



5 **Moldin er síkvik efnasúpa**



Mynd 5.1. Moldin er fjölbreytt og síkvik efnasúpa. Málverk Veronique Maria sem birtist í bókarkafli með ljóðum og myndverkum um jarðvegsmyndun eftir Veronique Maria og ÓA (2019).

Moldin hefur hleðslu

Jarðvegur öðlast jónrýmd vegna þess að örefni (e. colloids) á borð við leiragnir, lífræn efni og málm-húmus-knippi hafa hleðslu.

Þessi hleðsla veldur því að jónir með rafhleðslu loða við yfirborð örefnanna, t.d. K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ , Na^+ og margar aðrar mikilvægar jónir, en einnig Al^{3+} og H^+ í einhverjum mæli.

Efnahvörf reka áfram þróun moldarinnar og þar með eðli þeirra eiginleika sem hafa áhrif á frjósemi hennar. Þættir sem stýra þessum efnahvörfum eru mikilvægir fyrir skilning á moldinni. Hér er einkum lögð áhersla á tvö atriði, **jónrýmd** og **sýrustig**, sem eru grundvallarþættir sem móta efnavirkni í moldinni. Einnig er vikið nokkuð að **afoxunarspennu** í moldinni, sem einnig hefur áhrif á efnavirkni hennar. Þessum þáttum er yfirleitt gefið gott rúm í kennslubókum um jarðveg. Ýmis önnur atriði sem má telja til efnabátta, svo sem næringarefni í mold o.fl., eru til umfjöllunar í öðrum köflum ritsins.

Oft helgast umfjöllun um jónrýmd og sýrustig af vandamálum í landbúnaði og ræktun sem hljótast af of lágu eða of háu sýrustigi sem minnkar frjósemi og uppskeru. En sýrustigið er ekki síður mikilvægt með hliðsjón af efnaveðrun og virkni jarðvegs sem hluta af vistkerfum. Sýrustigið mótir framleiðni vistkerfa og samsetningu búsvæða, afdrif mengunarefna, framboð næringarefna, og getur haft áhrif á efnasamsetningu gróðurs og þar með lýðheilsu. Sýrustig ræður því m.a. á hvaða formi ýmis næringarefni eru í moldinni og þar með aðgengi þeirra fyrir plöntur, bæði meginefni og

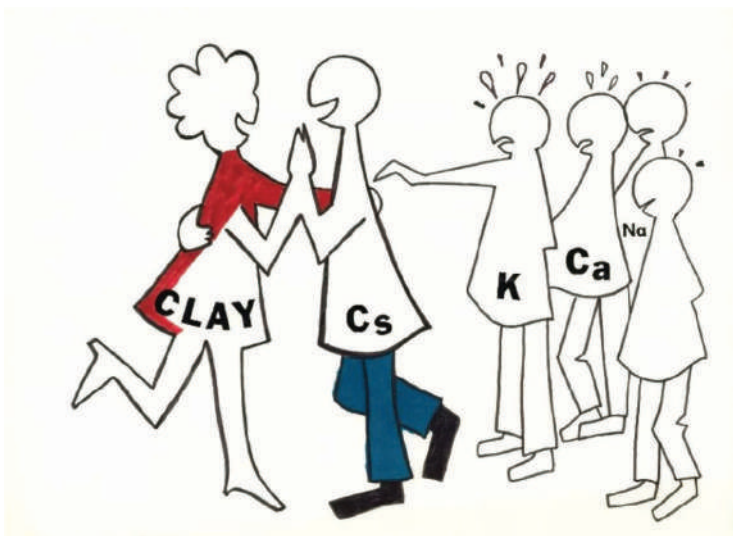
snefilefni (sjá 15. kafla um næringu í mold). Flest mikilvæg efnahvörf í jarðveginum eru háð sýrustigi að einhverju leyti og margt sem fyrir augu ber í moldinni er mótað af pH-gildi og afoxunarferlum. Hér verður fjallað um jónrýmd á undan sýrustigi, því þekking á henni er nauðsynleg til að átta sig á sýrustigi í mold.

5.1. Jónrýmd

Jónrýmd er hæfileiki moldar til að halda í og miðla síðan katjónum og anjónum í jarðvegslaun og til róta plantna. Tekið skal fram að það hjálpar að glöggva sig á kaflanum um eðli vatns (4.2) og kaflanum um leir (2.2) til að átta sig á því hvað jónrýmd er. Jarðvegur öðlast jónrýmd vegna þess að örefni (e. colloids) á borð við leiragnir, lífræn efni og málm-húmus-knippi hafa hleðslu. Þessi hleðsla veldur því að jónir með rafhleðslu loða við yfirborð örefnanna, t.d. K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ , Na^+ og margar aðrar mikilvægar jónir, en einnig Al^{3+} og H^+ í einhverjum mæli. Einkum er átt við katjónir (jákvætt hlaðnar agnir) því flest örefni hafa fyrst og fremst neikvæða hleðslu.

Þó hafa sum örefni, ekki síst lífræn efni, einnig jákvæða hleðslu, eins og síðar er fjallað um. Á ensku er eiginleikinn að halda í jónir með hleðslu nefndur „Exchange Capacity“, og þá er bæði talað um „Cation Exchange Capacity“, skammstafað CEC, og „Anion Exchange Capacity“, AEC, fyrir þær jarðvegsgerðir sem hafa slíkan eiginleika. Jónrýmd veldur því að þegar katjónirnar (og að hluta anjónir) losna við veðrun á bergefnum eða bætast við með regni teppast þær í kerfinu og verða til gagns þegar á þarf að halda.

Jónir sem staldra við í jarðvegi vegna jónrýmdar eru margar hverjar mikilvæg næringarefni fyrir gróður – jónrýmd gerir það að verkum að plöntur ná



Mynd 5.2. Cs-jónin tengist jónrýmdarstöðum leirefna mjög fast og varanlega og ytir um leið öðrum jónum út í lausnina. Hinar jónirnar „eiga engan séns“. Mynd: Tish Herrish (teiknuð fyrir MS-verkefni ÓA).

nauðsynlegum meginefnum á borð við kalsíum, magnesíum, natríum og kalí úr moldinni, sem og mörgum snefilefnum (t.d. Mn^{2+} , Ni^{+} , Fe^{2+}). Jónrýmd veldur því einnig að eitraðar jónir og ýmis mengunarefni geta bundist í moldinni, t.d. sink (Zn^{2+}), blý (Pb^{2+}), kopar (Cu^{2+}), kadmín (Cd^{2+}) og nikkell (Ni^{2+}) og lífræn eitrefni. Sumar katjónir sem eru nauðsynleg næringarefni geta valdið eituráhrifum sé of mikið af þeim í moldinni. Sesín (^{137}Cs) er eitt helsta geislavirka efnið sem fellur til jarðar með regni eftir kjarnorkuslys og atómbombur. Sesínjónir (Cs^{+}) bindast afar fast við jónrýmdarsæti jarðvegs í efstu sentimetrum moldarinnar, þær ýta öðrum jónum úr jónrýmdarsætunum og sitja þar enn sem fastast áratugum eftir geislavirkt úrfelli, m.a. á Íslandi (Magnús Á. Sigurgeirsson o.fl. 2005).

Algengasti mælikvarðinn á hleðslu öragna sem teppir jónir er milli-ekvivalentar hleðslu á hver 100 g jarðvegs (eða meq/100g), sem gefur þægilega stærðargráðu fyrir hleðsluna í jarðvegi (yfirleitt 3–50 meq á hver 100 g jarðvegs). Í þeirri viðleitni að færa einingar til alþjóðlegra staðla er einingin $cmol_c/kg$ oft notuð í vísindaritum (sentimól hleðslu (e. charge) á hvert kíló), sem er í raun sama einingin og sú gamla (meq/100g jarðvegs) sem ennþá er mest notuð í skrifum um jarðveg og í samskiptum jarðvegsfræðinga.

Neikvætt hlaðnar anjónir geta líka staldrað við í jarðveginum, einkum þó í *eldfjallajörð*, mó mold og jarðvegi hitabeltisins. Anjónirnar geta bæði verið nauðsynleg næringarefni (t.d. níturat, NO_3^- , mólýbden (sem MoO_4^{2-}) og selen (sem SeO_3^{2-} og SeO_4^{2-}), en þau síðasttöldu geta þó verið eitruð ef of mikið er af þeim. Svo má einnig nefna mjög mengandi anjónir á borð við arsen (sem AsO_4^{3-}) og króm (sem CrO_4^{2-}).

