduší po dobu alespoň posledních 14 dní.

Maximální hodnota pro ustálenou teplotu vychází z ČSN 46 5735, čl. 2.8.

13.4.3 Hodnocení kvality a zralosti kompostu

Problematika kompostů včetně rizik spojených s využitím bioodpadů jako suroviny podléhá legislativě České republiky, konkrétně ČSN 46 5735, Průmyslové komposty. Tato norma platí pro výrobu, zkoušení, dodávání a užívání kompostů vyráběných průmyslovým způsobem a používaných jako organické hnojivo.

Pro objektivní hodnocení kvality kompostu se používají standardní testy. Kvalita, zralost a nezávadnost kompostu se hodnotí testy toxicity (BOX 13—6), ostatní parametry lze hodnotit dle Tab. 13—23, nejvyšší přípustná množství sledovaných látek v kompostu a surovinách pro jeho přípravu jsou uvedeny v Tab. 13—24.

BOX 13—6: Testy klíčivosti pro stanovení kvality kompostu.

Box

Test klíčivosti na řeřiše seté:

Do Petriho misek o průměru 5 cm se vloží filtrační papír a pravidelně rozmístí 8 semen řeřichy seté. Papír se zavlhčí výluhem z testovaného kompostu. Pro každý vzorek (každý testovaný kompost nebo jeho sekci, které je testována směsným vzorkem) se používá min. 10 Petriho misek s 8 semeny (celkem tedy 80 semen). Uzavřené misky se vloží do termostatu a inkubují 24 hod při teplotě 28°C. Současně s vzorky výluhů se do termostatu vloží také kontrolní vzorek, kde je filtrační papír zavlažen destilovanou vodou.

Po 24 hodinách se změří délky všech naklíčených hypokotylů a stanoví se index klíčivosti, který je ukazatelem zralosti či toxicity kompostu:

$$IK = ((K_v \cdot L_v) / (K_k \cdot L_k)) \cdot 100$$

kde

K_v je klíčivost testovaného vzorku (procento vyklíčených semen) [%]

K_k je klíčivost kontroly [%]

L_v je průměrná délka kořínků vzorku [mm]

L_k je průměrná délka kořínků kontroly [mm]

Index klíčivosti je jako kvalitativní znak stability platný pouze v souvislosti ostatních parametrů deklarovaných podnikovou normou.

Index klíčivosti IK >80 % značí dobře vyzrálý kompost.

Tab. 13—23: Požadavky na jakost kompostu dle ČSN 46 5735.

Znak jakosti	Hodnota
Vlhkost [%]	min. 40,0; max. 65,0
Spalitelné látky ve vysušeném vzorku [%]	min. 25,0
Celkový dusík jako N přepočtený na vysušený vzorek [%]	min. 2
Poměr C : N	max. 30 : 1 (do 25)
Fosfor [%]	min. 2
Draslík [%]	min. 1,25
Vápník + hořčík [%]	min. 4,5
Hodnota pH	od 6,0 do 6,5
Nerozložitelné příměsi [%]	max. 2,0
Homogenita celku [% _{relativní}]	± 30

Tab. 13—24: Nejvyšší přípustná množství sledovaných látek v kompostu a v surovinách pro jeho přípravu dle ČSN 46 5735.

Sledované látky	Nejvyšší přípustné množství sledované látky [mg/kg] vysušeného vzorku kompostu podle třídy	
	I.	II.
As	10	20
Cd	2	2
Cr	100	300
Cu	100	400
Hg	1	1,5
Mo	5	20
Ni	50	70
Pb	100	300
Zn	300	600

13.4.4 Druhy kompostů

Statkové komposty se obvykle vyrábějí ze zemědělských odpadů na volné ploše – na okraji pole nebo lesa. Organický materiál je zejména sláma, řepka, makovina, natě, plevy, nevhodná krmiva, listí stromů, tráva z lučních porostů a drny ze skrývek. Jako anorganický materiál se používají kaly z čističek odpadních vod, bahno, zemina po praní řepy, odpadní vápno, popel atd. Zdroji mikrobů (pro „naočkování“ kompostu) jsou kejda, močůvka nebo hnůj. Kompost se vápní CaCO₃.

Průmyslové komposty se vyrábějí ve specializovaných závodech (kompostárnách), kde jsou hlavními směsmi městské a průmyslové látky – domovní a komunální odpad, dále přírodní zdroje jako rašelina nebo bahno a dále ostatní odpadní látky jako jsou saturační kaly, popílky, prosevy. Očkování kompostu se provádí vyhnílymi kanalizačními kaly.

Specifickou kategorií kompostů tvoří **vermikomposty** (Hanč, Plíva 2013). V jistém slova smyslu mohou být považovány za pokročilejší formu kompostování, kdy je cíleně využíváno žížalovitých v přeměně kompostované suroviny na humifikovanou hmotu. Vermikomposty jsou populární zejména při využití tzv. kalifornských žížal (*Eisenia andrei*), ale stejně dobře lze použít druh žížala hnojní (*Eisenia foetida*). Výhodou využití kalifornských žížal je, že díky specifickým trávicím enzymům likvidují k patogenní látky, které se nacházejí např. v hnilých surovinách.

www.vermikompostovani.cz

14 LESNICKO-PEDOLOGICKÉ ASPEKTY MINERÁLNÍ VÝŽIVY LESNÍCH DŘEVIN

14.1 Hlavní aspekty výživy rostlin

Pod **minerální výživou** si lze představit začlenění látek (prvků) s nízkou chemickou energií do struktury organických látek na účet energie získané jinými metabolickými procesy. Rostliny přijímané látky využívají pro zajištění optimálního růstu, v případě ustálené dynamické rovnováhy bez degradačních účinků na stanoviště, tzn. při zachování koloběhů látek ekosystémem. Při hnojení (obecně dodávání látek do systému „z vnějšku“) je třeba důsledně respektovat ekologii daného prostředí, ať už se jedná o lesní stanoviště nebo o lesní školky. U lesních stanovišť problematika minerální výživy úzce souvisí s dlouhodobostí fyziologických procesů rostlin a koloběhů látek, které by měly být respektovány, u lesních školek je problematika minerální výživy blízká spíše zemědělským půdám, kde jde o udržení půdní úrodnosti.

Minerální živiny jsou nezbytné pro růst a vývoj rostlin a jsou nenahraditelné jinými chemickými prvky. A protože se jedná o výživu živých organismů, jsou tyto prvky biogenní. Minerální živiny se účastní všech ontogenetických fází vývoje rostliny avšak vždy v jiné míře a poměru daných živin – jiné prvky se v převaze účastní klíčení, jiné růstu jedince, jiné kvetení, plození a zrání, obecně rozmnožování (viz dále).

Mladší rostlinná pletiva oproti starším zpravidla obsahují ve větších koncentracích N, P, K, starší pletiva obsahují více Ca, Mn, Fe a B, zatímco obsah N, P a K se s postupem věku snižuje.

Biogenní prvky a sloučeniny v produkčním pojetí působí (A) na výnosy zemědělských plodin: např. bílkoviny jsou významné pro růst pšenice, která jich obsahuje velké množství, škrob naopak v hlízách brambor a sacharidy (cukr) v cukrovce. V lesnickém pojetí biogenní prvky působí (B) na produkci dřeva a vývoj dřeviny, tedy v dlouhodobějším a komplexním měřítku, což je vázáno na delší obmýtí (až 50x-70x). Mohou tak působit buď na kvantitu – v případě lignikultur, nebo na kvalitu – např. v případě získávání rezonančního nebo jinak kvalitativně odlišného dřeva (s čímž souvisí také pěstební přístupy v daných porostech).

Minerální živiny se z hlediska jejich obsahu v organické hmotě (rostlinných pletivech) dělí na **makroživiny** (C, O, H, N, P, S, K, Ca, Mg, Fe), které jsou v rostlinné biomase obsažené z více než 0,1 %, **mikroživiny** (Mn, Cu, Zn, Mo, B), které jsou v rostlinné biomase obsaženy z méně než 0,1 % a užitečné živiny (Na, Cl, Si, Al, V, Ti aj.), které se v různé míře a v různé fázi ontogeneze podílejí na metabolických procesech. Přitom prvky (živiny) mohou být obsaženy ve velmi rozdílném množství: např. N a K mají podíl 10x vyšší než P a Mg a ty zase 100-1000x vyšší podíl než mikroelementy.

Živiny lze rozdělit také podle fyziologických a biochemických vlastností: C, O, H, N, S jsou přijímány jako CO_2 , HCO_3^- , H_2O , O_2 , NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , SO_2 . P, B a Si jsou přijímány ve formě fosfátů kyseliny borité, borátů a silikátů. K, Na, Mg, Ca, Mn a Cl^- jsou přijímány v iontových formách (např. K^+ , Mg^{2+}). Fe, Cu, Zn a Mo jsou přijímány jako ionty nebo cheláty.

Minerální živiny (obecně prvky) lze rozdělit na **nekovy** (C, O, H, N, P, S, B, Si, Cl), **kovy** (K, Ca, Mg, Na) a **těžké kovy** (Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Zn, Hg, Pb, Al atd. – viz kapitolu 15.1.4).

Část rostlinného těla tvoří tzv. **popeloviny**. Zaujímají v rostlině velmi malý podíl, avšak jsou významné z hlediska tvorby organických látek při fotosyntéze.

14.2 Problematika příjmu živin rostlinou

14.2.1 Kořenová výživa

Živiny jsou z půdy přijímány z půdního roztoku (snadno rozpustné sloučeniny uvolněné do půdního roztoku) nebo z pevné fáze půdy (vázané na sorpční komplex nebo snadno rozpustné sloučeniny v půdě, které vznikají buď biologickou činností mikroorganismů, nebo působením kořenových exsudátů).

Do **kořenů rostlin** jsou ionty z půdního roztoku dopraveny do cytoplazmy specifickými nosiči. Přijaté prvky (živiny) jsou buď okamžitě zapojeny do látkové výměny (N, P, S) nebo jsou jako ionty dočasně pohlceny a uloženy ve vakuolách nebo jsou transportovány do nadzemních orgánů přes plasmatická vlákna (plasmodezmy) skrz sousedící buňky až do xylému (dřevního cévního svazku) a tudíž rozváděny do celé rostliny nebo příslušných nadzemních částí.

Floémem (lýkem) jsou naopak vedeny produkty metabolismu (asimiláty). Rostlinnými pletivy jsou snadno vedeny K, N, P a S, neboť se rychle váží na organické látky, obtížněji Zn, Fe a Mn a obtížně Ca a Mg.

Příjem živin může být buď **(A) PASIVNÍ**, zprostředkovaný difúzí, kdy se roztok volně pohybuje, aniž by musel překonávat biologickou bariéru (plazmalemu), do mezibuněčných prostorů nebo v rámci nich. Difuze má statický charakter, neboť se látky pohybují prostorem ve smyslu termodynamických principů z místa vyšší koncentrace do místa s nižší koncentrací. Při pasivním transportu není spotřebovávána metabolická energie. Pasivní transport může za jistých okolností probíhat i přes membránovou dvojvrstvu, pokud dochází k pohybu hydrofilních a iontově aktivních látek.

Při **(B) AKTIVNÍM** příjmu živin je třeba přímé účasti metabolických dějů. **Příjem spojený s metabolismem** vyžaduje vnější energii, je spojen s oxidativním odbouráváním cukrů (sacharidů) a probíhá zejména v provzdušněných půdách. Aktivní příjem je **příjem spojený se selektivitou** umožňuje přijímat tu živinu, která je v půdě zastoupena v nižším množství než ostatní živiny, ale je pro rostlinu v daném čase významnější. Živiny jsou přijímány **proti koncentračnímu spádu**. Při tomto příjmu mají vakuoly vyšší negativní náboj a rozdíl nábojů mezi vnitřním a vnějším prostředím vakuol se vyrovnává pronikáním kationtů z půdy (K, Ca, Mg, Na) i přes koncentrační spád, kdy jsou dané živiny obsaženy uvnitř vakuol ve vyšších koncentracích než vně. Záporný gradient vnitřní části buňky tak umožňuje aktivní transport živin přes plazmalemu s tím, že záporný náboj uvnitř buňky je zajištěn ATP (po rozkladu vody na H^+ a OH^- je vodík pak transportován za plasmatickou membránu, čímž se zvyšuje koncentrace hydroxylových aniontů a tedy záporný náboj uvnitř buňky). Proces je zajištěn tzv. **protonovou pumpou** (sodíko-draslíkovou pumpou), kterou je transmembránový protein různého chemismu, zajišťující aktivní transport volného vodíku.

Samotná výživa může probíhat dvěma způsoby:

1. **Kontaktní výměnou** mezi povrchem kořenů a povrchem půdních koloidů. Při tomto způsobu dochází k výměně vodíkového kationtu H^+ z rostlin za kationt z koloidů. Z hlediska podílu na výživě tento způsob není významný.
2. **Objemový tok**, kdy je transport zajištěn prouděním roztoku obsahujících dané látky – živiny – z půdního roztoku do kořene. Výživa v tomto případě závisí na velikosti (rychlosti) toku a na koncentraci roztoků. Pro tento příjem jsou významné koncentrace a aktivita iontů v půdním roztoku, aby mohla probíhat výměna iontů mezi roztokem a povrchem iontů (z hlediska možnosti uvolnění iontů z povrchů koloidů je významné, že mezi půdním roztokem a koloidy je neustále ustalována rovnováha a koncentrační spád je neutralizován). Samotný tok závisí na hydratační energii prvků (např. u K je 357 kJ/mol, u Mg je 1086 kJ/mol), kterou se molekuly vody váží na povrch jednotlivých iontů.

Při **povrchové adsorpci** (vázáni *na* povrch) jsou ionty vázány na povrchu karboxylových skupin pektinových látek na buněčných stěnách. Tato forma příjmu je významnější u mladších než u starších a u dvouděložných než u jednoděložných rostlin.

14.2.2 Foliální výživa

Foliální výživa („hnojení na list“) probíhá prostřednictvím listů (asimilačních orgánů) i plodů a znamená nejčastěji cílené aktivity spojené s dodáním živin rostlinám. Při foliální výživě se zvyšuje účinek hnojiv až o 85 %, zvyšuje se také příjem některých živin kořenovým systémem (např. při aplikaci močoviny na list se zvyšuje příjem P a K kořeny) a snižuje se riziko z přehnojení půdy.

Efektivita foliální výživy závisí na stavbě a stáří listů, na době aplikace v rámci vegetační sezóny i na koncentraci hnojivé látky.

Rychlost příjmu živin prostřednictvím foliální výživy:

N (z močoviny)	přijat za 0,5-2,0 hod
Mg	přijat za 2-2,5 hod
K	přijat za 10-24 hod
P, Ca, Mn, Zn	přijat za 5-10 dní

V principu příjem foliální výživou probíhá v důsledku zvlhčení povrchu listu aplikační (nosnou) látkou, čímž se kutikula rozestoupí a následuje difuze živin do listu přes buněčné membrány.

14.3 Výživa rostlin a Liebigův zákon

Na výživu (příjem živin rostlinami) má vliv nejen množství (koncentrace) živin v prostředí (půdním roztoku), ale také jejich vzájemný poměr. Prvky obsažené v půdě jsou přítomny v několika intervalech koncentrací resp. zónách koncentrace živin v prostředí, ze kterého jsou rostlinou přijímány.

Jak bylo výše zmíněno, s obsahem resp. koncentrací živin souvisí jejich vzájemné interakce nebo také limitní hranice jejich koncentrace v prostředí. V širším slova smyslu hovoříme se jedná o **Liebigův zákon minima**, který znamená, že životní podmínky jsou limitované tím faktorem prostředí, který je v rámci daného ekosystému v minimu a omezuje tak život a rozvoj organismu. Např. pro aridní oblasti (polopouště, pouště) je limitní obsah vody, ačkoli ostatní podmínky mohou představovat ekologické optimum. Z hlediska výživy rostlin to znamená, že výživa probíhá na té úrovni, na jaké je rostlina vyživována živinou nejméně obsaženou v půdě.

Justus von Liebig (1803-1873)

Německý chemik se zaměřením na agrochemii a organickou chemii. Zákon minima publikoval v roce 1840 v díle *Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie*.

Často je limitním prvkem výživy fosfor P, který rostliny vyžadují ve značném množství, ale v půdě je často obsažen v malé míře. V momentě vyčerpání fosforu (jeho imobilizaci v rostlinných pletivech) se zpomaluje růst a vývoj rostlin a nastává deficit ve výživě.

14.4 Faktory ovlivňující příjem živin

Intenzita kořenové výživy závisí na

- obsahu vody a vzduchu (resp. jejich poměru) v půdě;
- teplotě
- půdní reakci
- složení půdy (obsahu živin a jejich interakce)
- intenzitě syntézy živin do organických vazeb v kořenech a možnostech transportu biomasou
- formě aplikace hnojiv, jedná-li se o hnojení (na půdní povrch nebo do půdy s promíslením).

