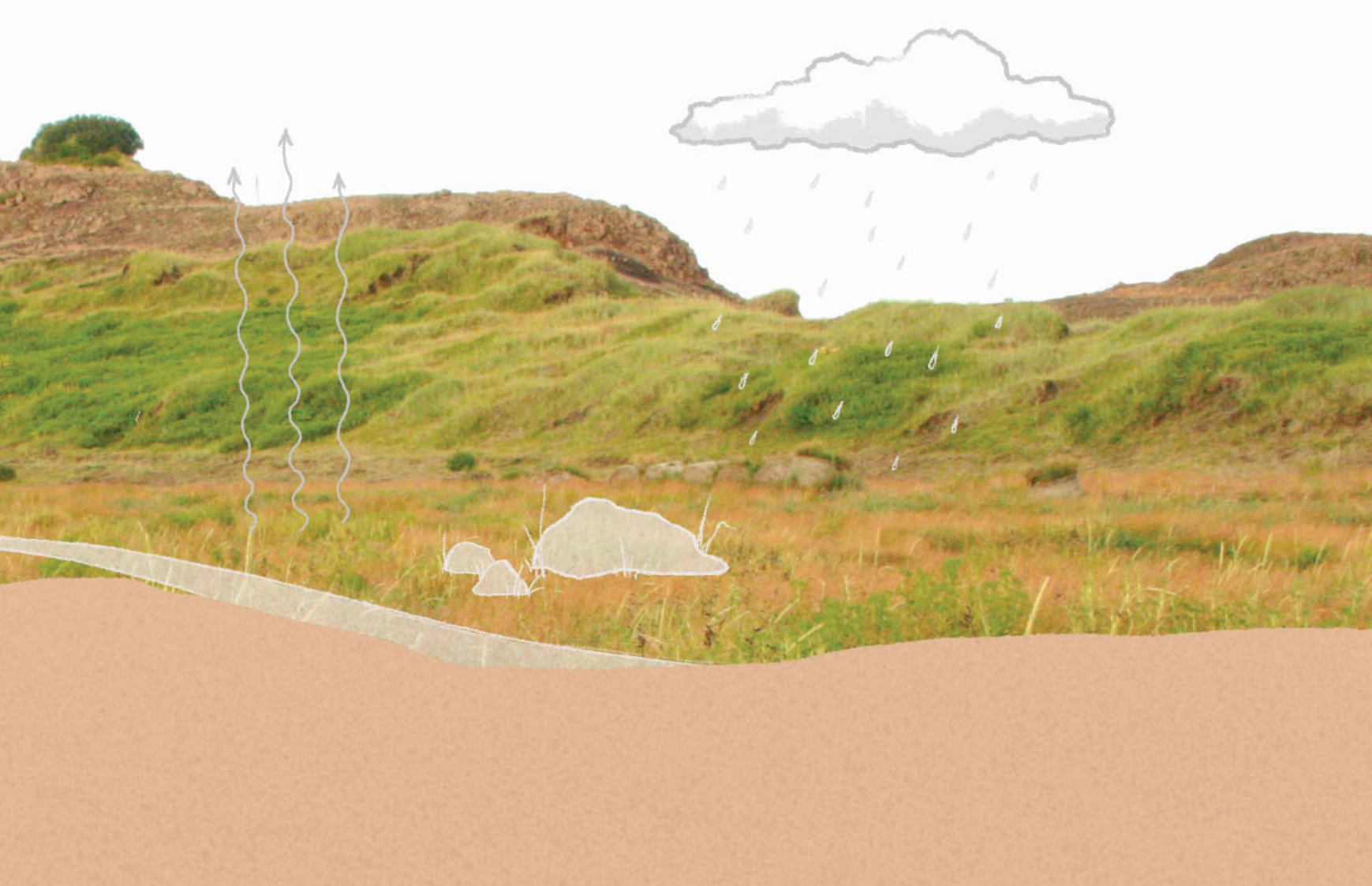


15 Næring og mold



Mynd 15.1. Mynd sem gefur hugmynd um hringrás næringarefna. Kerfið er drifið af orku sólar sem er numin með ljóstillifun plantna. Teikning: Fífa Jónsdóttir.

Stærsta og mikilvægasta atvinnugreinin

Það er hverjum og einum holt að velta fyrir sér kostnaðinum við framleiðslu á fæðu og efnunum í klæði fyrir hvern jarðarbúa, en sá kostnaður nemur um 120 þúsund krónum á verðlagi 2022.

Sé þessi upphæð margfölduð með fjölda jarðarbúa (um 8 milljarðar) verður til stjarnfræðilega há fjárhæð — landbúnaður er langsamlega stærsta atvinnugrein veraldar og sú mikilvægasta. Og byggist á moldinni.

Plöntur sækja sér þá næringu sem þær þarfnast í moldina. Hringrás næringarefna í moldinni er undirstaða lífs á landi og er meðal mikilvægustu viðfangsefna jarðvegsfræða (mynd 15.1). Vænn hluti þess fólks sem menntar sig í jarðvegsfræðum starfar á sviði plöntunæringar, m.a. við að rannsaka og leiðbeina um áburðarþörf og leita leiða til þess að auka hagkvæmni og uppskeru við ræktun matvæla. Vistfræðileg viðfangsefni á sviði plöntunæringar eru þó ört vaxandi – bæði í dreifbýli og þéttbýli. Framleiðsla matvæla á jörðinni byggist að meginhluta á jarðyrkju með áburðargjöf þar sem notuð eru lífræn og ólífræn áburðarefni.

Mikilvægustu næringarefnin fyrir plöntur eru bundin lífrænum efnunum en með hjálp ensíma og örvera er þeim umbreytt í ólífrænt form sem er aðgengilegt gróðri. Aukin uppskera er fengin með því að bæta við skömmtum af þeim næringarefnum sem plöntur þurfa í mestu magni, annars ganga þau til þurrðar og upp kemur næringarskortur. Nitur er það næringarefni sem oftast þarf að bæta við í ræktun, enda þarf mikið af því til að viðhalda eðlilegri hringrás næringarefna og góðri uppskeru. Mikil áburðarnotkun

hefur aftur á móti valdið stórfenglegum vandamálum vegna mengunar á grunnvatni, vötnum og innhöfum, auk losunar gróðurhúsalofttegunda út í andrúmsloftið.

Telja má að næringarhringrásin falli undir sérstaka fræðigrein sem útilokað er að gera ítarleg skil í kafla sem þessum – hér verður aðeins brugðið upp skissu af viðfangsefninu.

Friðrik Pálmason, fyrrum sérfræðingur hjá Rannsóknastofnun landbúnaðarins (nú Landbúnaðarháskóli Íslands), helgaði starf sitt plöntunæringarfræðum. Að lokinni starfsævi gaf hann út viðamiklari rit: *Plöntunæringar- og áburðarfræði* (2013). Ritið er aðgengilegt á vef Lbhí. Þar er að finna margháttaðan fróðleik sem getur hjálpað nemum að tileinka sér þessi fræði, ekki síst þeim sem koma að ræktun með einum eða öðrum hætti, enda birtist þar samantekt á rannsóknum sem gerðar hafa verið á Íslandi á ýmsum áburðarefnum. Í ritinu er ennfremur að finna mjög áhugaverðan vísindasögulegan fróðleik.

15.1. Flokkun og nýting næringarefna

Í moldinni er að finna fjölbreytt næringarefni, m.a. katjónir og anjónir sem sitja á jónrýmdarstöðum, efni sem bundin eru í lífrænum efnasamböndum og ólífrænum efnasamböndum. Mörg efnanna losna og verða aðgengileg í vistkerfum við efnaveðrun og þegar lífræn efni rotna í moldinni – við hringrás næringarefna. Mun meira magn steinefna er bundið í bergefnum og þar eru þau ekki aðgengileg fyrir lífríkið, en þau losna smám saman við efnaveðrun og jarðvegsmyndun þar sem lífríki jarðvegsins kemur mjög við sögu.

Næringarefnum er yfirleitt skipt í tvo hluta: annars vegar þann hluta sem



Mynd 15.2. Jörðin búin til ræktunar. Efsta lagið plægt upp en síðan er sáð og borið á. Bóndinn á aðgang að upplýsingum hjá ríkisstofnun um hæfilegt magn áburðarefna. Þær upplýsingar byggja á viðtækum rannsóknum. Landbúnaður – og þá einkum jarðrækt í ýmsu formi – er langsamlegasta stærsta atvinnugrein jarðar sem fæðir og klæðir jarðarbúa.

gróður þarf mikið af til þess að hann dafni, svonefnd meginefni (e. macro-nutrients), en hins vegar snefilefni (e. micro-nutrients) sem gróður þarf mun minna af, enda þótt þau séu algjörlega nauðsynleg fyrir afkomu plantna (tafla 15.1) og lífríkið í heild. Hafa verður í huga að plöntur eru að stærstum hluta gerðar úr efnasamböndunum C, O og H, aðalefnum lífkerfisins, en hér eru aftur á móti til umfjöllunar efni sem aflað er úr jarðveginum, vatnslausn og andrúmsloftinu.

Í meðfylgjandi töflu er listi yfir þau efni sem plöntur þarfnast til viðhalds og vaxtar. Hafa ber í huga að manns-

líkaminn þarfnast nokkurra annarra efna en hér eru talin, svo sem natríums (Na, er í töflunni), jöðs (I), króms (Cr) og selens (Se). Jafnvel er talið að líkaminn þurfi agnarögn af arseni (As), nikkeli (Ni), kísli (Si), líþíum (Li), og vanadíum (V), en þau fræði öll eru nú í örri þróun. Bóron var lengi talið ónauðsynlegt mönnum en er nú talið mikilvægt (Oertli, 2008).

Næring berst aðallega til rótanna með þrenns konar hætti. Í fyrsta lagi vaxa rætur stöðugt inn í nýtt umhverfi þar sem næringu er að finna. Í öðru lagi berast næringarefni að rötinni í vatnslausn, m.a. vegna mismunar á styrk efna, en lausnin leitast ávallt við að jafna út

Tafla 15.1. Meginefni og snefilefni í jarðvegi sem nauðsynleg eru plöntum.

