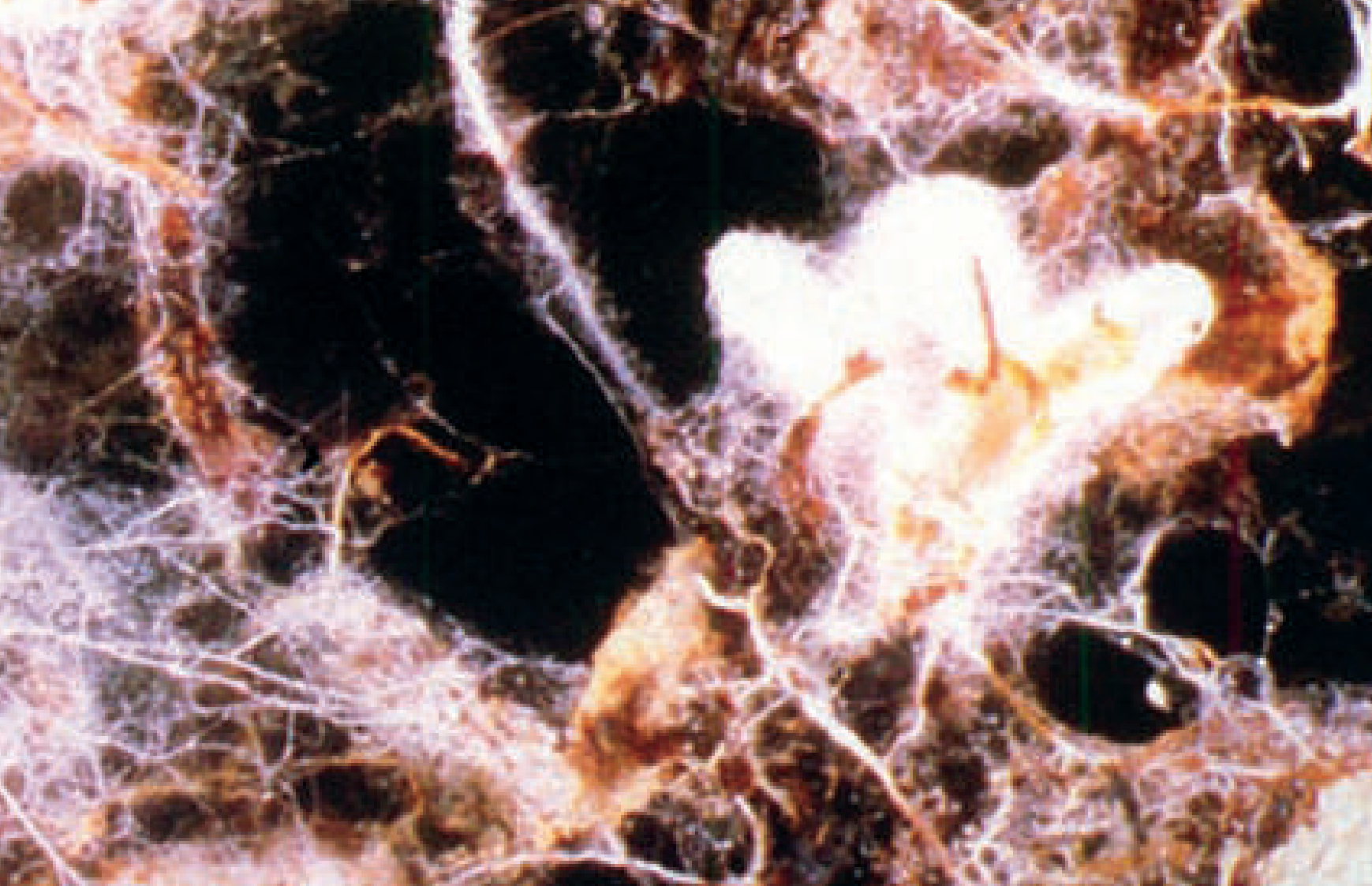


3

Hin lifandi jörð – lífverur og lífræn efni



Mynd 3.1. Svepprót sem losar næringarefni til plantna. Svepprætur tengjast m.a. örefnum í jarðveginum og liðka fyrir næringarefnaupptöku. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Mælikvarði á stöðu vistkerfa

Magn kolefnis eða lífrænna efna í moldinni er einn algengasti mælikvarðinn sem er notaður við mat á stöðu og ástandi vistkerfa. Frjósöm jörð hefur ríkulegan forða lífrænna efna, mikið af kolefni á afoxuðu formi og þá er moldin oft dökk á litinn (mynd 3.2). Eitt helsta einkenni hnignunar vistkerfa er tap á kolefnisforðanum.

3.1. Orkuhringrásin og lífið

Lífið á jörðinni er drifið áfram af orku sólar. Þar sem hún skín lóðrétt niður á jarðarflötinn nemur orkan >1 000 W á hvern fermetra, sem er væntanlega meira en flestir hefðu gert sér í hugarlund. Meðaltal geislunarinnar er þó nær því að vera um 150 W á fermetra. Þetta er vitaskuld feykilega mikið innstreymi orku sem jörðin nýtur, enda er það svo að sólarorka sem numin er með „sólarsellum“ er smám saman að verða meginorkugjafinn fyrir starfsemi mannsins á sólríkum svæðum jarðar.

Til þess að lífverur geti hagnýtt sér orku sólar er henni umbreytt í kolefnissambönd. Vistkerfi jarðar, landbúnaður – og þar með maðurinn – eru algjörlega háð þessu orkunámi og því að hringrásir orku, vatns og næringar séu virkar til að standa undir orkunáminu. Mælikvarðar sem lýsa þessari virkni hringrásanna eru notaðir til þess að meta gæði vistkerfa og ástand lands (sjá t.d. *Methods for Assessing Soil Quality*, Doran og Jones 1996 og *Að lesa og lækna landið*, ÓA og Ása L. Aradóttir 2015), eins og lýst er nánar í 20. kafla þessa rits. Það er blaðgræna gróðurs sem nemur orku sólarinnar og bindur hana í kolefnissamböndum með efnaferli sem kallast ljóstíllífun. Kolefnið er á afoxuðu formi í plöntum (sjá 5. kafla um efnaeiginleika), en síðan tekur við flókin „atburðarás“ og fjölbreyttar

„sviðsmyndir“ þegar orkuforðinn dreifist um vistkerfið og er notaður af hinum ýmsu leikendum í hringrás lífsins. Sumt er geymt sem forði í jarðvegi eða gróðri, t.d. lífrænt efni í mold og viður í trjám. Við lok hringrásarinnar losnar um kolefnið sem tekur þátt í þessari hringrás við öndun. Við öndun oxast kolefnið, það „brennur upp“ – orkan sem geymd var í afoxuðu kolefni losnar að nýju. Kolefnið berst til andrúmsloftsins á ný sem CO₂ – hringrásin lokast.

Lífverur keyra hringrás orkunnar eða öllu heldur kolefnisins, en orkunámið er vitaskuld háð skini sólar og blaðgrænu plantna. Undir yfirborðinu er lífheimur sem tekur ríkulegan þátt í þessu ferli. Þar er að finna fjölbreyttari heim lífvera og efnahvarfa en orð fá lýst. Það er t.d. býsna sláandi staðreynd að mun fleiri tegundir lífvera þrífast ofan í moldinni en á yfirborðinu, sem eru sannindi sem mörgum eru ókunn. Lífverur moldarinnar stuðla að rotun lífrænna efna, geymslu kolefnissambanda og síðan framboði á nauðsynlegri næringu fyrir lífið, bæði það sem þrífst ofanjarðar og ofan í moldinni.

Lífræðileg virkni vistkerfa, stöðugleiki þeirra og þanþol mótast verulega af lífrænum efnum og starfsemi lífvera í moldinni. Lífverurnar nýta þau lífrænu efni sem falla til moldarinnar og skila til baka nauðsynlegum næringarefnum til annarrar lífsstarfsemi, svo sem til róta plantna. Raskist þetta flæði hefur það áhrif á vistkerfið í heild, en við það getur t.d. gróðurfar breyst mikið. Þá



Mynd 3.2. Fjölbreytileiki lífsins í moldinni er meiri en orð fá lýst. Lífræn efni geyma orku í moldinni og lita hana dökka en lífverurnar drífa hringrás næringarefna og þar með fæðuframleiðslu jarðarbúa.

eru mengunarvarnir moldarinnar afar þýðingarmiklar. Lífverurnar vinna úr mengunarefnum sem falla til jarðar og gera þau óskaðleg áður en þau berast áfram inn í grunnvatnskerfi eða til annarra hluta vistkerfa. Á því sviði eru bakteríur og sveppir mjög mikilvirkar lífverur. Hreinsunin tekur m.a. til sýkla, þungmálma og ýmissa lífrænna mengunarefna.

Lífverur móta byggingareiningar jarðvegs með því að hnýta agnir moldarinnar saman í samkorn, sem síðan tengjast í stærri byggingareiningar. Samkornin auka holrými jarðvegsins og auðvelda flæði vatns og súrefnis um moldina. Þessar byggingareiningar auka því mjög á frjósemi jarðvegsins, vatnsrými og vatnsleiðni og bæta aðra þætti sem eru mikilvægir fyrir gróður og vistkerfi. Auk þess getur mikið vatn loðað við lífrænu efnin sem síðan er unnt að miðla til róta plantna; lífræn efni bæta því vatnsheldni moldarinnar.

Stór hluti þess kolefnis sem kemur við sögu í kolefnishringrás jarðar er geymdur í jarðveginum sem lífræn efni og þau eru gríðarlega mikilvæg í samhengi við magn gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu og hlýnun jarðar, eins og síðar er vikið að.