Leirsteindir í mold erlendis tilheyra fyrst og fremst lagsilíkkötum (einnig

nefnd blaðsilíkköt, e. phyllosilicates og layer silicates). Þær hafa að mestu fasta hleðslu sem helst stöðug þótt pH moldarinnar breytist. Járnoxíð sem oft einkenna hitabeltið hafa jónrýmd sem breytist með sýrustigi. Þetta fyrirbrigði mætti kalla **pH-háða hleðslu** (e. pH dependent charge). Eftir því sem sýrustigið hækkar (verður basískara) eykst jónrýmdin, en hún er samt alla jafna lág í jarðvegi hitabeltisins. Jónrýmd íslenskrar moldar er afar háð pH, eins og síðar verður vikið að.

5.1.1. Summa katjóna og mæling á jónrýmd

Mæling á jónrýmd felst í því að metta jarðveginn með einhverri ákveðinni jón sem alla jafna er lítið af í jarðvegi, t.d. NH_4^+ eða Ba^{2+} . Þær stugga burt öðrum jónum úr jónrýmdarsætunum og taka sætin í þeirra stað. Moldin er mettuð með vatni sem inniheldur þessar jónir, og því vatni sem lekur úr moldarsýninu er jafnframt safnað. Hægt er að mæla styrk jónanna sem losna í jarðvegslauninni og leggja þær saman. Með þessari aðferð fæst hlutfallslegt magn jónanna sem losna frá jónrýmdarstöðunum, en þessar upplýsingar eru notaðar til þess að reikna út basamettun (BS) sem fjallað er um aftar í þessum kafla.

Hluti þeirra katjóna sem sitja í jónrýmdarsætum eru Al^{3+} og fleiri Al-sambönd, sem og H^+ sem teljast súrar katjónir, eins og síðar er vikið að í umræðu um pH. Þegar moldarsýni er mettað og skolað með NH_4^+ -lausn, eins og algengt er, tíðkast að mæla aðeins basísku katjónirnar sem losna, þ.e. K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} og Na^+ ; hér vantar súru katjónirnar Al^{3+} og H^+ (mynd 5.3).

Basísku katjónirnar gefa ekki fullnaðar-mynd af jónrýmd, heldur er þessi stærð kölluð summa katjóna (e. sum of cations). Summa katjóna getur verið góður mælikvarði á jónrýmd í fremur basískum jarðvegi en alls ekki

Moldin safnar eitri

Stór hluti fæðuframleiðslu jarðarbúa fer fram þar sem vatni er veitt á sáðakra. Vatnsgæði eru afar mikilvæg til að tryggja að unnt sé að nýta moldina ár eftir ár til ræktunar.

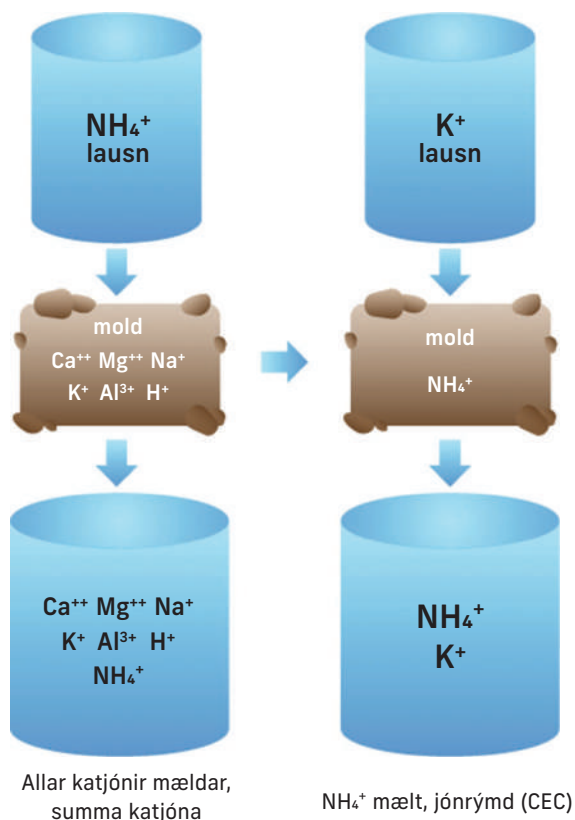
Ef eitraðar jónir á borð við arsen og selen eru í áveituvatninu mengast jarðvegurinn smám saman. Þetta á ekki síður við ef sölt á borð við natríum taka að safnast fyrir í moldinni á jónrýmdarsætin.

Jarðvegurinn verður með öðrum orðum smátt og smátt eitraður eða ófrjósamur og að lokum ónothæfur. Vandamál af þessu tagi eru algeng víða um heim, t.d. er arsen-mengun algeng í hrísgrjónarækt í Bandaríkjunum og Bangladess, enda er iðulega varað við mjög mikilli eða einhæfri neyslu á hrísgrjónum, ekki síst fyrir börn.

Söltun jarðvegs (einkum vegna natríums) er gríðarlegt vandamál á áveitusvæðum, t.d. í Pakistan og á Indlandi.

á jónrýmd í súrum jarðvegi eða mold með pH-háða jónrýmd (sjá hér neðar). Í súrum jarðvegi er stór hluti þeirra jóna sem sitja í jónrýmdarsætum Al^{3+} og fleiri álsambönd, sem og H^+ eins og áður sagði.

Þegar jónrýmd er mæld með því að metta jónrýmdarsætin með t.d. NH_4^+ eða Ba^{2+} við fyrstu jarðvegsskolun er önnur lausn notuð til að skipta út hinni fyrstu. Til dæmis er K^+ notað til að skola út NH_4^+ sem var notað í fyrstu skolun. Þá er orðið auðvelt að mæla hve mikið losnar af fyrri jóninni; NH_4^+ í okkar dæmi sem er skipt út úr jónrýmdarsætum með K^+ (sjá mynd 5.3). Með mælingu á styrk fyrri jónarinnar, sem notuð var til að reka út þær sem fyrir voru í moldinni í náttúrunni, hefur fengist mæling á jónrýmd moldarinnar, bæði basískum katjónum og þeim súru.



Mynd 5.3. Mæling á jónrýmd. Í fyrstu er moldin með ýmsar katjónir í jónrýmdarsætum (fyrri brúni kassinn), svo sem Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} og H^+ , en þegar moldarsýnið er skolað með lausn með ofgnótt NH_4^+ mettast sýnið af NH_4^+ en þær jónir sem sátu á jónrýmdarsætum skolast niður í lausnina fyrir neðan (ásamt einhverju af NH_4^+). Unnt er að mæla katjónirnar í þeirri lausn og fæst þá summa katjóna. Sé moldarsýnið, sem nú er mettað af NH_4^+ , skolað á ný með K^+ lausn er unnt að mæla það NH_4^+ sem kemur niður úr jónrýmdarsætunum og í vökvann fyrir neðan. Nú voru jónrýmdarsætin einmitt mettuð af NH_4^+ og gefur mæling á þeirri jón í skolvatninu til kynna heildarjónrýmd í moldinni. Mynd byggð á hluta á Weil og Brady 2017.

5.1.2. Jónrýmd örefna og jarðvegsgerða

Moldin hefur afskaplega mismikla jónrýmd eftir því hvaða leirgerð er ríkjandi og hve mikið er af leir og lífrænum efnum í henni. Í töflu 5.1 eru gefin dæmi um jónrýmd ýmissa örefna (lífræn efni og leirefni, „colloids“) í mold sem og algengra jarðvegsgerða.

Taflan sýnir að lífræn efni hafa mikla jónrýmd. Dæmi um leirtegund með mikla jónrýmd er smektít, enda er hún mikið notuð leirsteind í efnaiðnaði vegna mikillar efnavirkni. Leirsteindir hitabeltisins hafa litla jónrýmd, sem hefur neikvæð áhrif á frjósemi hitabeltiskerfa og gerir vistkerfi þeirra viðkvæm fyrir raski og ofnýtingu. *Graslendisjörðin* er alla jafna frjósöm mold með jónrýmd 15–30 meq/100 g, en athygli vekur mikil jónrýmd *eldfjallajarðar* og *mójarðar* sem þó er mjög háð sýrustigi – hún lækkar ört ef sýrustig lækkar.

Rétt er að leggja áherslu á það hér að mæling á jónrýmd getur verið ýmsum annmörkum háð, sérstaklega þar sem jónrýmd er pH-háð. Ef notað er mun hærra sýrustig í seinni mælingunni (sem gefur heildarjónrýmdina, CEC) en moldin hefur í náttúrunni fæst mun hærra CEC-gildi en moldin hefur í raun og veru og niðurstaðan verður lág tala fyrir basamettun (BS). Sýrustig getur einnig breyst meðan á skolun moldarinnar með annarri hvorri lausninni stendur (sú fyrri t.d. með NH_4^+), sem hefur áhrif á niðurstöðuna. Sem fyrr sagði verður mæling á basamettun röng ef ekki er notað sama sýrustig á milli fyrstu og seinni skolonarinnar ef jónrýmdin er pH-háð – það er í raun verið að breyta forsendum mælinganna ef pH er ekki það sama. Þetta hefur háð mælingum og birtingu á vísindaniðurstöðum fyrir bæði *mójarð* og *eldfjallajörð*, svo dæmi séu tekin, m.a. í rannsóknaniðurstöðum fyrir íslenska mold.