MEGINEFNI		%	
Nitur	N	2–4	Í próteinum (svo sem ensímum), grænuhornum og kjarnsýrum. Er nýtt í orkuvinnslu (bruni á kolvetnum).
Kalí	K	1–3	Margvisleg not við tillífun, hvati, tekur þátt í myndun próteina, osmósu o.fl.
Kalsíum	Ca	0,5–3	Byggingarefni. Tekur þátt í ýmsum efnahvörfum.
Natríum	Na	0,2–1	(Misjafnt hvort er nauðsynlegt plöntum).
Súlfúr	S	0,2–0,5	Í próteinum (amínósýrum o.fl.). Tekur þátt í myndun próteina, tillífun o.fl. Mikil lykt (oft „vond“, t.d. af hvítlauk) tengist iðulega brennisteini. Vítamín (B1).
Fosfór	P	0,1–0,4	Mikilvægur fyrir orkuflutning (ATP) í próteini. Er í DNA og RNA. Einnig í beinum. „Orkugjaldmiðill.“
Magnesíum	Mg	0,1–0,5	Í blaðgrænu o.fl. Stjórnar virkni ensíma o.fl.
SNEFILEFNI		ppm ¹	
Járn	Fe	50–300	Hluti margra efnasambanda, rafeindaskipti (orkuflutningur) o.fl.
Mangan	Mn	20–250	Virkjar ensím, efnahvörf við ljóstillífun, Mn (afoxun) oxar vatn svo myndast O ₂ og H ⁺ , myndun C-vítamíns.
Sink	Zn	20–100	Efnasambönd og efnahvörf (dehydrogenase).
Bóron	B	10–50	Líklega í vaxtarhormónum. Lítið vitað.
Kopar	Cu	5–15	Hluti ensíma og ýmissa efnasambanda. Ljóstillífun og öndun, rafeindaskipti.
Klór	Cl	0,2–2	Ljóstillífun og í ensímum sem kljúfa vatn (í O og H).
Kísill	Si	0,2–2	(Styrktarefni, misjafnt hvort það sé talið nauðsynlegt plöntum).
Mólybden	Mo	<0,1–1	Hluti ensíma og í niturbindingu (afoxar nítrat).
Kóbolt	Co	0,04–0,2	Niturbinding (niturnám), B12-vítamín.

1: ppm, parts per million. Milljónasti hluti eða % deilt með einni milljón.

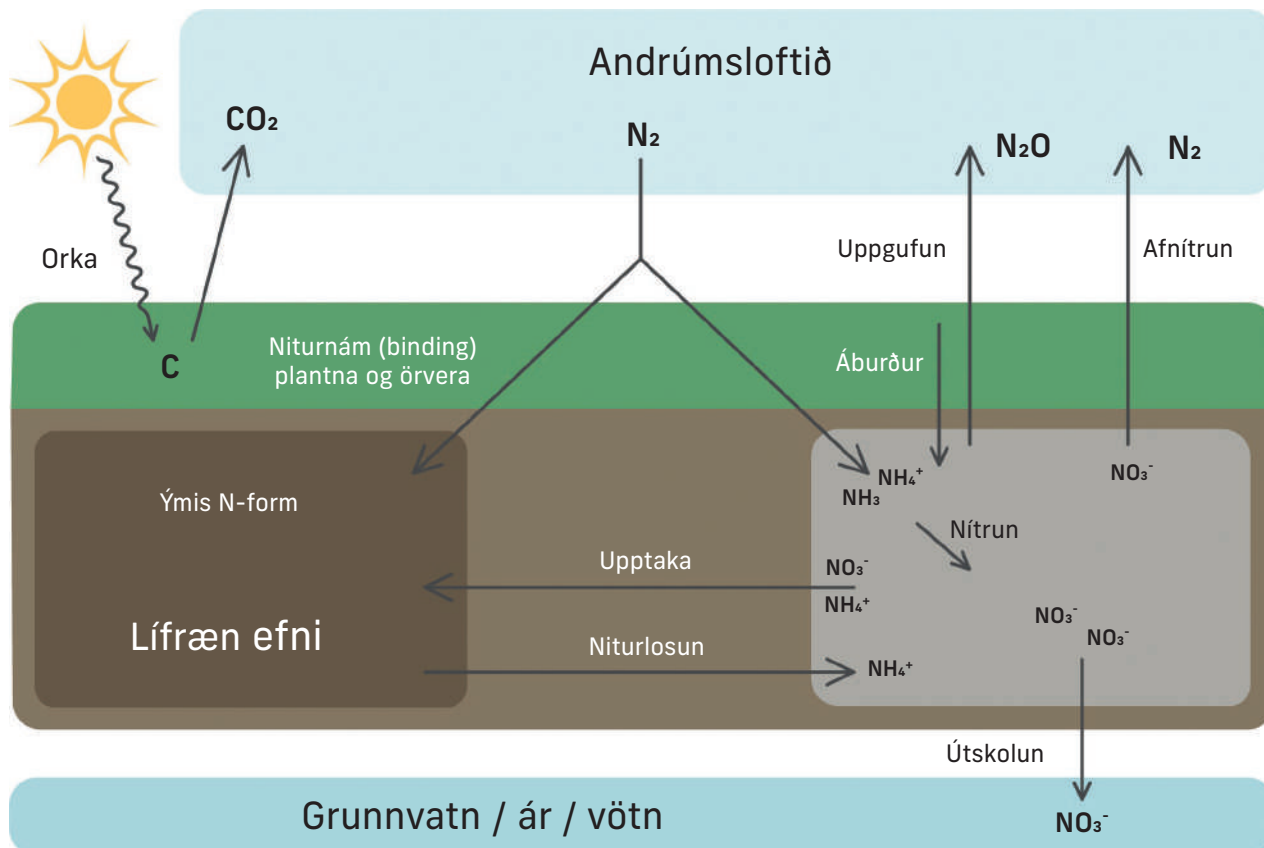
styrk eftir að efni eru fjarlægð úr lausn inn í rót plöntu (e. diffusion). Í þriðja lagi berast jónir með lausninni með massaflæði þegar þornar og blotnar og vatn flæðir um moldina (e. mass flow).

15.2. Nitur og niturhringrásin

Nitur er það næringarefni sem oftast skortir við ræktun á landi. Í þroskuðum náttúrulegum vistkerfum sem eru í jafnvægi við vistgetu (e. potential, sjá síðustu kaflana), þ.e. kerfum sem ekki eru nýtt til uppskeru, viðhelst nitrið í hringrás og skortir yfirleitt ekki nema aðrar umhverfisaðstæður séu hamlandi. Þar sem gengið hefur verið á næringarforðann eða þar sem gróður er að þróast á landi sem áður var gróðurvana er nitrið takmarkandi efni. Heilbrigðar plöntur innihalda yfirleitt 2–4% af nitri, sem er ansi mikið ef haft er í huga að plöntur eru að mestu gerðar

úr C, H og O. Niturskortur í plöntum lýsir sér í því að þær fölna eða gulna (e. chlorosis), sérstaklega yst á blöðum þar sem vöxtur á sér stað.

Niturhringrásin er meðal mikilvægustu ferla náttúrunnar en hér eru aðeins kynntir meginþættir hennar (mynd 15.3). Andrúmsloftið er að mestu samsett úr nitri á forminu N_2 . Þetta vill fara fram hjá mörgum því umfjöllun um andrúmsloftið beinist eðlilega alla jafna að súrefni og koltvísýringi. Lofthjúpurinn er tæplega 78% N (sem N_2), 21% O_2 , um 0,9% Ar (argon) og um 0,04% CO_2 . Það má því segja að nóg sé til af nitri fyrir lífheiminn, vandinn er að N_2 í andrúmsloftinu er alls ekki á aðgengilegu formi og tekur ekki þátt í efnahvörfum lífsins. Á því formi er nitrið hlutlaust, óhvarfgjarnt (e. inert) og skaðlaust, enda mikið notað sem hlutlaust gas í margvíslegum tilgangi, t.d. þar sem þarf að mynda mikinn þrýsting. Gríðarlega orku þarf til að koma því á aðgengilegt form fyrir plöntur.



Mynd 15.3. Niturhringrásin, mjög einfölduð. Örvarnar gefa til kynna ferli sem hafa sérstakt heiti. Plöntur taka einkum upp nitur á forminu NO_3^- en einnig sem NH_4^+ .

Nitur getur haft mörg oxunarstig, sem skýrir að hluta til mikilvægi þess í lífrænum efnahvörfum. Oxunarstigin sveiflast frá +5 (mjög oxað) í NO_3^- til -3 í NH_3 (mjög afoxað). Frá oxuðu til afoxaðra forma er röðin þessi:

FORM	OXUNARSTIG
oxað	
NO_3^-	+5
NO_2^-	+3
NO	+2
N_2O	+1
N_2	0
$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	-3
afoxað	

Fyrir plöntuna skiptir þó höfuðmáli að ná sem mestu N, og er þá sama á hvaða formi eða oxunarstigi það er, en aðeins tvö þessara efnasamböndu eru í raun aðgengileg plöntum í einhverjum mæli: **NH_4^+** (ammóníum) og **NO_3^-** (níturat), og er **níturat** mikilvægara þegar á heildina er litið; ammóníum kemur aðallega fyrir í fremur basísku umhverfi. Reyndar er það svo að níturat er afoxað á fyrstu stigum upptöku í plöntum, aðallega í rótum, til að geta myndað NH_4^+ (ammóníum) eða NH_3 (ammoníak) áður en það nýtist plöntunni í efnahvörfum.

Ýmis efnahvörf og ferli verða til þess að i) nitur berst ofan í moldina; ii) það kemst á nýtanlegt form; og iii) það tapast á ýmsa vegu út úr kerfinu. Á mynd 15.3. eru mörg þessara ferla sýnd sem og heiti þeirra. Það ferli sem leiðir til þess að N_2 er losað úr andrúmslofti og ofan í jarðveg er nefnt niturbinding, nitursöfnun eða **niturnám** (e. fixation, sjá umfjöllun um hugtakið hér á eftir) og leiðir til þess að NH_4^+ verður til.

Gríðarlega orku þarf til að mynda NH_4^+ úr N_2 . Eldingar eru m.a. mikilvirkar við að mynda NH_4^+ í lofthjúpunum. Á Íslandi var nituráburður framleiddur úr andrúmsloftinu með rafmagni í Áburðarverksmiðju ríkisins í Gufunesi, en stofnun þeirrar verksmiðju telst með mikilvægustu framfaraskrefum þjóðarinnar á síðustu öld, en hún er nú aflögð. Hin mikilvæga jón NH_4^+ er nefnd ammóníum og hún er raunar hluti af mörgum algengum efnasamböndum sem eru í daglegri notkun, svo sem hið illa lyktandi ammoníak (ammonía), en NH_3 er hættuleg gastegund í miklum styrk og er m.a. notuð í hreinsiefni. Ammóníum (NH_4^+) sem er í jarðvegslaun á greiðan aðgang að jónrýmdarsætum, „binst“ þeim tímabundið og nýtist plöntum þegar það losnar úr jónrýmdarsætunum.

Almennt séð losnar mjög mikil orka þegar NH_4^+ oxast (einnig NH_3 , sem er gas) enda er það notað í sprengiefni. Niturdíoxíð (NO_2^- , nítít) er notað sem rotvarnarefni í matvælum, t.d. í kjötvörum, en er eitruð þegar styrkur þess er mikill og þykir því óhollt, sem og flest önnur rotvarnarefni (rotvörnir felst í eituráhrifum, sem neytendur matvæla ættu ávallt að hafa í huga – mörg þeirra eru krabbameinsvaldandi).