V procesu příjmu živin **voda** účinkuje jako médium – translokátor a distributor živin. Zároveň, protože je spojená s optimalizací životních podmínek většiny půdních organismů, se nepřímou podílí

na mineralizaci a nitrifikaci a dalších procesech uvolňujících živiny do oběhu. Voda se významně podílí na tvorbě biomasy: na tvorbě 1 kg sušiny se účastní 300-800 l vody.

Za vyšší vlhkosti je ve výživě více přítomného Ca^{2+} a Mg^{2+} a zároveň se K^+ lépe uvolňuje mineralizačními pochody.

Poměr prvků pro zajištění vyvážené výživy (Cape et al. 1990, Kazda 1990)	
Poměr živin	Hodnota
N/Ca	2-20
N/Mg	8-30
P/Zn	30-150
K/Ca	< 2*
K/Mg	2-15
* kritická hodnota	

Příjem živin významně ovlivňuje **sluneční záření**, avšak i přesto se jedná o pouhý zlomek záření dopadajícího na Zemi, které rostliny využívají při metabolických procesech: za vegetační období je využíváno cca 2,5 % (2,0-4,0 %) globálního záření. To ovlivňuje příjem dusíku, fosforu, síry i draslík, který je lépe přijímán při zastínění. Sluneční záření, jeho intenzita a světelný požitek mají těsnou vazbu na dusík obsažený v rostlinných pletivech. Ten je součástí chlorofylu, podílí se na konstrukci aminokyselin, nukleových kyselin a bílkovin a tím je základní složkou protoplazmy. Nedostatek dusíku má za důsledek změnu cukrů na škrob a tuky.

Optimální **teplota** pro příjem živin se u většiny rostlin mírného klimatického pásu pohybuje mezi 25 a 35°C. Při teplotě pod 10°C klesá mineralizace vlivem snížené aktivity nitrifikačních bakterií, (z čehož plyne, že je vhodné aplikovat dusíkatá hnojiva v jarním období). Při teplotě nižší než 6°C dochází ke snížení příjmu všech živin, zejména Ca a P. Teplota 5°C je hraniční pro příjem NO_3^- (NH_4^+ je při této teplotě ještě metabolizován, což koresponduje se skutečností, že v chladných podmínkách horských poloh je v půdách více zastoupený dusík v amonné formě). Se stoupající teplotou stoupá rozpustnost látek a zvyšuje se rychlost metabolických procesů.

Příjem živin je ovlivněn také **složením atmosféry**. Celá řada rostlin je citlivých na zvýšený obsah SO_2 (hranice je 0,1 mg/m³), který způsobuje nekrotické skvrny na asimilačních orgánech. Zvýšená koncentrace CO_2 způsobuje snížení vodivosti průduchů, ale snižuje také vliv imisí, zvyšuje efektivitu využití vody v rostlině a nárůst biomasy (viz také kapitolu 15.4.2).

Komplexní pojetí výživy rostlin a v tomto kontextu půdy jako výchozího substrátu pro jejich růst a v souvislosti se stanovištními podmínkami představuje **půdní úrodnost**. Jde o schopnost půdy jednak poskytovat rostlinám prostředí pro růst a vývoj (dostatek živin, vody, vzduchu apod.), jednak poskytovat podmínky pro život půdních organismů a jednak vyrovnávat v rámci pufrčních schopností změny v půdním prostředí.

15 DEGRADACE A OCHRANA PŮDY, ENVIRONMENTÁLNÍ POJETÍ PŮDY

Za degradaci půdy lze považovat zhoršování půdních vlastností a tím i stanoviště antropogenními faktory.

Degradace půdy se projevuje ve zhoršování půdních fyzikálních, chemických nebo biologických vlastností. Je výsledkem vnějších faktorů, jako jsou geologické, klimatické, biologické a antropické podmínky, ale také vnitřních faktorů, které podmiňují stabilitu půdy, její kvalitu a „zdraví“ (jako je půdní chemismus, půdní pufovitost, biologická aktivita a celá řada dalších vlastností).

Ve smyslu lesnické pedologie riziko degradace půdy spočívá zejména

- v acidifikaci půdy vlivem imisí
- intoxikaci půdy cizorodými látkami (pesticidy, těžké kovy, soli)
- v neadekvátních melioračních opatřeních za účelem zmírnění acidifikace
- ve zhoršení fyzikálních vlastností vlivem těžební techniky
- v nevhodné dřevinné skladbě a následných změnách v půdním chemismu a společenstvech půdního edafonu
- v intenzifikaci lesního hospodářství (plantáže a krátkověké rychle rostoucí dřeviny)
- záboru lesní půdy

15.1 Chemická degradace půdy

Chemická degradace spočívá ve změnách půdního chemismu ve smyslu

- změn půdní reakce (acidifikace nebo alkalizace)
- změn v koncentraci solí v půdě
- ztráty trofnosti půdy (vyplavení živin, snížení půdní sorpce)
- intoxikace rizikovými prvky (zejména těžkými kovy)
- snížení kvality organické hmoty

Z hlediska výživy lesních dřevin mohou být v půdě navýšeny koncentrace prvků, které mohou při normálním obsahu zcela neškodné, avšak při jejich navýšení se stávají toxickými – jako je hliník, zinek, nikl, olovo, arsen, ve vodě rozpustné soli, ale i karbonáty.

Vedle vlastních změn v půdním chemismu, kterými se budeme dále v této kapitole podrobněji zabývat, má každá změna v půdním chemismu půdy odezvu ve **změně společenstev půdních organismů**. Vizuálními projevy je změna ve skladbě vegetace, která reaguje zejména na půdní reakci, trofnost půdy a vodní režim. Na úrovni půdního edafonu se však také odehrává celá řada změn ve skladbě mikrobiálního společenstva, na které má změna v obsahu různých látek (forem dusíku, síranů, vodíku atd.) komplexní vliv. Reakce půdního edafonu na změny v půdním chemismu má odezvu v kvalitě dekompozičních procesů a produktů humifikace, změnách humusových forem a koloběhů látek, ve snižování imunity mezoedafonu k mikrobiálním parazitům, houbám i prvokům, ve zkrácení životních cyklů, snížení plodnosti aj. Zejména v lesních půdách s sebou navazující vápnění nese v souvislosti s biologickou aktivitou značná rizika: zatímco vlivem acidifikace dochází k redukci počtu druhů půdních organismů a následnému vyselektování acidofilního společenstva, následné meliorační vápnění nejen že původní společenstvo neobnoví, ale navíc působí drasticky na acidofilní společenstvo, které se uzpůsobilo nově nastoleným podmínkám. Takto je postupně redukováno také acidofilní půdní společenstvo a sním také biologická aktivita i celá funkce edafonu (Rusek in Hruška, Cienciala 2005).

15.1.1 Acidifikace

Acidifikace je proces změny chemismu půdy, při kterém dochází ke snižování obsahu bází (živin) a naopak ke zvyšování obsahu kyselých kationtů (vodíku). Důsledkem a zároveň projevem je snížení půdní reakce (pH). Acidifikace tedy znamená změnu chemismu v čase a provází ji ztráta živin

vymýváním v důsledku přirozených acidifikačních procesů, odběru biomasy spolu se sklizní (zemědělské půdy) nebo těžbou (lesní půdy) nebo také atmosférické depozice polutantů.

Díky půdní pufovitosti půda disponuje schopností udržovat půdní reakci (půdní aciditu/půdní bazicitu) v určitých hodnotách pH. Zároveň však vlivem přirozených nebo antropogenních procesů dochází ke změnám v půdní reakci. V případě, že dochází k okyselování půdy, hovoříme o acidifikaci, v případě, že dochází ke snižování kyselosti, hovoříme o alkalizaci. V podmínkách mírného pásu a humidního klimatu mají půdy přirozenou tendenci se okyselovat, proto je v tomto textu acidifikaci věnována větší pozornost.

V případě zvýšení intenzity okyselování zejména antropogenní činností hovoříme o *urychlené acidifikaci* půdy (Bedrna, 2002; Hruška & Ciencala, 2005; Šimek, 2004). Acidifikace je znak půdy, který znamená změnu půdní reakce od alkalické směrem ke kyselé a je doprovázen snížením schopnosti půdy neutralizovat kyselé ionty. Jak acidifikace, tak alkalizace jsou původně přirozené změny v půdní reakci vyvolané např. procesem podzolizace, ilimerizace, salinizace (viz kapitulu 6.1). Antropogenní činnost se podílí na urychlené acidifikaci nebo alkalizaci zejména atmosférickou depozicí polutantů, kyselými dešti, nevhodnou dřevinnou skladbou, hnojením, vápněním nebo zimním solením. Přirozeně probíhá acidifikace v řádech stovek až tisíců let, zatímco urychlená acidifikace se může projevit i v rámci decénia.

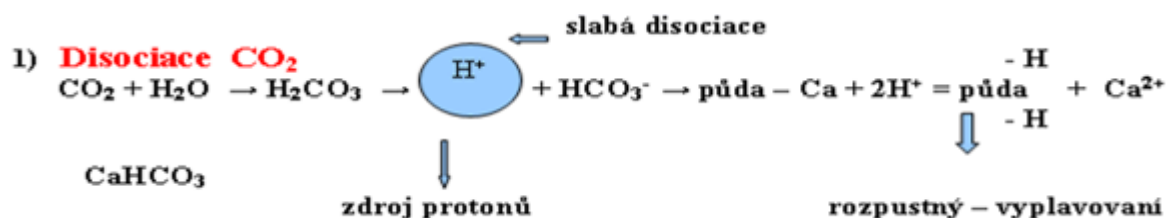
Acidifikace se odehrává buď v důsledku působení (1) interních zdrojů, jako je disociace CO_2 , disociace organických kyselin, akumulace kationtů v biomase a jejich odběr z půdy v rámci koloběhů v lesním ekosystému, zvětrávací a dekompoziční procesy, oxidační procesy, hydrolýza při desorpci iontů hliníku, nebo (2) externích zdrojů, mezi kterými jsou nejvýznamnější imise.

15.1.1.1 Příčiny acidifikace

Podstatné je, že acidifikace je v zásadě přirozený proces, který probíhá i bez antropogenních vlivů, zejména v půdách horských poloh, které jsou typické přirozeně nízkou hodnotou pH, nízkou bazickou saturací, nízkou sorpcí a pufovitostí půdy. Vlivem lidské činnosti však může dojít intenzivnějším acidifikačním procesům v půdě. Příkladem může být celá zemědělská produkce nebo další intenzivní způsoby využívání půdy, při kterých dochází k odběru živin. V takových případech jsou živiny do půdy zpětně dodávány nejrůznějšími formami hnojení (viz kapitulu 13). V případě lesních půd jsou podobné meliorační zásahy otázkou detailního šetření konkrétního stanoviště, na základě kterého je stanovena míra acidifikace a tím rizika chemické degradace půdy. Toto riziko však musí být vždy posuzováno v kontextu stanoviště, dřevinné skladby i zdroje případného polutantu nebo příčiny změny půdního chemismu. Proto zde uvádíme vedle antropicky podmíněné acidifikace také přirozené mechanismy, při kterých dochází ke změnám v půdním chemismu:

- Disociace CO_2

K disociaci CO_2 dochází podle rovnice



Během reakce dochází ke slabé disociaci vzniklých hydrogenuhličitanů, které jsou zdrojem protonů. Z vazeb uvolněný vodík je v půdě mobilní a dochází k jeho vyplavování.

- **Disociace organických kyselin**

V tomto případě má kyselost původ v humifikačních procesech. Proces lze vyjádřit podle rovnice

2) Disociace organických kyselin – pochází z humifikace!



Vodík se uvolňuje z vazeb karboxylových skupin do půdního prostředí a tvoří se tak volné skupiny HCO^- a organické kyseliny.

- **Akumulace kationtů v biomase (odběr živin lesním ekosystémem)**

Při přijímání živin rostlinami (kationtů) dochází k ekvivalentnímu uvolňování iontů H^+ do půdy z kořenů rostlin. Produkce vodíkových iontů se tak rovná odběru živin z půdy a je snížena o přísun živin ve formě opadu a o vyplavování vodíku z půdy s půdní vodou.

- **Zvětrávací a dekompoziční procesy**

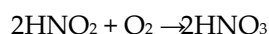
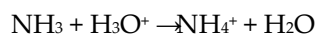
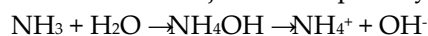
K uvolňování vodíkových kationtů dochází jednak při zvětrávání minerálů a hornin, jednak při dekompozici organických zbytků. Zároveň probíhá desorpce (zpětné uvolňování) adsorbovaných aniontů (NO_3^- , SO_4^- , H_2PO_4^- , Cl^- , F^- apod.), které jsou z půdy odnímány rostlinami. Produkce H^+ je potom rovná příjmu živin rostlinami, navíc snižena o vstupy živin z atmosféry a z opadu.

- **Oxidační a redukční procesy**

Oxidační procesy probíhají ve vazbě na acidifikaci zejména v souvislosti s dusíkem. Zdrojem acidifikace je ale i oxidace dalších prvků, např. síry podle vztahu



Obdobně účinkují oxidační procesy v případě amonných sloučenin:



Za zvýšeného přísunu dusíku (např. v případě imisí) dochází k nutriční nerovnováze. Zvýšený příjem dusíku má za následek zvýšenou produkci biomasy a také zvýšené odčerpávání dalších živin z půdy, jako vápníku Ca^{2+} , hořčíku Mg^{2+} nebo draslíku K^+ .

Samotná amonifikace je proces, při kterém nedochází primárně k produkci vodíku v půdě, avšak při příjmu dusíku v amonné formě ano. Tvorba amoniakální formy dusíku v prvním stupni (NH_3) během rozkladu, zejména z bílkovin (odumřelá hmota opadu), nezahrnuje ani produkci ani spotřebu vodíkových iontů. Ve druhém stupni amonifikace dochází k protonaci – reakci vody s NH_3 , čímž vzniká amoniakální forma dusíku NH_4^+ , přijatelná rostlinami a adsorbovatelná na půdní sorpční komplex. Při tomto procesu je vodík z půdy odebíráán a čistá kumulativní produkce vodíku je deficitní (-1H). Jestliže však je NH_4^+ odebíráán porostem (zejména ve smrkových porostech) nebo mikroflórou, H^+ je uvolněn při odběru do půdy (+1H). Kumulativní produkce vodíku je pak nulová.

Přes listy může být přijato až 10-20 % N, což činí přibližně 20-25 kg N/ha.

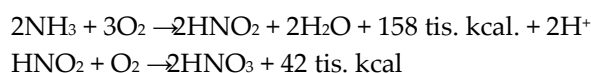
Zejména v nižších polohách a na středně bohatých stanovištích dochází k oxidaci amonné formy na nitrátovou, přičemž jsou uvolňovány při vzniku jednoho aniontu NO_3^- dva kationty H^+ . Čistá

kumulativní produkce při zohlednění protonace ($\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+$) je 1H^+ (každý mol NH_3 přeměněný na NO_3^- produkuje 1 mol HNO_3).

Jestliže je NO_3^- odebírán porostem, pak je z porostu uvolněn hydroxylový aniont OH^- a produkce H^+ je nulová. Tato situace však zejména ve smrkových porostech nastává zřídka, neboť smrk preferuje výživu dusíkem v amonné formě (NH_4^+).

Je-li však aniont NO_3^- vyplaven (dusičnanová forma dusíku), což při jeho vysoké mobilitě je dosti pravděpodobné, nastává čistá produkce 1H^+ do půdy a dochází k acidifikaci. Nejsou-li dusičnany z půdy vyplavovány a nevyskytuje-li se vnější vstup N iontů z ovzduší, čistá produkce vodíku je nulová

V teplém období, nebo také při odlesnění, kdy je půdní povrch více prohříván, dochází ke zvýšené mineralizaci a tím také nitrifikaci (oxidaci amoniaku na nitráty) podle vztahu



Je-li v takových případech dodán vápník formou vápnění, důsledkem je uvolnění vodíku z vazeb s nitráty za vzniku $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ a uvolnění vodíku do půdního roztoku. Dočasně tak může dojít k okyselení půdního roztoku.

- **Hydolýza při desorpci iontů hliníku (Al^{3+}) a železa (Fe^{3+})**

Hydolýza vlivem účinku hliníku a železa má za následek uvolňování vodíku ve velkém množství, a to podle vztahu



Do půdního roztoku se tak dostává trojnásobné množství H^+ iontů s tím, že kyselost (aciditu) způsobují adsorbované ionty H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} i Fe^{2+} . Hliník je v půdě rozpustný v závislosti na pH (do výměnné formy Al^{3+} přechází až při $\text{pH} < \text{cca } 5,5$; do té doby je ve formě nerozpustného gibbsitu). Tak např. při vápnění půd při kyselém pH jsou iontem vápníku Ca^{2+} nejprve desorbovány H^+ ionty, zatímco při pH nad 5 jsou desorbovány ionty Al^{3+} , které jsou hydrolyzovány na ionty $\text{Al}(\text{OH})_x$. Hliník ve vysokých koncentracích také působí fyziologické problémy kořenového systému smrku (Hruška, Cienciala 2005). Zejména při nízkém poměru bazických kationtů a Al obsazuje hliník výměnná místa na buněčných membránách kořenového apoplastu a narušuje iontovou rovnováhu, brání aktivnímu transportu iontů, zejména Mg. Tím dochází k odumírání zejména jemných kořenů a následným poruchám v příjmu živin a vody. Hliník také může blokovat aktivitu některých půdních enzymů.

