

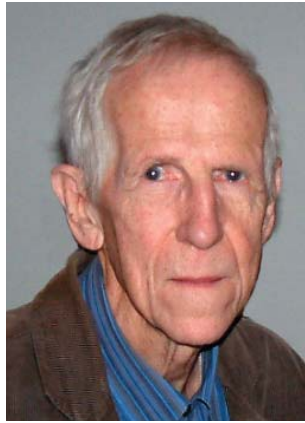
Friðrik Pálmason

Plöntunæringar- og áburðarfræði



Friðrik Pálmason

Plöntunæringar- og áburðarfræði



Höfundur bókarinnar Friðrik Pálmar Pálmason er fæddur þann 16. apríl 1935 í Reykjavík. Friðrik er cand. agro. 1960 og lic. agro. 1965 frá Landbúnaðarháskólanum í Kaupmannahöfn.

Störf: Sérfræðingur við Rannsóknastofnun landbúnaðarins 1967-77 og 1981-2005. Kennari við Búvísindadeild Bændaskólans á Hvanneyri 1965-66 og 1977-81, forstöðumaður Rannsóknastofu Bændaskólans á sama tíma. Kenndi plöntulífeðlisfræði við líffræðiskor verkfræði- og raunvísindadeildar HÍ 1967-76.

Félagsstörf: Varaformaður Íslandsdeildar Norræna Búvísindafélagsins (Nordiske Jordbrugsforskeres Forening, NJF) 1968-76. Fulltrúi Íslands í stjórn jarðvegsskorar NJF 1972-80. Form. Félags íslenskra náttúrufræðinga 1969-70.

Ritstörf: Auk licentiatritgerðar um sextíu greinar og ritgerðir á fræðasviði höfundar Í ritnefnd Búnaðarblaðsins 1965-68 og Íslenskra landbúnaðarrannsókna 1969-73. Ritstjóri Búvísinda. Icelandic Agricultural Sciences 1988-2002.

Útgefandi:
Landbúnaðarháskóli Íslands.

1. útgáfa í maí 2013
ISBN 13 978-9979-881-19-3
Bók þessa má eigi afrita með neinum
hætti nema með leyfi útgefanda.