Áburðarverksmiðjur eru almennt hættulegar umhverfi sínu sökum sprengihættu. Ein öflugasta sprenging sem átt hefur sér stað, ef kjarnorkusprengingar eru frátaldar, varð í Beirút í Líbanon þegar stór „gleymd“ áburðargeymsla sprakk í loft upp. Framleiðsla á nituráburði byggist á aldagömlum aðferðum en þess er að vænta að nýjar og ódýrari aðferðir ryðji sér til rúms á næstu árum sem vonandi léttu undir fæðuframleiðslu í fátækari ríkjum heims. Grunnurinn er alltaf aðgangur að nægri orku en nóg er af N_2 í andrúmsloftinu.

Niturnám (niturbinding; e. nitrogen fixation). Í íslenskum ritum er yfirleitt

talað um niturbindingu, það sem hér er nefnt niturnám. Þýðingin „niturbinding“ á því sem nefnt er „N-fixation“ á ensku er gömul og að mörgu leyti óheppileg því með ferlinu er nitrið gert aðgengilegt plöntum, það er ekki verið að binda það. Þetta er grunnhugtak í náttúrufræðum yfir annað af mikilvægustu efnaferlum lífsins. Hugtakið kemur fyrir í orðabók Arnar og Örlygs (nú Mál og menning, Sören Sörensson, 1984), en þar er það skilið eftir án þýðingar, sem er nokkuð sérkennilegt.

Hugtakið „fix“ þýðir hér að breyta úr loftkenndu ástandi í efnasamband í vökva. Fyrir lesendur þessa rits hef ég ákveðið að nota hugtakið „niturnám“. Það lýsir ferlinu mun betur en „binding“. Þá er rétt að hafa í huga að binding er notað í öðrum skilningi í hringrásum annarra næringarefna – sem dæmi má nefna að fosfórbinding þýðir að fosfór binst öðrum efnum sem gera hann óaðgengilegan, t.d. kalsíum. Æskilegt væri að koma betra og samræmdara skipulagi á notkun

hugtaka í jarðvegs-næringarfræðinni til að auðvelda nemendum og áhugafólki um viðfangsefnið lífið.

Það er sannarlega nóg til af nitri í andrúmsloftinu, sem áður sagði, en það þarf aftur á móti mikla orku eða sérhæfðar lífverur til að hafa not af því. Þar koma til sögunnar svokallaðar niturbindandi bakteríur („niturnámsbakteríur“ eða „niturnemar“) sem lifa í sambýli við rætur niturbindandi plantna. Lúpína, smáategundir, alfa-alfa, baunagras og aðrar jurtir af ertublómaætt og ýmsir runnar hafa þennan eiginleika, en einnig eru eldingar drjúgar við að bæta nýtanlegu formi af nitri inn í vistkerfi jarðar. Kolabrennsla skilar einnig miklu magni niturs í andrúmsloftið og stuðlar að ákomu niturs, m.a. í Kína, Evrópu og Bandaríkjunum þar sem kolaorkuver eru útbreidd.

Nitur berst með vindum langar leiðir og bætist við vistkerfi með regni, en mjög erfitt er að mæla þessi áhrif.



Mynd 15.4. Lífræn jarðvegsskán inniheldur lífverur sem vinna nitur úr andrúmsloftinu, sem nýtist síðan í vistkerfum. Þessar lífverur eru afar mikilvægar við að sjá náttúrulegum vistkerfum fyrir nitri, jafnvel sem nemur >30 kg N á hektara á hverju ári (ÓA óbirt gögn). Skánin sem myndin er af myndaðist á 15 árum í 650 m hæð í kjölfar þess að svæðið var friðað fyrir búfjárbæit og áburðargjöf í tvö ár.

Niturmengun frá Evrópu sást t.d. iðulega áður fyrr sem gulleitt sólarlag – en það er orðið sjaldgæfara nú eftir að þeim orkuverum sem menguðu hvað mest í Vestur-Evrópu var lokað.

Gagnsemi niturbindandi (niturnemandi) plöntutegunda er augljós og slíkar tegundir eru í raun undirstaða landbúnaðar víða um heim. „Cyano-bacter“, eða blágrænubakteríur og skyldar lífverur, sem m.a. finnast í lífrænni jarðvegsskán og rætt var um í tengslum við lífræn efni (3. kafli), vinna einnig svipuð afrek, sem eykur gildi þeirra sem frumherja við landnám plantna því vistkerfin þurfa mikið af nitri til þess að gera hringrás næringarefna sæmilega virka (mynd 15.4).

Niturlosun/rotnun (e. mineralization eða ammonification). Þetta ferli færir nitur sem bundið er í lífrænum efnum yfir á nýtanlegt form. Lífrænt N er gert aðgengilegt þegar NH_3 (gas) losnar í jarðvegslausn og verður síðan að NH_4^+ í lausninni. Þvag inniheldur mikið af nitri á forminu NH_2 (bundið lífrænum sameindum) sem gengur undir svipuð efnahvörf og verður að NH_3 . Þvagefni eru mjög mikilvæg áburðarefni og eru hluti af lífrænum áburði sem borinn er á við ræktun. Þvagefnið „urea“ er mikið notaður áburður erlendis og er í raun lausn sem er mettuð af NH_3 . Sprengihætta samfara meðhöndlun á slíku efni er mikil.

Nítrun (e. nitrification). Tvær bakteríur vinna á NH_4^+ og oxa þetta efnasamband í NO_3^- . Annars vegar er það bakterían nitrosomonas, sem framleiðir NO_2^- og losar um leið orku og H^+ , en hins vegar nitrobacter sem oxar NO_2^- í NO_3^- en við það losnar einnig orka og H^+ (takið eftir H^+ í NH_4^+). Þessi ferill er afar mikilvægur í landbúnaði, m.a. við áburðargjöf, en hefur jafnframt sýrandi áhrif á jarðveginn því mikið af prótónum (H^+) losna við efnahvörfin og geta valdið skemmdum á moldinni. Því skiptir máli

á hvaða formi nitur er borinn á jarðveg. Mikil jónrýmd, sem einmitt einkennir stærstan hluta af íslenskum jarðvegi, minnkar sýrandi áhrif tilbúins áburðar.

Afnítrun – uppgufun (e. denitrification – volatilization). Afnítrun er ferli sem leiðir til afoxunar nítrats (NO_3^-) svo það verður að hláturgasi (N_2O), og að lokum að N_2 (afturhvarf til andrúmsloftsins). Hláturgas og N_2 eru loftegundir sem losna auðveldlega úr mold til andrúmsloftsins. Þetta ferli gerist þar sem súrefnisstyrkur er lítill og nituroxíðin taka sæti súrefnis í efnaferlum (taka við rafeindum, svipað og súrefni við bruna á kolefni, en súrefni er mikill rafeindafíkill), en efnahvarfið þarf að hafa greiðan aðgang að kolefni. Lífræn ensím eru afar mikilvæg við þetta ferli, eins og mörg önnur efnaferli í jarðvegi. Eins og ljóst má vera eru þessi og svipuð efnahvörf háð því að súrefnisþrýstingur sé lágur (lítið af súrefni, loftfirrð), t.d. í votlendi. Losun á hláturgasi hefur verið mæld úr röskuðum mýrum á Íslandi og einnig úr röskuðum mólendum sem eru rök hluta ársins (Keller o.fl. 2020).

Hláturgas (N_2O) er afar öflug gróðurhúsalofttegund (200–300 sinnum öflugri en CO_2) og því er brýnt að það losni sem minnst úr landbúnaðarkerfum og röskuðum votlendum. Hláturgas losnar í litlum mæli úr náttúrulegum óröskuðum votlendum, sem taka upp kolefni á móti og hafa því ekki eins mikil áhrif á styrk gróðurhúsalofttegunda. Hætta er á losun N_2O í kerfum sem hafa ofgnótt af nitri við rakar aðstæður – gæti t.d. átt sér stað í sumum lúpínubreiðum (ekki vitað). Við þær aðstæður hefði lúpína neikvæð loftslagsáhrif þrátt fyrir að binda kolefni.

Niturupptaka (e. immobilization; fjötrun, gera óvirkt). Þetta ferli er í raun upptaka á N þar sem það myndar lífræn efnasambönd, sem gerir nitrið um leið óvirkt í jarðvegi í bili, í fjötrum lífrænna efna.

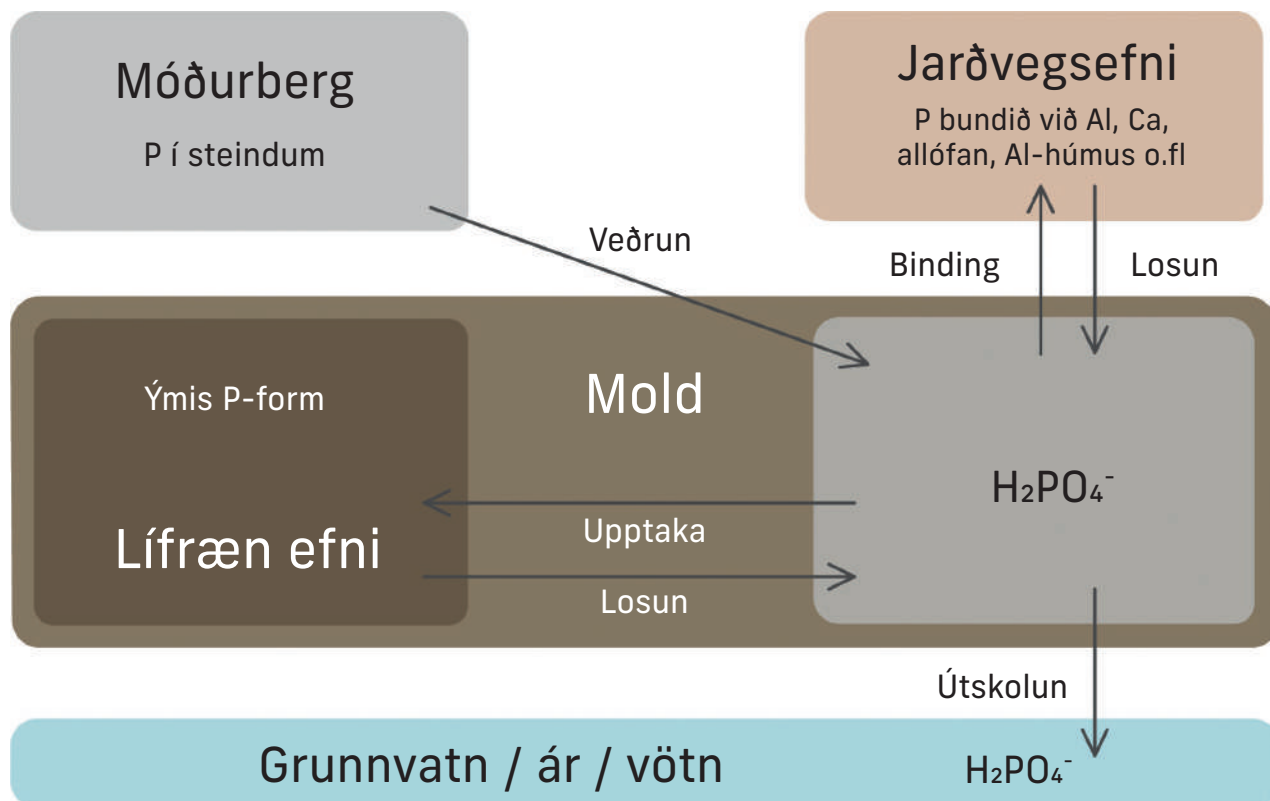
Útskolun. Fjallað var um útskolun í tengslum við myndun jarðvegs (8. kafli), t.d. þegar E- og Bt-lög þróast, en þá var einkum rætt um ferli innan sniðanna. Jarðvegslausnir tapast einnig úr moldinni þegar hún verður vatnsósa; laust vatn (e. gravitational water) streymir til grunnvatns, stöðuvatna og straumvatna. Það er afar mikilvægt að hafa í huga að mörg mikilvæg form niturs finnast einkum í jarðvegslausninni og þá ekki síst níturat (NO_3^-).