Samspil lífvera í moldinni er afar flókið: þetta er „ógnvænlegur“ heimur þar sem hver lífvera lifir á þeirri næstu. Lífverur í mold hafa margs kyns aðferðir á takteinum til að verjast öðrum lífverum, t.d. veirum og bakteríum, og þessar varnir geta haft hagnýta þýðingu fyrir mannlífið. Lífverur ættaðar úr mold eru því mikilvægar í lyfjaframleiðslu og æ fleiri tegundir nytsamlegra efnasambanda og lífvera finnast með ári hverju. Fúkkalyf eiga t.d. uppruna sinn í moldinni (pensillín, streptómýsín, fyrstu virku lyfin sem læknuðu berkla o.fl.). Lífverur jarðvegs eru mikilvægar í fæðu- og efnaiðnaði og eru notaðar við jógúrtframleiðslu og bjórgerð, svo dæmi

séu tekin. Á hinn bóginn geta nokkrir sjúkdómar borist í fólk úr jarðvegi, m.a. stífkrampi. Eyðing regnskóganna ásamt því að sífellt stærri svæði eru tekin undir akuryrkju er ógn við líffjölbreytileika moldarinnar, sem alþjóðastofnanir á borð við Umhverfisstofnun Sameinuðu þjóðanna (UNEP) og Samningurinn um líffjölbreytileika (UN-CBD) hafa varað við (IPBES 2019).

Fjöldi tegunda er yfirleitt í réttu hlutfalli við framleiðni kerfisins, en hvorki fjöldinn né framleiðnin eru þó einhlítir mælikvarðar á líffjölbreytileika því mikilvægar en sjaldgæfar tegundir lifa á svæðum þar sem framleiðni er mun minni, t.d. á norðurslóðum og í eyðimörkum. Þá getur fjölbreytileiki í moldinni verið mikill enda þótt gróðurfar sé einsleitt. Varðveisla fjölbreytilegra vistgerða og búsvæða, sem og fjölbreytileika í landslagi, felur í sér gild verndunarsjónarmið.

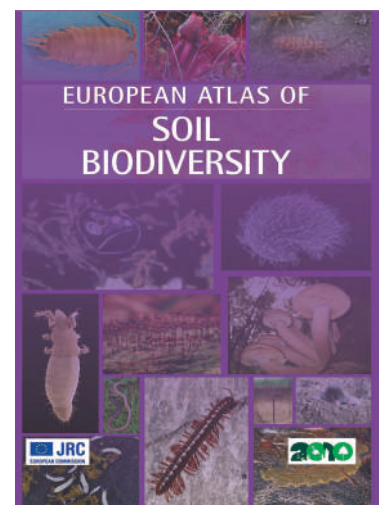
Nokkuð ber á að fjöldi háplöntutegunda í tilteknum reitum sé notaður sem slíkur mælikvarði, en hann er aðeins einn af mörgum og getur verið afar villandi með tilliti til skilnings á líffjölbreytileika, svo dæmi sé tekið. Það er semsagt mikilvægt að horfa einnig til verndunar vistkerfa og búsvæða í heild, sem vitaskuld tekur þá einnig til moldarinnar, en ekki aðeins til einstakra tegunda ofanjarðar þegar gætt er að verndun líffjölbreytileikans (mynd 3.3).

Tækni til rannsókna á lífinu neðanjarðar hefur fleygt fram á síðustu árum. Þróuð hafa verið tæki til myndatöku sem gerir mönnum kleift að skyggjast inn í þennan dulda heim. Einnig er ör þróun í tækni til að mæla og auðkenna hinar margvíslegu lífrænu sameindir sem eru í jarðveginum. Þessi kafli styðst m.a. við myndefni sem nýtir þessa tækni, og þá einkum myndefni sem stofnanir bandaríska landbúnaðarráðuneytisins (USDA) og stofnanir Evrópusambandsins hafa gefið út til fræðslu.

Lífræn efni í mold

Við rotnun á leifum jurta og dýra myndast margvíslegar lífrænar sameindir, sem ásamt lífverunum mynda lífræn efni í moldinni (e. organic matter, skammstafað OM eða OC fyrir lífrænt kolefni).

Það eru þessi lífrænu efni í yfirborðslögum moldarinnar sem eru, eins og fyrr sagði, einn helsti mælikvarðinn á frjósemi vistkerfa og landbúnaðarlands.



Mynd 3.3. Evrópski atlasinn um líffjölbreytileika í moldinni. Efnið er aðgengilegt á netinu og ætlað til fræðslu á öllum stigum menntunar og fyrir almenning (Jeffery o.fl. 2010).

3.2. Lífverur

Því hefur verið haldið fram að fjöldi þeirra tegunda sem á eftir að lýsa og greina í jarðvegi séu fleiri en allar þær tegundir sem þrífast ofanjarðar. Það ætti að gefa nokkra hugmynd um auðgi tegunda í moldinni. Sú umfjöllun sem hér fylgir er engan veginn tæmandi en gefur hugmynd um helstu flokka lífvera í mold og sýnir fram á hve líf í moldu er fjölskrúðugt og mikilvægt. Þá er vert að geta þess hér að fjöldi skordýra lifa á einhverju þroskastigi ofan í moldinni, sem enn eykur á fjölbreytnina.

Vírusar og bakteríur. Gríðarlegur fjöldi vírusa og baktería lifir í jarðvegi og þessar lífverur sjá um fyrsta stig endurvinnslu á lífrænu efni. Síðan eru aðrar lífverur sem annaðhvort lifa á bakteríum eða þeim efnum sem losna við starfsemi vírusa og baktería. Talið



Mynd 3.4. Rhizobía-bakteríur lifa í sambýli við ýmsar plöntutegundir og hafa þann eiginleika að vinna nitur úr andrúmsloftinu. Plantan nýtir hluta þessa niturs en miðlar orku (C) o.fl. á móti og hefur mikinn hag af samstarfinu. Myndin er úr European Atlas of Soil Biodiversity (Jeffery o.fl. 2010).

er að í einu grammi skógarjarðvegs geti verið allt að 40 000 tegundir baktería og fæstum hefur verið lýst til hlítar. Rhizobía-bakteríur lifa í sambýli við ýmsar plöntutegundir og hafa þann eiginleika að vinna nitur úr andrúmsloftinu. Plantan nýtir hluta þessa niturs en miðlar orku á formi kolefnissambanda o.fl. á móti og hefur mikinn hag af samstarfinu. Lúpína og smári eru dæmi um öflugar plöntur sem lifa í sambýli við rhizobía-bakteríur. Sambýli af þessu tagi er mikilvægt fyrir margar nytjaplöntur (mynd 3.4).

Lífverur sem nefndar hafa verið **blágrænþörungar** (e. cyanobacter), en eru í raun sérstök deild lífvera, eru mikilvægar fyrir niturnám og hringrás næringarefna. Þetta lífsform er víða nauðsynlegt fyrir landnám gróðurs og er hluti þeirrar jarðvegsskánar sem hylur yfirborð þurrlendis víða um heim (e. crust, soil crust, biocrust).

Á Íslandi er þessi skán mikilvæg í landgræðslu og oft forsenda landnámsplantna, því skánin gerir yfirborðið stöðugt og ver það gegn frostlyftingu og rofi um leið og nitri er smám saman safnað í vistkerfið. Fleiri lífverur en bakteríur af þessu tagi mynda skánina, svo sem ýmsar fléttur og mosategundir. Bók Harðar Kristinssonar (2016) er afar merkileg heimild um fléttur í náttúru Íslands. Allar þessar lífverur eru mikilvægar fyrir mold og vistkerfi landsins enda þótt þær láti lítið yfir sér miðað við stórvaxnari tegundir.

Blágrænþörungar gegndu forvitnilegu lykilhlutverki í sögu jarðar og lífsins, en þeir komu fram fyrir um 3 milljörðum ára. Talið er að breiður blágrænþörungur í hafinu hafi smám saman byggt upp súrefnisforða andrúmsloftsins, sem er bæði forsenda veðrunar (oxun), jarðvegsmyndunar og svo vitaskuld starfsemi vistkerfa á jörðinni (orkuskipti sem byggjast á afoxun og oxun/bruna kolefnis).

Blessuð skánin

Lífræn jarðvegsskán er útbreidd um heiminn, ekki síst á þurrlandissvæðum og þurrum svæðum jarðar. Hún hefur afar mikil áhrif á jarðvegisyfirborðið og vistkerfi. Hún eykur samkornamyndun og myndar varðbelti á yfirborðinu sem minnkar eða stöðvar rof. Á Íslandi skiptir einnig miklu að skánin stöðvar myndun ísnála (sjá 16. kafla um kulferli), sem er forsenda þess að uppgræðsluaðgerðir takist sem skyldi. Hún stuðlar að auknu ísigi vatns sem dregur úr yfirborðsrennsli og einnig stórlega úr uppgufun úr moldinni, sem bætir vatnsbúskap. Þetta er einkar mikilvægt þar sem moldin er sendin og heldur litlu vatni, að ekki sé talað um þar sem yfirborðið hitnar í sól vegna þess að það er mjög dökkt, eins og á við um íslenskar sandauðnir.

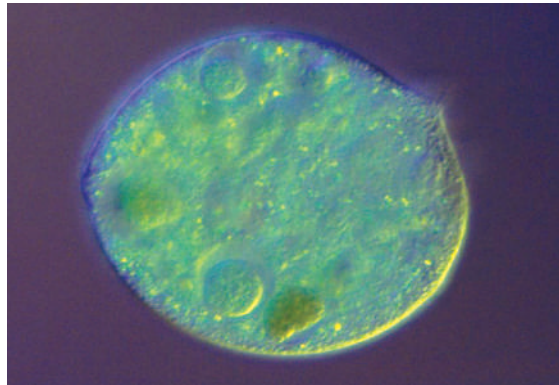
Niturnám skánarinnar er afar mikilvægt fyrir vistkerfi jarðar. Skánin nemur nitur úr andrúmsloftinu og skilar því til annarra hluta vistkerfisins. Nitursöfnunin getur numið tugum kg á ha hvert ár, m.a. hér á landi – þetta er gríðarlegt magn niturs en hluti þess tapast með útskolun eða er fjarlæggt með beit. Jarðvegsskán stuðlar að uppsöfnun lífrænna efna í moldinni sem eykur frjósemi vistkerfa. Skánin er enn fremur mikilvæg að því leyti að hún býr til örugg „set“ þar sem góð skilyrði eru fyrir fræplöntur að komast á legg. Lífræn jarðvegsskán er afar viðkvæm fyrir raski á borð við akstur utan vega og traðki manna og búfjár. Þar sem gróður er lítill er yfirferð búfjár oft mikil sem hefur skaðleg áhrif á skánina og því er mikilvægt að hlífa slíkum svæðum við beit.