15.1.1.2 Antropogenní acidifikace, imise – vliv základních polutantů S a N na lesní půdu

Přirozený proces acidifikace může být umocňován vlivem kyselé depozice nebo nevhodné dřevinné skladby (zejména prosazování jehličnanů s kyselým opadem). Zároveň v těchto porostech roste vliv melioračních a zpevňujících dřevin, jako je bříza nebo jeřáb, které mohou svým opadem zvýšit hodnoty pH až o 1,3 a zvýšit koncentrace bazických kationtů až 3-4x.

K antropicky podmíněné acidifikaci dochází také vlivem používání fyziologicky kyselých hnojiv, jako je močovina (následný vznik kyseliny dusičné), síran draselný nebo síran amonný (následný vznik kyseliny sírové).

Aplikací fyziologicky kyselých hnojiv (např. draselná sůl KCl 60 %) dochází zejména na zemědělských půdách k acidifikaci. Např. při aplikaci 120 kg K/ha (240 kg hnojiva/ha) dodáme současně s draslíkem také 109 kg chlóru Cl. Toto množství chloridů váže ekvivalentní množství vápníku, v našem případě 61 kg Ca/ha. Jestliže komodity (pěstované rostliny) odeberou 40 kg Cl, zbývá v půdě z uvedeného hnojení ještě 69 kg Cl, což za předpokladu, že budou mobilní chloridy vyplaveny z půdy s podzemní vodou, znamená ztrátu vyplavením ekvivalentního množství Ca, tj. 39 kg/ha.

Síra se z atmosféry ve formě polutantů dostává jako oxid SO_2 . Ten přechází do formy iontu SO_4^{2-} , který je adsorbován na pevné fázi půdy nebo je sorbován biologicky. Dále vznikají síranové soli za spotřeby ekvivalentního množství kationtů. Na zemědělských půdách dochází k vazbám zejména s Ca^{2+} , Mg^{2+} a K^+ (CaSO_4 , MgSO_4 , K_2SO_4), což má za následek zakyselení půdy a eutrofizaci (obohacení) podzemních vod. V lesních půdách jsou sírany vázány převážně na ionty H^+ a Al^{3+} (H_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), což má za následek zakyselování podzemních vod.

Důsledky imisí v lesních porostech jsou zřejmé z obrázků ze 70. a 80. let, kdy docházelo k rozsáhlému poškození porostů zejména v horských polohách v česko-německém a česko-polském pohraničí. Avšak vedle působení imisí na půdní prostředí je mnohem zásadnější vliv kyselých dešťů na asimilační aparát. Vlivem kyselin je poškozována kutikula a rostlina ztrácí jednak obranyschopnost vůči patogenům, jednak schopnost zadržovat vodu a zabraňovat zvýšené transpiraci.

Imisní zátěž hůře snášejí jehličnaté dřeviny: zatímco listnáče každý rok obnoví poškozený asimilační aparát, u jehličnanů dochází k chronickému ataku polutantů na jehlice, které postupně opadávají rychleji, než stačí přirůstat. Vlivem toho se snižuje počet ročníků jehličí i na pouhé 2, které nejsou schopné zajistit dostatečnou asimilační plochu a rostliny odumírají. V horských polohách zároveň dochází s námrazou spojenou s pozdními nebo časnými mrazíky k obalování nadzemních částí rostlin zmrzlou vodou obsahující ve vysoké koncentraci polutanty, které o to intenzivněji působí destrukčními účinky na asimilační aparát.

15.1.1.3 Případná opatření omezující acidifikaci

Opatření na omezení acidifikace půd lze zařadit do třech oblastí: (1) snížení emisí resp. zaměření se na zdroj acidifikace; (2) chemická meliorační opatření; (3) úprava hospodaření v postižených ekosystémech.

Zaměření se na zdroj acidifikace spočívá ve zjištění způsobu vstupu kyselých iontů do ekosystému (emise, změna chemismu povrchových a spodních vod, správná volba hnojiv a hnojivých dávek apod.) a jeho eliminace.

Mezi chemická opatření patří zejména vápnění, kterému je věnována v tomto učebním textu samostatná kapitola 15.1.2 a BOX 11—2. Vzhledem k tomu, že chemická meliorace může mít a často také má komplexnější dopady na ekosystémy ve smyslu ovlivnění biologické aktivity půdy, obsahu a forem organické hmoty, koloběhů látek apod., často se přistupuje k technicko-hospodářským a bioremediačním melioračním opatřením.

Technická opatření spočívají např. v celoplošném odstranění intoxikovaných nebo extrémně kyselých svrchních vrstev půdy. Tento postup byl proveden v 80. letech 20. stol. v Krušných horách,

kdy byly svrchní půdní horizonty odstraněny a shrnuty do valů. Jak se v tomto případě ukázalo (Kubelka, 1992), význam humusových horizontů z hlediska vodního režimu a výživy rostlin byl těžce podceněn. Podobná opatření tak sice zajistí odstranění intoxikovaných vrstev půdy, ale za cenu ztráty vododržnosti a významné zásobárny živin a tím také ujímavosti dřevin. Jako vhodnější se tak jeví biologická opatření, mezi která patří např. změna dřevinné skladby s podporou melioračních a k extrémům v chemismu a mikroklimatu více rezistentních dřevin. Takto jsou zakládány přípravné porosty náhradních dřevin, zejména listnáčů jako bříza, buk, jeřáb nebo smrk pichlavý. Tyto dřeviny jednak produkují opad s příznivým obsahem živin a urychlují koloběh látek, jednak snižují depozici okyselujících látek a acidifikaci a lze se vyhnout jak technickým opatřením, tak vápnění.

Volbu uvedených opatření je třeba pochopitelně posuzovat individuálně, ve vztahu ke konkrétnímu stanovišti, ve vazbě na obnovní cíl, míru degradace stanoviště, vliv stanovištních faktorů jako srážky, topografie apod. Ne všechny půdy vyznačující se silně kyselou půdní reakcí je třeba meliorovat, což platí zejména pro pohraniční pohoří, kde se půdy vyvíjejí na kyselých horninách, za výrazně humidního a chladného klimatu a na kterých má smrk ztepilý přirozený výskyt. Toto jsou příklady, kdy je třeba respektovat přírodní procesy vedoucí ke specifitě lesního stanoviště a kde jsou lesní porosty spíše ochranného než produkčního charakteru.

15.1.2 Karbonáty v půdě, vápnění lesních půd

Karbonáty se v půdách vyskytují zejména díky vyluhování z karbonátových hornin. V půdách humidního klimatu dochází nejčastěji k dekarbonizaci vlivem promyvného režimu půd a sestupování karbonátů do hlubších vrstev půdy, přechod do půdního roztoku a jejich vyplavení. Na nepřírodně zvýšené množství karbonátů v půdě rostliny mohou reagovat chlorózami a žloutnutím následkem špatné výživy ostatními elementy (dusík, železo, mangan, fosfor, popř. draslík u jehličnanů). Poruchy ve výživě mají komplexní fyziologické aspekty: přechod dusíku do nitrátové formy a současně nedostatečná aktivita enzymů nitráto-reduktáz; zvýšení koncentrace iontu Ca^{2+} a současná redukce syntézy organických kyselin, snížení rozpustnosti některých oligoelementů při zvýšeném pH, redukce trojmocného železa na dvojmocné (Jabiol et al. 2009). Nepříznivý efekt karbonátů je o to výraznější v sušších půdách, zatímco ve vlhkých půdách je zmírněný.

Dřeviny citlivé na zvýšené koncentrace karbonátů v půdě jsou smrk ztepilý, borovice lesní, borovice přímořská, douglaska, jedle kavkazská, kaštanovník, dub korkový a některé druhy eukalyptu. Dřeviny tolerantní ke zvýšeným koncentracím karbonátů jsou buk lesní, borovice černá, borovice pyrenejská, borovice limba, javory, jasan. Dub letní také snáší do značné míry karbonáty, alespoň je-li půda dostatečně saturována vodou, zatímco dub zimní a dub červený jsou nepříteli tolerantní.

Vápnění, stejně jako hnojení, má opodstatnění zejména v intenzivně obdělávaných půdách, tedy zemědělských půdách a v lesních školkách. V půdách lesních stanovišť by každé chemické melioraci mělo předcházet šetření zaměřené na stav edafických podmínek, případné zdroje acidifikace a na výživu rostlin. V opačných případech s sebou vápnění nese četná rizika.

Již Ulrich a Keufel (1970) upozorňovali na nepřiměřená rizika spojená s vápněním lesních porostů, zejména v horských polohách, kdy došlo v důsledku celoplošného leteckého vápnění ke ztrátám až 15 t C a 470 kg N na 1 ha. Podobně Hüttl a Zöttl (1993) prokázali sice nárůst pH, ale současně ztráty v obsahu dusíku a draslíku, čímž předpokládaného efektu vápnění ve zvýšené produkci dosaženo nebylo. Snížení obsahu ostatních živin ve prospěch vápníku v důsledku vápnění bylo zjištěno i dalšími autory (Mai, Fielder 1979), a to i na tři dekády po aplikaci vápence (Lettl 1991, 1992).

K těmto podstatným změnám v půdním chemismu v zemědělských půdách nedochází, neboť tam přímo pracujeme s obsahem živin, který přizpůsobujeme pěstovaným plodinám s krátkým obmětím (zpravidla 1-2 roky) – na rozdíl od lesních půd, kde je třeba přizpůsobovat dřevinou

skladbu přírodním podmínkám a respektovat stav edatopu. Vlivem vápnění dochází vedle zvýšení hodnot pH také ke stimulaci biologické aktivity. Důsledkem je zrychlená mineralizace nadložního humusu, který je zkonsumován půdní mikroflórou. Zejména v horských polohách s mocnými vrstvami nadložního humusu je povrchová vrstva půdy nenahraditelná z aspektu zásobárny živin, pufracího nárazníku, ale i vodního režimu půdy.

Vlivem půdní pufrovitosti je v případě horských poloh s půdami s mocnou vrstvou nadložního humusu navíc vápnění pro zvýšení pH minerální půdy velmi neefektivní.

V kontextu vývoje zdravotního stavu lesních porostů v uplynulých letech (70. léta 20. stol. až r. 2000) by se tak mohlo zdát, že lesní porosty zdárně odrůstají vlivem příznivých účinků vápnění. Jak však bylo zjištěno (Hruška, Cienciala 2005; Vavříček in Hruška, Cienciala 2005), příčina zlepšení zdravotního stavu lesních porostů spočívá zejména ve snížení atmosférické depozice polutantů a tak v odstranění přímého účinku imisí na asimilační orgány dřevin, zatímco z pohledu půdního chemismu výrazné změny zaznamenány nebyly.

Vápnění půdy podle očekávání ovlivňuje stav iontů na půdním sorpčním komplexu. Zvyšuje se bazická saturace, zejména ionty Ca a Mg, na středně dlouhou dobu, avšak v půdě dochází k celé řadě dalších změn. Stimulace půdní bioty má za následek rychlejší humifikaci a mineralizaci a tím snižování zásoby humusu i živin, které jsou z půdy vyplavovány. Bylo tak zjištěno zvýšení obsahu dusíku v půdní vodě, zvýšení bakteriální aktivity, nárůst populací protozoa, ale také byla zjištěna výrazná reakce kořenů rostlin. Jejich kořenové vlášení se přesouvá do mělčích partií půdy s navozeným příznivějším chemismem. Důsledkem je pak značné riziko v souvislosti s přísušky, kdy zmineralizované organické horizonty nemají dostatečnou zásobu vody a mělká kořenová vrstva snadno prosychá. V důsledku tak může vápnění způsobit prosychání porostů, poškození mrazem nebo nedostatečnou výživu hořčíkem. Toto je typické zejména pro smrk, zatímco buk může reagovat lepším kořeněním v minerální vrstvě půdy.

S efektem vápnění souvisí také půdní pufrovitost (viz také kapitulu 11.1.2). Ta účinkuje stabilizačně na půdní chemismus proti změnám nejen směrem ke snižování pH, ale i k jeho zvyšování. Z toho důvodu lze očekávat, že i zvýšení hodnot pH vápněním je v půdě dočasné a že se hodnoty vrátí v relativně krátké době do přirozeného stavu, kterým může být i to, že se půda nachází již v pufracím pásmu hliníku nebo železa. Pro vysokohorské prostředí na kyselých vulkanitech krystalinika s porosty smrku je to však zcela přirozený stav: v lesních ekosystémech je vývoj půdního prostředí přirozený proces, který ústí do charakteristických půdních jednotek. Ty se liší podle stanoviště hodnotami chemických a fyzikálně chemických vlastností půdy, ale i vodním režimem, čemuž je nutné modifikovat dřevinnou skladbu porostů.

15.1.3 Hliník v půdě

Hliník ve formě kyselého kationtu Al^{3+} (ve výměnné formě) je hojný v kyselých půdách. Při zvýšeném pH je vázán s hydroxidy v nerozpustné formě minerálu gibbsit a nemá kyselý účinek na půdu.

Toxicita hliníku v půdě pro vybrané dřeviny:	
dřevina	limitní obsah Al
smrk ztepilý	50 mg/l
javor cukrový	4 mg/l

Zvýšený obsah hliníku v půdě se neprojevuje vizuálními karenními jevy, jako jsou chlorózy apod. Projevuje se redukcí růstu nadzemní části stromu, u mladých jedinců také kořenového systému.

Je také doprovázena neobvykle nízkým obsahem hořčík a vápníku v jehlicích nebo listech. Zároveň nastává zhoršená výživa dusíkem, která však závisí na kvalitě humusu.

Škodlivé účinky hliníku spočívají zejména ve vytěšňování bazických kationtů ze sorpčního komplexu. Vedle toho však také obsazuje povrch kořenových špiček a brání tak v příjmu živin do kořene. Tak může nastat situace, že i za optimálního obsahu živin může být zhoršený jejich příjem a tím nedostatečná výživa. Zvýšený obsah hliníku a tím zvýšená kyselost také způsobuje změny ve skladbě půdního edafonu, konkrétně houbových společenstev, a to ve prospěch hub vyžadujících (snášejících) zvýšené koncentrace Al^{3+} , avšak v neprospěch mykorrhizních hub.

Ke zvýšeným koncentracím hliníku v půdě je citlivá většina lesních dřevin, zejména listnatých.

Toxicita hliníku ve vztahu k bazickým kationtům

Limitní poměry bází a hliníku (horní hranice, pod kterou je koncentrace hliníku rizikový z hlediska minerální výživy)

Poměr Ca/Al (cmol/cmol)	0,07
Poměr Mg/Al (cmol/cmol)	0,035

Zejména hořčík je při zvýšené koncentraci hliníku v půdě špatně adsorbován na půdní sorpční komplex. Proto mohou být živiny pocházející z externích zdrojů (se srážkami, z mineralizace, z hnojení) obtížně fixovány v půdě a tak mohou být vyplaveny s půdní vodou z ekosystému.

Vedle nedostatečné výživy však také dochází ke snižování samotné sorpční kapacity půdy, což je již dlouhodobý a obtížně vratný efekt.

15.1.4 Těžké kovy v půdě

Jakkoli se těžké kovy v půdě mohou vyskytovat pouze ve stopových koncentracích, mohou mít dalekosáhlé následky na stav půdy, ale i rostliny a živočichy při jejich zvýšeném příjmu. Zvýšené koncentrace těžkých kovů v lesních půdách však nejsou rozšířeným fenoménem a mají zpravidla vazbu na antropickou činnost (vyjma oblastí s regionálně-geologickým výskytem ultramafických hornin). Jejich sledování je tak často omezeno zejména na eutrofizované půdy, antropogenní sedimenty, kaly, lomy a rudní ložiska nebo ultramafické horniny v půdotvorném substrátu, tedy lokality určené k zalesnění a k remediacím.

Těžké kovy jsou řazeny do skupiny cizorodých látek, které se mohou významně podílet na kontaminaci životního prostředí. Toxicita těžkých kovů je závislá na jejich setrvání v půdě, zejména v humusem obohacených horizontech. Důsledkem účinků těžkých kovů v půdě je ekologická degradace půdy, zejména v oblasti biologické aktivity. U zemědělských půd riziko spočívá v intoxikaci potravin.

Doba setrvání těžkých kovů v ovzduší

Pb	7 dní
Cd	2 hod až 4 dny
Zn	0,4 dne

OLOVO (Pb) – hygienický limit 70 mg/kg (2M HNO_3)

V půdě je olovo velmi málo mobilní. Je slabě rozpustné v půdním roztoku (jeho soli), Pb^{2+} se dobře adsorbuje na humus (humínové kyseliny). Pb^{2+} inhibuje mikrobiální aktivitu. Přijaté z půdy se v rostlině kumuluje zejména v kořenovém systému a málo v reprodukčních orgánech, do asimilačních orgánů vstupuje převážně z atmosféry. Koncentrace olova v rostlině není zcela úměrná zvýšeným koncentracím v půdě: stoupne-li v půdě obsah olova 10x, v rostlině přibližně 2x.