5.2. Hvað er pH?

Eiginleikar vatns ráða miklu um starfsemi lífs á jörðinni, eins og áður hefur komið fram, meðal annars hve vatn er sérkennilegt efni. Sökum þess að vatn er skautað efnasamband verkar það sem leysir, þ.e. það getur geymt jónir í upplausn, t.d. salt (Na^+ og Cl^-). Efnahvörf í vatni eiga sér einmitt stað á milli jóna sem eru í upplausn í vatninu.

H^+ jónir leita sér súrefnis (t.d. í málmi) eða kolefnis, svo dæmi séu tekin, og ganga í samband við þessi efni sem verður til þess að þau tærast. Við tæringuna myndast vatn, OH^- , CH_4 o.s.frv. H^+ leysir upp málma og grjót sé lausnin nógu sterk, þ.e. ef sýrustigið er nógu lágt. Sé mikið af H^+ er lausnin talin súr, en OH^- er ráðandi í basískri lausn. Til þess að skilgreina virkni H^+ í vatni er notaður pH-kvarði. Hann er lógaritmískur, en samkvæmt honum er:

$$\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$$

þar sem (H^+) er skilgreint sem virkni H^+ , sem yfirleitt lætur nærri að vera það sama og styrkur H^+ (mælt í mól/lítra). Styrkur OH^- er í öfugu hlutfalli við styrk H^+ í lausninni, en við ákveðinn styrk, 10^{-7} mól í lítra, er jafnmikið af báðum, en þá er $\text{pH} = 7$ (sjá töflu 5.2). Við $\text{pH} 7$ er styrkur $\text{H}^+ = 0,0000001$ mól/l og einnig styrkur OH^- ; lausnin er hlutlaus.

Það er mikilvægt að tileinka sér pH-kvarðann því efnaferli í náttúrunni eru mjög háð sýrustigi, eins og áður sagði. En pH er einnig mikilvægt í mörgu því sem fólk tekur sér fyrir hendur, bæði í starfi og í sambandi við mat og drykk, þekking á pH er því mikilvæg fyrir daglegt líf. Mjög súrt vatn eða mjög basískt vatn er eittrað fyrir lífverur og getur m.a. leyst upp algengar lífrænar sameindir, sem er eiginleiki sem er notaður í hreinsiefnum. Efni sem notað er í uppþvottavélar er baneitrað, það getur m.a. auðveldlega

Tafla 5.1. Jónrýmd örefna (e. colloids; leir og lífræn efni) og dæmigerð jónrýmd nokkurra jarðvegsgerða. Tölurnar gefa hugmynd um stærðargráðu, en jónrýmd er nokkuð breytileg innan jarðvegsgerða eftir aðstæðum, svo sem leirmagni, gerð leirs og lífrænum efnum. Þá er jónrýmdin breytileg eftir dýpt en hér er miðað við yfirborðslög. Oft hefur pH moldar (og pH sem notað er við mælingu á jónrýmd) afgerandi áhrif (sjá aftasta dálkinn).

Örefni/ Jarðvegsgerð	Jónrýmd við pH 7 <i>cmol_c /kg</i>	pH-háð jónrýmd
Lífræn efni	150–250	mjög
Smektít	100	lítið
Vermikúlít	150	lítið
Kaólínít	8	mjög
Gibbsít (Al-oxíð)	4	algjörlega
Götheít (Fe-oxíð)	4	algjörlega
Allófan	30–60	mjög
Mójörð (Histosol)	80–150	mjög
Barrskógajörð	8–12	nokkuð
Graslendisjörð	15–30	lítið
Hitabeltisjörð	2–8	mjög
Eldfjallajörð	20–50	mjög

Tafla 5.2. pH-kvarðinn. Til vinstri er sýndur styrkur H^+ en til hægri er styrkur OH^- og pH er sýnt í miðjunni. Brúnleitur hluti sýnir algengt sýrustig (pH) í jarðvegi. Vökví með pH undir 2 eða yfir 11 er mjög eittraður.

Styrkur H^+ (mól/l)	pH	Styrkur OH^- (mól/l)
0,01	2	0,000000000001
0,001	3	0,000000000001
0,0001	4	0,000000000001
0,00001	5	0,000000000001
0,000001	6	0,000000000001
0,0000001	7	0,000000000001
0,00000001	8	0,000000000001
0,000000001	9	0,000001
0,0000000001	10	0,0001
0,00000000001	11	0,001
0,000000000001	12	0,01

Vatn er ekki bara H₂O

Vatn er aldrei fullkomlega „hreinræktað“ safn H₂O-sameinda, í því er alltaf eitthvað af H⁺ og OH⁻ jónum sem „flækjast um“ í lausninni innan um vatnssameindirnar, rétt eins og Na⁺ og Cl⁻ í söltu vatni.

Styrkur H⁺ og OH⁻ í lausninni ræður mestu um efnafræðilega virkni vatnsins, m.a. á hvaða formi aðrar jónir eru í upplausn í vatninu, hvaða efnahvörf eiga sér stað og hve hröð þau eru. H⁺ er afar virk jón, vægast sagt, hún er örsmá og sé nóg af henni smýgur hún inn í hvaða flöt sem er, jafnvel málmyfirborð.



Mynd 5.4. Sýrustig og ýmis efni sem við neytum eða koma fyrir í náttúrunni. Mjög hátt og mjög lágt sýrustig er afar eittrað; sýra með pH lægra en 1 leysir upp berg og málma.

leyst upp hluta magans komist óvitar í slíkar töflur. Algengt sýrustig jarðvegs er á milli pH 4 og pH 8, en bæði er til súrari og basískari jarðvegur, en utan þessa bils á gróður þó yfirleitt erfitt uppdráttar. Á meðfylgandi mynd 5.4 er kvarðinn sýndur ásamt sýrustigi ýmissa hluta sem við þekkjum úr umhverfi okkar.

5.3. Sýrustig í moldinni

5.3.1. Hvað stjórnar sýrustiginu?

Jónrýmd er mikilvæg forsenda þess að sýrustig jarðvegs sé sæmilega stöðugt. Annars gæti það stjórnast af sýrustigi úrkomunnar sem fellur til jarðar. Katjónir (t.d. Ca⁺⁺ og K⁺) loða við jarðvegsagnirnar vegna þess að þær hafa neikvæða hleðslu. Katjónirnar eru einnig í vatnslausninni því að þetta kerfi er kvíkt, katjónir losna sífellt frá jónrýmdarstöðum og aðrar taka sæti þeirra. Það sem við mælum (þ.e. hvaða katjónir eru fastar þegar jónrýmd er mæld) er eins konar meðaltalsástand þessa síkvika kerfis. Meðal þessara jóna er H⁺ sem er sífellt að festast eða losna frá jónrýmdarstöðum og er því bæði í lausn og á jónrýmdarstöðum, í þeim mun meira mæli sem pH er lægra (súrara).

Ef moldin hefði ekki jónrýmd þyrfti afskaplega lítið af súru eða basísku vatni til að breyta sýrustigi jarðvegsins, en jónrýmdin og efnafræði áls (sjá síðar) sjá til þess að pH helst stöðugt. Eftir því sem sýrustigið er lægra, þeim mun meira er af H⁺ í jónrýmdarsætum sem miðlast aftur út í vatnið eftir þörfum og heldur sýrustigi jarðvegs nokkuð stöðugu ásamt álsamböndum – moldin er súr. Eftir því sem sýrustigið er hærra er minna af H⁺ í jónrýmdarsætum, en Ca²⁺, K⁺, Na⁺ og Mg²⁺ eru ráðandi í jónrýmdarsætum – moldin er basísk.

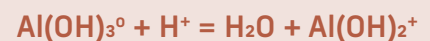
5.3.2. Hlutverk álsambanda – stuðpúðar

Hér á undan var dregin upp mynd af áhrifum styrks H⁺ og OH⁻ á sýrustig, en hún var þó kannski helst til einföld til að fá mætti sæmilegan skilning á sýrustigi jarðvegs. Þar gegna ál (Al³⁺) og álhýdroxíð meginhlutverki við að gera sýrustigið stöðugt og þar með minnka áhrif aðkomuefna, t.d. efna sem falla til jarðar með úrkomu, áburðarefna og efna vegna mengunar. Álsamböndin virka sem eins konar „stuðpúði“ (e. böffer) í moldinni. Því má segja að mæling á sýrustigi jarðvegs sé einnig að hluta mæling á virkni ál-efnasambanda. Gott er að hafa það í huga að ál er annað meginefni jarðskorpunnar ásamt kísli – það er ákaflega mikið af áli í umhverfinu!