Mynd 3.5. Jarðvegsskán. Þarna er að finna fjölbreyttar lífverur sem auka stöðugleika yfirborðsins og móta það fyrir landnám háplantna á borð við víðinn til hægri á myndinni.

Þetta er í raun mesta umhverfisbylting í sögu jarðarinnar og henni olli þessar smáu en mjög svo mikilvægu lífverur. Benda má á aðgengilega yfirlitsgrein um jarðvegsskán eftir Jayne Belnap (2003), sjá einnig Weber o.fl. 2016 fyrir þá sem vilja fræðast meir.

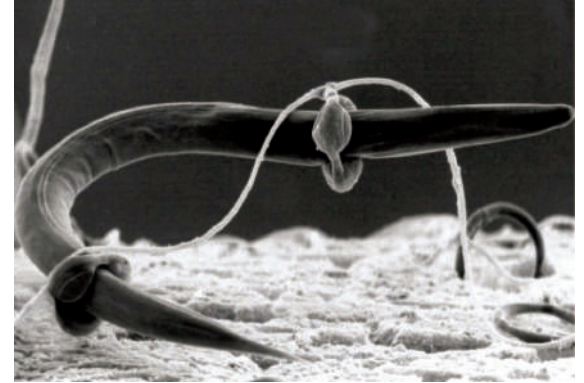
Frumdýr (e. protozoa) eru einkjörnungar. Þau eru gríðarlega margbreytileg; um 2 000 tegundum hefur verið lýst, sem er trúlega um 10% af tegundum frumdýra í jarðvegi. Frumdýr lifa fyrst og fremst á bakteríum og þrífast því best í rakri mold. Þau gegna mikilvægu hlutverki í næringarhringrásinni (mynd 3.6).



Mynd 3.6. Frumdýr – angarsmáar lífverur sem eru mikilvægur hlekkur í næringarhringrás moldarinnar. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Þráðormar (e. nematodes) eru ólíðskiptir ormar, oftast það smáir að þeir sjást ekki með berum augum (allt að því nokkrir mm á lengd). Jarðvegur sem hefur tiltölulega mikið af stóru holrými, svo sem sendinn jarðvegur (og væntanlega *eldfjallajörð*), er ákjósanlegur bústaður þráðorma því þar rúmast þeir best. Þeir lifa sem afræningjar og hræætur og éta jafnvel aðra þráðorma. Sumar tegundir þeirra geta valdið miklum skaða á rótum gróðurs og ræktartegundum á ökrum. Því eru eitrefni mikið notuð til að stemma stigu við þráðormum við jarðrækt, en nú færast í vöxt að hvíla akra og planta tímabundið í þá tegundum sem hafa eitúrahrif á þráðorma, t.d. ýmsum harðviðartegundum. Við það fækkar þeim svo að þeir valda ekki

skaða fyrr en stofninn nær sér á strik á ný. Sumar ræktartegundir eru ónæmar fyrir þráðormum, t.d. sojabauur. Fjöldi tegunda þráðorma sem hefur verið lýst er um 15 000, en kann að reynast >100 000 þegar öll kurl koma til grafar (mynd 3.7).



Mynd 3.7. Þráðormur genginn í gildru svepps sem vex umhverfis orminn og herðir að og sogar síðan úr honum næringuna. Myndin er úr European Atlas of Soil Biodiversity, Jeffrey o.fl. 2010 (bls. 94).

Ánamaðkar eru mjög mikilvæg jarðvegsdýr (mynd 3.8). Þeir þrífast á plöntuleifum og lífrænum efnum í moldinni. Úrgangur þeirra verður að tiltölulega stórum samkornum (mm) sem einkenna oft efstu lög jarðvegs (kornótt bygging, sjá 7. kafla um jarðvegslög). Ánamaðkar melta feiknalega mikið af mold á ári hverju. Kornótt bygging bætir jarðvegseiginleika á marga lund. Úrgangur þeirra inniheldur t.d. meira af auðnýtanlegri næringu fyrir rætur plantna en jarðvegurinn umhverfis. Einnig má nefna að vatn streymir greiðlega um göngin sem ánamaðkarnir grafa um jarðveginn.



Mynd 3.8. Gríðarlegur fjöldi ánamaðka býr í moldinni. Þeir eru afar mikilvægir fyrir næringarhringrásina eins og önnur dýr í moldinni, en einnig mynda þeir loftrásir og stuðla að kornóttri byggingu jarðvegsins.

Fjöldi ánattegunda sem hefur verið lýst er yfir 3 600, en fáar tegundir eru algengastar í Evrópu og Bandaríkjunum. Ástæða er til þess að benda sérstaklega á grein Hólmfríðar Sigurðardóttur um ánamaðka í *Náttúrufræðingnum* (1994). Þess má geta að Charles Darwin var frumkvöðull í rannsóknum á ánamöðkum og áhrifum þeirra á frjósemi jarðvegs.

Maurar og termítar hafa mikil áhrif á jarðveg heitari landa, einkum á gresjum og í skógum hitabeltisins. Þekktar eru um 2 000 tegundir termíta. Sumar þeirra byggja stóra hrauka sem eru áberandi, m.a. á gresjum Afríku (mynd 3.9). Maurar eru afar algengir í jarðvegi og nú þegar hefur verið lýst um 9 000 tegundum þeirra.



Mynd 3.9. Termítahraukur. Myndin er tekin í Níger. Mynd: Hafdís Hanna Ægisdóttir.

Mítlar og köngulær (e. mites). Köngulær og mítlar (sem eru skyldir köngulóm) eru oft heldur ægilegir ásýndum þegar þeir eru skoðaðir í öflugri smásjá. (myndir 3.10 og 3.11). Um 45 000 tegundum mítla hefur verið lýst, en talið er að það sé aðeins um 5% heildarfjölda tegunda þeirra.

Mítlar og köngulær, eins og flestar aðrar tegundir lífvera í jarðvegi, gegna mikilvægu hlutverki við losun næringarefna. Esther Marloes Kapinga (2020) gerði rannsóknir á mítlum og mordýrum í uppgræðslutilraun á Geitasandi á Rangárvöllum sem sýna hvernig fjöldi og fjölbreytni þessara dýra eykst eftir því sem vistkerfum vex ásmegin.



Mynd 3.10. Mítlar gegna mikilvægu hlutverki í næringarhringrás í moldinni við losun næringarefna. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.



Mynd 3.11. Heldur ófrýnileg könguló sem lifir í mold. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Mordýr. Stökkmor (e. springtail) er oft algengasta liðdýrið í jarðvegi (mynd 3.12), það geta jafnvel verið >10 000 þeirra undir einum fermetra. Stökkmor er hlutfallslega algengast í köldu loftslagi. Nafnið hlýtur dýrið af því að undir afturból þess liggur hali sem það getur látið smella niður, og þar með tekst dýrið á loft. Á þann hátt getur það forðað sér undan aðsteðjandi hættum. Stökkmor er talið hafa jákvæð áhrif á vistkerfi og vöxt gróðurs.



Mynd 3.12. Stökkmor eru algeng liðdýr í jarðvegi. Það stekkur um með því að spyrna við með afturendanum. Við vissar aðstæður, t.d. ef rótað er í frjósömum jarðvegi, getur mikil mergð komið í ljós og stökkið um. Mynd: European Atlas of Soil Biodiversity.

Sveppir (e. fungi). Helgi Hallgrímsson (2010) hefur ritað ítarlega bók um sveppi og sveppafræði og einnig Bjarni D. Sigurðsson (2015), sem gaf út aðgengilega bók um matarsveppi. Vert er að gefa þessum bókum gaum því þessar lífverur eru svo snar þáttur í starfsemi vistkerfa. Sveppir mynda langa þræði sem vaxa inn á milli jarðvegskorna, róta og bergs (mynd 3.13).

Sveppir eru mikilvægir fyrir sundrun efnis, en sumir vaxa í sambýli við aðrar lífverur (t.d. rætur plantna) sem ýmist getur valdið skaða eða verið nauðsynlegt viðkomandi lífverum. Myglusveppir (e. molds) stuðla að sundrun lífrænna efna og eru mikilvægari að því leyti en hattsvæppir (m.a. átsveppir). Yfirborðshluti hattsvæppa er aðeins lítill hluti lífveranna. Starfsemi myglusveppa er mjög sérhæfð og tegunda-samsetning þeirra mótast að hluta af samsetningu lífræna efnisins sem er til boða. Svepprót (e. mycorrhiza) er sérstaklega þýðingarmikil fyrir margar tegundir plantna því hún greiðir fyrir næringarupptöku þeirra (mynd 3.13).