Zdrojem olova je (byla v době provozování olovnatých paliv) doprava. Dalšími zdroji jsou hutě a energetika. Ve vzduchu se vyskytuje v koncentracích max. 0,05-0,2 mg/m³, z čehož max. 40 % je absorbováno dýchacími cestami.

V přírodě se olovo vyskytuje zejména v draselných minerálech (živce, slídy). Je chalkofilní (vytváří sloučeniny se sírou), jako např. galenit PbS. Ve vyvřelých horninách je olovo obsaženo z cca 10-30 mg/kg, v jílovitých sedimentech 20-40 mg/g, u ultrabazických hornin jeho obsah klesá.

V půdě je olovo dobře poutáno humusovými látkami a jílovými minerály, ale také s FeOH s tím, že je v humusových látkách poutáno pevněji než v jílových minerálech.

BOX 15—1: Limitní hodnoty pro koncentrace těžkých kovů v půdě.

Box 15_1					
Maximální přípustné koncentrace rizikových látek v půdě stanovuje příslušný právní předpis daného státu a je také předmětem mezinárodních úmluv v rámci EU.					
Hodnoty obsahu rizikových látek [mg·kg ⁻¹ sušiny] v půdě (upraveno podle Kelly in Sánka, Materna 2004).					
Prvek	Bez kontaminace	mírná kontaminace	střední kontaminace	silná kontaminace	extrémní kontaminace
Arsen	< 30	30-50	50-100	100-500	> 500
Kadmium	< 1	1-3	3-10	10-50	> 50
Chrom	< 100	100-200	200-500	500-2500	> 2500
Měď (přístupná)	< 100	100-200	200-500	500-2500	> 2500
Olovo	< 500	500-1000	1000-2000	2000-1 %	> 1 %
Olovo (přístupné)	< 200	200-500	500-1000	1000-5000	> 5000
Rtuť	< 1	1-3	3-10	10-50	> 50
Nikl (přístupný)	< 20	20-50	50-200	200-1000	> 1000
Zinek (přístupný)	< 250	250-500	500-1000	1000-5000	> 5000
Bor (přístupný)	< 2	2-5	5-50	50-250	> 250
Maximální přípustné hodnoty obsahu rizikových prvků v půdě podle vyhl. č. 13/1994 [mg·kg ⁻¹ sušiny].					
Prvek	Výluh v 2M HNO ₃		Celkový rozklad v lučavce královské		
	Lehké půdy	Ostatní půdy	Lehké půdy	Ostatní půdy	
Arsen	4,5	4,5	30,0	30,0	
Kadmium	0,4	1,0	0,4	1,0	
Chrom	40,0	40,0	100,0	200,0	
Rtuť	-	-	0,6	0,8	
Nikl	15,0	25,0	60,0	80,0	
Olovo	50,0	70,0	100,0	140,0	
Zinek	50,0	100,0	130,0	200,0	

Nízkomolekulární organické kyseliny (fulvokyseliny) mohou olovo rozpožehovat tím, že je převedeno do formy chelátů, které jsou v půdě stále pohyblivé. Tak se zvýší jak mobilita olova v půdě, tak také jeho přijatelnost rostlinami. Olovo je také mobilnější v kyselých půdách.

Naopak, imobilizace (z důvodu zamezení vstupu do biomasy a do potravního řetězce) je možná pomocí organické hmoty. Protože se váže olovo na organickou hmotu, je možné jejím zapravením do půdy olovo v půdě imobilizovat. Dále lze využít tzv. chemosorpce vytvořením málo rozpustných solí olova. Je také blokováno při vyšším pH, a tak lze jeho pohyblivost v půdě snížit vápněním (spíše na zemědělských půdách) nebo hnojením (s fosforečnými hnojivy tvoří olovo nerozpustné fosforečnany).

Nejvyšší přípustné množství Pb jako cizorodého prvku v krmivech je 20 mg/kg.

Box

Je nutné při stanovování obsahu olova v půdě zohlednit také obsah humusu v půdním vzorku. Hodnoty obsahu sledované látky (v tomto případě olova) se pak přepočítávají pomocí objemové hmotnosti redukované na limity stanovené pro minerální půdy. Pro tyto potřeby se vychází z předpokladu, že hmotnostní poměr minerál:humus je 6-7:1!

Např.:

je-li zjištěna koncentrace olova 300 mg/kg sušiny v humifikačním horizontu H, je třeba toto číslo vydělit 6-7x (viz také BOX 13—4), což je 43-50 mg/kg, což je stále pod hranicí rizika.

Chelát = komplex vytvořený z organické látky humusu a kovů, který setrvává stále v rozpustné formě.

KADMIUM (Cd) – hygienický limit 1 mg/kg (2M HNO₃)

V půdě je kadmium podstatně mobilnější než olovo, čímž se dostává do větších hloubek půdy. Kadmium výrazně inhibuje mikrobiální aktivitu a ve vysokých dávkách poškozuje půdní mikroflóru. Zároveň má negativní vliv na rostliny, omezuje fixaci N a zpomaluje mineralizaci. Vlivem kadmia bývá narušena aktivita enzymů (fenolázy, anhydrázy, proteinázy, peptidázy).

Kadmium je přijímáno kořeny i listy s tím, že v listech bývá obsaženo ve větším množství. V kořenech jeho převaha začíná až při obsahu Cd v půdě nad 40 mg/kg. V rostlinách se kadmium hromadí v proteinech.

Z atmosféry je 30-50 % Cd přijímáno přes listy.

Kadmium je jedním z nejtoxičtějších prvků pro člověka, zvířata i rostliny již při relativně malých dávkách (0,1-0,2 mg/kg). Za posledních 150 let však jeho obsah v ekosystémech vzrostl o 27-60 %.

Zdrojem kadmia je zejména energetika (spalovny odpadů, méně spalovny uhlí), metalurgie (hutě, zpracování rud olova a zinku), doprava a výroba průmyslových barviv.

Přirozeně se kadmium vyskytuje ve vyvřelých a sedimentárních horninách, kde zpravidla nepřesahuje koncentrace 0,3 mg/kg. Dále se vyskytuje v organických sloučeninách a je sorbováno na půdní koloidy, zejména jílové minerály, z nichž nejvíce na vermikulit (až 61 mg/kg). Kadmium je pohyblivé s půdní vodou. Hromadí se ve fosfátech (apatitu) – i 2-3 g Cd/ha/rok – a v půdě tak může dosahovat hodnot až 0,2-1,5 mg/kg.

V půdě se kadmium kumuluje v hydratované formě s oxidy Mn, Fe a Al. Taky je vázané na humusové látky – huminové kyseliny –, avšak tyto komplexy jsou méně stabilní než např. u olova. Největší koncentrace kadmia jsou do hloubky 0-5 cm.

S klesající hodnotou pH rozpustnost a pohyblivost kadmia silně stoupá. Nejpohyblivější je při pH 4,5-5,5. Pohyblivost také zvyšují ionty Cl⁻, které zvyšují množství Cd vázaného na montmorillonit. Cd je silně mobilní za nedostatku jílových minerálů v půdě a při převaze fulvokyselin.

Imobilizace spočívá v zamezení vstupu do biomasy a do potravního řetězce. Toho lze docílit navozením zásaditého prostředí: při pH 7,5 kadmium přestává být rozpustné, neboť o jeho rozpustnosti rozhoduje přítomnost CdCO₃ a Cd₃(PO₄)₂. Aplikace síranů způsobuje vysrážení kadmia a snížení jeho rozpustnosti. Imobilizačně také působí aplikace huminových kyselin, které vytvářejí s kadmii komplexy. Ty jsou však méně stabilní než v případě Pb. Lze říci, že při zvýšení pH o 1 stupeň dojde ke snížení mobility Cd až 100x a tím také ke snížení jeho obsahu v rostlinách – až o 60 %. Koncentraci Cd lze eliminovat aplikací sorbentů, jako je bentonit.

Půdní roztok je vysoce kontaminovaný, obsahuje-li 0,2-6 µg Cd/l.

Nejvyšší přípustné množství Pb jako cizorodého prvku v krmivech je 5 mg/kg.

CHROM (Cr)

Chrom je ve formě Cr^{3+} málo pohyblivý a neškodný, toxický pro rostliny je jako Cr^{2+} .

Chrom je důležitý mikroelement pro zdravotní stav a výživu, avšak začíná být toxický už při nízkých koncentracích.

Chrom je obsažen ve vyšších koncentracích v humusových horizontech. Přirozeně se vyskytuje ve vyvřelých horninách, v pyroxenitech v množství až 1600-3400 mg/kg, dále v ultrabazických horninách (olivínovcích) v koncentraci až 2000 mg/kg, v hadcích, lateritech a uhlí. V nekontaminované půdě se obsah Cr pohybuje v rozmezí 5-120 mg/kg.

Chrom barví půdu s Fe a Mn do hnědých odstínů.

Chrom je obsažen hlavně v kalech, v průmyslových kompostech, je uvolňován při spalování uhlí, při pokovování, výrobě nátěrů a čistících prostředků.

V zásaditém prostředí se sráží na oxidy Fe a Al v trojmocné formě. V kyselých půdách tvoří rozpustné komplexy, zatímco v alkalických půdách málo rozpustné hydroxidy. V aerobních podmínkách oxiduje na Cr^{6+} . Do této formy přechází nejsnáze při pH 6-7. Tato forma je v půdě rozpustná a mobilní při vazbě na sírany a na nitráty.

Účinným remediačním opatřením je vápnění (nejméně pohyblivý je v neutrálních půdách), hnojení fosforem (je zabudován do málo pohyblivých fosfátů) a aplikace kvalitních humusových látek (humátů).

ARSEN (As)

Arsen je uvolňován do prostředí při spalování v popílcích z tepláren, v kalech koželužného průmyslu, z hutí a sléváren.

V zemské kůře je průměrně zastoupen v koncentraci 1,8 mg/kg, je vázán v jílových sedimentech, v horninách obsahujících siřičky a uhelné příměsi.

Mobilní je arsen při biologické metylaci s CH_3 , kdy může volatilizovat (uvolňovat se v plynné formě) do atmosféry.

Arsen je nejméně pohyblivý v kyselých půdách, kde vytváří málo rozpustné arseničitany Fe a Al. Účinným způsobem imobilizace arsenu je aplikace humusových látek, vápence, síranu železnatého, fosforu a jílových minerálů, zejména kaolinu. V suchém klimatu je arsen téměř nepohyblivý.

RTUŤ (Hg)

Rtuť se může vyskytovat v rámci pedogeneze ve třech formách:

1. elementární Hg, která je těkavá a slabě rozpustná ve vodě;
2. dvojmocná Hg^{2+} v anorganické formě, která se vyznačuje tendencí slučovat se s organickými i anorganickými skupinami obsahujícími sírné funkční skupiny (uhlí – markazit FeS_2).
3. methylrtuť (CH_3Hg^+), což jsou vysoce stálé a odolné sloučeniny.

Methylace:

Chemická reakce, při níž dochází ke slučování s CH_3 . Je to mikrobiální proces, při kterém vzniká methylalkohol, což jsou sloučeniny s vyšší těkavostí, které se více uvolňují do atmosféry (volatilizují). Tak se mohou dostávat do potravního řetězce nebo se srážkami zpět do půdy.

V zemské kůře je rtuť málo zastoupená. Přirozeně se vyskytuje více v kyselých horninách než v alkalických, v pískách nebo karbonátech. V nízkých koncentracích se vyskytuje v jílech, ve vyšších koncentracích v břidlicích (0,02-0,05 mg/kg). V půdách je obsažena průměrně v koncentracích 0,02-0,2 mg·kg⁻¹, požadově může být nadlimitní pouze ve vazbě na antropogenní činnost.

Zdrojem rtuti jsou fosilní paliva, čistírenské kaly, fungicidy na bázi rtuti, odpady z chemiček, úpravy vod a některá hnojiva (např. NPK).

Kovová rtuť se rozpouští v půdním roztoku, kde je ve formě Hg(OH)₂. Vyšší koncentrace jsou v povrchových horizontech, zejména při vyšší alkalitě a teplotě půdy. V takových případech probíhá proces metylace, kdy je metylrtuť intenzivně sorbována na humus a jílové minerály.

Imobilizace rtuti probíhá ve vazbě na jílové minerály, kdy je kationtová forma rtuti dobře sorbovatelná půdními koloidy. Dvojmocná rtuť je silně vázána na organickou hmotu. Na hydratovaných oxidech Fe a Mn je rtuť poutána na sorpčních frakcích půdy.

Kontaminace půdy musí být posuzována samostatně v závislosti na půdních vlastnostech, jestli snižují nebo zvyšují mobilitu daného prvku.

ZINEK (Zn)

Zinek nepatří mezi silně fyto toxické prvky. Podílí se na metabolismu a aktivuje některé enzymy.

Přirozeně se zinek vyskytuje v minerální formě jako ZnS – sfalerit, starším názvem blejno zinkové.

Zinek se hromadí v humusu, kde je ve formě vysoce polarizovaného iontu Zn²⁺, který je výrazně mobilní a při zvýšeném pH se sráží v málo rozpustný Zn(OH)₂. Za neutrální reakce vzniká zinečnan vápenatý. Nejmenší rozpustnost má zinek při pH 5,5-6,9.

Ve slabě alkalickém prostředí přechází zinek do stabilních organických forem, ve slabě kyselém prostředí je adsorbován na minerální část půdního sorpčního komplexu.

Rozpustnost a přijatelnost zinku je nepřímě úměrná se stupněm nasycení půdy mědi a obsahem fosforu v půdě.

BOX 15—3: Příklad poklesu kontaminace zemědělské půdy v závislosti na vzdálenosti od zdroje chemické látky (Karviná, pozinkovna, výluh v 2M HNO₃).

Box 15_2
Obr_BOX_15_02 abc

Zlepšování půdních vlastností je zaměřeno na (1) fyzikální vlastnosti (zejména struktura a textura), které spočívá ve vylehčování těžkých půd nebo hutnění lehkých půd nebo v aplikaci sorbentů (hydroabsorbentů) a na (2) chemické vlastnosti, které na zemědělských půdách spočívají zejména v úpravách půdního chemismu prostřednictvím vápnění, hnojení a střídání osevních postupů a na lesních půdách spočívají zejména v biologických opatřeních, úpravě dřevinné skladby a prevenci. Úpravou chemických vlastností lze na zemědělských půdách saturovat alespoň 30 % z celkové kapacity sorpčního komplexu, zatímco na lesních půdách cca 5-10 %.

Fytoremediace nemusí vždy znamenat jednoznačně příznivé účinky v souvislosti se snižováním koncentrací těžkých kovů v půdě: bylo zjištěno, že těžké kovy, jímané rostlinami, jsou v rostlině distribuovány do různých orgánů v různých koncentracích. Zejména v květech a v nektaru jsou těžké kovy obsaženy ve větším množství. Důsledkem tohoto faktu tak může být distribuce těžkých kovů z lokality jejich výskytu do širšího území prostřednictvím hmyzu, v důsledku pak také do potravních řetězců.

15.1.5 Zasolení půd

Přítomnost sodných solí v lesních půdách ve větších koncentracích je zřídka jev, neboť v podmínkách lesního porostu zpravidla nepřevažuje výparný režim a tím vzestupný tok půdní vody, a zároveň lesní půdy se zpravidla vyznačují přirozenou tendencí k acidifikaci. S větší koncentrací solí v lesních půdách se však lze setkat v případech bezprostřední blízkosti vozovek udržovaných v zimě chemickým posypem, při zalesňování břehů litorálů nebo v případě vysoko položené hladiny podzemní vody s vysokým obsahem rozpuštěných solí.

Zasolování nastává v důsledku vzestupného proudění půdní vody obsahující rozpuštěné soli. Ty se buďto srážejí v půdě nebo jsou vynášeny až na půdní povrch, kde tvoří kůry, krusty a výkvěty.

Negativní účinek solí spočívá zejména v extrémním chemismu půdy. Při výrazném impaktu Na^+ do půdy jsou vytěšňovány ostatní kationty a dochází k poruchám ve výživě. Zároveň dochází k destrukci půdní struktury a disperzi půdních částic. Sodík jako jednomocný kationt nedisponuje koagulačními účinky, jako např. Ca^{2+} nebo Mg^{2+} , půdní částice jsou tak individualizovány a půdní struktura se stává slitou a elementární. Sodík je navíc v hydratované formě velmi slabě vázán na půdní koloidy, které jsou od tak od sebe v půdě více vzdáleny – na rozdíl od účinku dvojmocných kationtů, které jsou na koloidy těsněji vázány a koloidy jsou tak poutány van der Waalovými silami. Soli také výrazně ovlivňují vodní režim půdy. Vlivem disperze půdy se extrémně snižuje infiltrační schopnost a hydraulická vodivost a dochází ke snižování fyziologické dostupnosti vody pro rostliny a poruchám ve výživě. K tomu dochází jednak vlivem snížení osmotického potenciálu, kdy rostliny nejsou schopné zajistit koncentrační spád směrem do kořene, a jednak vlivem iontového efektu, kdy sodík způsobuje nevyvážený příjem ostatních iontů a ionty si v příjmu vzájemně v podstatě konkurují.