PLÖNTUNÆRINGAR- OG ÁBURÐARFRÆÐI

Efnisyfirlit

PLÖNTUNÆRINGAR- OG ÁBURÐARFRÆÐI	4
FORMÁLI	4
<i>Heimildir</i>	5
BROT ÚR SÖGU OG ÞRÓUN EFNAFRÆÐI OG LÍFÆDLISFRÆÐI TILLÍFUNAR.....	6
<i>Þróun hugmynda um frumefnin</i>	6
<i>Efnafræði nútímans í móttun</i>	11
<i>Heimildir um frumefni og sögu efnafræðinnar</i>	32
LEITIN AÐ SKÝRINGUM Á VEXTI PLANTNA.....	34
<i>Humuskenningin</i>	34
<i>Þróun hugmynda um vatn og vöxt plantna</i>	34
<i>Tilraun van Helmonds og skýring á vexti plantna</i>	34
<i>Sölt og jarðvegur mikilvæg fyrir vöxt plantna</i>	36
<i>Ljóstillífun kolefnis skýrð</i>	44
FÆÐUÖFLUN, FÓLKSFÖLGUN OG ÁBURÐARNOTKUN.....	53
<i>Heimildir um Malthus kenninguna</i>	54
RÆTUR PLÖNTUNÆRINGARFRÆÐINNAR.....	55
<i>Steinefnakenningin og lágmarkslögmálið</i>	57
<i>Lögmálið um minnkandi vaxtarauka</i>	62
<i>Tilraunstarfsemi eflist, nútímaþekking á plöntunæringu móttast</i>	66
PLÖNTUNÆRINGAREFNIN.....	76
<i>Næringarlausnir</i>	77
<i>Þróun rannsókna á plöntunæringarefnum</i>	79
SAGA PLÖNTUNÆRINGAR- OG ÁBURÐARFRÆÐI Á ÍSLANDI.....	106
EÐLIS- OG EFNAEIGINLEIKAR ÍSLENSKS JARÐVEGS OG JARÐVEGSEFNAGREININGAR FYRIR ÁBURÐARLEIÐBEININGAR.....	110
FERLI OG NÝTANLEIKI PLÖNTUNÆRINGAREFNA Í ÍSLENSKUM JARÐVEGI.....	114
<i>Afrennsli og útskolun</i>	114
<i>Áburðarnotkun, sýrustig og nýtanleiki plöntunæringarefna í jarðvegi</i>	115
<i>Níturbúskapur í jarðvegi og plöntum</i>	117
<i>Umsetning plöntuleifa í jarðvegi. Norræna NIR verkefnið</i>	122
<i>Níturnám úr lofti</i>	141
FOSFÓR Í JARÐVEGI.....	168
<i>Fosfórforði í jarðvegi, lifrænn og umskiptanlegur fosfór</i>	168
TILRAUNIR MEÐ FOSFÓRÁBURÐ.....	171
<i>Tilraun á Sámsstöðum í Fljótshlíð</i>	171
<i>Tilraunir í Dalasýslu</i>	173
TILRAUNIR MEÐ KALÍÁBURÐ.....	176
AÐFERÐIR VIÐ MAT Á KALÍ- OG FOSFÓRÞÖRF Í TÖNUM. YFIRLIT.....	177
BRENNISTEINSPÖRF Í JARÐRÆKT.....	178
SNEFILEFNI Í JARÐVEGI, PLÖNTUM OG NÆRINGU BÚFJÁR.....	181
<i>Kölkun, sýrustig í jarðvegi og snefilefni</i>	181
<i>Kjörmörk, skortsmörk og eitrunarmörk snefilefna í plöntum</i>	184
<i>Snefilefni í heysýnum og þarfir búfjár og plantna fyrir snefilefni</i>	185
TILBÚINN ÁBURÐUR OG ÁBURÐARNOTKUN.....	192
<i>Vaxtarauki eftir áburð og árferði</i>	192
<i>Dreifingartími áburðar</i>	192
BÚFJÁRÁBURÐUR.....	194
<i>Nýting búfjáráburðar</i>	194
<i>Yfirbreiðsla búfjáráburðar</i>	195
<i>Niðurfelling búfjáráburðar</i>	195
<i>Langtímaáhrif búfjáráburðar</i>	196
EFNAJÖFNUÐUR BÚSKAPAR.....	198
<i>Kúabú</i>	199

<i>Sauðfjárnú</i>	202
ÁBURÐARLEIÐBEININGAR.....	203
<i>Almennar leiðbeiningar og áburðaráætlanir</i>	203
<i>Tölvuforrit fyrir áburðarleiðbeiningar</i>	204
<i>Jarðvegsefnagreiningar</i>	204
<i>Þróun áburðarleiðbeininga í túnrækt og kornrækt</i>	204
HEIMILDIR.....	209
MYNDASKRÁ.....	221
VIÐAUKAR.....	223
1. <i>Næringarlausnir</i>	223
2. <i>Kvarðar fyrir vatnspennu í jarðvegi</i>	224
3. <i>Kolefni og nítur í lífrænum efnum plöntuleifa (van Soest flokkun)</i>	225
4. <i>Heildar C og N og C/N hlutfall í plöntusýnum</i>	226
5. <i>Aðferðir við mælingar á níturlosun</i>	227
6. <i>Aðferðir við útreikninga á níturlosun í jarðvegi</i>	228
7. <i>Niðurbrot kolefnisforða plöntuleifa</i>	230

PLÖNTUNÆRINGAR- OG ÁBURÐARFRÆÐI

Formáli

Nú á árinu 2013eru liðin 35 ár frá því að *Áburðarfræði Magnúsar Óskarssonar og Matthíasar Eggertsonar* kom út. Efni þessa rits kemur ekki í stað Áburðarfræðinnar en er að því leyti viðbót við Áburðarfræðina frá 1978 að í seinni hlutanum er greint frá íslenskum rannsóknum síðustu áratuginna, sem snerta áburðarnotkun og plöntunæringarefni í jarðvegi og plöntum og nítuvinnslu úr lofti.

Í fyrsta köflunum er fjallað um sögu plöntunæringarfræði og skyldra greina á alþjóðavísu, og er að mestu stuðst við erlendar heimildir.