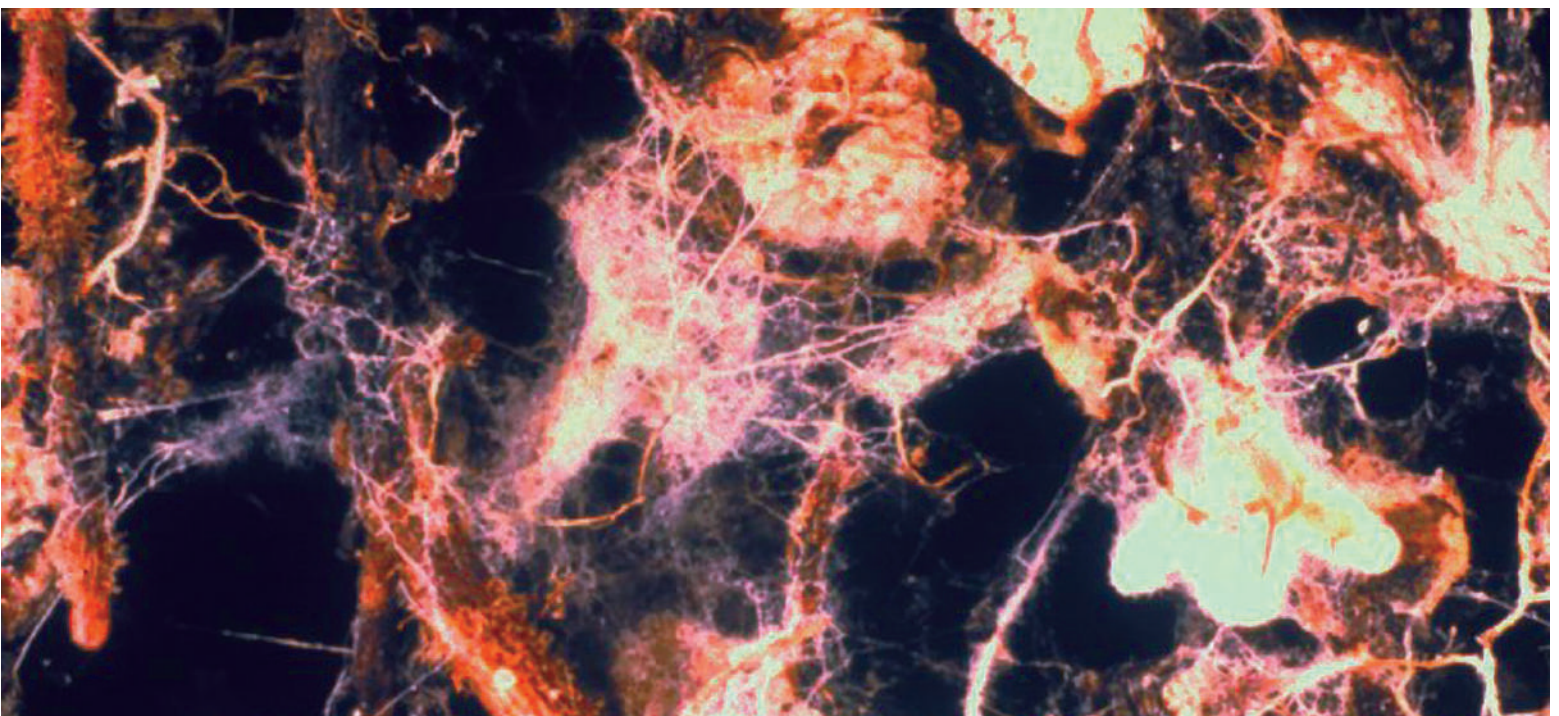
Sveppir geta verið mikilvægir fyrir vatnsbúskap – þeir mynda m.a. brú

fyrir vatn frá yfirborði og niður í mold og stuðla þannig að vatnsflæði í moldinni þegar það er takmarkað. Þekkt er að í eyðimörkum miðla sveppir vatni upp til róta plantna.

Sveppir eru einkanlega fjölbreyttir í skóglendi og frjósemi landsins eykst verulega eftir því sem þeim fjölga. Talið er að til séu um 72 000 tegundir af sveppum en að aðeins 5% þeirra hafi verið lýst. Um helmingur þeirra flokkast sem jarðvegssveppir.

Geislasveppir (e. actinomycetes), sem eiga bæði skyldleika við bakteríur og sveppi, stuðla að rotnun lífræns efnis, ekki síst efna sem eru tiltölulega torleyst, svo sem ligníns, sellulósa og lípíða. Þeir mynda gríðarlega víðtæka þræði um moldina.

Geislasveppir eru liður í hringrás næringarefna í mörgum vistkerfum. Athyglisvert er að þeir þrífast best á tiltölulega þröngu sýrustigsbili (pH 6–7,5). Margir geislasveppir gefa frá sér efni sem drepa örverur, sem er mikilvægur eiginleiki sýklalyfja; t.d. er aktínómísín mikið notað sýklalyf en það er unnið úr geislasveppum.



Mynd 3.13. Svepprót sem losar næringarefni til plantna. Svepprætur tengjast m.a. örefnum í jarðveginum og liðka fyrir næringarefnaupptöku. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Plöntuskaðvaldar. Ljóst er að margar tegundir þeirra lífvera sem hér hafa verið nefndar geta valdið miklu tjóni í ræktarlandi, þar á meðal eru sveppir, bakteríur, veirur og skordýr. Skaðvaldar sem lifa í mold geta auðveldlega borist á milli landa, til dæmis með pottaplöntum, og ber því að varast slíka flutninga eins og kostur er.

Plöntuskaðvaldar eru vettvangur sérstakrar fræðigreinar, enda er mikið í húfi að slíkir skaðvaldar eyðileggi ekki uppskeru. Rótarflókasveppur (*Rhizoctonia solani*) er algengur skaðvaldur í kartöflurækt og finnst hér á landi (Sigurgeir Ólafsson 2006) og lirlfur kálflugu (*Delia radicum*) eru alvarlegasti skaðvaldurinn í ræktun káls og rófna (Guðmundur Halldórsson 1989).

Aðrar lífverur í mold gegna oft mikilvægu hlutverki við að draga úr tjóni af völdum plöntuskaðvalda. Til dæmis getur svepprót dregið úr skaðsemi skordýralirfa sem naga rætur plantna og það sama má segja um jarðvegs-sveppi sem sníkja á skordýrum (Edda S. Oddsdóttir 2010).

Mælingar á virkni jarðvegslífs. Nokkrar aðferðir eru notaðar til að mæla virkni jarðvegslífs. Algeng aðferð er að stinga bómullarstrimlum ofan í jarðveginn og meta síðan hve hratt jarðvegsörverur vinna á þeim. Notaðir eru strimlar sem framleiddir eru sérstaklega í þessu skyni. Svokölluð flæming er einnig mikið notuð aðferð þar sem jarðvegsdýr eru flæmd úr sýnum með hita. Þá er hitaperu komið fyrir ofan við moldarsýni sem veldur því að það þornar ofan frá og jarðvegsdýrin flæmast niður úr sýninu og lenda ofan í vatnskari með rotvarnarvökva, þaðan sem þau eru síðan tekin til greiningar.

Mæling á örverumassa í jarðvegi (e. microbial biomass) er stundum talin ein besta aðferðin til að meta gæði og heilbrigði jarðvegs (Dudal 1998).

3.3. Rotnun og C/N-hlutfall

3.3.1. Öndun – rotnun

Allar þær lífverur sem búa í moldinni þurfa næringarefni til viðhalds og vaxtar. Virkni lífvera og þar með vistkerfisins er því háð því hve mikið leggst til af nýjum næringarefnum. Lífræn efni eru misjafnlega auðleysanleg í jarðvegi, þ.e. lífverur ráða misvel við að melta hin ýmsu efni. Sykrur og mörg prótein eru mjög auðmelt en sellulósi, ýmsar fitusýrur og lignín eru aftur á móti torleystari.

Segja má að rotnun í mold sé ferli þar sem kolefni á afoxuðu formi (verður til við ljóstillífun) í ýmsum lífrænum sameindum er oxað (lífverurnar nota til þess súrefni) og út rýkur koldíoxíð (CO_2). Orku ljóstillífunarinnar er skilað aftur en þau næringarefni sem losna við „brunann“ eru gripin á ný af öðrum lífverum og rötum plantna um leið og nýjar lífrænar kolefnissameindir myndast fyrir atbeina sólarljóssins. Því losnar mikið af CO_2 úr jarðveginum og þá losun er tiltölulega auðvelt að mæla með þar til gerðum mælitækjum – moldin andar. Styrkur þess CO_2 sem jarðvegurinn andar frá sér er mælikvarði á niðurbrotsstarfsemi en um leið enn einn mælikvarðinn sem hægt er að nota á virkni kerfisins.

Þess ber að geta að niðurbrot lífræns efnis á sér einnig stað við loftfirrtar aðstæður (skortur á súrefni) og þá losnar fyrst og fremst metangas (CH_4), t.d. í mýrlendi. Mjög sérhæfðar lífverur stuðla að niðurbroti lífræns efnis við þessar aðstæður. Umtalsverð orka er þá enn til staðar – hægt væri að oxa (brenna) kolefnið mun betur við meiri loftun, enda má nota CH_4 (metan) til brennslu, t.d. á bílvélar. Metangas hefur 10–50 sinnum meiri gróðurhúsaáhrif en CO_2 (háð reikniaðferðum) og því er mjög óæskilegt að losa metan út í andrúmsloftið.

3.3.2. C/N-hlutfall

Lífverur þurfa mikið magn af nitri (N) fyrir vöxt sinn og viðgang og því er það mikilvægt fyrir rotnun á lífrænum efnum. Nitur er jafnframt iðulega takmarkandi þáttur fyrir lífsstarfsemina og er þess vegna næmur mælikvarði á frjósemi vistkerfa. Það má segja að virkni jarðvegslífvera takmarkist m.a. af því magni lífrænna efna sem er tiltækt til rotnunar (eldsneyti til oxunar – bruna) og því framboði af nitri sem nauðsynlegt er fyrir niðurbrotið. Vitaskuld hafa aðrir þættir áhrif, t.d. hitastig, rakastig, sýrustig og framboð á súrefni (sem er t.d. lítið í afoxuðum, súrefnissnauðum votlendisjarðvegi).

Eftir því sem minna er af nitri í samanburði við framboð á lífrænu kolefni (C), þeim mun óhægara eiga lífverur moldarinnar um vik, skortur á N hamlar þá lífsstarfseminni.

Hugtakið „C/N-hlutfall“ er notað til þess að lýsa þessu samhengi. Eftir því sem C/N-hlutfallið er hærra (minna af N samanborið við C) þeim mun takmarkaðra er framboð niturs fyrir lífverur. Frjósöm jörð hefur C/N-hlutfall

á bilinu 8-12, en hún er orðin verulega ófrjó við C/N >25, jafnvel þótt verulega mikið sé af lífrænu efni í moldinni. Dæmi um C/N-hlutfall í plöntuleifum, lífverum og jarðvegi er sýnt í töflu 3.1. Efni með mjög hátt C/N-hlutfall, t.d. viðarkurl, getur af þessum sökum tafið fyrir landnámi og vexti plantna og því er það notað í stígagerð í þessu skyni.

Tafla 3.1. C/N-hlutfall.