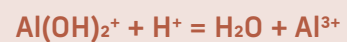
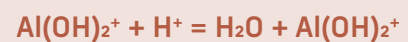
Til að skilja þessi áhrif er nauðsynlegt að velta fyrir sér „efnakeðjunni“ sem hér er sett fram:



Hér er ekki um eiginlega efnajöfnu að ræða, heldur mismunandi form álsins sem ræðst af pH. Al³⁺ er ráðandi jón í mjög sírum jarðvegi en Al(OH)₃ er ráðandi við pH 7 og þar yfir. Ef H⁺ er bætt við lausn þar sem Al(OH)₃ er ráðandi álform hvarfast það við Al(OH)₃ og úr verður vatnssameind og Al(OH)₂⁺ en sýrustigið breytist ekki:

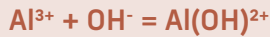


Það sama gerist ef Al(OH)₂⁺ eða AlOH₂⁺ er ráðandi:



Sýrustigið breytist ekki fyrr en styrkur hvers ál-efnasambands hefur minnkað mjög mikið. Það sama á sér stað nema í gagnstæða átt þegar OH⁻ bætist við

jarðvegslausnina, t.d.:



Þannig sjá þessi efnasambönd til þess að sýrustigið haldist nokkuð stöðugt í moldinni. Eftir því sem það er lægra er meira af Al^{3+} í jónrýmdarsætum, og ef ætlunin er að breyta sýrustiginu þarf að hafa í huga hve jónrýmdin er mikil og hve mikið af H^+ og Al^{3+} er til staðar því það ræður því hve miklu af OH^- þarf að bæta í jarðveginn til að vega upp á móti (mynd 5.5).

Al^{3+} er eitrad fyrir lífríkið. Þar sem pH fer niður úr öllu valdi, m.a. á námasvæðum meginlandanna, blasa við ógróin svæði sem illa gengur að rækta á ný nema með mjög miklum tilkostnaði. Þá þarf að bæta við ýmsum efnum svo sem kalki til þess að reyna að hækka sýrustigið. Sýrustig er víða lágt í votlendi á Íslandi en þar grípa lífrænar sameindir hið lausa ál svo að úr verða ál-húmus-knippi eða fjölliður (sjá umfjöllun um *eldfjallajörð*) sem draga úr áhrifum Al^{3+} í lausninni.

Ál losnar tiltölulega hratt við veðrun á basískri gjósku, en við sýrustig sem er hærra en pH 5 fellur það jafnharðan út með kísli (þ.e. „kristallast“) sem einnig losnar við veðrunina. Saman mynda þessi efni t.d. allófan og ímógólít ásamt súrefni og hýdroxíði (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*).

5.4. Mæling á pH

Mæling á sýrustigi er frekar einföld og er framkvæmd með elektróðum. Slíkur búnaður er til staðar á langflestum efnagreiningarstofum, en til eru sérstakar elektróður sem ætlaðar eru fyrir jarðveg. Moldin er sett í lítið glas og eimuðu vatni blandað saman við þar til

hún verður vatnsmettuð eða í hlutfallinu einn hluti jarðvegs á móti tveimur hlutum vatns. Hrært er í vatnslausninni til að jafnvægi náist milli lausnar og jarðvegs.

Á meðan á þessari mælingu stendur er hluti þeirra katjóna sem tekur þátt í efnaskiptum bundinn á jónrýmdarstöðum, m.a. Al^{3+} og H^+ . Með því að bæta við veikri lausn með K^+ (t.d. KCl) eða Ca^{2+} (CaCl_2) er hægt að reka Al^{3+} og H^+ út í jarðvegslausnina úr jónrýmdarsætunum (K^+ eða Ca^{2+} taka sætin í staðinn). Við það lækkar sýrustigið í jarðvegslausninni. Algengt er að sýrustig mælist einni einingu lægra þegar það er mælt í veikri KCl - eða CaCl_2 -lausn. Það á t.d. við um íslenskan jarðveg. Slík mæling segir til um „virka sýrueiginleika“ jarðvegsins.

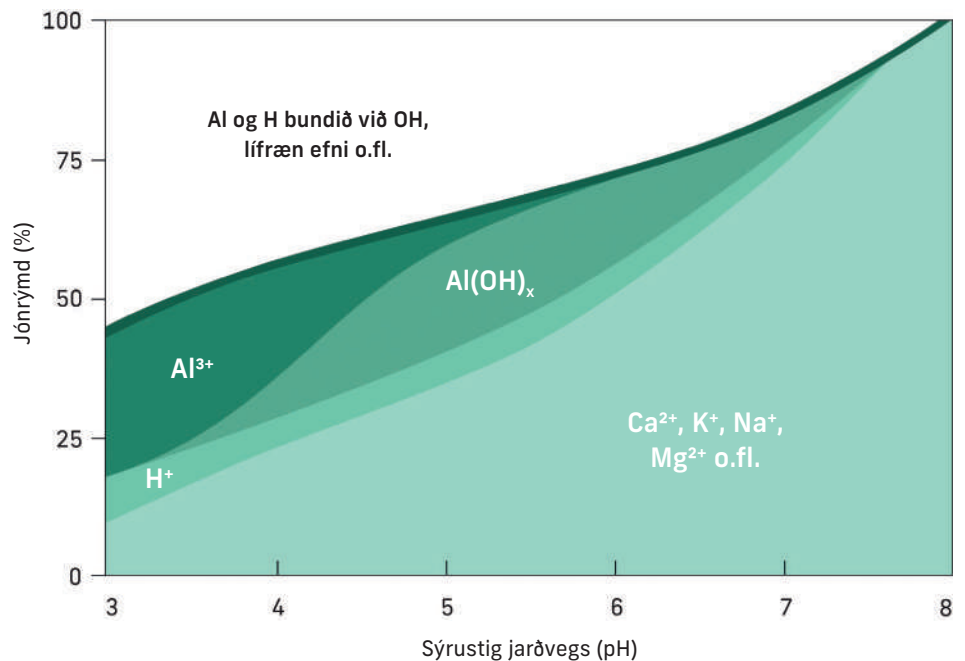
5.5. Basamettun

Bæði H^+ og Al^{3+} eru skilgreindar sem súrar katjónir, en Ca^{2+} , K^+ , Na^+ og Mg^{2+} sem basískar katjónir í jarðvegi. Hugtakið basamettun (e. base saturation) er notað til að skilgreina hlutfall basískra

Moldin er stuðpúði

Þessi stuðpúða-eiginleiki jarðvegs er afar mikilvægur. Án hans hefði súrt regn gert jarðveg iðnríkja mjög súran og ófrjóan og tiltölulega litla efnaveðrun hefði þurft til að lækka pH niður úr öllu valdi.

Þessir eiginleikar álsambanda og samspil við jónrýmd gera jarðveginn að hlutfallslega stöðugu umhverfi með tilliti til efnahvarfa; moldin færir vistkerfinu stöðugleika sem er afar mikilsverður. Af töflu 5.1. er augljóst hvaða jarðvegsgerðir eru viðkvæmastar fyrir súru regni: sá jarðvegur sem hefur minnsta jónrýmd.



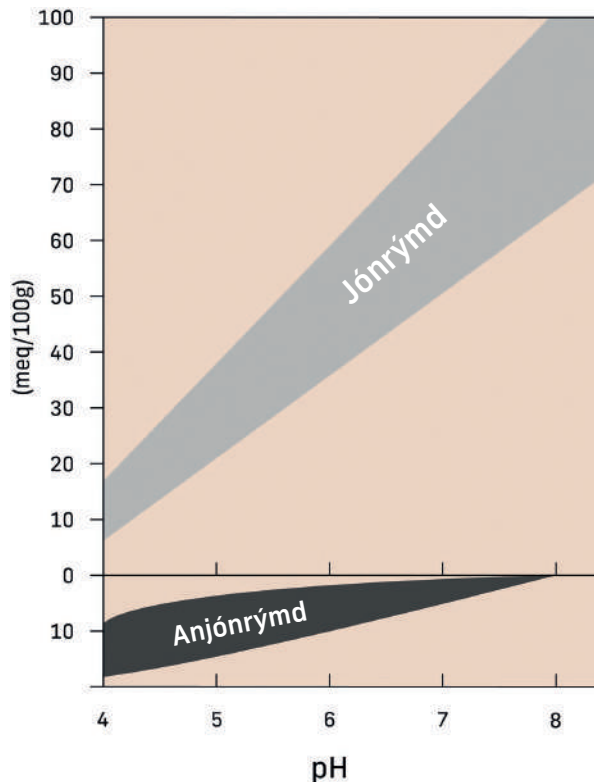
Mynd 5.5. Styrkur Al-sambanda og pH Al^{3+} er aðeins í lausn í einhverjum mæli við mjög lágt sýrustig, en það er eitrad. Styrkur $\text{Al}(\text{OH})$ -sambanda eykst með hækkanði sýrustigi. Við það verða basísku katjónirnar ráðandi (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) á jónrýmdarsætum – en basamettun (BS) er mælikvarði á hlutfall þeirra í jónrýmdinni. Byggt á Brady og Weil 2002.