Á 19. öld varð mikil umbreyting í þeirri fræðigrein, sem þá var nefnd landbúnaðarefnafræði. Sir Humphry Davy er líklega sá sem fyrstur notaði þetta heiti í bók sinni 1813, *Elements Of Agricultural Chemistry In A Course Of Lectures, 1813*. Öllu þekktari varð þó bók Justus von Liebig frá 1840: Um notkun lífrænnar efnafræði í landbúnaði og lífeðlisfræði (*Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie*, í enskri útgáfu frá 1847: *Chemistry in its application to agriculture and physiology*)¹.

Með tímanum skiptist landbúnaðarefnafræðin í jarðvegsfræði (e. soil science), plöntunæringu og áburðarfræði (e. plant nutrition, soil fertility, fertilizers techniques) og næringarfræði dýra og fôðurfræði (e. animal nutrition, animal feeding), en í öllum þessum greinum eru grunngreinarnar efnafræði, eðlisfræði og lífeðlisfræði mikilvægar. Browne (1944) fjallar ítarlega um þróun landbúnaðarefnafræðinnar í *A source book of agriculture*.²

Áhugaverð tenging sögulegs yfirlits hugmynda um plöntunæringu, áburðarnotkun og sögu mismunandi búrekstursforma allt fram til fyrsta áratugar 21. aldar við mótun á sjálfbærum landbúnaði til framtíðar í grein Fossards o. fl. 2009 (*Concepts and practises of nutrient management in agro-ecosystems: Can we draw lessons from history to design future sustainable agricultural production systems*) er gott vitni um mikilvægi þess að þekkja sögu búvísinda og búrekstar.

Plöntunæringarfræði fjallar um vöxt og næringu plantna á grundvelli plöntulífeðlisfræði og jarðvegsfræði. Henni má skipta í fræðilegan hluta (plöntunæring) og tæknilegan (áburðarfræði). Upphafleg markmið voru að auka og bæta uppskeru nytjajurta, en á síðari hluta 20. aldar hefur komið til áhersla á umhverfisvæna ræktun og ekki síst með það markmið að takmarka sem mest má verða tap plöntunæringarefna úr jarðvegi í grunnvatn og andrúmsloft.

Seinni hluti þessa rits greinir frá rannsóknum hér á landi á plöntunæringarefnum í jarðvegi og plöntum og tilraunum með áburð og um áburðarleiðbeiningar frá undanförunum áratugum. Umfjöllun um þessi efni er þó langt frá því að vera tæmamdi en er einkum um þær rannsóknir sem höfundur eru helst kunnugar.

¹ <http://www.scs.illinois.edu/~mainzv/exhibit/liebig.htm>

² Browne (1944). A source book of agriculture
http://books.google.com/books?id=B8wJAop_EBUC&printsec=frontcover&hl=is#v=onepage&q=&f=false

Flestar íslensku greinanna, sem vitnað er í, má nálgast í greinasafni landbúnaðarvefsins landbunadur.is. Ýmsar aðrar greinar og jafnvel bækur (t.d bók Russells *Soil conditions and Plant Growth* í útgáfu frá 1915)³ má nálgast á veraldarvefnum eða með Google leitarvélinni, sjá tilvitnanir neðanmáls og í heimildaskrá.

Tilraunum með áburð og rannsóknum þeim tengdum fjölgaði mjög með tilkomu tilraunastöðva í öllum landsfjórðungum um miðja síðustu öld og vaxandi notkun tilbúins áburðar samfara áburðarframleiðslu innanlands. Mikið hefur birst af greinum unnum úr gögnum tilrauna frá miðri 20. öld og fram á þennan dag ekki síst langtímatilraunum bæði með búfjáráburð og tilbúinn áburð. Einnig hafa síðustu þrjá áratugin bæst við ný viðfangsefni, til dæmis varðandi áhrif veðurfarsþátta á grasprettu og tengsl þeirra við áburðarnotkun og varðandi umsetningu plöntunæringarefna í jarðvegi og plöntum og níturám belgjurta. Þá má nefna að aðferðir við leiðbeiningar um áburðarnotkun hafa tekið ýmsum breytingum.