Ef vatn skolast úr jarðveginum tapast níturat (NO_3^-) með vatninu. Þetta getur verið bagalegt fyrir landbúnað þar sem mikilvægt er að áburðarnýting sé sem best. Nitrið er í ofanálæg afar mengandi þar sem stuðpúðann vantar í straumvötnin og grunnvatnið. Áburðarmengun hefur einmitt orðið til þess að grunnvatn er ódrykkjarhæft á stórum svæðum í Evrópu og víðar.

15.3. Fosfór og fosfórhringrásin

Fosfór er eitt þeirra efna sem er lífsnauðsynlegt fyrir plöntur auk þess sem tiltölulega mikið þarf af efninu – það er í hópi svokallaðra meginefna. Fosfór er hluti af ATP sem er eins konar orkumiðill fyrir flest lífefnaferli. Þau ferli sem þarfnast orku fá þau yfirleitt frá ATP. Fosfór er m.a. mikilvægur fyrir ljóstillífur plantna og fræmyndun. Hann er jafnframt bæði í DNA og RNA. Öfugt við nitur er mikið af fosfór (P) í jarðskorpunni, en það er afar mismunandi eftir bergtegundum. Niturbindandi tegundir á borð við smára og alfa-alfa gera miklar kröfur til aðgengis að fosfór. Svepprætur eru taldar hjálpa til við upptöku á fosfór.

Yfirleitt er fremur lítið magn af lausum fosfór í mold þar sem hann er m.a. bundinn lífrænum efnum. Fosfórskortur er viðvarandi vandamál í löndum



Mynd 15.5. Einfölduð skýringarmynd af fosfórhringrásinni. Plöntur taka upp fosfór einkum á forminu H_2PO_4^- . Fosfór kemst í moldina við veðrun á bergi og þegar lífræn efni rotna. Losun P frá allófani og málm-húmus-fjölliðum er iðulega lítil.

þar sem skógar hafa verið ruddir til landbúnaðarnota, t.d. í Afríku. Fosfórinn tapast með minnkandi magni lífrænna efna í moldinni og kerfinu í heild. Ofgnótt fosfór áburðar með tilheyrandi mengun er víða vandi í ríkari löndum heims. Plöntur þurfa mun minna af P en N; oftast 10–20 sinnum minna. Mest er af fosfór í ýmsu setbergi. Oft er vandinn sá að gera fosfórinn aðgengilegan plöntum.

Á mynd 15.5 er sýnd einfölduð fosfórhringrás. Við veðrun á berginu losnar um fosfór – einkum á forminu H_2PO_4^- í jarðvegslaun – sem jafnframt er meginform fosfórs sem plöntur taka upp. Ef kalk er í kerfinu (mikið af Ca^{++} , hátt pH) hvarfast þessi jón við kalsíum og myndar torleyst efnasamband. Það hefur einnig tilhneigingu til að bindast áli og járnhydroxíðum, en P á því formi er mjög torleyst og því óaðgengilegt fyrir plöntur. Þessi efni eru m.a. notuð til að fella út fosfór við meðhöndlun á fosfórmenguðu vatni. Eins og sést á myndinni kemur nýtanlega fosfórjónin (H_2PO_4^-) úr þremur áttum: frá lífræna efninu við hringrás lífrænna efna (næringarefnahringrás), að einhverju leyti frá ólífrænum samböndum (P bundið kalki, Al- og Fe-efnasambönd o.fl.) og við veðrun á bergsteindum sem innihalda fosfór, t.d. apatíti. Þess má geta að efnasamsetning beina og tanna í mannlíkamanum er mjög skyld apatíti. Fosfór getur, rétt eins og nitur, auðveldlega tapast við útskolun og veldur þá mengun. Fosfórmengun straumvatna, stöðuvatna og innhafa er alvarlegt vandamál víða um heim þar sem áburðarnotkun er mikil. Í náttúrulegum vistkerfum er hins vegar yfirleitt nóg af P í hringrásinni, slík kerfi eru frekar takmörkuð af N. Í graslendi er mest af fosfórnum bundið lífrænum efnum í moldinni, en í skógum er minna af P í moldinni. Við ræktun þarf hins vegar að bera á fosfór.

Það er eitt megineinkenni *eldfjallajarðar* (Andosol) að hún bindur fosfór, teppir

hann í torleystum efnasamböndum. Fosfórinn binst bæði allófan-steindum og málm-húmus-fjölíðum (sjá kafla um *eldfjallajörð*) og losnar ekki þaðan. Þar sem þannig háttar til safnast fosfór smám saman fyrir í moldinni við áburðargjöf, en halda þarf áburðargjöfinni áfram, ár eftir ár, til að tryggja góða uppskeru. Á móti kemur að yfirleitt er lítil hætta á fosfórmengun frá *eldfjallajörð*, sem einnig á við hér á landi.

15.4. Súlfúr (brennisteinn)

Náttúruleg hringrás súlfúrs í vistkerfum er nokkuð flókin. Efnið getur haft mjög mörg oxunarstig, rétt eins og nitur. Oxun súlfúrs er vitaskuld bruni, sem getur verið mjög öflugur, enda var efnið notað í sprengiefni – púður – áður fyrr, sem endurspeglast í heitinu brennisteinn sem gjarnan er notað um súlfúr. Hér eru bæði heitin notuð að einhverju leyti, en höfundur er fylgjandi þeirri stefnu að heiti frumefna sé nálægt alþjóðlegum heitum sem endurspeglast þá í tákni efnisins (N fyrir nitur, S fyrir súlfúr). Mörgu í hringrás súlfúrs svipar til niturhringrásarinnar; súlfúr berst í mold úr andrúmsloftinu en einnig að hluta úr bergefnum og stærsti hluti hans binst lífrænum efnum í næringarhringrásinni. Rætur taka upp súlfúr þegar hann losnar við rotnun lífrænna efna.

Yfirleitt þurfa plöntur um 1/10 hluta súlfúrs miðað við nitur. Margar bergtegundir innihalda umtalsvert magn súlfúrs, en hann berst einnig í moldina sem mengun, ekki síst þar sem kol eru brennd við orkuframleiðslu. Hér á landi geta kynstrin öll af súlfúr borist í andrúmsloftið í eldgosum og sumt af honum berst í moldina með regni. Brennisteinn er einkum tekinn upp á forminu SO_4^{-2} (súlfat). Bakteríur og ensím eru afar mikilvæg við oxunarferli brennisteins. Súlfúrtvíoxíð (SO_2) er eitnað, jafnvel þótt það sé til staðar í mjög litlum mæli, en þó geta plöntur

tekið það upp í gegnum laufin (sjá Tisdale og Nelson, 1975).

Súlfúr er stundum hluti áburðarefna við ræktun, sérstaklega þegar ræktunartegundir gera miklar kröfur til þess eða eru viðkvæmar fyrir brennisteinskorti. Niturbindandi tegundir sem stuðla að niturnámi þurfa að hafa gott aðgengi að súlfúr sem og margar káltegundir. Laukar innihalda mikið af súlfúr eins og ráða má af lykt þeirra. Þar sem næringarefni eru að stórum hluta bundin ofanjarðar, eins og í regnskógum, getur stór hluti súlfúrforðans tapast við bruna. Eyðing regnskóganna felur því í sér tap á mikilvægum næringarefnum úr kerfinu á borð við súlfúr, sem síðar kallar á mikla áburðargjöf við ræktun nytjategunda.

Súlfat (SO_4^{2-}) getur tapast úr mold með útskolun á svipaðan hátt og H_2PO_4^- og NO_3^- . Ofgnótt súlfúrs getur einnig orðið verulegt vandamál vegna þess að efnið getur sýrt moldina. Súr mold er algeng á námasvæðum, t.d. þar sem kol og ýmsir málmar eru unnir úr jörðu, og því er efnafræði súlfúrs mikilvæg í námafræðum. Við þær aðstæður er nauðsynlegt að leita leiða til að hækka sýrustigið, sem yfirleitt er afar kostnaðarsamt.

Hér á landi er mikið af brennisteini á jarðhitasvæðum og við jarðhitavirkjanir. Súlfúr frá gufuaflsvirkjunum tærir gróður og getur skemmt viðkvæm rafmagnstæki af sömu ástæðu, m.a. kopar í tengingum, jafnvel í mikilli fjarlægð frá mannvirkjunum því lítið þarf til. Sprenging verður við mjög hraða oxun á afoxuðu formi brennisteins. Brennisteinn var numinn úr jörðu á háhitasvæðum hérlendis á öldum áður og fluttur út, m.a. til að nota í púður á þeim tímum sem Evrópuþjóðir áttu í sífelldum styrjöldum innbyrðis, allt þar til öflugra sprengiefni var fundið upp sem byggðist á nitri.

15.5. Basískar katjónir (K, Ca, Mg, Na)

Í þessum undirkafla er fjallað um katjónir sem einkum berast til planta frá jónrýmdarsætum, en þangað eru þær komnar fyrir tilstuðlan efnaveðrunar á bergi. Jónirnar eru kalí (K), kalsíum (Ca), magnesíum (Mg), mangan (Mn) og járn (Fe). Auk þess teljast margar katjónir til snefilefna sem fjallað er um hér síðar.