K zasolení jsou citlivější mladší rostliny než starší. U smrku ztepilého se projevuje toxicita v důsledku sodných solí žloutnutím a opadem jehlic a nevratným chřadnutím, a to při obsahu 0,33 g NaCl/kg půdy. K zasolení půd jsou jehličnany značně citlivé, zatímco řada listnáčů dosti tolerantních.

Větší toxicitou se vyznačují sodné soli ve sloučeninách s karbonáty (Na_2CO_3) než ve sloučeninách se sírany (Na_2SO_4).

Negativní účinek solí v půdě výrazně eliminuje organická hmota. Při zasolení rozsáhlých území se přistupuje k proplachování půdy závlahovou vodou. Lze také využít vlastnosti hydroabsorbentů. V podmínkách středoevropského klimatu opatření vůči zasolení z pohledu lesnické pedologie spočívá zejména ve vhodném výběru dřevin (např. *Ailanthus altissima*, *Carya cordiformis*, *Carya laciniata*, *Castanea sativa*, *Ginkgo biloba*, *Gleditsia triacanthos*, *Fraxinus pennsylvanica*, *Picea omorica*, *Picea orientalis*, *Pinus heldreichii*, *Pinus nigra*, *Pinus ponderosa*, *Pinus walichiana*, *Platanus acerifolia*, *Populus alba*, *Populus berolinensis*, *Populus canescens*, *Populus euroamericana*, *Populus koreana*, *Quercus cerris*, *Quercus frainetto*, *Sophora japonica*, *Tilia petiolaris*, *Tilia tomentosa*, *Ulmus laevis*, *Ulmus minor* – Smýkal a kol. 2008, Hurych 2003 –; využití většiny druhů připadá zejména na využití v urbanizované krajině), výběru vhodného místa pro zakládání lesních školek a ve sledování koncentrací solí v závlahové vodě.

Box 15_4

Koncentrace solí v půdě se stanoví z půdního výluhu prostřednictvím elektrické vodivosti (Electrical Conductivity), která je přímo úměrná koncentraci solí obsažených v půdě. Výluh se připravuje z poměru zeminy:reakčního činidla (demineralizovaná voda) 1:5 (hm/obj). Následně se měří elektrická vodivost filtrátu pomocí elektrody, která udává hodnoty mS/m nebo mS/cm.

mS/m (milisiemens/metr), dříve také nazývaná *mho* vyjadřuje elektrickou vodivost jako převrácenou hodnotu k elektrickému odporu udávaného v Ohmech (Ω). Při stanovení se vychází z toho, že samotná H_2O se vyznačuje velmi nízkou vodivostí elektrického proudu, kterou ale zvyšují rozpuštěné soli.

Pro stanovení je také důležité, že vodivost je závislá na teplotě roztoku s tím, že se zvyšující se teplotou klesá elektrická vodivost.

Hodnocení salinity půdy

Elektrická vodivost (mS/cm)	Klasifikace zasolenosti	Reakce rostlin
< 0,7	Nezasolené	Normální stav
0,7-1,4	Středně zasolené	Reagují citlivější rostliny
1,4-2,8	Zasolené	Reagují nepříznivě i odolnější rostliny
> 2,8	Silně zasolené	Nesnášejí ani halofyty

Vedle elektrické vodivosti se v souvislosti se zasolením půd hodnotí také stav sorpčního komplexu půdy resp. podíl sodíku Na^+ na KVK.

Tuto hodnotu udává tzv. procentický podíl výměnného sodíku – Exchangeable Sodium Percentage (ESP), který udává stupeň saturace sorpčního komplexu půdy sodíkem. Ke stanovení se používá

$$ESP = \frac{\text{výměnný } Na^+ [mmol/kg]}{KVK [mmol/kg]} \times 100 [\%]$$

Vyhodnocení ESP: obecně je používán limit pro rizikové hodnoty ESP 10 %. V USA je hranice rizika ESP=15 %, Austrálii ESP=6 %. Pro klasifikaci ESP lze využít následující tabulku.

ESP (%)	Hodnocení
< 6	Bez obsahu Na
6-10	Mírně zvýšený obsah Na
10-15	Zvýšený obsah Na
15-25	Vysoký obsah Na
> 25	Extrémní obsah Na

Také se lze setkat s parametrem SAR – Sodium Adsorption Ratio (poměr adsorbovaného sodíku), který se spočítá pomocí vzorce

$$SAR = \frac{\text{výměnný } Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}}$$

15.2 Fyzikální degradace půdy

Fyzikální degradace půdy zahrnuje ztrátu půdní struktury, ztrátu pórovitosti, utužení a hutnění půdy. Degradace fyzikálních vlastností má za následek změny ve vodním režimu a provzdušněnosti půdy, ve zmenšování prostoru pro kořeny rostlin a v dalších půdních parametrech, jako je např. objemová hmotnost redukována, biologická aktivita aj.

Vedle antropogenního podmínění je pedokompakce přirozený proces spojený s procesy ilimerizace, inkrustace půdy solemi nebo se zvětráváním půdy a tvorbou jílových minerálů. V lesnické pedologii problematika fyzikální degradace souvisí zejména s pojezdem těžařské techniky, čehož následkem je pedokompakce neboli zhutňování půd. Míra zhutnění (ulehlosti) půdy se také sleduje v lesních školkách, kde je možné prostřednictvím aktivní práce s půdou fyzikální vlastnosti upravovat.

15.2.1 Specifika extrémně lehkých a těžkých půd

Lehké půdy se vyznačují výsušným vodním režimem, nízkou retenční vodní kapacitou i sorpční kapacitou pro bazické kationty. Jsou velmi propustné pro vodu (rychlost infiltrace až 0,5 cm/min), probíhá v nich rychlá mineralizace a následné vyplavování organických látek, jsou náchylné k podzolizaci, trpí velkými teplotními výkyvy, více podléhají větrné erozi, mají nízkou nasycenost sorpčního komplexu (obsah jílové frakce nepřesahuje 10-20 %, převaha surového kyselého humusu), mají nízkou pórovitost (40-45 % a nižší), mají nedostatečnou hloubku biologicky využitelného půdního profilu a mají vysokou půdní aciditu.

Těžké půdy se naopak vyznačují nedostatečnou provzdušněností a rizikem poškození kořenů při školkování a vyzvedávání sazenic nebo při vymrzání půdy a následných objemových změnách. Těžké půdy jsou hůře zpracovatelné, mají velmi pomalý vsak a tím jsou náchylné k plošné a rýhové erozi, ke zhutnění a povrchovému zamokření, mají omezenou biologickou aktivitu, což vede ke zpomalení biochemických procesů v půdě, mají omezenou výměnu látek s okolím včetně výměny plynů, jsou vymrzavé, proměnlivé v objemu ve vztahu k půdní vlhkosti (s důsledkem možného poškození kořenového systému a zpřetrhání kořenového vlášení), probíhají zde převážně redukční procesy a jsou málo strukturní nebo nestrukturní.

Extrémně těžké nebo lehké půdy vznikají v důsledku charakteru matečné horniny, mechanického zhutnění a dalších antropogenních vlivů např. v podobě narušení vegetace a půdního krytu (následná mineralizace může způsobit úbytek organické hmoty a zhutnění půdy).

Tab. 15—1: Kritické hodnoty pórovitosti půdy v závislosti na půdním druhu. Hodnoty jsou udávány pro podorníci zemědělských půd; v lesnické pedologii lze je uplatnit v lesnickém školkařství. Upraveno podle Šimon, Lhotský in Sářka, Materna 2004).

Půdní druh	jíl, jílovitá	jílovitohlinitá	hlinitá	písčítohlinitá	hlinitopísčitá	písčitá
Pórovitost (%)	< 48	< 47	< 45	< 42	< 40	< 38

Lesní půdy se vyznačují velkou proměnlivostí objemové hmotnosti redukované v rámci půdního profilu. Zatímco v zemědělských půdách dochází vlivem kultivace k homogenizaci svrchní vrstvy půdy, v lesních půdách je organická hmota distribuována v organických horizontech nadložního humusu, kde způsobuje výrazné zvýšení pórovitosti a nižší hodnoty objemové hmotnosti redukované. Při půdním povrchu tak lesní půdy bývají lehčí a kypřejší.

Ke **zhutňování lehkých půd** se používají bentonity, tufogenní horniny, průmyslové komposty (40-100 kg/ha), rašeliny, rybníční bahno (100-200 m³/ha), sedimentační kaly, stromová kůra, sláma (za současného dohnojení dusíkem), uhelné odpady (karbohnojivo), kapucín nebo ornice. Efektem dodávky jílovitých materiálů je zvýšení bobtnavosti s vlhkostí, zvětšení vnitřního sorpčního povrchu a celkové půdní sorpce, zvýšení půdní pufovitosti. Efektem dodávky organických látek je zvýšení podílu humusu, zlepšení vodního a tepelného režimu, zvýšení sorpce a dodávka živin.

K **vylehčování těžkých půd** se používají písky, nejlépe vápnité, nebo stromová kůra (20 t/ha), posklizňové zbytky, rašelina, hnůj, průmyslové komposty, karbohnojiva, organická hnojiva.

Problematika zhutňování nebo vylehčování půd je vždy otázkou konkrétního posouzení dané lokality. Mělo by probíhat po předcházejícím průzkumu hydrofyzikálních a texturních charakteristik, ale i chemických vlastností půdy. V každém případě se jedná o nákladný zásah do půdního prostředí, u kterého není vždy zaručen trvalý efekt: jakkoli organická hmota může půdu efektivně vylehčit, je třeba kalkulovat s její permanentní dodávkou – v opačném případě se můžou půdní vlastnosti vrátit do původního stavu. Stejně tak je třeba provést rozbor aplikovaného materiálu, a to nejen z aspektu fyzikálních vlastností, ale také co do obsahu rizikových prvků, pesticidů a dalších toxických látek.

Pro zlepšování fyzikálních vlastností půdy lze také využít **biologické postupy** a **fytotechnická opatření**. K těm patří volba vhodné skladby plodin nebo dřevin, dodávka organické hmoty do půdy, zelené hnojení, hloubkové meliorační kypření, snížení pojezdů, vhodné načasování provádění technologií, snížení tlaku na pneumatiku zdvojením kol, pásy nebo koberci.

15.2.2 Degradace fyzikálních vlastností vlivem těžební činnosti

Vlivem pojezdu dochází i přes příznivý účinek organické hmoty v lesních půdách k výraznému zhutnění doprovázené vnikem kolejí a rýh. V tomto ohledu je lesní půda vůči zhutnění odolnější ve srovnání se zemědělskou. Vrstva nadložního opadu tvoří účinné nárazníkové pásmo a společně s kořenovým skeletem, který v půdě tvoří doslova rošt, zejména ve smrkových porostech, je významným eliminačním faktorem fyzikální degradace půdy.

Jak vyplývá z platné legislativy, součástí těžební činnosti a soustřeďování dříví jsou i potěžební úpravy, v rámci kterých dochází k úpravám terénu do stavu, který nepředstavuje ohrožení funkcí lesů jako složky životního prostředí.

Bohužel jsou v lesnickém provozu často stroje nasazovány na příslušné práce spíše intuitivně, na základě subjektivních rozhodnutí. Důsledkem je neúměrné poškozování lesních půd, následná povrchová nebo vnitropůdní eroze a celková degradace půdy. Při opakovaných pojezdech dochází v koleji ke zhutnění půdy do hloubky až 30 cm (viz Tab. 15–2). Na půdách hlinitých, bezskeletových a zrnitostně těžších dochází ke zvyšování objemové hmotnosti redukované a ke snižování pórovitosti, na skeletnatých půdách a na svazích může docházet k narušení kompaktnosti půdního povrchu vytvořením souvislých nebo přerušovaných rýh.

Tab. 15–2: Vliv pojezdu přibližovací techniky na objemovou hmotnost redukovanou v půdách různých půdních druhů a v různých hloubkách půdy (ilimerizované půdy, Georgia). Upraveno podle Brady, Weil 2002.

Hloubka půdy	Před těžbou	Po přibližování, nesené kmeny	Po přibližování, vlečené kmeny
	Písčité půdy		
0-8	1,25	1,50	1,47
8-15	1,40	1,55	1,71
15-23	1,54	1,61	1,81
23-30	1,58	1,62	1,77
	Jílovité půdy		
0-8	1,16	1,36	1,52
8-15	1,39	1,49	1,67
15-23	1,51	1,51	1,66
23-30	1,49	1,46	1,61

Za účelem vyhodnocení rizika plynoucího z pojezdu těžební techniky jsou hodnoceny klíčové půdní parametry (detaily viz Vavříček et al. 2014):

1. **ÚNOSNOST PŮDY**, vyjadřující míru trvalé nebo přechodné deformace. Závisí na textuře, obsahu skeletu, konzistenci, hydrických poměrech, obsahu organických látek a vegetaci (hustotě vegetačního krytu, prokořenění). Míra únosnosti půdy je hodnocena podle hloubky stopy (koleje) vytlačené do povrchu půdy jednorázovým pojezdem.

Únosné půdní těleso se vyznačuje odoláváním měrnému tlaku ve stopě 200 kPa, při vytvoření koleje o hloubce max. 7 cm, a to i při změně půdní vlhkosti. Středně únosné těleso odolává měrnému tlaku ve stopě 60-200 kPa při vytvoření koleje o hloubce 7-25 cm, neúnosné půdní těleso se vyznačuje odoláváním měrnému tlaku ve stopě max. 50 kPa, při vytvoření koleje o hloubce nad 25 cm. Různou únosností půdy se vyznačují půdní taxonomické jednotky (Tab. 15–3).

Tab. 15—3: Kategorizace únosnosti půdy k pojezdu přibližovací technikou v závislosti na půdně taxonomických jednotkách.

únosnost půdy	definice - hloubka stopy LKT, konzistence	půdně taxonomické jednotky
extrémně nízká sucho - 30-50 kPa vlhko - 5-12 kPa	≥ 35 cm, nesoudržná, silně drobná, kašovitá	Organosoly, Glejsoly
velmi nízká sucho - 50-140 kPa vlhko - 12-22 kPa	25-35 cm, drobná, jíly, hlíny, velmi měkká až mazlavá za vlhka	Stagnosoly, glejové subtypy
snížená sucho - 140-300 kPa vlhko - 18-50 kPa	15-25 cm, mírně ulehlá, těžko rýpatelná, hlíny, písčité jíly, měkká za vlhka	oglejené subtypy Kambisolů, Luvisolů, Fluvisolů
mírně snížená sucho - 300-600 kPa vlhko - 50-80 kPa	7-15 cm, ulehlá, středně tvrdá, těžko rýpatelná, tuhá ponechává tvar, písčité hlíny, za vlhka mírný otěr	suchá až mírně vlhká stanoviště Kambisolů, koluvizemě, Luvisolů, Regosolů, Černosoly
únosná sucho - > 600 kPa vlhko - 80-120 kPa	do 7 cm, pevná, tvrdá, tuhá, skeletnatá, (štěrk, kámen)	Podzosoly, Leptosoly, rankerové subtypy

2. EROZIVNOST PŮDY

Erozivnost půdy je výsledkem celého souboru vnějších faktorů (viz také kapitulu 15.3). Kvantitativní průběh eroze je vyjádřen ztrátou půdy v hmotnostních jednotkách (tuny) na jednotku plochy (ha) za určitý čas (rok), neboli t/ha/rok. Erozivnost lze vyjádřit pomocí erozního faktoru půdy G pomocí rovnice

$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad [t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}]$$

kde

R je faktor erozní účinnosti dešťů vyjádřený v závislosti na četnosti jejich výskytu, úhrnu, intenzitě a kinetické energii;

K je faktor erodovatelnosti půdy vyjádřený v závislosti na textuře a struktuře svrchní vrstvy půdy (ornice), obsahu organické hmoty a zrnitosti se zohledněním také skeletu;

L je faktor délky svahu vyjadřující vliv nepřerušované délky svahu;

S je faktor sklonu svahu;

C je faktor ochranného vlivu vegetačního krytu ve vazbě na vývoj vegetace a použitou techniku;

P je faktor účinnosti protierozních opatření.

3. REZISTENCE PŮD VE VZTAHU K TĚŽEBNĚ DOPRAVNÍ EROZI

Rizika spojená s těžebně dopravní erozí vyplývají jednak z vnějších podmínek, jako je klima, počasí nebo topografie, které působí svými účinky na zvyšování erodibility půdy, a jednak vnitřních podmínek, jako jsou půdní vlastnosti, které vyjadřují odolnost nebo naopak náchylnost půdy k erozi. Tu je možné specifikovat pro půdně taxonomické jednotky. Únosnost půdy spolu s dalšími pěti faktory (erodovatelnost půdy, skeletnatost, sklon svahu, délka svahu, vegetační kryt) podmiňují rezistenci lesních půd ve vztahu k těžebně dopravní erozi.