katjóna miðað við jónrýmd (CEC) og er skammstafað BS:

$$BS = (\text{basískar katjónir/CEC}) \times 100$$

Eins og kom fram áður skolar NH_4^+ út öðrum jónum úr jónrýmdarsætum í fyrstu skolon og þá er auðvelt að mæla basana (Ca^{2+} , K^+ , Na^+ og Mg^{2+}) í skolinu sem losnar, en þá eru súru katjónirnar ekki mældar (H^+ og Al^{3+}). Önnur skolonin gefur hins vegar mælingu á heildarfjölda jónrýmdarsætanna, þ.e. jónrýmd (CEC). Há basamettun (>80%) er einkenni frjósams jarðvegs þar sem sýrustig er sæmilega hátt, en lág basamettun (t.d. < 50%) takmarkar frjósemi jarðvegsins og einkennir oft mikið veðraðan jarðveg með lágt sýrustig.

Jónrýmdin (fjöldi hleðslna) og basamettunin spila saman og gefa til kynna hve mikið þarf af OH^- -jónum til þess að hækka sýrustigið. Það er yfirleitt gert með kalkáburði sem losar OH^- sem hvarfast við H^+ og myndar vatn (H_2O).



Mynd 5.6. Hækkandi jónrýmd með hækkandi pH í allófani. Myndin er einnig í 10. kafla um *eldfjallajörð* og skýrð betur þar.

Þessi hvörf verða ekki skýrð hér nánar en þau eru mikilvæg í landbúnaði þar sem jarðvegur er mjög súr.

Hér á landi eru nokkur landsvæði með súra mold, eins og síðar verður fjallað um, en það er mjög dýrt að bera kalk á tún, auk þess sem mjög mikið þarf af kalki hérlendis því jónrýmd íslensks jarðvegs er alla jafna mikil. Veðrun á basalti getur einnig af sér katjónir sem hækka sýrustigið og áburðargjöf með basískri ösku, sem og gjóskufall eða áfok, getur hækkað pH og aukið frjósemi jarðvegsins til muna.

Allófan, einkennissteind *eldfjallajarðar*, hefur pH-háða jónrýmd. En öfugt við steindir hitabeltisins hefur allófan mikla jónrýmd. pH-háð jónrýmdin leiðir til þess að *eldfjallajörð* hefur mun meiri jónrýmd eftir því sem pH er hærra (mynd 5.6). Þetta hefur mikilvægar afleiðingar sem vert er að hafa í huga þegar basamettun *eldfjallajarðar* er skoðuð.

Niðurstöður mælinga á jónrýmd *eldfjallajarðar* eru háðar því við hvaða sýrustig (pH) skiptanlegu katjónirnar eru mældar, þ.e. Ca^{2+} , K^+ , Na^+ og Mg^{2+} (basísku jónirnar) eða H^+ og Al^{3+} (súru jónirnar), og við hvaða sýrustig jónrýmdin er mæld (heildin, allar jónir). Oft er ekki notað sama pH við mælingu á skiptanlegum katjónum og jónrýmd, sem kemur ekki að sök við útreikning á basamettun (BS) þar sem leiragnirnar eru venjuleg lagsilíkköt (blaðsilíkköt), t.d. á hinum Norðurlöndunum. En þar sem *eldfjallajörð* á í hlut verður útreikningur á basamettun með þessum hætti marklaus.

Eins og fyrr sagði getur verið erfitt að stjórna sýrustigi jarðvegs við mælingu á skiptanlegum katjónum og jónrýmd í *eldfjallajörð*, sýrustig breytist gjarnan meðan á mælingunni stendur. Því borgar sig að túlka tölur um basamettun *eldfjallajarðar* með varúð, og það á við hérlendis.

5.6. Veðrun og áhrif loftslags á sýrustig

Veðrun og aldur jarðvegs hefur áhrif á hvaða leirsteindir eru í moldinni. Þær hafa, eins og áður hefur komið fram, afskaplega mismikla jónrýmd. Lítið veðruð mold sem er rík af smektíti, illíti eða vermikúlíti hefur mikla jónrýmd (tugir cmol_c/kg eða $\text{meq}/100\text{ g}$). Mikið veðraður jarðvegur sem einkennist af kaólíníti, járnsteindum og álsteindum hefur litla jónrýmd ($<10\text{ cmol}_c/\text{kg}$). Þar sem jónrýmdin er lítil er basamettun lítil og pH er því oft lágt í hitabeltisjarðvegi.

Þar sem úrkoma er lítil veldur uppgufun því að leysanleg sölt berast ofar í jarðveginn í þurrkum, en þeim skolar síðan aftur niður í úrfelli. Þessi sölt stuðla að háu sýrustigi. Jarðvegur á þurru svæðum hefur yfirleitt hátt pH og ef CaCO_3 er í kerfinu festist sýrustigið nálægt 8,4. Hins vegar þarf Na^+ að vera til staðar eigi sýrustigið að verða ennþá hærra, en þá hættir venjulegur gróður að geta þrifist.

Þar sem úrkoma er mikil skolast þessi sölt ofan í neðri lög jarðvegsins eða út úr honum (útskolun) og þar með þær jónir sem teljast basískar (Ca^{2+} , K^+ , Na^+ og Mg^{2+}). Við það eykst hlutur Al^{3+} og H^+ í jónrýmdinni, basamettunin lækkar og að lokum einnig pH (mynd 5.8). Því er sýrustig í gömlum jarðvegi í röku loftslagi oft tiltölulega lágt – jarðvegurinn er súr. Vert er að hafa í huga að áfok á Íslandi bætir sífellt nýjum bergefnum við yfirborðið sem kemur í veg fyrir að jarðvegur á Íslandi súrni (sjá 13. kafla um íslenskan jarðveg).

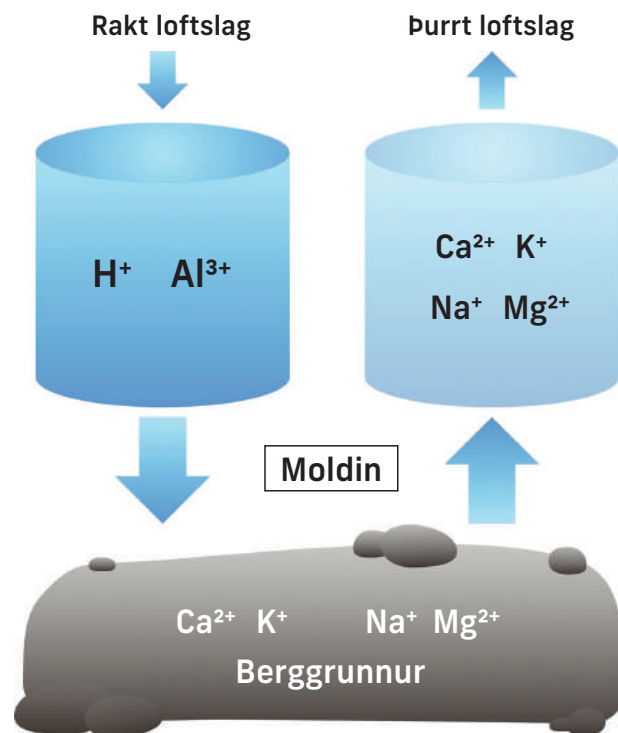
5.7. Súrt regn

Brennsla á lífrænum orkugjöfum á borð við kol og olíu leiðir til þess að ýmis efni sem sýra yfirborðið falla til jarðar með úrkomu. Lengi vel stóðu deilur um það

hvort súrt regn hefði í raun og veru áhrif á jarðveg; því var jafnvel haldið fram að áhrifin væru nánast engin vegna stuðpúðaeiginleika jarðvegsins. Olíu- og kolaiðnaðurinn hafði og hefur enn á sínum snærum snjallt fagfólk á sviði afneitunarfræða.