15.5.1. Kalí

Kalí (K) er það efni sem plöntur þurfa í hvað mestum mæli; það er 1–4% K í laufum plantna, litlu minna en af nitri. Gríðarlegt magn er því fjarlæggt af kalí rétt eins og nitri í landbúnaðarkerfum. Kalí er notað í vatnsbúskap plantna (osmósa o.fl.), það er mikilvægur liður í starfsemi margra ensíma og nýtist í ljóstillífun og niðurbroti sykra, svo dæmi séu tekin. Gnótt af K stuðlar m.a. að viðnámi plantna gegn þurrkum og plöntusjúkdómum. Iðulega er hætt við kalískorti í ræktun, enda er það eitt þriggja meginefna sem notuð eru í áburði ásamt N og P. Kalí losnar við veðrun úr bergi, sest í jónrýmdarsæti og er miðlað þaðan sem K^+ . Það tapast einkum með útskolun, en þegar mold hefur mikla jónrýmd og basamettun er yfirleitt gnægð af aðgengilegu kalí til staðar sé ekki gengið á forðann með ræktun. Margar plöntur, m.a. ræktunartegundir, taka upp ofgnótt af K sé það til staðar í miklu magni, sem má kalla „lúxus-neyslu“ efnisins (e. luxury consumption) og getur valdið K-skorti þegar til lengri tíma er lítið.

Erlendis þar sem leirsteindin illít er í jarðvegi er mikil hætta á að K^+ festist í kristalgrindum illíts og nýtist þar með ekki (e. fixation). Þetta vandamál er ekki til staðar hérlendis svo vitað sé.

15.5.2. Kalsíum og magnesíum

Kalsíum (Ca^{++}) kemst í jarðvegslaun með svipuðum hætti og kalí. Framboð á því er mjög háð sýrustigi og jónrýmd því yfirleitt er meira af Ca í jónrýmdarsætum eftir því sem sýrustigið er hærra. Þar sem mikið er af kalsíum í móðurbergi, svo sem í kalksteini og ýmsum basískum bergtegundum eins og hér á landi, er lítil hætt á að kalsíum skorti. Þó er upptaka á kalsíum og notkun þess í plöntum nokkuð viðkvæm fyrir hlutföllum við aðrar jónir, t.d. Mg^{++} ; ef þau hlutföll eru mjög óvenjuleg getur gætt ýmiss konar skortseinkenna eða vanþrifa.

Magnesíum (Mg^{++}) er afar svipuð jón og kalsíum; báðar eru þær tví-gildar en kalsíum er haldið fastar í jónrýmdarsætum. Minna þarf af magnesíum en kalsíum, en deilt er um hvort til sé æskilegt hlutfall Ca miðað við Mg. Nýlegar rannsóknir benda þó til ofmats á mikilvægi þessa hlutfalls. Það er einkum þegar berg inniheldur mikið Mg en ekkert Ca sem hætt er á vandamálum vegna skorts á kalsíum.

15.6. Snefilefni

15.6.1. Helstu snefilefni

Rannsóknir á næringarefnum í jarðvegi í tengslum við ræktun snúast að langstærstum hluta um meginefni nitur, kalí og fósfor sem oftast eru uppistaða áburðarefna. Önnur meginefni sem stundum eru í áburði eru t.d. kalsíum og súlfúr (brennisteinn). Með vaxandi þrýstingi á jarðvegsauðlindina, bættri mælitækni og aukinni umræðu um tengsl snefilefnaframboðs og lýðheilsu hefur umfjöllun stóraukist um snefilefni í jarðvegi. Slík umræða er þó oft á tilfinningalegum nótum og þess gætir nokkuð að fram komi tillögur um skyndilausnir í ræktun eða á heilsufarsvandamálum sem ekki eiga sér fræðilegar forsendur. Víð-

feðmar tilraunir hafa verið gerðar til að komast að því hvaða áhrif skortur á snefilefnum í plöntum og dýrum hefur við mismunandi jarðvegsaðstæður, ekki síst í tengslum við ræktun nytjajurta. Ekki er hægt að gera þessu fjölbreytta viðfangsefni ítarleg skil í riti sem þessu en bent á afgangskafli í Weil og Brady 2017 sem dæmi.

Járn (Fe) og **mangan** (Mn). Yfirleitt eru gildi járns og mangans fremur há í íslensku fóðri, sem m.a. má rekja til áfoks efna með há Fe- og Mn-gildi (ÓA 2015). Hátt Mn-gildi má eflaust skýra bæði með basískri efnafræði bergefna og afoxun í votlendum og vegna frosts í jarðvegi (sjá hér aftar um frost og þýðu).

Kopar (Cu) er iðulega bundinn lífrænum fjölliðum (málm-húmus-komplexar) í jarðvegi, sem einmitt er mikið af í íslenskri mold (Mengel, 2008). Þannig er koparskortur oft í *barrskógajörð* í nágrannalöndunum, en hún er rík af lífrænum fjölliðum eins og moldin héraendis. Bjarni Guðmundsson og Þorsteinn Þorsteinsson (1980) mældu snefilefni í grasi og skýrðu frá lágum gildum fyrir kopar. Rannsókn Grétars Hrafns Harðarsonar o.fl. (2006) sýndi lág gildi kopars í heysýnum og einnig sinks. Kristín Vala Ragnarsdóttir og Hawkins (2006) sýndu fram á að Cu-gildi í íslenskum jarðvegi gæti verið afar lágt og að hlutfall Mn/Cu væri mögulega óhagstætt með tilliti til heilbrigðis. Mælingum ber þó ekki alveg saman og þess má geta að Panek og Kepinska (2002) fundu hærri Cu-gildi í íslenskri mold en gengur og gerist t.d. í Mið-Evrópu.

Sink (Zn). Skortur á sinki er yfirleitt rakinn til jarðvegs með hátt sýrustig (kalkjarðvegur) en lífrænar fjölliður geta einnig bundið sinkið. Af þeim er ofgnótt í mörgum íslenskum jarðvegsgerðum, eins og áður hefur komið fram. Nokkrar rannsóknir hafa verið gerðar á bindingu sinks í jarðvegi héraendis sem sýna að

Snefilefni eru mikilvæg!

Þau snefilefni í jarðvegi sem oftast koma til umræðu eru járn (Fe), mangan (Mn), sink (Zn), bór (B), kopar (Cu), mólýbden (Mo), nikkell (Ni) og selen (Se). Margfalt meira þarf af járn og mangan samanborið við mólýbden og nikkell.

Þessi efni gegna margvíslegu hlutverki í lífefnafræði plantna og dýra. Kopar, járn og mólýbden eru mikilvæg fyrir oxunar- og afoxunarferli í ensímum.

Mangan er afar mikilvægt fyrir sýklavarnir plantna og snefilefni eru raunar mikilvæg almennt til að sporna við plöntusjúkdómum. Skortur getur leitt til sjúkdóma í dýrum, þar á meðal í mannfólki.

hún er sterk en það sagast sennilega fast á yfirborð járnhýdroxíða (Gunnar Sigurðsson o.fl. 2007). Arsen virðist hegða sér með svipuðum hætti (Bergur Sigfússon, óbirt gögn). Hér er einnig rétt að geta rannsókna Torkells Jóhannessonar o.fl. (2005, 2007) og Kristínar Völu Ragnarsdóttur og Hawkins (2006) á kopar og mangani í tengslum við riðu á Íslandi.

Mólybden (Mo) finnst einkum í jarðvegslaun sem MoO_4^{2-} og hefur að mörgu leyti svipaða hegðan og fosfór (H_2PO_4^-) í moldinni. Þessi jón binst fast við járn- og áloxíð og hýdroxíð. Málms-húmus-knippi (fjölliður), sem eru ráðandi í *svartjörð* og *mójörð*, eru þessarar náttúru og eru líkleg til að binda mólybden líkt og gerist með fosfór. Leirefni í íslenskum jarðvegi, allófan og ferrihýdrít, hafa svipuð einkenni og ál- og járnsteindir og því er ekki ólíklegt að Mo sé að finna í fremur lágum styrk í íslenskum gróðri, en þó einkum þar sem sýrustig er lágt (t.d. á Vestfjörðum). Styrkur Mo virðist afar breytilegur í íslensku heyi (Torkell Jóhannesson o.fl., 2005, 2007) og getur verið of lágur með tilliti til heilsufars dýra.

Selen (Se) er í sjálfu sér ekki nauðsynlegt fyrir vöxt plantna en er mikilvægt fyrir dýr, þar með búfé og fólk. Mikið hefur verið ritað um hugsanlegan þátt selenskorts í krankleika íslenskra húsdýra (sjá Grétar Hrafn Haraldsson o.fl. 2006). Samkvæmt mælingum er selenstyrkur í heysýnum lágur og gæti valdið selenskorti (sjá t.d. Torkell Jóhannesson o.fl. 2005; Grétar Hrafn Haraldsson o.fl. 2006). Fróðlegt væri að tengja þessar mælingar betur við jarðvegseiginleika, en aðrir þættir svo sem vaxtartími, vaxtarhraði o.fl. kann að hafa áhrif hérlendis (Baldur Símonarson o.fl. 1984).

15.7. Miðlun næringarefna

Við jarðvegsmýndun öðlast moldin smám saman mikilvæga eiginleika sem eru nauðsynlegir fyrir miðlun næringarefna. Hér eru nefndir nokkrir þessara eiginleika sem hafa áhrif á framboð næringarefna, bæði meginefna og snefilefna.

Lífræn efni og sortuefni. Uppsöfnun Lífrænna sameinda er afar mikilvæg. Lífræn efni eru næringarforði og stjórna m.a. miðlun meginefna á borð við kolefni, nitur og snefilefni. Sortuefnin, þ.e. lífrænar fjölliður, allófan og ferrihýdrít, hafa tilhneigingu til að fastbinda mörg mikilvæg næringarefni, t.d. fosfór og ýmis snefilefni.

Örverur bæði umbreyta og losa um næringarefni sem plöntur nýta. Örverur nota einnig næringarefni, sem m.a. getur valdið tímabundnum skorti á efnunum á borð við nitur. Nýting örvera á næringarefnum hægir á tapi næringar úr jarðveginum með útskolun. Örverurnar vinna einnig í sambýli við rætur og örva upptöku á margvíslegum snefilefnum. Lágt hlutfall C/N örvar starfsemi örvera (t.d. <12) en hátt hlutfall takmarkar örverustarfsemi og rotnun plöntuleifa.

Oxun-afoxun. Framboð og form flestra snefilefna er háð afoxunarspennu í jarðvegi. Þannig stuðlar afoxun í súrefnissnauðum jarðvegi að auknu framboði á Fe, Co, Cu, Mn, Mo, Ni og Zn. Þetta getur einnig valdið eitrun í jarðvegi við vissar aðstæður. Oxun og afoxun stjórna að hluta framboði lífrænt bundinna næringarefna, en við oxun þeirra verða þau aðgengileg plöntum.