Půdy velmi silně rizikové jsou zpravidla Organosoly, Glejsoly a další taxonomické jednotky s intenzivním hydrickým režimem. Jsou to také půdy s vysokou erodovatelností, mezi které patří půdy eolických substrátů s nízkým obsahem organické hmoty, jako jsou Luvisoly, Regosolů. Bývají velmi silně skeletnaté, na prudkých táhlých svazích, s absencí vegetace. V takových případech je třeba omezit holosečný způsob obnovy lesa a dřevní hmotu přibližovat v plném závěsu pomocí lanových systémů nebo kolopásů. V případě pojezdu je třeba chránit půdní povrch pokládkou klestu nebo mobilními rohožemi. Těžbu je vhodné směřovat do zimního období, pokud to umožní mocnost sněhové pokrývky.

Půdy silně rizikové zpravidla patří mezi půdy s extrémním hydrickým režimem (Stagnosoly, Glejsoly, glejové subtypy) nebo silně skeletnaté (rankery, rendziny, pararendziny), na flyšovitých

substrátech nebo jílovitých břidlicích. Bývají také na exponovaných stanovištích středně prudkých, dlouhých svahů, s pokryvností vegetace max. 50 %. Soustředování dříví by se mělo provádět lanovými dopravními zařízeními v polozávěsu nebo plném závěsu, ojediněle, na krátkou vzdálenost koňmi. Alternativně lze použít traktory s nízkotlakými pneumatikami nebo kolopásky. Je doporučeno vyhnout se stromové metodě těžby. Umožňuje-li to terén, přibližovací linky by se měly vyhýbat vlhkým místům a přibližování by mělo probíhat v suchém nebo zimním období. Přibližovací linie by měly být opatřeny odvodněním ve formě propustků a upraveným dopadištěm na výtok.

Půdy rezistentní, se střední odolností, patří zpravidla mezi oglejené subtypy Kambisolů, Luvisolů a Fluvisolů, případně rankerové subtypy, půdotvorným substrátem je nejčastěji flyš s převanou pískovců, slepence, slíny, slínovce nebo karbonátové sedimenty. Skeletnatost bývá nízká až střední (do 5-10 %), topografie je již mírná, se sklonem svahu cca 17-30 %. Vegetace se vyznačuje vysokou pokryvností, zpravidla nad 50 %. Soustředování dříví lze provádět vlečením dopravními zařízeními a lanovými systémy na bázi dvoububnového navijáku na traktoru se zvýšeným tažným lanem. Na krátkých úsecích lze použít koňské potahy, alternativně lze použít UKT a SLKT s flotačními pneumatikami. Pro zřizování přibližovacích a vyvážecích linek je třeba využívat mírnější sklony svahu a vyhýbat se zamokřeným místům a korytům občasných vodotečí. Prudké úseky musí být opatřeny odvodňovacími prvky (svodnice, rošt z klestu, propustky, upravená dopadiště).

Půdy silně rezistentní patří nejčastěji mezi suchá až mírně vlhká stanoviště Kambisolů, Fluvisolů, Luvisolů, Regosolů a černozemí. Bývají vyvinuté na psamitických sedimentech (pískovce, arkózy), brekciích, rulách, fylitech, vápencích a navětralých granitech, se slabou až střední skeletnatostí. Patří sem terény mírných krátkých svahů, se souvislým vegetačním krytem. Soustředování dříví lze provádět pomocí UKT, SLKT, forwarderů vlečením i vyvážením, avšak po předem vytýčených linkách. Z vlhkých míst je třeba dříví vyklízovat lanem navijáku. Linky by měly vést mimo vlhká místa nebo koryta byť jen dočasných vodotečí. V suchém období je třeba linky a cesty upravovat dozérskou radlicí.

Půdy velmi silně rezistentní jsou charakteristické vysokou odolností vůči těžebně dopravní erozi. Patří sem půdy Podzosolů, Leptosolů a rankerové subtypy, dále Kambisoly, Černosoly, Fluvisoly. Půdy bývají vyvinuté na drobách, horninách krystalinika, pískách, neovulkanitech, křemitých pískovcích nebo fluviálních sedimentech. Skeletnatost je střední, zpravidla do 50 %, topograficky jsou typické roviny nebo krátké svahy do 100 m. Vegetace se vyznačuje souvislým, často vícepatrovým zapojením. Soustředování dříví lze provádět vlečením s využitím UKT, SLKT, bez předchozího vytýčení přibližovacích linek; vždy však s ohledem na minimalizaci porušení půdního krytu. Za srážkově vydatných období na těžkých půdách je třeba vyhnout se zřizování linek na stanovištích s tendencí k zamokření.

15.3 Půdní eroze

Z pohledu rychlosti tvorby půdy (převážně stovky až tisíce let) patří půda mezi neobnovitelné přírodní zdroje. Eroze půdy je celosvětový fenomén, kterému se navzdory obecnému povědomí o tom, že eroze „zkrátka probíhá“, nevěnuje dostatečná pozornost. Historické záznamy dokumentují situace celých civilizací, jejichž konec byl úzce spojen s degradací půdy erozí, kdy půda byla „smyta z povrchu země“ a „nezbylo než neplodná drť a skála“. Zejména v souvislosti s pěstováním zemědělských plodin je eroze často považována za globální hrozbu, zvláště se stoupající poptávkou po potravinách s narůstající populací. Mezi erozí zemědělských a lesních půd je však řada rozdílů.

Rozsah aktuální vodní eroze v České republice je 1 780 000 ha, tj. 42 % zemědělské půdy, výrazně poškozeno je 450 000 ha, tj. 10,7 % zemědělského půdního fondu (Vopravil a kol., 2010a, 2010b in Sobotková 2012). Často jsou na pozemcích v kategorii orná půda mělké půdy, které jsou zcela smyté, nebo u kterých lze naměřit posun o jeden stupeň hloubky půdy níže (z 60 cm na 30 cm i méně). Větrnou erozí je potenciálně ohroženo 10,4 % orných půd, a to především na jižní Moravě a v Polábí (Vopravil et al. 2010; 2011).

Erozi lze definovat jako ztrátu nebo odnos zemského povrchu vlivem vody, větru, ledu nebo geologických faktorů za účasti zemské gravitace. Erozi půdy nedochází „jenom“ k rozrušování povrchu Země a odnosu půdních částic, ale také k fyzikální, chemické a biologické degradaci půdy. Erozi se zhoršuje půdní struktura, textura, objemová hmotnost, retence pro vodu, pórovitost, infiltrační schopnost, fyziologická hloubka atd. Také se snižuje obsah organické hmoty, minerálních živin. Je odnášena biologicky neaktivnější část půdy. Zpomalují se tak koloběhy látek ekosystémem, dekompoziční a enzymatické procesy v půdě a vzniká nutnost lesnicko-technických zásahů.

Erozi lze rozdělit na geologickou a zrychlenou. **Geologická eroze** má za následek přeměnu půdy na sediment. Je to přirozený proces, který probíhá za každých okolností, bez přispění člověka. Geologická eroze má za následek snižování terénních vyvýšenin a zaplňování depresí transportovanými materiály pocházejícími ze zemského povrchu. Probíhá však tak pozvolna, že si často ji ani neuvědomujeme – už proto, že bývá pozvolnější, než tvorba nové půdy. Rychlost geologické eroze závisí na intenzitě erozních činitelů a odolnosti erodovaného materiálu. Nejintenzivnější je v semiaridních oblastech s intenzivními přívalovými srážkami a řídkou vegetací. Vegetace hraje v odolnosti půdy významnou roli a zvláště v semiaridních oblastech nastává situace, kdy jsou srážky velmi intenzivní a přívalové, avšak protože jsou koncentrovány v krátkém období v roce, vegetace není schopná se vlivem sucha po většinu roku vyvinout. **Zrychlená eroze** probíhá ve vazbě na lidskou činnost spojenou zejména s odstraněním vegetace, ale v návaznosti také s nevhodnými agronomickými postupy (špatné načasování agronomických aktivit, orba po spádnici, nevhodné osevní postupy atd.). Zrychlená eroze je často i 10-1000x rychlejší než geologická. Roční ztráty půdy se pohybují v hodnotách 30-40 t/ha.

Rychlost tvorby půdy: cca 1 t/ha/rok
versus
Rychlost ztráty půdy vodní erozí: až 20-40 t/ha/rok, v extrémních odbodech až 100 t/ha/rok
(Houšková, Montanarella 2006)

Ztráta půdy v oblastech se zapojenou vegetací (travní a lesní porosty)
cca 0,1 t/ha/rok

15.3.1 Vodní eroze

Ztráta půdy vodní erozí závisí jednak na erozivnosti (účinnosti deště a tekoucí vody erodovat půdu) a erodibilitě (odolnost půdy k vodní erozi). Půda je odplavována nejčastěji ve formě suspenze, ve které jsou jednotlivé částice půdy unášeny. K tomu je zapotřebí rozrušit půdní agregáty. Jejich stabilita závisí na kinetické energii deště, která je až 200x větší než kinetická energie povrchově tekoucí vody.

I iniciačních fázích eroze probíhá ve vazbě na povrchový odtok jako **plošná eroze**. Množství povrchově odtékající vody je dáno množstvím vody, které zbyde po odečtení ztráty výparem, vsakem do půdy a retencí půdy (retenční kapacitou).

BOX 15—5: Stabilita a rozpadavost půdních agregátů.

Stabilitu půdních agregátů lze vyjádřit pomocí stanovení jejich indexu rozpadavosti I_B (Rémy, Lafleche 1970). Důsledkem rozpadavosti půdy je jednak plošná eroze, jednak individualizace půdní struktury a tvorba povrchových kůr v případě absnce astabilizujících strukturních elementů. Mezi faktory významné pro stabilitu půdy patří zejména textura půdy, resp. obsah jílu a prachu, obsah organické hmoty a pH. Obecně lze říci, že jíl a organická hmota působí agregáčně a stabilizačně, zatímco prachová frakce stabilitu půdních agregátů oslabuje: nepůsobí ani agregáčně, ani není dostatečně propustná pro vodu, která by nezůstávala na půdním povrchu. Půdní reakce (pH) je odrazem stavu půdního chemismu, obsahu vodíku a bazických kationtů. Vodík jako kyselý element působí destabilizačně, desagregačně a má za následek peptizaci půdy (vývoj elementární struktury).

$$I_B = \frac{1,5Lf + 0,75Lg}{A + 10MO} - 0,2(pH - 7)$$

kde

Lf je obsah jemného prachu (0,002-0,02 mm) v ‰;

Lg je obsah hrubého prachu (0,02-0,05 mm) v ‰;

A je obsah jílu (< 0,002 mm) v ‰;

MO je obsah organické hmoty v ‰;

pH je půdní reakce.

Hodnocení stability půdních agregátů na základě indexu rozpadavosti

Index rozpadavosti	Kategorie
< 1,4	nerozpadavé
1,4-1,6	mírně rozpadavé
1,6-1,8	středně rozpadavé
1,8-2	rozpadavé
> 2	silně rozpadavé

Vysoký tupeň rozpadavosti má za následek slehávání půdy vlivem deště nebo závlah, zvyšování objemové hmotnosti redukované a snižování pórovitosti, kdy se strukturní agregáty na půdním povrchu při kontaktu s vodou rozplavují a rozpadají. Půda smíchaná s vodou získává blátivou (kašovitou) konzistenci a agregáty se rozpadají na menší frakce. Při povrchovém odtoku jsou půdní částice odnášeny nebo se ukládají v bezprostřední blízkosti a formují sazeniny lístkovité struktury.

Vytvořené kůry snižují schopnost infiltrace s tím vstupem vody do půdy. Tím se zvyšuje povrchový odtok a intenzita eroze a zhoršuje se vodní a vzdušný režim půdy i tepelný režim.

Půdy náchylné ke korovatění jsou zejména půdy na eolických substrátech, s dominancí prachové frakce – spraše, sprašové hlíny.

Při neustávajícím povrchovém odtoku se charakter vody odtékající z území mění v **soustředěný odtok**. Při něm se na půdním povrchu tvoří stružky, rýhy a strže. K rýhové erozi přispívá plošný povrchový odtok a jím transportované částice z mezirýhového prostoru. Jestliže je objem odnosu splavenin z mezirýhového prostoru větší než transportní kapacita odtoku v erozních rýhách, začíná se i v erozních rýhách projevovat depozice sedimentu. To se stává v případě poklesu sklonu na bázích svahu a při ztrátě unášecí síly vody, která plyne z tzv. **tečného napětí**.

Kritické tečné napětí

Mez unášecí síly vody, kdy začínají být půdní částice odnášeny proudící vodou.

$$\tau_k = 10 \times \sqrt{0,201g^2\rho(\rho_s - \rho)C_Td_e^3}$$

kde **g** je gravitační zrychlení, **d_e** je efektivní průměr zrna, **ρ** je hustota vody, **ρ_s** je hustota materiálu splavenin, **C_T** je tvarový součinitel pohybující se v intervalu od **C_T=1** pro kulovitá zrna do **C_T=4,4** pro plochá zrna.

Eroze vodou probíhá ve třech fázích: **(1)** oddělení půdních částic z půdní masy; **(2)** transport uvolněných částic plavením, sesunem, tečením; **(3)** ukládání přemístěných částic na deponium v terénních depresích, na bázích svahů atd. – obecně v deponiích.

Intenzitu vodní eroze lze vyjádřit pomocí tzv. univerzální rovnice (USLE – Universal Soil Loss Equation) a na ní navazující revidované univerzální rovnice (RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation). Ztráta půdy je vyjádřena pomocí rovnice (viz také kapitulu 15.2.2)

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad [t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}]$$

kde

A je průměrná dlouhodobá ztráta půdy;

R je faktor erozního účinku deště, který vyjadřuje četnost výskytu, úhrny, intenzitu a kinetickou energii deště;

K je faktor erodovatelnosti půdy, vyjadřující půdní vlastnosti a rezistenci půdy vůči erozi. Pro stanovení faktoru K se používá buď rovnice nebo tzv. nomogramu (Constantini et al. 2009; Janeček et al. 2006). Vstupními veličinami pro stanovení K faktoru jsou zrnitostní třídy ornice, obsah organické hmoty, struktura, třída propustnosti půdního profilu. K faktor lze také určit pomocí bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ) nebo pro půdní taxonomické jednotky;

L je faktor délky svahu vyjadřující význam nepřerušené délky svahu;

S je faktor sklonu svahu;

C je faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu;

P je faktor účinnosti protierozních opatření.

Faktor R vyplývá z vlastností deště, faktory K, L a S vyplývají z vlastností půdy a stanoviště, faktory C a P vyplývají z managementu krajiny.

Intenzivní srážka: > 30 mm/hod
Od této intenzity srážky vzniká zvýšené riziko povodní.

Univerzální rovnice byla vyvinuta v USA v 70. letech s účelem monitorovat a modelovat ztrátu půdy pomocí permanentně sbíraných dat a kvantifikovat rizika spojená s agronomickými postupy prakticky po celém světě. Univerzální rovnici lze použít pro lesní půdy s jistými omezeními. Ta vyplývají jednak z velké heterogenity *topsoil* lesních půd a jednak z heterogenity mikroreliefu: zatímco na zemědělských pozemcích je půdní povrch kultivován, po jistou část roku obnažen a terénní nerovnosti jsou vyrovnány, takže vznikají souvislé svahy, v případě lesních půd jsou toto situace, které by za normálních okolností neměly nastávat. Proto je smysluplné kvantifikovat erozi v případech lokálního odlesnění, sesuvů nebo plošného narušení půdního krytu např. při celoplošné přípravě půdy, budování sjezdovek apod.

15.3.2 Větrná eroze

V případě větrné eroze lze nalézt podobné faktory jako u eroze proudící vodou. I zde je zapotřebí dostatečné unášecí schopnosti média (větru) a i zde probíhají 3 fáze eroze (uvolňování půdních částic, jejich transport a ukládání).

S důsledky větrné eroze se můžeme dnes setkat v podobě eolických sedimentů – spraší a sprašových hlín. Tento proces probíhá samozřejmě i v současnosti. Je vázán zejména na aridní a semiaridní oblasti s řídkou vegetací. Vedle unášení prachových částic má větrná eroze za následek také obrušování zemského povrchu, vznik hranců (lasturnatě obroušené kameny), přemisťování dun a za větrných bouří transport i úlomků větší velikosti.

Velikost částic má na efekt větrné eroze klíčový vliv:

Částice < 0,1 mm v průměru stoupají do výšky více než 30 cm a mohou zůstat v atmosféře rozptýlené po delší čas i ve větších výškách. Účinkují potom jako kondenzační jádra, na zemský povrch se dostávají se srážkami a jsou přepravovány na velké vzdálenosti v podobě mračen a

prachových bouří. Obrovské objemy prachu byly přepravovány v průběhu pleistocenních zalednění, kdy byly doslova zasypávány periglaciální oblasti částicemi o velikosti 0,02-0,06 mm do podoby sprašových sedimentů.