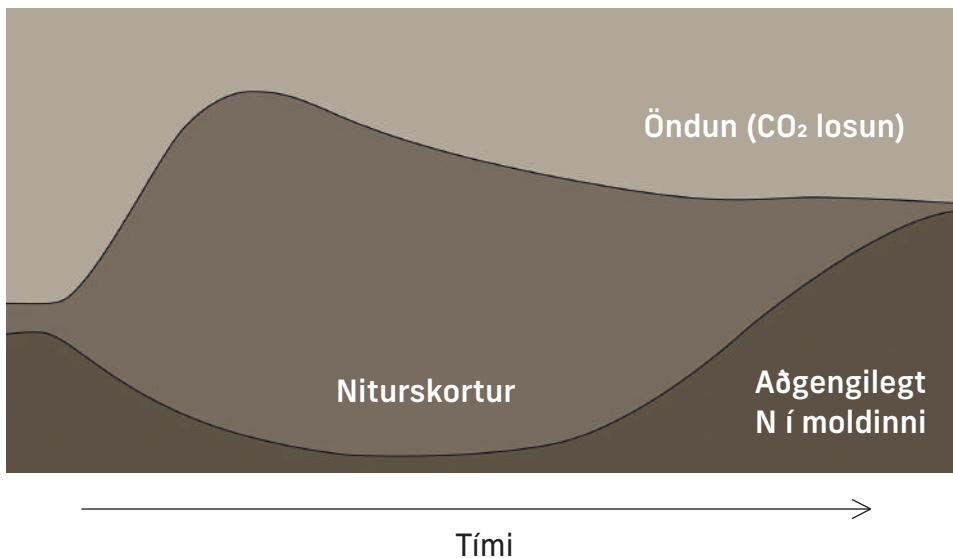
EFNI	C/N-HLUTFALL
Viðarsag	300–600
Pappír	80–150
Hey	15–40
Efni í lífrænni tunnu ¹	10–15
Seyra	7
Jarðvegsörverur	5–8
Mold almennt A-lag	8–20 (12–14) ²
Mór (O-lög)	30–90 ³

1: í safntunnu fyrir lífrænan úrgang, háð rotnunarstigi o.fl. 2: C/N er oft á bilinu 12–14 en er þó afar breytilegt. 3: þó oft lægra á Íslandi, t.d. 25.

3.3.3. Rotnun og þörfin fyrir nitur

Hegðun vistkerfa stjórnast iðulega af samspili niturs og framboði lífrænna efna. Starfsemi jarðvegsörvera tekur kipp við það að fá nitur inn í kerfið. Þegar mikið leggst til af efni með lágt C/N-hlutfall (hlutfallslega mikið af N, t.d. í moltu og seyru) eykst starfsemi lífvera mjög hratt (mynd 3.14). Ef C/N-hlutfallið er hátt getur orðið skortur á N og á meðan svo er gengur niðurbrotið hægt fyrir sig. Jafnframt tína lífverurnar upp allt laust N í jarðveginum um leið og það losnar og því fer að gæta niturskorts hjá gróðri.

Gott dæmi um þetta á Íslandi er þegar uppskerumikið land er friðað fyrir beit, en við það raskast jafnvægi kerfisins.



Mynd 3.14. Niturskortur verður í kjölfar þess að sína eða annað efni með hátt C/N-hlutfall leggst til við yfirborðið. Örverur nýta allt laust nitur sem leggst til í þeirri viðleitni að brjóta niður sinuna og því verður tímabundinn niturskortur í moldinni. Landið virðist þar af leiðandi ófrjórri – í bili. Enda þótt lítið sé um nitur fyrir plöntur er öndun mjög ör vegna starfsemi örvera og mikil losun á CO₂. Þegar jafnvægi kemst á að nýju býr vistkerfið að auknum niturbirgðum og meiri frjósemi.

Gróður vex upp, hann er ekki fjarlægður með beit og verður síðan að sinu. Sinan hefur hátt C/N-hlutfall og þar með taka jarðvegslífverur að grípa allt nitur jafnharðan og það losnar til að hafa undan við niðurbrotið. Því getur N nánast týnst úr kerfinu um tíma og þá leggst gróðrinum lítið til fyrir en nýju jafnvægi er náð (e. nitrogen depression period). Kerfinu ofanjarðar getur þá farið aftur með tilliti til grósku. Þetta hefur stundum verið kallað að „landið fari í sinu“, sem mörgum bóndanum þykir slæmt.

Þegar jafnvægi er náð í kjölfar niturskortsins er kerfið í heild orðið frjósamara í þeim skilningi að meira er af lífrænum efnum og nitri. Þetta birtist oft sem eins konar „sprenging“ í gróðurfari þar sem land hefur verið friðað um hríð (oft í áratugi).

Blómplöntur á borð við blágresi verða þá ríkjandi, en þær eru margar hverjar háðar frjórrí mold og geta betur nýtt sér mikið framboð niturs en ýmsar aðrar tegundir (mynd 3.15). Aðrir þættir spila þarna inn í, t.d. einangrun sinunnar, en áhrif niturhingsins í þessu ferli hafa lengi verið vanmetin héraendis, enda þótt þau séu vel þekkt erlendis.

Þetta samhengi þarf að hafa í huga þegar gerður er samanburður á aðstæðum í beittu og óbeittu landi – samanburðurinn er óraunhæfur ef fremur stutt er síðan land var friðað fyrir beit – því vöxtur innan friðaða landsins kann að vera mun minni en á beitta svæðinu og í ójafnvægi til að byrja með. Rétt er samt að hafa í huga að hófleg beit á vel grónum og öflugum vistkerfum (t.d. graslendi) getur örvað hringrás næringarefna og frjósemi landsins.

Hægt er að nýta þekkingu á niturhringrásinni til þess að búa til beitiland sem hentar til nýtingar á ákveðnum tímum. Sinubrennsla gerir yfirborðið svartleitt og það hitnar því fyrr í sól. Um leið er fjarlægð einangrun yfirborðsins sem flýttir fyrir því að jarðvegurinn hlýni að vori. Og nú vantar samkeppnina um nitrið sem losnar, gróðurinn nýtur þess og svæðin grænka fljótt að vori og gefa góða uppskeru. Mjög þung beit árið áður hefur sömu áhrif, beit sem fjarlægir alla uppskeru. Með þessum hætti er hægt að skapa vorkerfi, en þá er sérstaklega mikilvægt að hafa í huga að þessi aðferð byggist á því að gengið er á lífrænan forða jarðvegsins og endurtekin sinubrennsla getur valdið hrúni vistkerfisins með sama hætti og ofbeit ár eftir ár.



Mynd 3.15. Blómskrúð sem hefur myndast í kjölfar friðunar og að loknu tímabili þegar nitur hefur skort í kerfinu. Myndin til hægri er úr Þórsmörk frá árinu 2007, en þetta land er nú óðum að hyljast víðikjarri og birkiskógi með frjósömum blómlendum o.fl. inn á milli.

Frjósöm mold er auðug af lífrænum efnum. Þegar land er brotið til ræktunar losnar um þessi efni og framboð á nitri er því yfirleitt gott í upphafi ræktunar. En sé uppskorið oft án þess að neinu sé skilað til baka til moldar tekur að ganga á lífrænan forða landsins. Mjög gott dæmi um þetta er landnám bænda á gresjum Bandaríkjanna þar sem uppskera var í fyrstu afar góð án þess að notaður væri áburður. En það gekk hratt á lífrænan forða moldarinnar sem að lokum leiddi til uppskerubrests og nú er yfirleitt ekki hægt að nytja þessa akra án áburðar. Líklega hefur eitthvað svipað gerst við landnám Íslands, jörðin hefur verið afar frjó í upphafi áður en tók að ganga á lífrænan forða í yfirborðslögum með fjölbreytilegum afleiðingum (sjá 20. kafla).

Framræsla mýra hefur sömu áhrif (mynd 3.16) en súrefni á þá greiðari aðgang að moldinni og lífsstarfsemin eykst – moldin tekur að anda. „Mýrin brennur“ er einnig sagt (bruni er í raun ekkert annað en oxun). Við það að kolefnið „brennur“ og hverfur sem CO₂ losnar um mikið af nitri sem eykur bændum heyfeng. En smám saman getur gengið á



Mynd 3.16. Framræst mýri á Suðurlandi. Við framræsluna tekur kolefni að oxast (brenna) en þá losnar um nitur og frjósemi til ræktunar verður umtalsverð. En meðan á þessu stendur gengur smám saman á lífrænan forða kerfisins.

þennan forða og yfirborðið tekur jafnvel að lækka. Sumir evrópskir bændur þurfa að glíma við sérkennileg vandamál þegar þetta gerist, mýrarnar brenna upp. Sums staðar er nú örþunnur jarðvegur, sem stendur jafnvel neðan sjávarmáls en er varinn af strandgörðum, þar sem áður voru margra metra djúpar mýrar, t.d. við Englandsstrendur og stendur Norðursjávar.

3.4. Lífræn efni í jarðvegi

Stærsti hluti þeirra lífrænu efna sem bætast við á ári hverju rotnar á tiltölulega skömmum tíma, jafnvel innan árs, nema þar sem umhverfisaðstæður koma í veg fyrir rotnun, svo sem í mýrum á norðurslóðum þar sem er kalt og súrefnisþrýstingur lítill. Hluti efnanna verður þó ávallt eftir í jarðveginum og myndar lífrænu efnin í moldinni sem taka síðan þátt í mun hægari hringrás lífrænna efna.

3.4.1. Tegundir lífrænna efna

Flokkun lífrænna efna í jarðvegi ber þess merki hve erfitt er að „sjá“ efnin. Lífræn efni í jarðvegi eru einnig nefnd húmus. Þeim er skipt niður í húmínefni (e. humic) og einföld húmínefni (e. non-humic), en þau síðarnefndu eru frekar einföld og auðbrjótanleg húmusefni. Húmínefnin eru síðan aðgreind frekar með efnafræðilegum aðferðum sem fela í sér skolon í mismunandi sýrum og bösum.