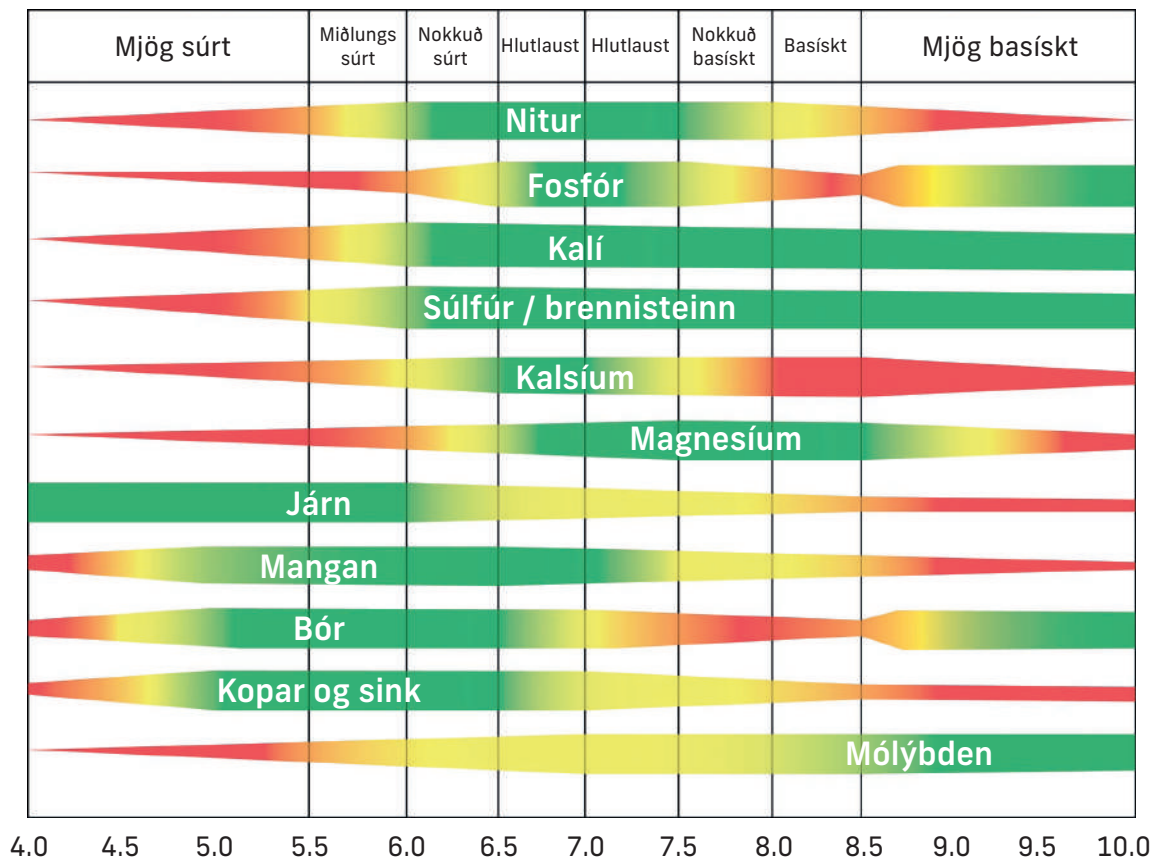
Framboð snefilefna í jarðvegi hefur áhrif á virkni ensíma, en mörg snefilefni eru mikilvægur hluti af byggingu ensíma en önnur kveikja á virkni þeirra. Oxun á sér stað fyrir tilstuðlan ensíma sem

liðka bæði fyrir oxun og afoxun með því að bera rafeindir milli mismunandi efnasambanda jarðvegsins. Ensím sem stuðla að afoxun lífrænna efna við loftfirrtar aðstæður stuðla að losun gróðurhúsalofttegunda úr jarðvegi á borð við hláturgas (N₂O) og metangas (CH₄).

Jónrýmd. Lífræn efni og leirefni gefa moldinni jónrýmd (e. cation exchange capacity). Lífrænar sameindir og leirsteindir hafa hleðslu sem yfirleitt er jákvæð og veldur því að jákvætt hlaðnar jónir á borð við Ca⁺⁺, Mn⁺, K⁺ og Mg⁺⁺ loða við agnirnar. Þeim er síðan miðlað til róta plantna eftir því sem þörf er á, meginefnum jafnt sem snefilefnum. Jónrýmd er afar breytileg eftir jarðvegsgerðum en alla jafna minnst í mjög veðruðum hitabeltisjarðvegi og jarðvegi þar sem lítið er af lífrænum efnum og leir (t.d. sendnum jarðvegi).

Jónrýmd hefur einnig áhrif á virkni ensíma og upptöku plantna á slíkum sameindum (Quiuampoix 2008). Mikil jónrýmd stuðlar að bindingu skaðlegra efna svo sem þungmálma í jarðvegi og tefur þar með útskolun þeirra úr mold í drykkjarvatn eða upptöku þeirra af plöntum. Jónrýmd er tengd kornastærð og því er þess að vænta að minna næringarframboð sé í grófum sandjarðvegi en leirmold, svo dæmi sé tekið, auk þess sem útskolun er meiri í sandinum sem getur valdið tapi á næringarefnum.

Sýrustig (pH) stjórnar efnajafnvægi og formi margra næringarefna (mynd 15.6). Ef moldin súrnar minnkar styrkur ýmissa mikilvægra næringarefna, jafnframt því sem eittraðar jónir á borð við Al³⁺ koma til skjalanna. Kjörsýrustig næringarefna er nátengt kjörsýrustigi örvera (pH 6–7) en sýrustig hefur mikil



Mynd 15.6. Framboð næringarefna fyrir plöntur er afar háð sýrustigi. pH 6–7 er yfirleitt hagstæðast. Sem dæmi má nefna að Mo, Ca og Mg tekur að skorta við pH 5–5,5 sem er algengt sýrustig í íslenskum votlendum (jafnvel lægra). Framboð á mörgum þessara efna tekur einnig að minnka við hátt pH, en óalgengt er að pH á Íslandi fari yfir 7,5, en það er einkum hátt í auðnum. Myndin er byggð á svipuðum myndum og eru í kennslubókum um jarðveg og á alnetinu.

áhrif á virkni þeirra. Sú jarðvegur dregur til að mynda verulega úr starfsemi þeirra sem leiðir til þess að hann verður ófrjósamur. Æskilegt sýrustig fyrir mörg næringarefni (pH 6–7) er einmitt algengt sýrustig *brúnjarðar* á Íslandi, en *svartjörð* og *mójjörð* hafa iðulega lægra sýrustig.

Veðrunarhraði, áfok, regn og útskolun. Eyðist það sem af er tekið. Náttúruleg vistkerfi þar sem uppskeran er ekki fjarlægð ár hvert eru í jafnvægi. Nýting vistkerfa fjarlægir orku og næringarefni úr kerfunum. Veðrun losar næringarefni úr bergefnum í stað þeirra sem eru fjarlægð við ræktun, en áburðargjöf er yfirleitt nauðsynleg til að viðhalda styrk meginefnanna sé mikið uppskorið.

Heitt og rakt loftslag stuðlar að örri veðrun, en framboð og gerð bergefna vega í mörgum tilfellum þyngra en veðurfarsaðstæður. Veðrunarhraði er að jafnaði örastur í ungum jarðvegi, mun örrari en þar sem veðrun hefur gengið mjög langt. Veðrunarhraði í hitabeltinu

er t.a.m. afar hægur enda þótt veðurfarið gefi tilefni til örrar veðrunar, nema þar sem áfok, flóð, öskufall og annað rask hleður kerfin með nýjum bergefnum. Veðrunarhraði er mjög ör á Íslandi, sem eykur framboð næringarefna.

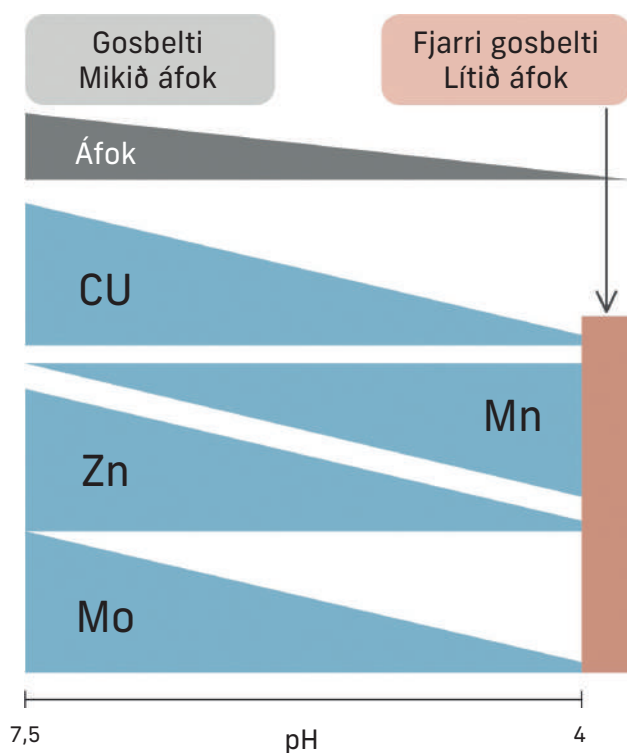
Sum næringarefni berast í moldina með áfoki (ryki) eða regni, en útskolun úr jarðveginum getur rýrt styrk mikilvægra næringarefna svo sem niturs og fosfórs, ekki síst í sendnum jarðvegi (skortir jónrýmd) og þar sem úrkoma er mikil, t.d. á söndum sunnanlands. Þar sem áfok er minnst á landinu, t.d. á Vestfjörðum, er hugsanlegt að skortur geti orðið á tilteknum snefilefnum en jafnvel offramboð á öðrum (mynd 15.7), en mjög skortir rannsóknir sem tengja slíka jarðvegsþætti við mælingar á snefilefnum á Íslandi.

Jarðefnafræði er mikilvægur þáttur með tilliti til næringarframboðs. Víða er lögð mikil áhersla á að kortleggja jarðefnafræði landsvæða, svo sem í Kanada, Bandaríkjunum og Bretlandi, m.a. til að kanna hugsanlegan skort eða ofgnótt á tilteknum snefilefnum í uppskeru (sjá t.d. Environment Canada 2002; Kristín Vala Ragnarsdóttir og Hawkins 2006). Skortur á snefilefnum getur valdið ýmsum sjúkdómum í búfé og fólki, eins og fram hefur komið.

Aðrir þættir. Meðal annarra þátta sem má nefna eru samkeppni jóna, efnasamsetning og hlutfall skyldra jóna, plöntutegundir, samsetning og ástand örveruflóru o.fl. Allir þessir þættir hafa áhrif á næringarhringrásina og upptöku plantna á næringarefnum.