Heimildir

Browne CA. 1944. A source book of agricultural chemistry. Í Chronica Botanica ritstj. F. Verdoorn. The Chronica Botanica Co. , Waltham MA.

Davy, Sir Humphry (1813). Elements Of Agricultural Chemistry In A Course Of Lectures. London: Longman.

Fossard Emmanuel, Else Bünemann , Jan Jansa, Astrid Oberson (2009): Concepts and practises of nutrient management in agro-ecosytems: Can we draw lessons from history to design future sustainable agricultural production sysems. Die Bodenkultur 60 (1)43-60.

von Liebig Justus 1840. Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie. Ensk þýðing 1847: Chemistry in its application to agriculture and physiology. Philadelphia 1847.

Magnús Óskarsson og Matthías Eggertson (1978). Áburðarfæði. Útg. Búnaðarfélag Íslands.

Russell Edward J. 1915. Soil Conditions and Plant Growth, 2. útgáfa 1915. Longmans, Green and Co. London (<http://www.archive.org/details/plantgrowth00russrich>).

³ Russell, Edward John (1915) Soil Conditions and Plant growth
<http://www.archive.org/details/plantgrowth00russrich>

Brot úr sögu og þróun efnafræði og lífeðlisfræði tillífunar

Í hinum fornu menningarlöndum notuðu menn áburð af margvíslegu tagi til þess að viðhalda frjósemi jarðvegs, svo sem plöntuleifar, grænaburð, tað, mykju og kalk, auk þess áveitur. Þekking á ræktun nytjajurta byggð á hagnýtri reynslu hefur þá þegar verið talsverð.

Hins vegar voru efnafræðilegar hugmyndir fábrotnar allt frá dögum forngríkkja fram á 18 öld. Frumefni voru lengst af talin fjögur eldur, loft, vatn og jörð eða fram yfir miðja 17. öld, þegar eðlisfræðingurinn Robert Boyle gaf út bók sína *The Sceptical Chymist*. Sama má segja um þekkingu á næringu og vexti plantna. Humuskenning Aristotelesar (384-322 f. Kr.) um mold sem uppruna lífrænna efna í plöntum hélt velli á miðöldum og í meginatriðum fram til 1840, þegar sú kenning var endanlega lögð að velli með bók Liebigs um lífræna efnafræði í landbúnaði og lífeðlisfræði (*Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie*).

Þróun hugmynda um frumefnin.

Á sama hátt og hagnýt kunnátta í landbúnaði var fremri fræðilegri þekkingu á því sviði í upphafi sögulegs tíma og allar aldir fram á 19 öld, kunnu menn til forna til verka við margvíslega framleiðslu án þess að þeirri kunáttu væri gerð fræðileg skil.

Litun, sýtun, bronsvinnsla, glergerð og sápugetur eru dæmi um störf, sem talið er að hafi í fornöld verið í höndum þræla, en fræða- og vísindastörf voru viðfangsefni yfirstéttar sem leit ekki svo lágt að tengja fræðakenningar og hugmyndir við hagnýt störf. Heimspeki, stjórnmál og stærðfræði voru helstu viðfangsefni fræðanna, Carnegie (1894).⁴

Á dögum forngríkkja settu heimspekingar fram kenningar um samsetningu og eðli alls efnis og þær eru upphafið að hægfare þróun til raunvísinda nútímans, þar á með efna- og lífeðlisfræðinnar.

Thales frá Miletus (624-546 f. kr) fyrsti gríski heimspekingurinn, vísindamaðurinn og stærðfræðingurinn, sem kunnugt er um, taldi að allt efni ætti uppruna sinn í vatni, sem minnir á nútíma hugmyndir um uppruna lífrænna efna og fyrstu lífsforma í hafsjó upphafsalda lífs.⁵ Á þessum tíma var talið að allir hlutir náttúrunnar ættu uppruna í einu grundvallarefni.