Deilur um súrnun jarðvegs vegna brennslu á jarðefnaeldsneyti eru nú að baki að mestu, súrt regn hefur sannanlega haft umtalsverð áhrif á sýrustig jarðvegs á gríðarlega stórum svæðum. Þó eru þessi áhrif mun minni en ætla mætti í jarðvegi vegna stuðpúðaeiginleika moldarinnar. Súrt regn hefur aftur á móti valdið mun sýnilegri skaða í ám og vötnum því vatnskerfin skortir dempun moldarinnar. Súrt regn og útblástur frá samgöngum valda líka skaða á byggingum og listaverkum úr kalksteini, svo fleiri dæmi séu tekin.

Mikilvægustu skaðvaldarnir í súrri úrkomu eru brennisteinsdíoxíð (SO_2) og nituroxíð (NO_x) sem aðallega verður til við rafmagnsframleiðslu (Vance, 2002). Þegar þessi efni oxast verða til prótónur



Mynd 5.7. Í röku loftslagi skolar basískum katjónum niður úr efsta laginu og súru jónirnar (H^+ og Al^{3+}) verða ráðandi. Basamettunin verður lítil með tímanum. Þessu er öfugt farið í þurru loftslagi.

Mengunin getur farið víða

Mengunarefni geta borist tugi og hundruði kílómetra í andrúmsloftinu. Þannig átti stór hluti af súru regni sem féll á Noreg uppruna á Bretlandi – sem nú hefur hætt kolavinnslu að mestu.

Til Svíþjóðar berst umtalsverð mengun frá Austur-Evrópu, sem fór þó ört minnkandi eftir fall Berlínarmúrsins. Vandamálið er hnattrænt í eðli sínu. Þessi mengun fer nú víðast hvar minnkandi í iðnríkjum, en vex sums staðar örum skrefum í þróunarríkjum.

Mengunin er mest þar sem kolum og olíu er brennt á iðnaðarsvæðum, m.a. í norðausturríkjum Bandaríkjanna, í Texas og Mississippi, Mið-Evrópu og Kína. Stjórnmal á sviði umhverfismála hafa vitaskuld áhrif á þessa þróun, sem sást m.a. af eflingu kolaiðnaðar í Bandaríkjunum í skjóli Trump-stjórnarinnar.

(H⁺) sem sýra umhverfið. Aukinn styrkur H⁺ veldur einnig því að basískar katjónir skolest út úr jarðvegskerfinu því þeim er ýtt úr jónrýmdarsætum af H⁺. Sem áður sagði er mold því viðkvæmari fyrir súru regni sem jónrýmdin er minni. Vistkerfi eru því misnægð fyrir súru regni. Barrskógar hafa orðið sérstaklega illa úti, m.a. vegna minni stuðpúða í jarðvegi þeirra og vegna þess að súr úrkoman rennur niður trjástofna og eykur mjög sýrustyrk í moldinni næst trjánunum. Ennfremur getur súr úrkoma valdið tjóni á laufum trjánna.

Talið er að um 35% skóglendis í Evrópu hafi orðið fyrir áhrifum af súru regni og þar eru sums staðar rekin viðamikil verkefni þar sem borið er kalk á skóglendi úr lofti.

5.8. Afoxunarspenna og litur moldar

5.8.1. Afoxunarspenna

Rafeindir (elektrónur) og rafeindaskipti gegna meginhlutverki í efnahvörfum, sérstaklega í orkuflutningi í lífheiminum, en einnig í ýmsum ólífrænum efnahvörfum. Þessi rafeindaskipti valda því að mörg frumefni taka mismunandi hleðslu eða oxunarstig. Til dæmis má nefna járn sem er ýmist tvígilt (táknad sem Fe(II) eða Fe²⁺) eða þrígilt (Fe(III) eða Fe³⁺). Þessi mismunandi form járnsgagna mikilvægu hlutverki við flutning sýrefnis í blóði dýra.

Kolefni og nitur geta tekið mörg oxunarstig sem eru notuð við orkubúskap lífheimsins. Tilhneigingunni til að taka við eða gefa frá sér rafeind (e⁻) er lýst sem rafspennu kerfisins, þ.e. afoxunarspennu, táknuð sem Eh. Þessi mælieining er afstæð og er efnajafnan (hálfhvarfið) fyrir mismunandi hleðslu vetnis notuð til viðmiðunar. Efnahvörf í náttúrunni takmarkast í

raun af afoxunarspennu vatns annars vegar og sýrefnis hins vegar sem mynda til samans eins konar útverði efnahvarfa lífheimsins. Umfjöllunin hér um afoxunarspennu gáar aðeins yfirborðið á þeirri efnafræði sem tengist afoxunarspennu í jarðvegi, en bent er á nokkrar heimildir aftast í kaflanum.

5.8.2. Loftfirrð: afoxun

Efni sem oxa önnur efni (e. oxidizing agent) taka við rafeindum (e⁻) en efni sem gefa auðveldlega frá sér rafeindir eru afoxandi efni (e. reducing agent). Súrefni er einmitt mjög sterkur oxari – eins konar elektrónu-fíkill og getur tekið við rafeindum frá mörgum öðrum frumefnum. Loftháð öndun þarfnast sýrefnis til þess að taka við rafeindum þegar lífverur taka til sín orku við að oxa (brenna) lífræn kolefnissambönd. Eða með öðrum orðum: nýting á þeirri orku sem felst í kolefnissamböndum sem mynduð eru með tillífun plantna eru ferli oxunar og lífverur nota til þess sýrefni. Með tilliti til sýrefnis er þessu lýst með hálfhvarfinu:



(oxunarstig sýrefnis breytist frá 0 í $\frac{1}{2}\text{O}$ í -2 í H_2O).

Afoxunarspenna í jarðvegi takmarkast bæði af sýrefnisþrýstingi og sýrustigi. Þessu samhengi er lýst á mynd 5.8 þar sem pH er varpað á x-ásinn en afoxunarspennu á y-ásinn. Þar sem nægjanlegt sýrefni er til staðar er jarðvegskerfið loftað (e. aerobic) en loftfirrt (e. anaerobic) þar sem sýrefni skortir. Við loftháða öndun (rotnun) getur gengið á sýrefni kerfisins nema sýrefnisbirgðirnar endurnýist.

Ef sýrefnisþrýstingur í jarðveginum minnkar lækkar afoxunarspenna sömu leiðis. Slíkar aðstæður ríkja oft í votlendi þar sem skortur er á sýrefni. Þar nýta

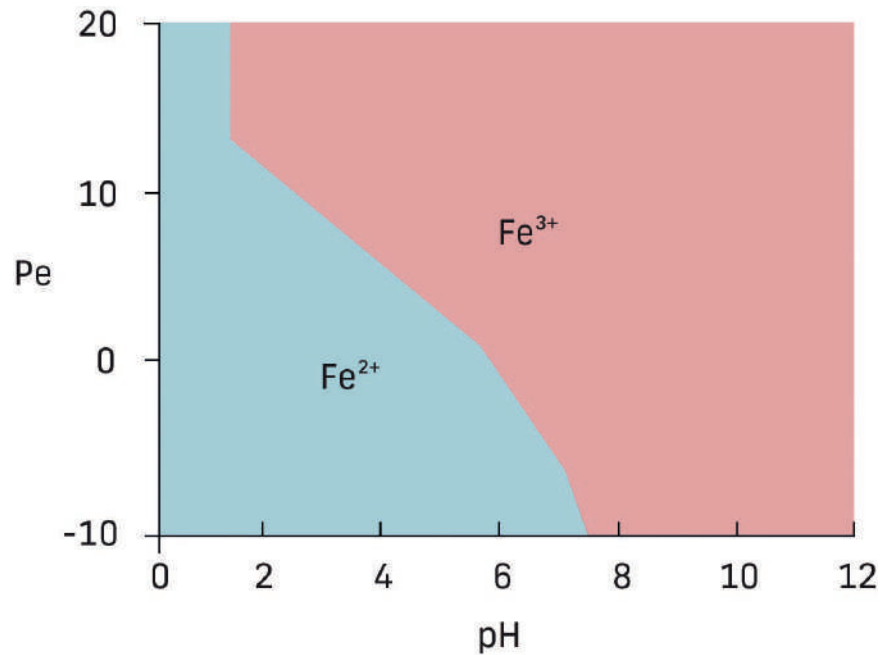
lífverur súrefnið á meðan það endist en síðan taka við sérhæfðar lífverur sem lifa í loftfirrtu umhverfi. Þá er afoxunarspennan orðin lág. Sýrustig hefur sömu áhrif, afoxunarspenna lækkar eftir því sem sýrustigið lækkar.