Hefðbundin skipting húmínefna er í húmín, húmínsýru og fúlvínsýru og efnin eru svört og mjög stöðug. Húmínsýrur eru brúnleitar og leysast upp í basa en ekki sýru, en fúlvínsýrur eru gular eða rauðar og leysast upp í sýrum. Þær eru einnig óstöðugastar gagnvart rotnun. Þessi skipting var mjög ráðandi í skrifum um lífræn efni í mold en byggist á

gamaldags aðferðum og er ekki eiginleg skipting á gerð eða virkni lífrænna efna í jarðvegi. Því er ekki lögð áhersla á hana hér, en þó er rétt að hafa þessa skiptingu í huga því hún kemur víða fram í skrifum um jarðvegsfræði. Nýjar aðferðir, sem m.a. byggjast á notkun gasgreinis (e. gas chromatography), innrauðum geislum o.fl. tækjum, ryðja sér nú til rúms.

Í jarðvegslögum er greint á milli mismunandi gerða lífrænna efna og þeim lýst með stöðluðum aðferðum sem þó eru nokkuð breytilegar á milli landa. Þar ræður m.a. rotnunarstig, t.d. hvort efnin eru fremur órotnaðar plöntuleifar, úrgangur stórra jarðvegslífvera eða mikið rotnuð efni sem geta verið tengd bergefnum jarðvegsins.

3.4.2. Dreifing og magn í jarðvegi

Lífrænt kolefni (OC) og lífræn efni (OM)

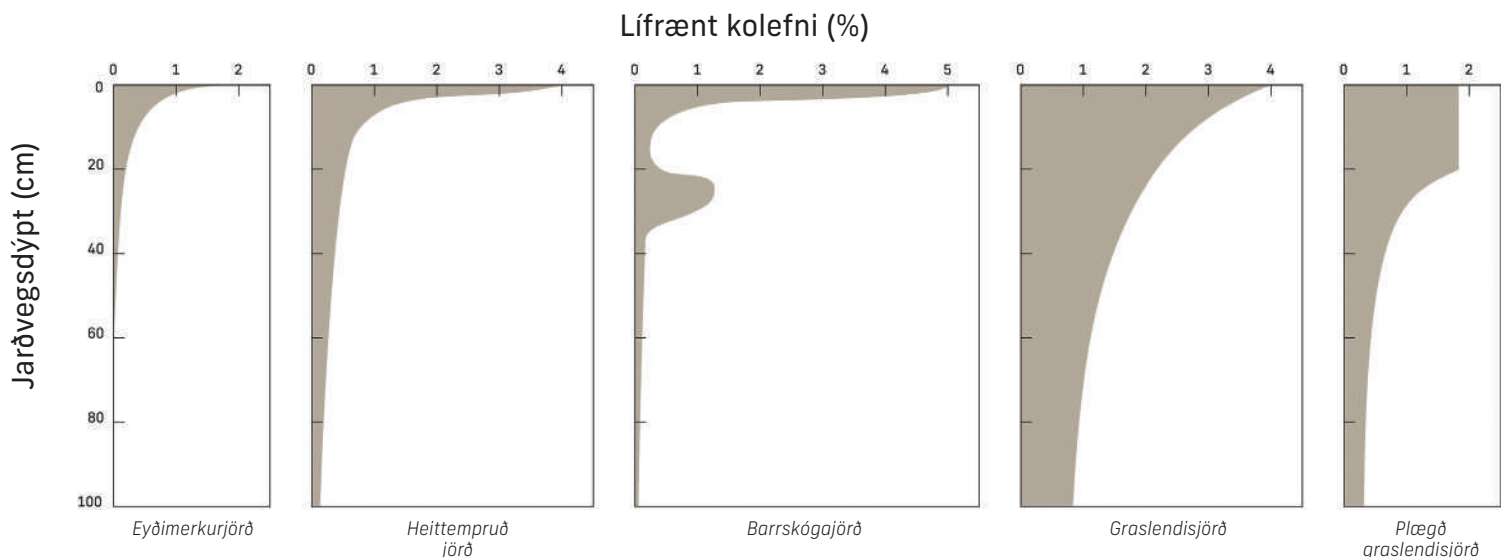
Lífræn efni eru að langmestu leyti mynduð úr kolefni en einnig súrefni, vetni og nitri – mun minna er af öðrum efnum. Þeir mælikvarðar sem notaðir eru til að meta magn lífræns efnis eru yfirleitt annaðhvort heildarmagn lífrænna efna (OM, e. organic matter) eða lífræns kolefnis (OC). Hér er yfirleitt talað um kolefnið (OC eða bara C).

Kolefni er hægt að mæla beint með ýmsum aðferðum en heildarmagn lífrænna efna er mælt með bruna (hve mikið brennur úr sýninu við háan hita í ofni). Bruni er góð mælistika á lífrænu efnin (OM), enda eru það þau í heild sem skipta máli. Mæling sem tekur mið af heildarbruna á lífrænu efni er þó ónákvæmari mælikvarði á C (orkuna) en bein mæling á kolefni (C), enda er hluti þess efnis sem losnar við bruna á jarðvegi vatn sem bundið er í sýnunum. Kolefni tengist einnig þælingum um gróðurhúsalofttegundir og því er æskilegra að mæla OC en OM. Til að reikna OM út frá OC er yfirleitt margfaldað með stuðlum frá 1,6–1,8.

Í þessari umfjöllun er aðeins rætt um þann hluta kolefnis sem er hluti af lífrænu efnunum í jarðveginum, en auk þess getur verið mikið af kalki (sem inniheldur vitaskuld kolefni, CaCO_3) í honum, sérstaklega á þurrum svæðum jarðar eða þar sem móðurefni jarðvegs eru kalkrík, en það á ekki við héraendis, með fáum undantekningum þó (*kalkjörð*, sjá 9. kafla).

Dreifing

Yfirleitt er langstærsta hluta lífræns efnis í mold að finna í yfirborðslögunum (mynd 3.17). Í mörgum vistkerfum, t.d. skóglendi og graslendi, er eins konar



Mynd 3.17. Dreifing kolefnis í yfirborðslögum í nokkrum jarðvegsflokkum (sjá 9. kafla um flokkun jarðvegs heimsins).

motta efst með lifandi og dauðu efni þar sem kolefnisinnihald er oft >12% C. Síðan fellur hlutfall kolefnis hratt eftir því sem neðar kemur í moldina. Í þurrlendisjarðvegi er yfirleitt 1–3% kolefni í yfirborðslögum en svæði sem búa við litla úrkomu (eyðimerkurloftslag) hafa enn minna kolefni, oft <1%. Í jarðvegi barrskóga safnast lífræn efni iðulega fyrir í sérstöku lagi nokkru undir yfirborðinu, sem er eins konar einkennislag *barrskógajarðar*, eins og fjallað verður um síðar.

Lífræn jarðvegslög (sjá umfjöllun í 7. kafla um jarðvegslög) eru táknuð sem O- eða H-lög. Þau innihalda >12% kolefni og ef slík lög eru nægjanlega þykk (og mörg) telst jarðvegurinn vera lífrænn jarðvegur (*mójröð*). Raunar er markið sett nokkru hærra en 12% C ef moldin er leirrík – allt upp að 16% í mjög leirríkri mold. Þetta er gert til að gefa áhrifum leirsins gildi, sem eru mikil í leirríkri mold, en annars eru lífrænu efnin ráðandi þáttur.

Mójröð (Histosol) hefur langmest af lífrænum efnum í heildina, oft >100 kg m⁻² (þ.e. magn kolefnis undir einum fermetra lands) en meðaltal jarðvegs heimsins er aftur á móti 5–15 kg m⁻² eftir því hvernig er reiknað. *Eldfjallajörð* (Andosol), sem er jarðvegur eldfjallasvæða, hefur nokkra sérstöðu því í þeim jarðvegi er dreifing kolefnis mjög ójöfn og oft er mikið af kolefni niður allt jarðvegssniðið. *Eldfjallajörð* hefur einnig þann eiginleika að binda lífræn efni, eins og rætt er um í kaflanum um þessa jarðvegsgerð. Því er mun meira af lífrænum efnum í *eldfjallajörð* en öðrum jarðvegi þurrlendis (meðaltal 25–35 kg m⁻²).

Loftslag

Loftslagið hefur áhrif á heildarmagn lífrænna efna í jarðvegi því bæði vöxtur gróðurs og rotnun eru háð hita og vatni í jarðvegi, sem m.a. stjórnast af úrkomu.

Lítið er af lífrænum efnum í mold í heitum eyðimörkum því kolefnið oxast fljótt við slíkar aðstæður, fyrir utan að ofanjarðarvöxtur er iðulega lítill. Einnig er hlutfallslega lítið af lífrænum efnum í rakri mold þar sem er heitt sökum örrar rotnunar og umsetningar lífrænna efna, jafnvel þótt ofanjarðarvöxtur sé mikill.

Í hitabeltinu er lífmassinn „geymdur“ í ofanjarðarhluta vistkerfanna, svo sem í regnskógunum. Það sem fellur til af dauðum lífmassa rotnar mjög hratt og er tekið inn í lífkerfið að nýju. Meira safnast fyrir þar sem er þurrara því rotnun og umsetning er þá hægari, en aðeins upp að vissu marki því í mjög þurru og heitu loftslagi oxast kolefnið tiltölulega ört, sem áður sagði. Því er kolefnisinnihald *eyðimerkurjarðar* lágt. Alla jafna er mest af lífrænum efnum í svölu og sæmilega þurru loftslagi, sem er loftslag graslendis tempraða og kaldtemprað beltisins. Þetta eru iðulega stöðug og frjósöm kerfi með mikið þanþol, t.d. gagnvart beit, en ræktun án áburðargjafar lækkar kolefnisinnihaldið smám saman, sem og ofbeit. Beit örvar hins vegar þessi kerfi upp að ákveðnu marki, enda hafa þau þróast samhliða beit árpúsundum saman og jafnvel lengur, svo sem í Afríku.

Hve lengi?