Částice o velikosti 0,1-1 mm v průměru jsou obvykle vynášeny do výšky max. 30 cm a přemísťují se saltací, tedy doslova „skákovým“ nebo klouzavým pohybem, během kterého buď mohou uvíznout v mikrodepresích půdního povrchu nebo také přispět k rozrušování půdního povrchu, půdních agregátů a dalších půdních částic.

Částice o průměru nad 1 mm se převážně kutálí po zemském povrchu. Mohou být rozpožehovány buď větrem, nebo jinými částicemi.

Saltací může být přemístěno až 50 % půdní masy. Přesto však, na kvalitu a čistotu ovzduší mají největší vliv nejmenší částice.

Z hlediska odolnosti půdy vůči větrné erozi účinně působí péče o vegetační kryt. Větrnou erozi méně trpí vlhké půdy a půdy s dobrou strukturou. Velmi náchylné k větrné erozi jsou odvodněné organické půdy, degradované např. v rámci těžby rašeliny. O semiaridních oblastech (např. Střední Východ) jsou budovány zábrany proti větrné erozi, a to buď v podobě prefabrikovaných bariér nebo větrolamů a vegetačních pásů.

15.3.3 Introskeletová eroze

V lesních půdách se lze s tímto typem eroze setkat zejména v souvislosti s odlesňováním nebo s nepřiměřenou chemickou meliorací půdy. Introskeletová eroze je definována jako propadávání a proplavování půdních částic do hlubších vrstev půdy dutinami mezi půdním skeletem, tedy kameny a balvany. Introskeletová eroze probíhá zejména v leptických, rankerových půdách, méně rendziny a pararendziny. Zpravidla je antropicky podmíněná a je o to rizikovější, že dochází ke ztrátě půdy na stanovištích již chudých na jemnozem a kvalitní organickou složku.

Proces introskeletové eroze je iniciován odlesněním a je podpořen porušením půdního povrchu např. vlivem soustředování dříví. Ve vazbě na neuvážená pěstební opatření a nešetrné těžební postupy potom dochází ke zrychlené mineralizaci svrchní vrstvy půdy, která ztrácí kontinuitu a stabilitu.

Největší rizika introskeletové eroze jsou na geologickém podkladu granitů, granodioritů, dioritů a syenitů (Vacek et al. 2003), méně na svorových rulách, pararulách, migmatitech, svorech, fylitech, ortorulách, granulitech apod. – tedy na horninách moldanubika a proterozoika.

Introskeletovou erozi lze velmi obtížně eliminovat, už proto, že probíhá skrytě. Z tohoto důvodu není tak významná obrana jako prevence. Ta spočívá zejména v péči o vegetační kryt, o souvislé zapojení půdního povrchu a volbu šetrných těžebních a přibližovacích technologií na rizikových stanovištích.

Ohroženost půd lze rozdělit do pěti tříd rizika:

1. nízká – ojedinělé plošky sutě na kamenitých svazích (SLT 6-8M, 6-8N, 8Z, 8K)
2. střední – časté plošky sutě na kamenitých svazích (SLT 6Y, 6-8N),
3. vysoká – rozsáhlé plochy sutě (SLT 8Y, 8Z, 8N, 7Y)
4. velmi vysoká – plochy nad horní hranicí lesa s výskytem sutě (SLT 9Z, 9K)
5. extrémní – periglaciální sutě (SLT 9Y).

Stanoviště ohrožená introskeletovou erozí jsou velmi těžko zalesnitelná a z hlediska obnovy lesa a ochrany půdy velmi riziková. V takových případech se umělá obnova lesa prakticky neobejde bez dodávky zeminy, nebo melioračních hmot (Nárovec, Šach 1996, Souček et al. 2010) nebo využití obalované sadby.

15.4 Lesní půdy v kontextu klimatických změn

V současnosti je za klimatickou změnu považován vzestup průměrných teplot o 0,2°C během jedné dekády po 50 let (IPCC 2007).

Vedle otázky po příčinách globálních klimatických změn, v rámci kterých již nelze jednoduše hovořit o globálním oteplování, je neoddiskutovatelnou skutečností, že klima Země se v porovnání s dlouhodobými průměry výrazně mění. Od roku 1750 začalo lidstvo postupně produkovat značná množství znečišťujících látek a znečišťovat nejen vody, ale i atmosféru. Zvláštní význam v narušení rovnováhy látkových koloběhů získalo vypouštění radiačně aktivních plynů, zejména CO₂ a CH₄, a dalších (viz Tab. 15–4). Koncentrace některých těchto látek jsou v troposféře díky činnosti člověka nejvyšší za posledních 420 000 let a koncentrace CO₂ možná i za posledních 20 miliónů let (Barnola et al. 1999 in Samec et al. 2008).

Znečištění prostředí a s ním související změny klimatu zasahují celou řadu zemských systémů:

- voda a omezené přístupy k pitné vodě;
- ekosystémy a biologická rozmanitost;
- potravní zdroje;
- pobřežní ekosystémy a lidská sídla;
- zdraví a nemocnost lidí, zvířat i rostlin.

Mezi klimatickou změnou a procesy v půdě jsou těsné vztahy (viz také kapitulu 15.4.2.2). Ty zahrnují např. rychlost koloběhů živin, ukládání uhlíku a jeho emise v podobě CO₂, hodnotu primární produkce, kvalitu vody a její retenci v půdě. Na úrovni biologické aktivity se klimatické změny podílejí na změnách ve skladbě, aktivitě a metabolismu půdních organismů. Dlouhodobě se tento efekt projevuje na úrovni rostlinného společenstva a schopnosti jeho adaptace.

Jedny z nejodolnějších suchozemských ekosystémů vůči klimatickým změnám jsou lesní porosty. Jejich odlesnění se projevují vzrůstem teplot, poklesem výparu a v následku utlumení tvorby oblačnosti a snížení srážek, ale i nedozírnou devastací tropických půd, které se vyznačují velmi nízkou odolností k erozi.

15.4.1 Hydrický režim lesů a lesních půd

Adaptabilita lesních ekosystémů nesouvisí pouze s reakcí na vzestup průměrných teplot, ale také se schopností reagovat na změnu ve srážkových úhrnech. A protože klimatické změny mají dopad na celé komplexní ekosystémy, ze kterých nelze téma půdy izolovat, i půda bude v následujících kapitolách pojata v kontextu s dalšími složkami lesních ekosystémů.

15.4.1.1 Hydrický režim horských lesů

Lesní porosty zejména horských oblastí a pramenišť hrají doslova klíčovou roli ve vodní bilanci krajiny. Jejich narušení má samozřejmě dopad na půdní prostředí a naopak: narušení půdního prostředí, půdního krytu nebo bilance živin se podepisuje na stavu lesních porostů (Samec et al. 2009).

Specifikem horských lesů je, že zajišťují stabilní odtok srážkové vody a mají i vedlejší srážkotvornou funkci. Jehličí působí tzv. vyčesávání srážek, pyl je jedním z typů kondenzačních jader oblačnosti. Hydrické funkce horských lesů se projevují:

- zvyšováním absolutního množství srážek zachytáváním horizontálních srážek;
- zvyšováním sumárního výparu intercepce a transpirace a snížením evaporace;
- transportem většího množství vody do půdních zásob a vzrůstem vododržnosti lesních půd;
- snížením povrchového svahového odtoku a eliminací erozních škod;
- zmírněním odtoků dochází ke snížení kulminačních průtoků.

Horské lesy byly v minulosti postihovány neúměrnou těžbou, pastvou, klučením a vypalováním, přeměnou druhové skladby na smrkové monokultury nebo náhradní porosty v imisních oblastech.

Odtokové poměry z lesů horských oblastí jsou limitovány retenční kapacitou půd a mají klíčový význam pro vznik nebo prevenci vůči povodňovým vlnám v níže položených oblastech. Půdy středohorských lesů jsou schopné tlumit déšť do úhrnů cca 50 mm. Při srážkovém přívalu 50-100 mm již vzrůstá odtok lesní půdou. Kritická hranice vododržnosti nastává při srážkových úhrnech 150-200 mm. Míra retence půdy závisí jednak na nasycenosti půdních pórů před srážkovými epizodami a také na průběhu srážek a jejich časovém rozložení.

Především jehličnaté porosty se v celoroční hydrické bilanci mohou projevovat výraznější intercepcí a evapotranspirací. v zimním období a zejména v předjaří dokáží výrazně zpomalovat intenzitu tání sněhové pokrývky a zmenšovat povrchový odtok. K těmto jevům v listnatých porostech z důvodu absence listové plochy nedochází.

Během vegetačního období dosahuje evapotranspirace mladých smrkových horských porostů 234 mm, mladých bukových porostů 220 mm.

Srovnání evapotranspirace mladých smrkových a bukových porostů:	
dřevina a období	evapotranspirace [mm]
smrk během vegetace	234
buk během vegetace	220

Nejvíce hydrický režim rozrůžňují hospodářské způsoby, ale zejména podíl nelesních ploch. Přítomnost holin a lesních kultur může z malých lesních povodí jen nepatrně zvýšit odtok. Vytvoření zápoje významně mění hydrický režim lesního porostu. To souvisí s vytvořením kompaktní vrstvy nadložního humusu (Šach in Samec et al. 2008), která výrazně zvyšuje retenci svrchních půdních horizontů. Horské lesní porosty sice významně nesníží celkový odtok z povodí, naopak může dojít k jeho zvýšení vlivem horizontálních srážek, avšak naprosto klíčová je jeho funkce při extrémních srážkových úhrnech. I neextrémní srážkové úhrny mohou vyvolat povodňovou vlnu v odlesněném povodí. Na druhou stranu, zalesněná území jsou schopná mnohem snáze překonat i dlouhá bezesrážková období, což opět souvisí s vysokou retencí a tím značnou zásobou vody zejména ve vrstvě nadložního humusu.

15.4.1.2 Hydrický režim lužních lesů

Lužní lesy poskytují krajíně kvalitativně jiné hydrické funkce než horské lesy. Lužní dynamika a lužní stanoviště bývají periodicky měněny ve vztahu k výrazným povodňovým vlnám, kdy může dojít jednak ke zvýšené sedimentaci nebo naopak odnosu půdního materiálu, ale i celkové změně tvaru koryta toku. Zatímco horské toky jsou typické bystřinným prouděním a velkou dynamikou průtoků, kdy však voda zřídka opouští koryto toku, toky lužních oblastí se vyznačují pozvolnějším nárůstem a ústupem povodňové vlny a častějším rozléváním vody do krajiny. Lužní toky jsou také pozvolnější, méně přímé, spíše meandrující a mají značný význam pro půdní genezi.

Luhem se tak rozumí takový soubor přirozených lesních společenstev, jehož výskyt je vázán na poříční edatopy nebo se přirozeně vyvíjí podél jiných vodních ploch. Jejich hydrický režim je podmíněn především říční vodou a podmáčením. Zatímco horské potoční luhy jsou typické humidním až perhumidním režimem, pro úvalové luhy je typický spíše semihumidní až semiaridní vodní režim s častými suchými epizodami.

Úvalové luhy se dělí na tvrdé luhy a měkké luhy. Půdy těchto ekosystémů jsou většinou náplavové, z referenční třídy Fluvisolů, které jsou často hlubokohumózní a záplavový režim je doslova jednou z podmínek jejich existence. Odlesněním takových oblastí dochází k rychlé erozi. Vodní režim lužních lesů tak nemá charakter zádržný ve smyslu půdní retence, nýbrž ve smyslu retence vody v rozlehlějších nížinných pánvích.

15.4.2 Klimatické změny: odezva lesních ekosystémů

15.4.2.1 Otázky krajinné ekologie

Rostlinné společenstvo, jehož základní determinantní a edifikátorovou složku tvoří dřeviny stromovitěho vzrůstu, ve svém prostředí, se kterým je ve vzájemných interakcích, se nazývá lesní ekosystém. Jako každý ekosystém, i lesní „podléhá“ principům svého přirozeného vývoje a spěje tak ke stavu ustálené rovnováhy s vyrovnaným tokem látek, vyrovnanou bilancí energetických vstupů a výstupů. Ve chvíli dosažení tohoto stavu, tzv. klimaxového stádia ekosystému, se interakce s okolím omezují na minimum (např. jen na příjem sluneční energie či srážkové vody) a společenstvo nepodporuje svou životní aktivitou změny prostředí, ale je vůči nim maximálně odolná. Klimaxové stádium pak představuje tzv. potenciální přírodní vegetaci. Ať už se jedná o vrcholná stádia vegetace zonálních, extrazonálních či azonálních společenstev, otázkou zůstává, zda v případě ekosystému, zachyceného v určitém čase, lze již hovořit o klimaxovém stádiu nebo o některém z dílčích vývojových stádií ekosystému.

Při posuzování míry, do jaké lidská činnost, a tedy i globální oteplování, ovlivňuje společenstva tvořící ekosystém, je třeba „odmyslet“ si působení člověka na krajinu. V případě našeho území rostlinná společenstva ze svých refugií migrovala po skončení poslední doby ledové a ustavovala novou rovnováhu se svým prostředím. Jaká by tedy byla původní skladba lesního společenstva, zůstává do jisté míry otázkou. Například v případě buku lesního, jehož počátek postupu na naše území lze lokalizovat do doby atlantiku, kdy červnové teploty poklesly po jejich vzestupu v boreálu na 17 až 19 °C, průnik této dřeviny do doubrav a horských smrčín nebyl v době, kdy člověk začal určovat podobu vegetačního krytu, dosud ukončen. Naopak lze dokonce předpokládat, že průměrný časový prostor v rámci holocenní doby meziledové byl příliš krátký na to, aby došlo k dosažení floristické vyváženosti i za člověkem „nerušeného“ vývoje (Davis 1976).

15.4.2.2 Perturbace

Ať s účastí člověka či nikoli, v rámci vývoje ekosystému coby společenstva, jež prochází procesem změn ve vztahu ke svému okolí, lze vždy hovořit o sukcesní sérii. Ta má tendenci ukončit svůj sled ustálením dynamické rovnováhy, v rámci které jsou vymezeny podmínky, za kterých společenstvo zůstává relativně neměnné. V případě změny podmínek (klimatických, edafických apod.) dochází k reakci, která znamená buď návrat zpět do výchozího stavu daného sukcesního stádia, nebo dojde k nastolení nové dynamické rovnováhy za vzniku kvalitativně jiného společenstva (v případě, že intenzita disturbancí překročí schopnosti autoregulačních mechanismů ekosystému). Změny tohoto typu, kdy společenstvo vlivem vnějších vlivů nabývá nových vlastností nebo sukcesních směrů, se nazývá perturbace. Nejedná se tedy o inhibici konfigurace stavu ekosystému, při které dochází k blokaci evoluce ekosystému bez jeho poškození či narušení jeho funkčnosti, jako například dočasně snížený přísun světla apod. (Otto, 1998). Jedná se o změny s následkem nabytí nového vývojového směru nebo i návratu k iniciálním stádiím. Perturbace mají často za následek celý komplex změn. Ty mohou být biotické (např. kalamitní poškození hmyzem či houbovými patogeny) nebo abiotické (jako poškození ohněm nebo výrazné klimatické výkyvy) a zřídka působí izolovaně – častěji působí v perturbačních řetězcích. Jako příklad perturbačního řetězce lze uvést poškození způsobené emisí polutantů do ovzduší: v podstatě se jedná o vnější antropickou perturbanci, která působí jednak přímo (přísun škodlivých látek do ekosystému), jednak také nepřímou (ovlivněním vitality jedinců a následně lesního společenstva). Vlivem toho je snížena obranyschopnost proti hmyzu a houbovým patogenům, stejně jako zvýšena acidifikace půdy (Hruška, Cienciala 2005). Každá z těchto změn má za následek další změny parametrů ekosystémů, charakterem humifikace počínaje, rostlinou a živočišnou skladbou konče.

Perturbace malého rozsahu bývají ekosystémem více méně absorbovány a mohou dokonce přispět ke zkvalitnění evolučního procesu – například vhodně směřovanou selekcí. Při perturbačních

zpravidla dochází ke změně druhové skladby společenstva (Begon et al. 1997) a tím i narušení určitých článků v potravních řetězcích a toku energie a následně ke změně stavu, resp. plynutí (Míchal 1994) bez udání jeho směru. Z toho plyne, že se v okolí homeorhetické linie vývoje ekosystému vyskytují teoretické paralelní sukcesní série, které mohou být uplatněny jako mechanismy ochrany plynutí po trajektorii vedoucí k dynamické rovnováze a tedy vyšší ekologické stabilitě.

Na první pohled by se mohlo zdát, že v rámci ustalování dynamické rovnováhy musí docházet k ustavičnému nárůstu počtu jedinců přítomných v daném ekosystému, aby byla zvýšena šance na nahrazení „volného místa“ v případě eliminace některé ze složek společenstva. Dynamická rovnováha, resp. ekologická stabilita však není přímo úměrná s druhovou pestrostí. Naopak existuje řada případů, jako ekosystémy horských smrčín, stejnorodých bučin či rákosin, ve kterých druhová pestrost se stupněm vyspělosti ekosystému klesá.