5.8.3. Afoxun nokkurra algengra efna í jarðvegi og litur jarðvegs

Þau efni sem eru hvað viðkvæmust fyrir breytingum á afoxunarspennu í jarðvegi eru járn og mangan (Mn). Skilin á milli Fe(II) og Fe(III) annars vegar og Mn(I) og Mn(II) hins vegar liggja einmitt á því bili sem Eh sveiflast tíðum í jarðvegi. Það á sérstaklega við þar sem skiptast á þurrir og votviðrasamir kaflar eða þar sem grunnvatn rís og hnígur í jarðveginum eftir árstíðum, veðurfari og holklaka. Þegar jarðvegurinn er votur afoxast þessi efni (verða Mn^+ og Fe^{2+}) en þegar hann þornar oxast þau á ný (Mn^{2+} og Fe^{3+}) og ganga í efnasamband við OH^- eða súrefni. Á afoxaða forminu (Mn^+ og Fe^{2+}) geta þau borist með vatni frá upprunastað og fallið síðan út þar sem loftunin er nóg til að oxar þau.

Þegar járn afoxast (á formið Fe^{2+}) verður það mjög „hreyfanlegt“ (e. mobile) og berst auðveldlega um jarðveginn í vatnslausn og jafnvel út úr honum. Það sama á við um afoxað mangan (Mn^+). Við viss skilyrði getur jarðvegurinn aflitast af þessum sökum, hann verður grár á litinn (grámi, e. gleying). Afoxað járn er bláleitt og er algengt næst upptökum vatns í virkum skurðum á Íslandi, þ.e. þar sem afoxað járn seytlar með vatni út í þá (mynd 5.9).

Þar sem járn fellur út aftur myndast skærrauðir litir þegar þrígilt járn (Fe^{3+}) fellur út sem hýdroxíð, í flestum tilfellum ferrihýdrít héraendis, en það er einmitt rauði liturinn á vatni í skurðum og víðar þar sem járníð hefur komist í snertingu við afoxað vatn (mynd 5.10).



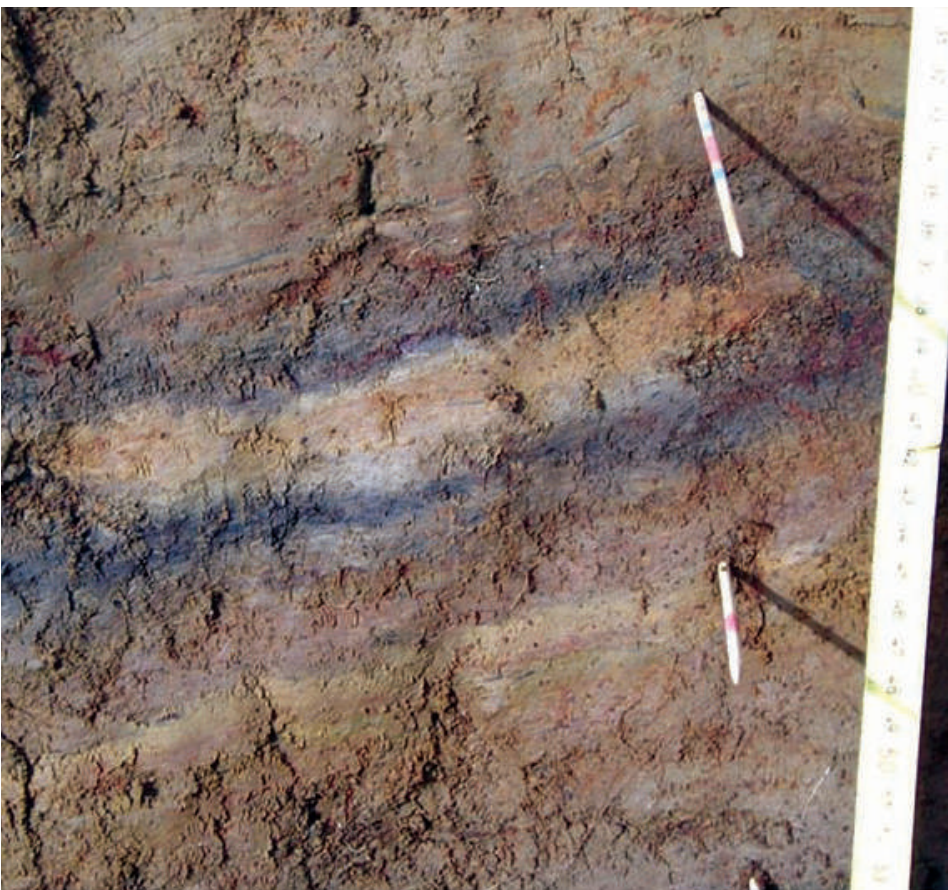
Mynd 5.8. Sýrustig (pH) og rafspenna í jarðveginum ráða á hvaða formi hin ýmsu efni eru, ekki síst Fe og Mn.



Mynd 5.9. Blátt afoxað járn (Fe^{2+}) streymir úr mold út í nýgrafinn skurð.



Mynd 5.10. Rauðlitað vatn í skurðl litað af ferrihýdríti við oxun á Fe^{++} .



Mynd 5.11. Aflituð grá mold ásamt járnútfellingum og mögulega Mn-útfellingum. Mynd: Brita Berglund.

Reyndar eru örverur og lífræn efni einnig þáttur í litnum og þau hafa áhrif á myndun ferrihýdríts. Jafnframt geta myndast dílar (e. mottles) og hnyðlingar (e. concretions) í moldinni sem hafa mun rauðari eða dekkri lit en jarðvegurinn umhverfis, sem getur jafnvel verið aflitaður (mynd 5.11).

Einnig fellur járn út í grófum, vel loftuðum jarðveglögum sem liggja á milli fínkorna laga með meiri vatnsheldni. Þetta er afar algengt á Íslandi, m.a. vegna grófra öskulaga í jarðveginum (mynd 5.12). Meira verður fjallað um votlendi á Íslandi í köflunum um íslenska mold.

Oxað mangan er iðulega litur bergs og jarðvegsyfirborðs í eyðimörkum. Þar fellur manganoxíð, sem er dökkt eða svart á litinn, smám saman út á yfirborði bergs. Oftast gerist þetta á löngum tíma. Í eyðimörkum hefur fína efnið í yfirborðinu iðulega fokið eða runnið burt í hitabeltisstormum og eftir situr malarkennt yfirborð sem gæti kallast „auðnaskrápur“ (e. desert pavement), dökk- eða svartlitaður af mangani (mynd 5.13). Mölin hindrar frekara rof. Manganliturinn útskýrir af hverju berg er víða svartlitað á yfirborðinu enda þótt það sé í eðli sínu ljóst, t.d. líparít eða kalksteinn. Oft og tíðum er auðnaskrápurinn gamall, jafnvel allt frá síðustu ísöld (Schaetzl og Thomson 2015).

Afoxunarspenna hefur áhrif á það á hvaða formi mörg helstu næringarefnin eru í jarðvegi og því er hún afar mikilvæg með tilliti til frjósemi og heilnæmi moldarinnar. Þetta á bæði við um algengustu efnin (t.d. nitur og brennistein) sem og snefilefni (t.d. selen og mólýbden). Önnur efni en súrefni taka við rafeindum (elektrónum) í jarðvegi, m.a. ýmis form niturs á borð við fimmgilt N í nitrati (NO_3^-) sem verður þrígilt N í nitríti (NO_2^-) við slík efnahvörf. Afoxunarspennan hefur því sérstaklega mikil áhrif á hringrás niturs í jarðvegi.



Mynd 5.12. Járnútfellingar í sprungu í mold þar sem járnríkt vatn hefur oxast þegar þornaði um.

5.8.4. Afoxunarspenna og mengun

Hér hefur verið lögð áhersla á algengustu jónirnar í jarðveginum, en afoxunarspenna er einnig mikilvæg fyrir oxunarstig margra annarra jóna, þeirra á meðal ýmissa mengunarefna. Sem dæmi má nefna króm (Cr). Cr^{6+} er mjög eitruð jón sem leitar auðveldlega í lausn (leysanleg), en Cr^{3+} - og Cr^{4+} -jónirnar eru ekki skaðlegar mönnum. Unnt er að afoxa Cr^{6+} -mengaðan jarðveg til þess að koma króminu á síður skaðlegt form. Hins vegar er reynt að oxa jarðveg sem er mengaður af arseni (As^{3+}) því oxað As^{5+} er ekki eins leysanlegt og afoxaða formið. Afoxunarspenna hefur einnig áhrif á leysanleika ýmissa lífrænna eiturefna, t.d. skordýraeiturs, illgresiseyðis og lífrænna leysiefna.



Mynd 5.13. Auðnaskrápur (e. desert pavement) í Sonoran-eyðimörkinni í vestanverðu Arizona-fylki (Kofa-náttúruverndarsvæðið). Fjöll úr líparíti og kalksteini í bakgrunnum eru einnig lituð af auðnaskrápi.