Eins og áður sagði rottna flest þau efni sem leggjast til jarðvegsins innan hvers árs (hringrás) en hluti þeirra bætist við lífrænan forða moldarinnar. Talið er að fúlvínsýrur endist í jarðvegi í áratugi en húmínsýrur í aldir eða lengur. Þá geta lífræn efni grafist undir nýrri lögum (t.d. í *mójröð* eða þar sem gætir skriðufalla eða áfoks) og geta þá orðið mjög gömul og grafist djúpt í jörðu. Einnig virðast lífræn efni geta orðið meira en 100 000 ára gömul í *eldfjallajörð* þar sem myndast mjög stöðug málm-húmusknippi (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*).

Lífhvolf 2.0

Gott dæmi um mikilvægi þekkingar á áhrifum umhverfis á kolefni í mold og hringrás kolefnissambanda tengist tilraun sem gerð var í suðurhluta Arizona-fylkis í Bandaríkjunum. Þar var reist gríðarlega stórt og sögufrægt „Lífhvolf“ (Biosphere 2) þar sem reka átti fullkomlega sjálfbært vistkerfi einangrað frá andrúmslofti jarðar (mynd 3.18). Stefnt var að því að ræktun gróðurs myndi skila matvælum til íbúa hvolfisins og hreinsa andrúmsloftið af CO₂ og skila súrefni til baka. Íbúarnir ákváðu að byrja með góða lífræna mold til að tryggja góða uppskeru (sjá Weil og Brady 2017). En lífræn efni í svo kolefnisríkri mold eru aðeins stöðug í loftfirrtum aðstæðum votlenda eða þar sem loftslagið er nægjanlega kalt til að hamla rotnun.

Eins og sagði hér að ofan er yfirleitt lítið af lífrænum eignum í þurrlendisjarðvegi rakra og heitra svæða. Íbúar hvolfisins tóku eftir því að styrkur CO₂ í andrúmslofti hvolfisins jókst mjög mikið eftir að búskapurinn hófst innandyrá og súrefnisstyrkurinn féll niður að hættumörkum fyrir heilsu fólks. Að lokum þurfti að dæla inn súrefni og lækka styrk CO₂. Hin lífræna mold var tekin að oxast, rétt eins og votlendin á Íslandi þegar þau voru ræst fram og losuðu mikið magn af CO₂, meira en ljóstíllífun í hvolfinu réð við. En einnig kom í ljós að umtalsvert magn af CO₂ hvarf úr kerfinu (og súrefni þar með sem hluti af koltvísýringi) og það tók langan tíma að finna skýringu á því. Ástæðan var upptaka CO₂ í steypuna, aðferð sem notuð er við niðurdælingu á CO₂ við Hellisheiðarvirkjun. Arizona-háskólinn í Tucson hefur nú tekið yfir rekstur á þessu merkilega lífhvolfi og notar það til margvíslegra tilrauna (sjá www.biosphere2.org).



Mynd 3.18. Lífhvolf 2 (Biosphere 2) í nágrenni Tucson, Arizona. Lífhvolf 1 er jörðin í þessu samhengi. Aðeins lítill hluti bygginganna sést á þessari mynd. Mynd: Ása L. Aradóttir.

Viðarkol – „char“

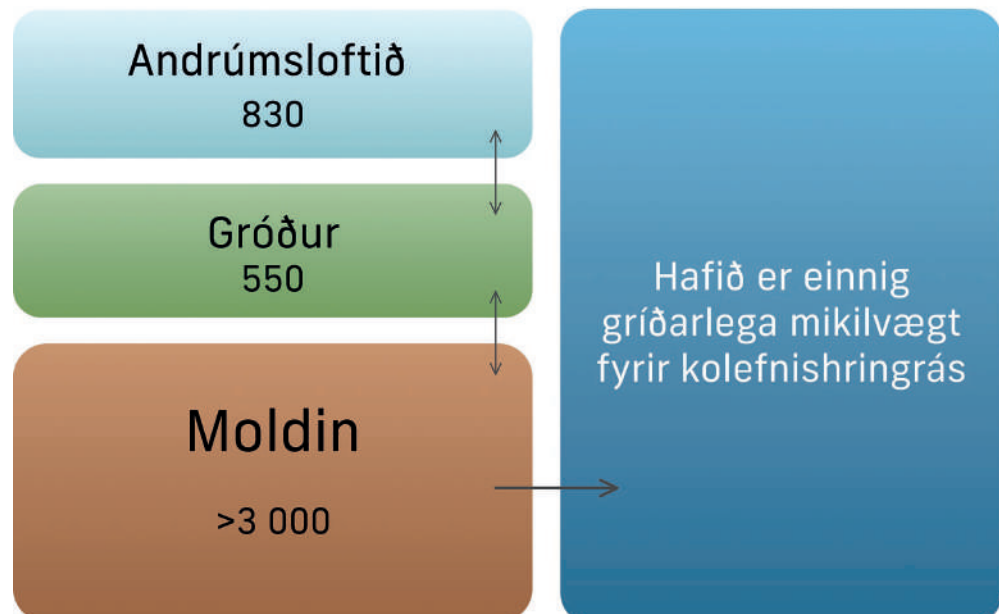
Hér er rétt að minnast aðeins á það sem nefnt hefur verið lífkol (e. biochar) sem myndast við bruna lífræns efni við fremur lágt hitastig við sinu- og kjarrelda. Efnið inniheldur meira kolefni (C) en lífræn efni almennt þar sem hluti súrefnisins og vetnisins tapaðist við brunann. Efnið er væntanlega svipaðs eðlis og viðarkol sem gert var að á Íslandi í birkiskógum fyrr á tíð. Hið lága hitastig brunans tryggir að efnið brennur ekki til fulls. Eftir situr mjög gropið, svart lífrænt efni með mikið yfirborðsflatarmál (allt að 2 500 m²/g; sjá Weil og Brady 2017, bls. 548) sem hefur afar hagstæða eiginleika með tilliti til frjósemi jarðvegs, svo sem vatnsheldni, jónrýmd o.fl. Efnið er enn fremur stöðugra og brotnar hægar niður en önnur lífræn efni. Telja má víst að þessi kolefnissambönd eigi margt sameiginlegt með hinum svartleitu „melanic“ jarðvegslögum í eldfjallajarðvegi (sortueiginleikar, sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*), enda er talið að sortuefnin í slíkum jarðvegi tengist sinueldum á gresjum eldfjallasvæða. Þessi „viðarkol“ eru eftirsótt til ræktunar og stundum mærd sem eins konar töfraefni fyrir ræktun.

3.5. Hnattræn hringrás kolefnis og lífrænna efna

Lífræn efni taka þátt í sívirkri hringrás lífsins. Meginuppistaða þeirra er vitaskuld kolefni og því er það iðulega notað sem mælikvarði á frjósemi jarðvegs, eins og áður gat. En kolefni ásamt súrefni mynda einnig koltvísýring (CO₂) í andrúmslofti sem síðan er tekinn upp við tillífun plantna og myndar þá kolefnissambönd (í lífríki) og súrefni (í andrúmslofti). Heildarstyrkur CO₂ í andrúmsloftinu hefur mótandi áhrif á loftslag jarðarinnar vegna gróðurhúsaáhrifa. Rétt er að benda hér á bók Sigurðar R. Gíslasonar (2012) um kolefnishringrásina, en síðar í þessu riti er sérstakur kafli sem er tileinkaður mold og kolefnishringrásinni.

Ætla mætti af umræðu um gróðurhúsa-lofttegundir að mest væri af kolefni í andrúmsloftinu eða gróðri, en svo er alls ekki. Heildarmagn kolefnis í hnattrænni (e. global) hringrás skiptist milli nokkurra megingeyma. Hafið er langstærsti geymirinn, inniheldur um

C í lífrænni hringrás



Mynd 3.19. Hinir ýmsu „geymar“ kolefnis sem eru í hringrás við andrúmsloftið. Moldin er með langmesta magnið, að hafinu undanskildu. Nánar er fjallað um þessa mynd í 22. kafla.

36 000 Pg (petagrömm, 10^{15} g, 10^9 t), en jarðvegurinn kemur þar á eftir, með 1 500–3 000 Pg eftir því hver telur (mynd 3.19). Ef allt kolefni í lífrænum jarðvegi heimskautasvæðanna væri talið (1600 Pg, sjá hér neðar) væri þessi tala >3200 Pg. Mun minna af kolefni er í andrúmslofti (750 Pg) og gróðri (560 Pg).

Stærstu geymarnir eru þó í kalksteini sem fellur út í hafinu og kolefniseldsneyti (kol, olía, gas), en þessir geymar taka þó ekki þátt í eiginlegri hringrás lífrænna efna nema við brennslu á kolefniseldsneyti, þ.e. kolum, gasi og olíu.

Af þessum tölum er ljóst að jarðvegur er afar þýðingarmikill með tilliti til hringrásar gróðurhúsalofttegunda. Einnig má telja víst að stór hluti þess kolefnis sem hefur valdið aukningu á styrk CO_2 í andrúmsloftinu síðustu tvær aldirnar komi úr jarðvegi, einkum við jarðrækt en einnig vegna ofbeitar á útjörð. Við ofnýtingu er gengið á lífrænan forða jarðvegsins og kolefnið endar þá í andrúmsloftinu sem koltvísýringur. Þegar nýtingu á landi er aflétt geta vistkerfi tekið að binda kolefni á ný í auknum mæli, eins og síðar er vikið að. Við það lækkar styrkur CO_2 í andrúmsloftinu.

Í nýlegri vísindagrein (Koch o.fl. 2019) er þeirri tilgátu varpað fram að með dauða tuga milljóna frumbyggja á amerísku meginlöndunum við komu hvíta mannsins upp úr árinu 1 500 hafi upptaka gróðurs og moldar á kolefni stórauðist vegna minna álags á landið. Höfundar færa fyrir því rök að upptakan hafi verið það mikil að dregið hafi úr styrk CO_2 í lofthjúpnunum. Við það hafi loftslag kólnað, sem m.a. hafi valdið kuldaskiði sem nefnt er Litla ísöld á norðurslóðum. Slíkar kenningar eru

umdeildar, en þær varpa eigi að síður ljósi á samspil andrúmslofts, loftslags og vistkerfa.