Anaximander (610 – 546 f.Kr.) sem einnig var frá Miletus taldi að öll efni ættu einn uppruna en að grundvöllur allra efna (gr. *Archê, e. principle*) gæti ekki verið vatn heldur væri það óskilgreint eða án takmarkana (gr. *Apeiron, e. the indefinite, eða the infinite*) Cohen 2002.⁶ Grundvallarefnið varð að vera hlutlaust og mátti ekki því hafa eiginleika frumefnanna (jörð, loft, eldur og vatn) og gat ekki búið yfir andstæðum eiginleikum (heitt/kalt og rakt/þurrt). Vatn kom því ekki tilgreina auk þess sem magn þess var takmarkað.

Anaximenes (494 f. Kr.) skýrði umbreytingar frumefnanna fjögurra á þá leið að grunnvallarefnið væri loft og eldur væri þynnt loft, en við þéttingu lofts myndaðist vatn og við frekari þéttingu myndaðist jarðvegur og loks steinn við þéttingu jarðvegs.

⁴Carnegie, Douglas (1894) *Law and Theory in Chemistry: A Companion Book for Students*
<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Empeocles.html>

⁵Thomas Knierim: *Greek Philosophy*0,

<http://www.thebigview.com/download/greek-philosophy.pdf>

⁶Lecture notes by S. Marc Cohen. Focuses on the relation of Anaximander's thought to that of Thales.
<http://faculty.washington.edu/smcohen/320/anaximan.htm>

Heraclitus (um 500 f.Kr.) áleit að allt væri frá eldi komið. Þeir sem aðhyllust hugmyndina um einn upprunalegan grundvöll efna voru að þessu leyti einhyggjumenn (monistar) en aðrir aðhylltust fjölhyggju (pluralistar) og gerðu ráð fyrir fleiri upprunalegum efnum, Graham 2008⁷:

The standard view of Heraclitus' ontology since Aristotle is that he is a material monist who holds that fire is the ultimate reality; all things are just manifestations of fire. According to Aristotle the Milesians in general were material monists who advocated other kinds of ultimate matter: Thales water, Anaximander the boundless, Anaximenes air (Metaphysics 983b6-984a8). So Heraclitus' theory was just another version of a common background theory.

Empedocles 492-432 f.Kr. varð fyrstur grísku heimspekinganna til að halda því fram að upprunaleg frumefni væru fjögur jörð, loft, eldur og vatn, en ekki væri um að ræða eitt upprunalegt frumefni sem önnur væru mynduð af, O'Connor og Robertson 2000⁸:

Empedocles did not base his four element hypothesis on any experimental evidence. He did base some other scientific ideas on experiment, however, and he showed by experiment that air existed and was not empty space. He did this with a clepsydra, a vessel with a hole in the bottom and one in the top. Placing the bottom hole of the vessel under water, Empedocles observed that the vessel filled up with water. If, however, he put his finger over the top hole, then the water did not enter the hole at the bottom but it did once he removed his finger. Empedocles correctly deduced that the air in the container prevented the water entering.

Þannig var þekking manna í fornöld á jarðvegi, lofti og vatni, en í byrjun miðalda koma fram aðrar hugmyndir um frumefni sem má segja að standi nær nútíma hugmyndum efnafræðinnar.

Grísku heimsspekingarnir **Anaxagóras (um 500-428 f. Kr.)**, **Leucippus (um 440 f. kr.)** og **Demókrítos (460-370 f. Kr.)** settu fram nismunandi hugmyndir um minnstu efnisagnir, gjörólíkar hugmyndunum um frumefnin fjögur.⁹

Anaxagóras hélt því fram að öllu efni mætti skipta óendanlega oft í smærri einingar. Í minnstu einingunum væru öll frumefni í mismunandi mæli. Eiginleikar hvers efnis réðust af hlutföllum frumefna í þessum minnstu efniseiningum.