5.9. Votlendin

Votlendi jarðarinnar eru æði mismunandi að gerð, sem mótast af þáttum á borð við landslag og loftslag. Mörg flokkunarkerfi fyrir mold hafa sérstakan flokk eða deild fyrir votlendisjarðveg með skertan súrefnisþrýsting, oft kallaður „gleyic“ eða „aquic“ jarðvegur. Bandaríska kerfið, sem hér er notað til grundvallar fyrir jarðvegsflokka, gerir það ekki, heldur er votlendisjarðvegur (e. aquic) flokkaður sem undirflokkur af öðrum jarðvegsgerðum. Þetta er að mörgu leyti galli á kerfinu með hliðsjón af mikilvægi votlendis á jörðinni, en á hinn bóginn endurspeglar þessi aðferð vel hvað votlendismoldin er mismunandi.

Önnur mikilvæg einkenni moldarinnar, eins og þau sem móta *eldfjallajörð*, eru þá látin stýra flokkuninni, frekar en jarðvegsrakinn, sem er eðlilegt. Fjallað er um jarðvegsflokka í 9. kafla. Vísindatímarit á borð við *Wetlands* eru helguð votlendum og um þau eru til margvíslegar bækur, þ. á m. kennslubækur (t.d. Mitsch og Gooselink o.fl. 2015). Nokkuð er misjafnt hvernig votlendi eru skilgreind en þau eru talin þekja um 17 milljónir ferkílómetra, eða 13–14% yfirborðs lands á jörðinni sem ekki er þakið jöklum.

Votlendin telja jafnólík svæði og lífrænar mýrar norðurslóða (með og án sífrera), votlendi við ár og vötn, sem hafa afar mismunandi lífrænt innihald, árósasvæði, sjávarfitjar, graslendismýrar þar sem grunnvatn stendur hátt, sem og hallamýrar í rótum fjalla og fjallgarða o.fl. Votlendi freðmýrasvæðanna eru víðfeðmust (35% votlendanna) (mynd 5.14). Íslensk votlendi eru einnig mjög breytileg (sjá *Íslensk votlendi*, ritstj. Jón S. Ólafsson, 1998; einnig yfirlitsgrein ÓA o.fl. 2016).

Votlendi eru meðal mikilvægustu vistkerfa jarðar. Þau eru frjósöm, m.a. vegna mikils magns af lífrænum efnum,

og geyma afar mikinn líffjölbreytileika. Þessi breytileiki er ýktur á Íslandi vegna þess hve mósaíkin í votlendislandslaginu er fjölbreytt þar sem litlar margbreytilegar landeiningar einkenna yfirborðið. Votlendi eru eins konar svampar sem miðla vatni til vatnakerfa í stórum stíl, sem á ekki hvað síst við á meginlöndunum.

Halldór Laxness kallaði votlendin „lungu landsins“ í frægri grein þar sem fyrst var vakin athygli á óhóflegri framræslu á Íslandi. Votlendin gleypa við vatni og miðla því og koma þar með í veg fyrir flóðatoppa og jafna rennsli í ám. Það hefur aftur mikil áhrif á lífið í vatnakerfunum, auk þess sem votlendi ljá næringu og miðla hita. Votlendin meðfram ám eru náttúrlegir flóðagarðar og við áróšana vernda þau strandlínurnar.

Votlendin eru risastórir geymar kolefnisforða sem við framræslu losnar úr læðingi: þau losa þá gríðarlegt magn gróðurhúsalofttegunda vegna oxunar kolefnis, eins og fjallað er um í kafla 2.2.

Votlendi miðla vatni þvert á landamæri þjóða og þau eru ennfremur viðkomustaðir fugla á alþjóðleguflakki þeirra: þau hafa alþjóðlega þýðingu. Mörg votlendi á jörðinni njóta alþjóðlegrar verndar samkvæmt Ramsarsamningnum um verndun alþjóðlegra mikilvægra votlenda. Á Íslandi voru sex Ramsarsvæði árið 2021: Andakíll, Grunnafjörður, Guðlaugstungur, Mývatn og Laxá, Snæfells- og Eyjabakkasvæðið og Þjórsárver. Votlendi eru víða vernduð fyrir raski með landslögum, m.a. að hluta til á Íslandi. Lögsóknir gegn þeim sem raska votlendum, m.a. með nýjum íbúðarbyggðum, færast nú í vöxt, t.d. í Bandaríkjunum. Fjallað er um votlendi víðar í þessu riti eftir því sem við á, m.a. í kaflanum um lífræn efni, kaflanum um íslenskan jarðveg og í umfjöllun um kolefni og loftslag.



Mynd 5.14. Orravatsrústir eru votlendi með vötnum og freðmýrarústum (ískjarnar) á hálendinu norðaustan við Hofsjökul. Þarna eru afar margbreytilegar vistgerðir og dýralíf fjölbreytt. Flest rústasvæði landsins njóta sérstakrar verndar (sjá 16. kafla um frost og kulferli). Rauðlitað vatnið í forgrunni er ferrihýdrít o.fl. efni gerð af oxuðu járni sem er ættað úr moldinni umhverfis.

Heimildir

Í þessari stuttu umfjöllun var stuðst við almennar kennslubækur í jarðvegsefnafræði, svo sem eftir Lindsay (1979), Sposito (1989) og Bohn o.fl. (1979), en einnig nokkra kafla í „Handbook of Soil Science“ (Huang o.fl. 2012), „Encyclopedia of Soil Science“ (Lal, 2007), „Encyclopedia of Soils in the Environment“ (Hillel, 2005), „Encyclopedia of Soil Science“ (Chesworth, 2008) og kennslubók Weil og Brady (2017).

Benda má á góða yfirlitskafla um afoxunarspennu eftir Bouma (1983), McDaniel (2002), James (2002) og James og Bartlett (2000) og kennslubækur í jarðvegsefnafræði, svo sem eftir Lindsay (1979), Sposito (1989), Bohn o.fl. (1979) og Tatabani o.fl. (2005).

Bohn, H.L., B.L. McNeal og G.A. O'Connor 1979. Soil Chemistry. John Wiley, New York, USA.

Bouma, J. 1983. Hydrology and soil genesis of soils with Aquic moisture-regimes. Í: L.P. Wilding, N.E. Smeck og G.F. Hall (ritstj.): Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Developments in Soil Science 11A, Elsevier, Amsterdam, Holland. Bls. 253–281.

Chesworth, W. 2008. Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, Holland.

Hillel, D. (ritstj.). 2005. Encyclopedia of Soils in the Environment. Elsevier, Amsterdam, Holland.

Huang, P.M., Y. Li og M.E. Sumner (ritstj.) 2012. Handbook of Soil Science. 2. útg. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA.

James, B.R. 2002. Redox Phenomena. Í: R. Lal (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science, Dekker, New York, USA. Bls. 1098–1100.

James, B.R. og R.J. Bartlett 2000. Redox phenomena. Í: M.E. Sumner (aðalritstj.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, USA. Bls. B-169–194.

Jón S. Ólafsson (ritstj.) 1998. Íslensk votlendi. Verndun og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.

Lal, R. (ritstj.) 2002. Encyclopedia of Soil Science, Dekker, New York, USA.

Lindsay, W.L. 1979. Chemical Equilibria in Soils. Wiley, New York, USA.

Magnús Á. Sigurgeirsson, Ólafur Arnalds, Sigurður Emil Pálsson, B.H. Howard, Kjartan Guðnason. 2005. Radiocaesium fallout behaviour in volcanic soils in Iceland. Journal of Environmental Radioactivity 79:39–53.

McDaniel, P.A. 2002. Anaerobic processes. Í: R. Lal (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science, Dekker, New York, USA. Bls. 60–63.

Mitsch, W.J. og J.G. Gosselink. 2015. Wetlands. John Wiley & Sons, New Jersey.

Ólafur Arnalds, Hlynur Óskarsson, Jón Guðmundsson, Sigmundur Helgi Brink og Fanney Gísladóttir 2016. Icelandic inland wetlands: Characteristics and extent of draining. Wetlands 36:759–769.

Schaetzl, R.J. og M.L. Thompson 2015. Soils. Genesis and Geomorphology. 2. útg. Cambridge University Press, New York, USA.

Sposito, G. 1989. The Chemistry of Soils. Oxford University Press, Oxford, UK.

Tatabani, M.A. og D.L. Sparks (ritstj.). 2005. Chemical processes in soils. Soil Science Society of America SSSA Book Series 8. Madison, Wisconsin, USA.

Veronique Maria og Ólafur Arnalds 2019. Soil Genesis. A Dialogue for Creation. In: Dialogues on Soil and Art in the Anthropocene (A. Toland, J.S. Noller og G. Wessolek ritstj.). CRC Press / Francis Taylor, New York. Bls. 127–135.

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