Eins og áður sagði er afar mikinn forða kolefnis að finna í votlendum jarðar. Við framræslu losnar þetta kolefni smám saman. Losun þess frá framræstu votlendi á Íslandi jafnast á við losun frá öllum iðnaði og samgöngum samtals (sjá ÓA og Jón Guðmundsson 2020). Nú hefur minnkun á losun frá votlendi verið bætt við gildar aðgerðir til þess að sporna við lofslagshlýnun, meðal annars fyrir tilstilli íslenskra rannsókna Hlyns Óskarssonar, Jóns Guðmundssonar og félagar og samninganefndar Íslands á vettvangi loftslagssamningsins. Endurheimt votlendis hefur þann kost að virka strax, losunin hættir um leið og fyllt er upp í skurðina. Fjallað er mun ítarlegar um losun gróðurhúsalofttegunda frá votlendi og hnignun mólendis á Íslandi síðar í þessu riti.

Á heimskautasvæðunum eru *mójrör* (Histosol) og *frerajörð* (Cryosol) algengar jarðvegsgerðir sem geyma mikið magn lífrænna efna eða >1 600 Pg. Sumt af þessu kolefni liggur á meira en 3 m dýpi (Tarnocai o.fl. 2009). Þegar loftslag hlýnar er hætt við að dragi úr útbreiðslu þessara jarðvegsgerða.

Sífrerinn á sinn þátt í að binda hið mikla magn af lífrænum efnum með því að halda moldinni rakri og koma í veg fyrir að hún ræstist fram. Þegar ísinn bráðnar eykst framræsla – moldin tekur að anda og lífrænu efnin að rotna og „brenna“ (oxast). Þetta getur losað umtalsvert magn af CO_2 út í andrúmsloftið í framtíðinni þegar loftslag tekur að hlýna; ferill sem raunar er hafinn nú þegar í Alaska, Kanada og Síberíu. Sú losun er hluti af vítahring loftslagshlýnunar sem kallar fram enn meiri losun gróðurhúsalofttegunda.

Að endurnýta

Lífræn efni eru auðævi sem leitast ætti við að skila aftur til moldar. Það hefur verið gert um langa hríð í landbúnaði þar sem mykja er nýtt til áburðar, enda getur það falið í sér umtalsverðan sparnað á áburði.

Á þéttbýlustu svæðum jarðar er skólpi frá fólki skilað á akra ásamt lífrænum úrgangi húsdýra. Þetta hafa Kínverjar gert um þúsundir ára og við það getur jarðvegurinn öðlast afar sérstæða eiginleika.

Jarðgerð á lífrænum úrgangi fer nú mjög vaxandi sem hluti af breyttum lífsháttum. Þar sem metangas losnar við jarðgerð er æskilegt að nýta það til brennslu vegna slæmra áhrifa metans á andrúmsloftið. Metani er víða safnað á sorpeyðingarstöðvum og notað sem eldsneyti, m.a. á Íslandi.



Mynd 3.20. Það er ekki úr vegi að ljúka þessum kafla um lífríkið með því að birta mynd af stærstu lífverum jarðar, risafurinum í Sierra Nevada-fjöllum í Kaliforníu. Risafururnar gera miklar kröfur um aðgengi að vatni í moldinni og vaxa gjarnan í útjaðri votlendissvæða eða í eins konar hallamýrum.

Takið eftir fólkinu sem stendur undir trjánum. Þetta eru meðalstórar risafurur en alls ekki þær stærstu. Þær geta orðið mörg þúsund ára gamlar og hafa varist áföllum af völdum veðurfars og skógarelda allan þennan tíma. Tilvist þeirra eru nú í mikilli hættu vegna loftslagsbreytinga.

3.6. Áhrif lífrænna efna á jarðvegseiginleika og umhverfið

Lífræn efni í jarðvegi móta nánast alla helstu eiginleika hans og þar með vistkerfa á landi. Áður er nefnt að lífverur móta byggingu jarðvegsins sem hefur áhrif á loftun og vatnseiginleika. Lífrænu efnin hafa mikla jónrýmd sem gerir jarðveginn frjósaman. Þessi gerð jónrýmdar eykst með hækkandi sýrustigi (pH-háð jónrýmd – sem nánar er fjallað um í 5. kafla um efnaeiginleika). Lífrænu efnin innihalda enn fremur önnur nauðsynleg næringarefni svo sem nitur, fosfór, brennistein o.fl. Jónrýmdin eykur á stuðpúðaeiginleika (böffer) moldar. Lífrænu efnin móta einnig sýrustig jarðvegsins og þannig getur mómold verið mjög súr. Þá hafa lífræn efni mikið holrými og geta bundið margfalda jafnþyngd sína af vatni, en vatnsmiðlun lífrænna efna er grundvallareiginleiki fyrir vistkerfi jarðar.

Uppgröftur úr blautu mýrlendi er að stærri hluta vatn en jarðvegur. Lífræn efni leiða vatn mjög vel, sem er m.a. mikilvægt fyrir gróður en einnig fyrir framræslu. Lífræn efni binda jarðvegskorn, sem hamla jarðvegsrofi, og þau auka einnig ísig sem minnkar afrennsli og vatnsrof (sjá næsta kafla um vatnið í moldinni). Þessir þættir móta því hvorttveggja vatns- og hitaeiginleika jarðvegs.

Lífrænu efnin eru jafnframt mikilvæg til að binda mengunarefni í jarðvegi. Ítarlegar er fjallað um þessi áhrif í tengslum við umfjöllun um hvern eiginleika fyrir sig í 5. og 6. kafla um efna- og eðliseiginleika.

Heimildir

Jarðveglíffræði (Soil Biology) er sérstök undirgrein bæði jarðvegsfræði og líffræði. Á engu sviði jarðvegsfræða eru framfarir jafnörar nú og í jarðveglíffræði. Sérstakar bækur eru tileinkaðar faginu (t.d. mikill fjöldi bóka í Amazon-netversluninni).

Æ meiri áhersla er lögð á hina lífrænu þætti í mörgum kennslubókum um jarðveg. Kafli í kennslubók Weil og Brady (2017) er auðlesinn, fróðlegur og nokkuð ítarlegur. Hér er m.a. stuðst við þann kafla en einnig ýmislegt efni frá USDA á netinu (www.soils.usda.gov/sqi), kafla í Handbook of Soil Science (Baldock og Broos 2012), kafla í Encyclopedia of Soil Science og World Atlas of Biodiversity (Groombridge og Jenkins 2002). Evrópusambandið gaf út stóra kortabók sem nefnist European Atlas of Soil Biodiversity (Jeffery o.fl. 2010) þar sem er að finna mikinn fróðleik og glæsilegt myndefni um lífið í jarðveginum, en það efni er aðgengilegt á veraldarvefnum. Sjá einnig Guðmund Halldórsson o.fl. 2002 um smádyr á íslensku.

Baldock, J.A. og K. Broos 2012. Soil organic matter. Í: Handbook of Soil Sciences. Properties and Processes 2. útg. P.M. Huang, Y. Li og M.E. Sumner (ritstj.), CRC Press/Taylor Francis, Boca Raton, Florida, USA. Bls. 11.1–11.52.

Belnap, J. 2003. The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1:181–189.

Bjarni D. Sigurðsson 2015. Sveppahandbókin. Mál og menning, Reykjavík.

Doran, J.W. og A.J. Jones 1996. Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Dudal, R.C. 1998. Soil microbial biomass – what do the numbers really mean? *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38:649–665.

Edda S. Oddsdóttir 2010. Distribution and identification of ectomycorrhizal and insect pathogenic fungi in Icelandic soil and their mediation of root-herbivore interactions in afforestation. Doktorsritgerð við Líf- og umhverfisvísindadeild Háskóla Íslands, Reykjavík.

Esther Marloes Kapinga 2020. Samfélög mítla (Acari) og stökkmors (Collembola) í mismunandi gróðurframvindu, 20 árum eftir uppgræðslu á Geítasandi. BS ritgerð, Náttúru- og umhverfisfræði, Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Groombridge, B. og M.D. Jenkins 2002. World Atlas of Biodiversity: Earth's Living Resources in the 21st Century. University of California Press, California.

Guðmundur Halldórsson 1989. Kálflugan og varnir gegn henni. Fjölrit RALA nr. 134.

Guðmundur Halldórsson, Oddur Sigurðsson og Erling Ólafsson 2002. Dulin veröld. Smádyr á Íslandi. Mál og mynd, Reykjavík.

Helgi Hallgrímsson 2010. Sveppabókin. Íslenskir sveppir og sveppafræði. Skrudda, Reykjavík.

Hólmsfríður Sigurðardóttir 1994. Ánamaðkar. Náttúrufræðingurinn 64:139–148.

Hörður Kristinsson 2016. Íslenskar fléttur. Opna, Reykjavík.

IPBES 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondizio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K.A. Brauman og 20 fleiri (ritstj.), Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES secretariat, Bonn, Þýskaland.

Jeffery, S., C. Gardi, A. Jones, L. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, K. Ritz, G. Peres, J. Römbke og W.H. van der Putten (ritstj.) 2010. European Atlas of Soil Biodiversity. European Union, Lúxemborg.

Koch, A., C. Brierley, M.M. Maslin og S.L. Lewis 2019. Earth system impacts of the European arrival and Great Dying in the Americas after 1492. *Quaternary Science Review* 207:13–36.

Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 2015. Að lesa og lækna landið. Landvernd, Landgræðsla ríkisins og Landbúnaðarháskóli Íslands, Reykjavík.

Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson 2020. Loftslag, kolefni og mold. Rit Lbhí nr. 133. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Sigurður Reynir Gíslason 2012. Kolefnishringrásin. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík.

Sigurgeir Ólafsson 2006. Rótarflókasveppur. Bændablaðið 2. tbl. 27/1, 2006 <https://timarit.is/page/5756533>

Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova og S. Zimov 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23:GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.

Weber, B., B. Büdel, J. Belnap (ritstj.) 2016. Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands. *Ecological Studies* 226, Springer, Sviss.

Weil, R.R. og N.C. Brady 2017. The Nature and Properties of Soils 15. útg. Pearson, Boston, USA.