15.8. Áburður og ræktun

Það er kostnaðarsamt að framleiða áburð og mikilvægt að nota hann skynsamlega. Á undanförunum árum hefur verið lögð mjög mikil áhersla á að minnka umhverfisáhrif áburðargjafar.



Mynd 15.7. Tilgáta um framboð nokkurra snefilefna í votlendismold á Íslandi í tengslum við áfok. Þess er að vænta að mun minna framboð sé af kopar (Cu), sinki (Zn) og mólýbdeni (Mo) í fremur súrum jarðvegi fjarri uppsprettum áfoks, t.d. á Vestfjörðum, sem gæti jafnvel haft áhrif á uppskeru og heilsufar búfjár (rauða svæðið á myndinni). Þar er aðgengi að Mn hinsvegar mikið, sem getur haft áhrif á upptöku kalsíums o.fl. Sjá mynd 15.6, en á þessari mynd hefur pH-skala verið snúið við, það er hátt pH til vinstri á myndinni.

Dæmi um það eru lagasetningar víða um lönd, m.a. á vettvangi Evrópusambandsins, til að vernda árhelgi yfirborðsvatns og koma í veg fyrir mengun grunnvatns, innhafa og vatnshlota.

15.8.1. Tilbúinn áburður – NPK

Um áratugaskeið notaðist Landgræðslan við flugvél við sáningu og áburðargjöf við uppgræðslu. Hún bar einkennisstafina TF NPK og var öldruð flugvél af gerðinni Douglas DC3 (mynd 15.8), en rituð hefur verið fróðleg bók um sögu áburðarflugsins á Íslandi. NPK vísar til helstu efnanna í tilbúnum áburði: **niturs**, **fosfórs** og **kalís** og alltaf í þessari röð.

Yfirleitt er hlutdeildar áburðarefnanna í prósentum getið með áberandi hætti utan á umbúðum, svo sem á áburðarpokum eða flöskum fyrir almennan markað. Dæmi um slíka merkingu væri 23 – 23 – 12, hlutdeild áburðarefnanna niturs, fosfórs og kalís í þessari röð. En mikilvægt er að gera sér grein fyrir hvað þessar tölur þýða í

raun og veru. Þær eiga sér langa hefð og byggjast á þekkingu frá árdögum áburðarfræða. Hlutdeild fosfórs í áburði er sett fram sem P_2O_5 , sem áður var talið það form sem P væri tekið upp af plöntum, sem er þó í raun $H_2PO_4^-$. Það sama á við um kalí sem var gefið upp sem oxíðið K_2O . Nitur er hins vegar alltaf gefið upp sem % N, þ.e. sem hlutdeild hreins niturs. Í raun þarf að margfalda uppgefið innihald fosfórs með stuðlinum 0,44 og kalís með stuðlinum 0,83 til að fá hlutdeild þessara áburðarefna í moldinni sem P og K. Áburður með NPK-innihaldi 23 – 23 – 12 hefur því í raun 23% N, 10% P og 10% K.

Að auki eru bæði kalsíum (Ca) og súlfúr (S) oft í áburði og stundum önnur efni eftir aðstæðum á borð við jarðvegsgerð og ræktartegund. Unnt er að draga mjög úr notkun tilbúins áburðar með skynsamlegri nýtingu lífræns áburðar sem fellur til við framleiðsluna og það gera íslenskir framleiðendur í ríkum mæli.

Áburður og fæða

Með sönnu má telja að þróun áburðarnotkunar sé ein meginstoð grænu byltingarinnar svokölluðu, sem er m.a. undirstaða þess að unnt er að fæða og klæða jafnmarga jarðarbúa og raun ber vitni.

En það má líka færa fyrir því rök að ræktunin hafi víða verið ansi dýru verði keypt með eyðingu regnskóga fyrir ræktarland, raski á vatnshag á tröllauknum skala, mengun moldar og vatnshlota, og svo mætti lengi telja.



Mynd 15.8. Landgræðsluflugvélin svokallaða af gerðinni Douglas DC3 bar einkennisstafina TF-NPK (sjá aftarlega á vélinni) eftir meginefnunum í áburði. Nýlega var gefin út bók um sögu áburðarflugsins á Íslandi (Sveinn Runólfsson og Páll Halldórsson 2021). Mynd: Niels Helmoel-Larsen/Landgræðslan.

15.8.2. Hve mikill áburður?

Á Íslandi hafaverið gerðar umfangsmiklar tilraunir með áburðargjöf í ræktun, ekki síst á vegum Rannsóknastofnunar landbúnaðarins fyrir árið 2005 og síðar hjá Landbúnaðarháskóla Íslands (mynd 15.9). Ráðlögð áburðargjöf byggist á niðurstöðum úr þessum tilraunum, sem eykur líkur á hámarksnýtingu áburðargjafarinnar. Hægt er að sækja sér fróðleik og leiðbeiningar um áburðargjöf hjá Ráðgjafarmiðstöð landbúnaðarins (rml.is). Yfirleitt er gert ráð fyrir 80 til 140 kg af N á hvern ha í ræktun á túnum og grænfóðri, 10–25 kg af P á ha og 20 til 60 kg af K, háð aðstæðum og magni þeirrar uppskeru sem sóst er eftir.

Þegar of mikið er borið á hækkar kostnaður á hverja einingu uppskeru mjög ört og hagkvæmni minnkar og það sama á við ef of lítið er borið á. Einnig þarf að taka tillit til stærðar þess ræktarlands sem notað er hverju sinni, kostnaðar við endurvinnslu túna og fleiri þátta.

Húsdýr leggja til óhemjumikinn úrgang, u.þ.b. 12 tonn þurrefnis eftir hverja mjólkurkú á ári, svo dæmi sé tekið. Húsdýraáburður hefur iðulega 2–4% N og mörg önnur nauðsynleg næringarefni. Lífrænn áburður nýtist því hraðar sem C/N-hlutfall áburðarins er lægra. Það er vitaskuld afar mikilvægt að skila sem mestu af áburðarefnunum sem falla til með þessum hætti aftur inn í kerfið. Lífrænn áburður hefur einnig þann kost að minni hætta er á útskolun næringarefna: þau losna hægar og eru tengd lífrænum efnum. Þó getur mengun fylgt húsdýraáburði, t.d. þar sem mikið er notað af lyfjum og öðrum aðskotaefnum í framleiðslunni.

Lífrænn áburður hefur margháttuð jákvæð áhrif á ræktunarmold, svo sem að auka lífrænan massa, bæta vatnsheldni og jónrýmd auk þess sem honum fylgir aukin virkni örvera. Þá hefur lífræni áburðurinn breiðari virkni því honum fylgja mun fleiri nauðsynleg næringarefni en aðeins meginefnin NPK sem borin eru á með tilbúnum áburði.



Mynd 15.9. Áburðartilraunir eru mikilvægur liður í að ákvarða hæfilegt magn áburðar til að hámarka nýtingu áburðargjafar. Áburður er stór kostnaðarliður í landbúnaðarframleiðslu og því mikilvægt að ná sem mestri hagkvæmni. Áburður eykur uppskeru upp að ákveðnu marki en áburðargjöf umfram það er óþarfa sóun. Myndin er af tilraunarektun á vegum Landbúnaðarháskóla Íslands. Mynd: Þóroddur Sveinsson.

Hlutfallslega eru jákvæðuáhrifin mest þar sem borið er á fremur ólífrænan jarðveg. Sjá mynd 15.10 af mykju-dreifingu.

15.8.3. Lífræn ræktun

Áhersla á lífrænar ræktunaraðferðir hefur aukist víða um heim á undanförunum árum samhliða auknum áhuga á umhverfisvernd og heilsuvitund. Ljóst er að þessar aðferðir geta stuðlað að betri meðferð á mold, minnkað jarðvegsrof og aukið endurnýtingu áburðarefna. Lífræn ræktun byggist mjög á lífrænum áburði á borð við mykju, tað, þvagefni og moltu, sem hefur marga mikilvæga kosti fram yfir tilbúinn áburð, eins og áður sagði.

Hugmyndafræði lífrænnar ræktunar fellur vel að markmiðum alþjóðasamfélagsins um sjálfbæra þróun. Á meðal þess jarðræktarfólks sem hefur sýnt andstöðu við lífrænar ræktunaraðferðir er bent á að lífræn ræktun kalli á aukið landrymi sem víða sé ekki til staðar, auk

þess sem uppskera á flatarmálseiningu og í heild geti minnkað umtalsvert. Það er þó alls ekki einhlítt. Á móti kemur að notkun á hvers kyns eiturefnum í landbúnaði getur haft neikvæð áhrif á umhverfi og lýðheilsu. Lífrænar ræktunaraðferðir tryggja ennfremur bætta meðferð húsdýra sem víða stenst ekki siðferðileg sjónarmið um dýravelferð. Það ber hins vegar að varast alls kyns hindurvitni og kreddur sem hafa fengið talsvert rúm bæði hjá þeim sem aðhyllast lífrænar ræktunaraðferðir og þeim sem hafa lagst eindregið gegn þeim. Það er augljóst að lífrænar ræktunaraðferðir sem byggjast á styrkum faglegum grunni geta haft jákvæð áhrif á verndun moldarinnar sem og lýðheilsu (mynd 15.11).

15.9. Mengun og lýðheilsa

Rétt er að víkja hér að lokum að mold og lýðheilsu, en sömu lögmál gilda



Mynd 15.10. Dreifing á lífrænum áburði er mikilvægur liður í sjálfbærri nýtingu auðlinda. Lífræni áburðurinn hefur margt umfram ólífrænan áburð. Mynd: Áskell Þórisson.

um ferli mengunarefna um moldina og nauðsynlegra næringarefna. Eftirfarandi kafli byggist á umfjöllun ÓA og Rannveigar Guicharnaud frá 2008.

Jarðvegur telst vera mengaður þegar hann inniheldur óeðlilega hátt hlutfall frumefna eða efnasambanda sem getur haft skaðleg áhrif á heilsu manna og dýra. Skaðleg efni geta verið bæði ólífræn (t.d. þungmálmar) og lífræn (t.d. skordýraeitur, olíuafurðir og klórberandi efni). Þungmálmar eiga uppruna sinn að rekja til jarðskorpunnar. Bæði menn og dýr innbyrða lítið eitt af þungmálum með mat og drykk; flestir málmar eru nauðsynleg næringarefni fyrir allar lífverur, en í afar litlu magni. Ef styrkur þeirra verður hins vegar of hár tekur að gæta eituráhrifa. Þungmálmar eru taldir sérstaklega hættulegir þar sem þeir safnast upp í lífkeðjunni mun hraðar en þeir brotna niður eða losna. Háan styrk þessara málma má iðulega rekja til iðnaðar en einnig til landbúnaðar, t.d. áburðar og svifryks.