Za perturbaci, která má za následek odklonění od původní sukcesní linie, lze považovat také změnu klimatických podmínek, která má podle mnohých názorů (Lawlor 2005; Roper 2006; Palmer, Räisänen 2002) příčinu v nadměrné emisi radiačně aktivních plynů do atmosféry, mezi nimiž hlavní místo zaujímá oxid uhličitý.

Zvýšení koncentrace oxidu uhličitého je faktor, který představuje pro rostliny celý komplex změn. Vyjma náhlého vzestupu teplot v době vegetačního klidu nebo náhlých teplotních šoků, při kterých dochází k poškození membrán thylakoidů (Méthy 1997), může mít mírné navýšení teplot pozitivní vliv na růst rostlin. Vedle potenciálního zvýšení rychlosti fotosyntézy a tím nárůstu biomasy (a v důsledku pak zvýšení konkurenceschopnosti vůči jinému jedinci) však dochází také ke zvýšení teploty prostředí. Při zvýšené teplotě a dostupnosti vhodného substrátu dochází ke zvyšování rychlosti chemických a biochemických procesů, avšak jen do té míry, kdy jsou enzymy vlivem nadměrných teplot rozloženy. Vysoké teploty mohou vést až k inhibici nebo dokonce denaturaci teplotně senzibilních enzymů (Peltzer et al. 2001) již při dlouhodobě navýšených teplotách jen o několik stupňů nad teplotu metabolického optima. Při teplotách převyšujících 25 – 40°C dochází k také k poškození funkce proteinů. Vysoké teploty rovněž znamenají navýšení rychlosti transpirace. Tím dochází k intenzivnější konzumaci metabolitů a jejich možnému deficitu a poruchám výživy. Teplota spolu se vzdušnou vlhkostí je také faktor určující rychlost transpirace. Za vysokých teplot a nízké vzdušné vlhkosti může dojít u rostlin, jež nejsou na tyto podmínky adaptovány, ke značným ztrátám vody a porušení vodního režimu, který podmiňuje termoregulační mechanismy rostliny i příjem živin.

Obecně by vyšší koncentrace uhlíku v ovzduší měla přinést pozitivní odezvu v produkci lesa, která plyne z jeho snazší přístupnosti rostlinám a tím i jeho zvýšených vstupů do procesu fotosyntézy (Saxe et al. 2001).

Možným důsledkem dlouhodobých teplotních změn a dopadem na bukové porosty se zabýval Fotelli (2002). Zvýšené teploty a snížená přístupnost vody mohou mít přímý vliv na vodní režim bukových semenáčků, ale zároveň může v důsledku toho dojít k ovlivnění bilance dusíku vlivem snižování příjmu dusíku z půdy. V konečném důsledku dochází k ovlivnění růstu a metabolismu dusíku. Paradoxně pozitivní vliv v tomto případě může mít přítomnost a zvýšená depozice atmosférického dusíku, který může deficit ve výživě dusíkem částečně kompenzovat. Konkrétně u buku lesního by však z důvodu jeho citlivosti ke snížené dostupnosti vody k výrazným pozitivním změnám patrně nedošlo.

Z hlediska **dopadu na lesní ekosystémy** nelze předpokládat zvýšení přírůstu dřevin, nacházejících se v aktuálním čase na daném stanovišti (Saxe et al. 2001). Odezva na vyšší teploty v podobě většího přírůstu závisí na migračních možnostech rostlin, které budou v nastalé situaci hledat svou optimální niku. Proto je vhodnější hovořit spíše o zvýšení produkční schopnosti stanoviště – pokud ovšem bude toto stanoviště obsazeno dřevinou optimálního druhu a provenience. Na urychlení tohoto procesu, který by v přírodních podmínkách sahal za horizont řádu stovek let, se může významně podílet vhodně zvolený lesní management. Paradoxně se jako adaptačně vhodnější

jeví dlouhověké jehličnaté dřeviny, které projevují větší ekovalenci, širokou genotypovou i fenotypovou plasticitu a lepší schopnost migrace.

Na úrovni půdního prostředí se klimatické změny mohou projevovat různě, v závislosti na daném regionu, klimatickém pásmu atd. V každém případě je však klima jedním z pěti půdotvorných faktorů (viz kapitolu 2.1) a míra jeho vlivu se přímo nebo nepřímo odráží ve vývoji půd.

Přímý vliv spočívá ve změnách teploty, vodního režimu a skladbě půdních bioty. Od toho se odvíjí charakter dekompozičních procesů a koloběhu látek. Teplota je klíčovým faktorem pro biologickou aktivitu a kvalitu dekompozice (Wall et al. 2012) a stejně tak vlhkost – z hlediska extrémů i dlouhodobých průměrů. Např. arktické oblasti se vyznačují velikými zásobami radiačně aktivních plynů, zejména metanu, v rozsáhlých oblastech organozemí a permafrostu. Vzestup teploty má důsledek ve změně metabolismu půdních společenstev, nástup oxidačních procesů, tání permafrostu a prohlubování jeho aktivní vrstvy. Navíc vzhledem k tomu, že arktické oblasti jsou největším suchozemským úložištěm uhlíku, jeho tání způsobuje uvolňování CO₂ a CH₄ plynů do globálního koloběhu.

V permafrostu je uloženo $1,672 \times 10^{15}$ g C!

Nepřímý vliv klimatických změn na půdní prostředí a půdní biotu je přes vliv na rostliny, jejich růst a skladbu vegetace. Přes kořenové exsudáty, opad, protierozní a zpevňující účinek, přes symbiotické nebo saprofytické organizmy dochází k řetězci změn v biologických, biochemických a chemických půdních procesech, které je velmi obtížné studovat, už z hlediska jejich komplexnosti.

15.4.2.3 *Adaptační kapacita*

Míra, s jakou jsou lesní dřeviny, lesní ekosystémy či jakékoliv systémy schopny odolávat perturbacím, se nazývá adaptační kapacita. Tímto termínem je rozuměna schopnost systému udržovat své vlastnosti nebo funkce v mezích rovnováhy v daných nebo nastávajících podmínkách. Pielke (1998) definuje adaptační kapacitu jako vyrovnávací schopnost, která je vymezena skupinou jedinců nebo je podmíněna institucionálním přístupem s cílem snižovat zranitelnost systému vzhledem ke klimatické změně. V antropocentrickém pojetí lze reakce členit na plánované, které zahrnují přispění lidského faktoru nebo automatické, k nimž dochází „samovolně“, vlivem přírodních činitelů.

Definováním míry adaptační kapacity lze popsat i aplikovat adaptační strategie nebo reagovat na náhlé změny podmínek a snižovat závažnost dopadu těchto změn. Je však obtížnější kvantifikovat míru adaptační kapacity než risk plynoucí z nedostatku adaptačních mechanismů, neboť adaptační kapacita není přímo měřitelná. V projektovém šetření (Brooks and Adger 2005; UNDP/GEF 2003) lze adaptační kapacitu posuzovat pomocí souvisejících faktorů, které ovlivňují ekosystém.

V rámci adaptační kapacity systém disponuje určitou výbavou, kterou může použít jako adaptační nástroj. V nejširším slova smyslu, kdy nehledíme na typ či velikost systému, tyto adaptační zdroje mohou být přírodní, finanční, institucionální apod. Zranitelným či senzibilním systémem není jen ekosystém přírodního lesa, ale i všechny typy systémů, kterých se globální změny klimatu dotýkají, jako je sociální, ekonomická sféra apod.

Na úrovni člověkem neřízeného ekologického systému bude míra adaptační kapacity záviset na takových faktorech, jako biodiverzita nebo migrační potenciál. V ekosystémech s vyšší biodiverzitou bude vyšší pravděpodobnost rychlého obsazení nově vzniklých nik oproti druhově chudým ekosystémům.

V kontextu s tezí uvedenou v úvodu této kapitoly, že vyšší druhová diverzita není nutně zárukou ekologické stability by se mohlo zdát, že toto pronesení je v rozporu s předpokladem adaptační kapacity, která je predikčně podmíněna druhově bohatým společenstvem (Brooks and Adger 2005). Zde je však nutné posuzovat adaptační kapacitu ze srovnatelné hierarchické úrovně. Na úrovni krajiny je stabilita, resp. schopnost absorbovat změny a obnovovat spontánně stav rostlinstva a

živočišstva před narušením, vyšší za předpokladu vyšší diverzity. Na ekosystémové úrovni jsou však tyto změny uplatněny za cenu modifikace dílčích ekosystémů a ztráty či narušení klíčových prvků ekosystému. To následně vede k narušení ekosystému a změně jeho homeorhézní linie.

Adaptačně méně schopné jsou ekosystémy geograficky omezené, oproti ekosystémům, které mají možnost nejen horizontálního, ale i vertikálního posunu do optimální klimatické zóny.

Adaptace ekosystémů může být podpořena managementem krajiny, jako je budování biokoridorů vedoucích přes urbanizovanou či zemědělskou oblast nebo omezení fragmentace přírodních ekosystémů. Adaptační kapacita ekosystémů může být také zvyšována omezením „neklimatických“ vlivů, jako je snižování znečištění prostředí nebo omezení hospodářské činnosti v kriticky ohrožených oblastech, resp. podpora trvale udržitelného hospodaření.

Tab. 15—4: Charakteristiky význačných radiačně aktivních plynů (RAP), které v zemské atmosféře působí skleníkový efekt. Nejúčinnějším RAP je vodní pára, ostatní plyny mohou ke skleníkovému efektu přispívat v důsledku přirozených pochodů (geotermální procesy, sopečná činnost, zvětrávání atd.) nebo antropogenní činnosti (spalování fosilních paliv, zemědělství, průmysl aj.). Negativní dopady znečištění atmosféry jsou zvyšovány tím, že mnoho živých společenstev má antropicky potlačenou přirozenou schopnost vyvíjet se a reagovat na změny vnějších podmínek. Ekologické dopady klimatické změny se různí v přirozených ekosystémech se zachovanou adaptabilitou a koevolucí a v ekosystémech antropicky podmíněných (vyžadujících neustálou kontrolu látkových vstupů a výstupů). Přirozená společenstva dokáží některé disturbance účinně tlumit, ale většina antropogenních ekosystémů má tuto schopnost snižovou nebo ji zcela postrádá.

Atmosférická složka	Zdroj	Místa resorpce	Koncentrace v atmosféře	Možný vliv na radiační bilanci a klima	Poznámka
Vodní páry	Do atmosféry je voda navracena zejména výparem z moří a oceánů a sladkovodních terestrických zdrojů, transpirací rostlin i evaporací z vegetace aj. biologickými a geologickými procesy. (např. při vulkanické činnosti vodní páry zaujímají až 60 % celkového objemu emitovaných plynů). Lidskou činností je evaporace často spíše snižována (např. zmenšením odparné plochy vykácením lužního lesa).	Srážky ve formě vody, sněhu nebo ledu, desublimace	Kdyby atmosférická voda okamžitě zkondenzovala, její roční koncentrace může představovat kolem 25 mm kapalné vody rozptýlené po celém povrchu Země. Průměrný roční úhrn srážek však činí asi 1000 mm, což svědčí o velmi rychlém koloběhu vody v ovzduší. Cca 99,99 % atm. vodních par je obsaženo v troposféře.	Latentní teplo, které je v atmosféře z vodních par uvolňováno při kondenzaci, je jedním z nejvýznamnějších zdrojů atmosférické energie.	Voda je zásadní látkou působící skleníkový efekt. V troposféře voda setrvává cca 10 dní. Skleníkový efekt ovlivňuje z 36–70 %.
oxid uhličitý CO₂	Významnými zdroji CO ₂ jsou sopky, oceány a geotermální činnost. Je také odpadním produktem dýchání a aerobní dekompozice. Dalšími zdroji CO ₂ je spalování fosilních paliv a biomasy, rozklad rostlin a organických zbytků (oxidace humusu), využívání organických půd pro zemědělství, intenzivní agrotechnika, respirace organismů.	Oceány (až 50 větší obsah než v atmosféře; absorbují až 1/3 CO ₂ , emitovaného do atmosféry lidskou činností), biosféra, lužní polohy	Koncentrace v předindustriální době (v r. 1832) byla cca 284 ppm. Současná koncentrace je 383 ppm (vzestup o 37,77 %)	Podle různých modelů je možný vzestup teploty cca o 3°K v případě zdvojnásobení koncentrace v atmosféře, ochlazení stratosféry o cca 10°K. V atm. absorbuje infračervené záření a záření o vlnové délce 4,26 mm a 14,99 mm.	V atmosféře nereaguje. Reaguje s chlorofylem, narušení fotosyntézy. Významným zdrojem je vulkanická činnost aj. geotermální pochody. Skleníkový efekt ovlivňuje z 9–26 %.
Metan CH₄	Jeden z vůdčích plynů v anoxické atmosféře Země. Přirozeně je produkován geotermálně nebo v zemědělství (hospodářská zvířata - trávicí trakty živočichů), rýžová pole, těžba a užití fosilních paliv, skládky organických hnojiv a odpadů. V atmosféře může být metan oxidován na CO ₂ a H ₂ O. Cca 55 % celkové emise pochází z lidské činnosti.	V atmosféře může být oxidován na CO ₂ a H ₂ O. Resorpce probíhá Oxidační OH radikálu	V roce 1750 cca 700 ppb, v roce 1998 byla koncentrace 1745 ppb. (Vzestup o 150 %)	Skleníkový efekt; vliv na radiační bilanci (ovlivňování množství troposférického ozónu). Absorbuje infračervené záření cca 20x efektivněji než oxid uhličitý.	Perzistence v troposféře cca 4 - 7 let. Metan má 25x větší vliv na skleníkový efekt než CO ₂ . Skleníkový efekt ovlivňuje z 4–9 %.

oxidy dusíku: N₂O a NO_x	N ₂ O: dusiční hnojiva, organická hnojiva; NO _x : spalování fosilních paliv a biomasy (Až 65 % z lidské produkce pochází z chovu hospodářských zvířat. Průmyslové zdroje cca 20 %.)	N ₂ O: fotolýza; NO _x : rainout (radioaktivní spad), suchá depozice	N ₂ O: 314 ppb; od r. 1750 koncentrace stoupla o 44 ppb (vzestup o 16 %); NO _x : 0,5 - 20 ppb	Skleníkový efekt vlivem zvyšování koncentrace N ₂ O, způsobujícího snižování množství ozónu. NO _x vstupuje do cyklu stratosférického ozónu.	Doba účinnosti N ₂ O: několik let. Perzistence NO _x : několik dní; vliv na vodu v atmosféře. Na hmotnostní jednotku má NO ₂ 298 x větší vliv na skleníkový efekt než CO ₂ .
Ozon O₃	Nepřímé zdroje: fotolýza antropického NO ₂	Katalytické reakce s různými prvky (např. Cl _x , NO _x , HO _x)	V troposféře: 20 ppb; ve stratosféře 15 ppm do výšky 25 km.	V případě silné redukce O ₃ : ochlazování stratosféry a zvyšování účinku UV záření na povrchu země; vliv na meteorologické procesy	Doba perzistence více než 1 měsíc; globální účinek, ale regionálně specifický; vliv na fotochemickou regulaci ozónu. Skleníkový efekt ovlivňuje z 3– 7 %.
halogenderiváty (halogenové uhlovodíky)	Výroba a použití plastů, chladicí látky, aerosoly. V současnosti omezené použití (Vídeňská úmluva, Montrealský protokol)	V troposféře nepodléhá degradaci; neprůkazný fotolytický rozklad ve stratosféře	(F)11: 268 ppt; (F)12: 533 ppt; (F)113: 84 ppt	Přispívá ke skleníkovému efektu; destrukce stratosférického ozónu	Poločas rozpadu 50 - 100 let. 2 skupiny chlorovaných uhlovodíků jsou začleněny do Kjótského protokolu: hydrofluorokarbonáty (HFCs) a perfluorokarbonáty (PFCs). HFCs se na globálním oteplování podílejí 12500x více než CO ₂ .
oxid siřičitý SO₂	Spalování fosilních paliv, sopečné erupce, postvulkanická činnost.	Suchá i mokrá depozice, oxidace v atmosféře	0,2 ppb, regionálně specifické	Oxidací vznikají sulfátové aerosoly, ovlivňující radiační bilanci a tvorbu oblaků	Regionální vliv; především v podobě kyselých dešťů. Perzistence látky: několik dní.
amoniak NH₃	Přírozně pochází z dekompozičních procesů, dále ve vazbě na zemědělství (hospodářská zvířata) a spalování uhlí	Vymývání srážkami, suchá depozice, oxidace na NO _x	0,2 ppb	Malý vliv na radiační bilanci (skleníkový efekt)	Krátkodobá perzistence
aerosoly (částice v suspenzi)	Produkty spalování	Sedimentace, vymývání	10 - 15 mg·m ⁻³	Vliv na tvorbu mraků a uvolňování srážek; absorpce, odraz a rozptylování slunečního a zemského záření	Možný vliv na albedo a tepelnou distribuci atmosféry