Mynd 15.11. Á Neðra Hálsi í Kjós er stunduð lífræn framleiðsla á mjólkurafurðum. Vel er hugað að skjóli fyrir kýrnar með ræktun skjólbelta. Ekki er notaður tilbúinn áburður við framleiðsluna.

Skaðlegustu þungmálmar eru taldir vera As, Pb, Cd, Cu, Cr, Se og Hg. Algengir sjúkdómar af völdum þeirra valda skaða á taugakerfi (Pb, Se og Cr), öndunarfærum (Cd), lifur og nýrum (Cu og Cr), heila (Hg) og æðakerfi manna og dýra (Se). Þungmálmar berast í menn og dýr þegar styrkur þeirra er t.d. of hár miðað við bindigetu jarðvegs, ekki síst þar sem jörðin er ófrjó með litla jónrýmd, en þá aukast líkur á mengun neysluvatns. Þungmálmar frá iðnaði geta einnig borist í neysluvatn með straumvatni.

Afdrif lífrænna mengunarefna

- Lausbundin þrávirk lífræn efni með lágan mólmassa geta losnað úr jarðvegi sem lofttegundir.
- Ef þrávirka efnið er vatnsleysanlegt getur það skolast úr jarðvegi í grunnvatn og neysluvatn.
- Þrávirkt lífrænt efni getur bundist við yfirborð jarðvegsagna (leir og lífræn efni) og langur tími getur liðið áður en það losnar aftur út í umhverfið og veldur skaða.
- Þrávirk efni geta bundist lífmassa jarðvegs til frambúðar.
- Niðurbrot örvera getur umbreytt mengandi efnum í skaðlaus efnasambönd.
- Lífræn efni geta einnig brotnað niður og orðið skaðlaus vegna jarðefnafræðilegra þátta og má þar á meðal nefna vötnun (e. hydrolysis) og oxun.

Skordýraeitur, olíuafurðir og klórberandi efni eru svokölluð lífræn mengunarefni. Þau hafa einnig verið nefnd þrávirk enda talin einkar skaðsöm þar sem þau brotna afar hægt niður en safnast upp í fituvefjum lífvera. Áhrifin magnast eftir því sem þau færast ofar í lífkeðjuna. Erfitt er að brjóta niður þrávirk lífræn efni þar sem mörg þeirra eru hluti af löngum lífrænum keðjum eða stórum sameindum sem torvelt er að sundra. Afdrif lífrænna mengunarefna eru afar margvísleg (Martin 1999) (sjá textabox til vinstri).

Þrávirk lífræn efni berast fyrst og fremst í menn með fituríkri fæðu á borð við fisk, kjöt og mjólkurvörur (Martin 1999). Dæmi um heilsutjón af völdum lífrænna mengunarefna eru krabbamein, athyglisbrestur, sykursýki, fósturskaði og stytting meðgöngutíma, svo eitthvað sé nefnt.

15.10. Lokaorð

Moldin er miðstöð næringarhringrásar og fæðuframleiðslu heimsins. Óða-fjölgun mannfólksins veldur nú gríðarlegu álagi á vistkerfi jarðar og andrúmsloftið. Ekki verður þessari þróun snúið við nema með alþjóðlegri samvinnu. Áður fyrr mynduðu ríki eins konarsjálfbær kerfi sem gátu þrífist þrátt fyrir mun minni samskipti við önnur lönd en nú tíðkast. Þó var hagsæld yfirleitt mest í þeim menningarsamfélögum sem voru alþjóðleg í eðli sínu og byggðust á viðskiptum ríkja á milli. En heimurinn er annar nú á dögum, í raun byggir aðeins eitt samfélag manna jörðina og ekki verður hægt að leita annað um þær auðlindir sem þrýtur.

Ekkert annað en alþjóðleg samvinna og sameiginlegar reglur um umgengni við náttúruna geta tryggt velferð vistkerfa hnattarins til framtíðar. Alþjóðlegir samningar og markmið á vettvangi Sameinuðu þjóðanna eru ákaflega

mikilvæg leiðbeining til þjóðríkja og alþjóðasamfélagsins um verndun og endurheimt vistkerfa. Þar má nefna:

- Samningur SP um aðgerðir gegn eyðimerkurmyndun (UN Convention to Combat Desertification; UN-CCD).
- Samningur SP um líffræðilega fjölbreytni (UN Convention on Biodiversity; UN-CBD).
- Samningur SP um loftslagsbreytingar (UN Framework Convention on Climate Change; UN-FCCC).
- Þúsaldarmarkmið Sameinuðu þjóðanna, mörg þeirra tengjast vistkerfum og mold.
- Áratugur Sameinuðu þjóðanna helgaður vistheimt (UN Decade on Ecological Restoration, 2021–2030).

En þrátt fyrir góðan ásetning miðar allt of hægt að snúa við hnignun vistkerfa. Og það vantar sérstakan alþjóðasamning um verndun jarðvegs, enda þótt víðast geri þjóðríki sér grein fyrir mikilvægi þessarar auðlindar. Allir þeir samningar sem hér er getið snerta þó verndun jarðvegs með einhverjum hætti. Nánar er fjallað um landhnignun og kolefnishringrásina síðar í þessu riti.

Heimildir

Kafllinn er m.a. byggður á alfræðiritum um jarðveg (Chesworth 2008, Hillel 2005), vinsælli kennslubók um frjósemi jarðvegs (Havlin o.fl. 2005) og síðast en ekki síst óstyttri útgáfu af *The Nature and Properties of Soils* eftir Weil og Brady (2017).

Í síðastnefndu bókinni er að finna marga ítarlega kafla um næringarefni sem miðast m.a. við að miðla ríkulegum upplýsingum til þeirra sem stunda ræktun af einhverju tagi. Einnig er stuðst við *The Soils of Iceland* (ÓA 2015), grein ÓA og Rannveigar Guicharnaud um mold og næringu (2009) og íslenskar rannsóknir á notkun áburðarefna, þeirra Bjarna Helgasonar, Hólmgæis Björnssonar, Guðna Þorvaldssonar, Þorsteins Guðmundssonar, Friðriks Pálmasonar o.fl. auk annarra heimilda sem er getið.

Baldur Símonarson, Guðný Eiríksdóttir, Sigurður Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson 1984. Selenskortur og seleneitrun. *Freyr* 80:910–912.

Bjarni Guðmundsson og Þorsteinn Þorsteinsson 1980. Þungmálmur í íslensku grasi. *Íslenskar landbúnaðarrannsóknir* 12:3–10.

Chesworth, W. 2008. *Encyclopedia of Soil Sciences*. Springer, Dordrecht, Holland.

Environment Canada 2002. Natural sources of trace element contaminants. Environment Canada, NWRI, www.nwri.ca/threatsfull/ch14-1-1.html.

Friðrik Pálmason 2013. Plöntunæringar- og áburðarfræði. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Guðni Þorvaldsson og Þorsteinn Guðmundsson 2006. Snefilefni í jarðrækt. *Fræðaðing landbúnaðarins* 2006:170–178.

Gunnar Sigurðsson, Ágúst Bjarnason, Rannveig Guicharnaud og G.I. Paton 2007. Frumrannsókn á gróðurskemmdum við háspennumöstur á Suðvesturlandi. Skýrsla unnin fyrir Landsnet á vegum Línuhönnunar, Línuhönnun, Reykjavík.

Grétar H. Harðarson, Arngrímur Thorlacius, Bragi Línal Ólafsson, Hólmgæir Björnsson og Tryggvi Eiríksson 2006. Styrkur snefilefna í heyi. *Fræðaðing landbúnaðarins* 2006:179–189.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale og W.L. Nelson 2005. *Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management*. Pearson – Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.

Hillel, D. (ritstj.) 2004. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press, Cambridge, UK.

Keller, N., M. Stefani, Sigríður R. Einarsdóttir, Ásta K. Helgadóttir, Jón Guðmundsson, Arnór Snorrason, Jóhann Þórsson og Leone Tinganelli 2020. National Inventory Report 2020. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2018. Umhverfisstofnun, Reykjavík.

Kristín Vala Ragnarsdóttir og D.P. Hawkins 2006. Bioavailable copper and manganese in soils from Iceland and their relationship with scrapie occurrence in sheep. *Journal of Geochemical Exploration* 88:228–234.

Martin, A. 1999. *Biodegradation and Bioremediation*. 2. útg. Academic Press, San Diego, Kalifornía, USA.

Mengel, K. 2008. Nutrient potential. Í: W. Chesworth (ritstj.), *Encyclopedia of Soil Science*. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 494–500.

Oertli, J.J. 2007a. Plant nutrients. Í: Ward Chesworth (ritstj.), *Encyclopedia of Soil Science*. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 560–571.

Oertli, J.J. 2007b. Soil fertility. Í: Ward Chesworth (ritstj.), *Encyclopedia of Soil Science*. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 656–668.

Ólafur Arnalds 2015. *The Soils of Iceland*. World Soils Book Series, Springer, Dordrecht, Holland.

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

Ólafur Arnalds og Rannveig Guicharnaud 2008. Lýðheilsa og mold. *Fræðaðing landbúnaðarins* 2008:59–70.

Panek, E. og B. Kepinska 2002. Trace metal (Cd, Cu, Pb, Zn) and sulphur content in soils and selected plant species of Iceland. A pilot study. *Icelandic Agricultural Sciences* 15:3–9.

Quiquampoix, H. 2008. Enzymes and proteins, interactions with soil-constituent surfaces. Í: W. Chesworth (ritstj.), *Encyclopedia of Soil Science*. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 210–216.

Sveinn Runólfsson og Páll Halldórsson 2021. Landgræðsluflugið. Endurheimt landgæða með eins hreyfils flugvélum. Sæmundur, Selfossi.

Sören Sörenson 1984. Ensk-íslensk orðabók með alfræðilegu ívafi. Örn og Örylgur, Reykjavík.

Tisdale, S.L., W.L. Nelson og J.D. Beaton 1985. *Soil Fertility and Fertilizers*. 4. útg. Macmillan Publishing Company, New York.

Torkell Jóhannesson, Kristín Björg Guðmundsdóttir, Tryggvi Eiríksson, Jakob Kristinsson og Sigurður Sigurðarson 2005. Molybdenum and sulphur in forage samples from scrapie-free, scrapie-prone and scrapie-afflicted farms in Iceland. *Icelandic Agricultural Science* 18:53–58.

Torkell Jóhannesson, Kristín Björg Guðmundsdóttir, Tryggvi Eiríksson, Jakob Kristinsson og Sigurður Sigurðarson 2007. Overview. Seven trace elements in Icelandic forage. Their value in animal health and with special relation to scrapie. *Icelandic Agricultural Science* 20:3–24.

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