Hugmyndin um frumeindir (atóm) er frá þeim Leucippus og Demókrítos komin.⁴ Demócrítos var nemandi hins fyrrnefnda en mun meira er vitað um Demócrítos en kennarann. Þeir héldu því fram að náttúran samanstæði af efni gerðu úr örsmáum einingum sem þeir nefndu atóm og tómi umhverfis efnið. Leucippus og Demókrítos álitu að það væri fjöldi mismunandi gerða af atómum og þau hreyfðust tilviljanakennt eins nútíma eðlisfræði gerir ráð fyrir hvað varðar hreyfingar sameinda í lofttegundum (e. kinetic theory). Að ýmsu leyti voru hugmyndir þeirra um gerð atómanna fjarri efna- og eðlisfræði nútímans. Þeir töldu að atómin væru þéttur massi, óskiptanleg og svo heilsteypt að ekki væri unnt að sundra þeim. Þótt þessar

⁷ Graham, Daniel W., "Heraclitus", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2008 Edition)*, Edward N. Zalta (ed.), <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/heraclitus/>

⁸ O'Connor J J and E F Robertson 2000. Empedocles of Acragas <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Empedocles.html>

⁹ Knierim Thomas: Greek Philosophy <http://www.thebigview.com/greeks/democritus.html>

fullyrðingar um atómin sem órjúfanlegar einingar hafi ekki staðist, höfðu þó atómistarnir í meginatriðum rétt fyrir sér.

Aristoteles (384-322 f. Kr.) tengdi ákveðna eiginleika við frumefnin fjögur¹⁰:

Eldur er heitur og þurr.

Loft er heitt og fljótandi (eða rakt).

Vatn er kalt og fljótandi.

Jörð er köld og þurr.

Í hverju frumefni er einn eiginleiki ríkjandi að áliti Aristotelesar, þurrkur í jörð, kuldi í vatni, hiti í eldi og í lofti er fljótandi eiginleiki ríkjandi. Hann taldi að frumefnin gætu breyst hvert í annað vegna sameiginlegra eiginleika: eldur í loft vegna hitans, loft í vatn vegna fljótandi eiginleika. Tvö frumefni gætu breyst í það þriðja, til dæmis gætu eldur og vatn breyst í jörð með því að sameina kulda og þurrk. Takmarkanir á ummyndun frumefna væru að gagnstæðir eiginleikar gætu ekki sameinast t.d. ekki hiti og kuldi. Öll efni væru mynduðu af frumefnunum fjórum en í mismunandi hlutföllum.

Alkemía (e. alchemy) sem nefnd hefur verið gullgerðalist er ævagömul og elstu heimildir eru frá Austurlöndum nær á tölum frá 13. öld f.Kr. sem lýsa gerð silfurs úr blöndu af kopar og bronsi.¹¹ Heitið alchemy er samsett úr al ákveðnum greini í arabísku og *kīmiyā'* á grísku *khēmia*, *khēmeia listin að ummynda málma*.¹²

Heimild um alkemíu frá tímum Hellena í Alexandríu í Egyptalandi líklega frá því um 200 f. Kr. er *Physica et Mystica* eftir Bolos Democritos frá Mendes. Alkemía í hinni fornu Alexsandríu var byggð á grískri heimspeki og hefðbundnu handverki.

Blómadagar alkemíu voru frá 800 e. Kr. fram á miðja 17. öld. Undir lokin voru þessi fræði orðin illskilgreinanleg blanda af trú á umbreytingu frumefna (transmutation), tilraunum til að framleiða lyf og leit að ráðum til að lengja lífið og dulspeki. Iðkendur alkemíu álitu hana grundvöll rannsókna á náttúrunni. Tilraunir til gullgerðar og myndunar annarra eðalmálma með umbreytingu úr öðrum verðminni málum var eitt af mörgum viðfangsefnum alkemista.

Auk hugmyndarinnar um frumefnin fjögur var önnur hugmynd í alkemíu um þrjú svonefnd grundvallarefni (e. principles), kvikasilfur sem stóð fyrir fljótandi ástand (e. fluidity), þyngd og málmeiginleika, brennisteinn fyrir eldfimi og salt fyrir eiginleika fastra efna.

Meðal fylgismanna alkemíufræða í Evrópu voru heimspekkir einstaklingar eins og [Roger Bacon](#), [Tycho Brahe](#) Saint [Thomas Aquinas](#), [Isaac Newton](#) og Thomas Browne.¹³

Theophrastus von Hohenheim öðru nafni **Paracelsus (1493-1541)** svissneskur læknir og alkemisti hefur verið talinn faðir seinni tíma lyfjafræði, þrátt fyrir trú sína á grundvallarefni þrjú. Hann hélt því fram að hlutverk alkemíu væri ekki að búa til gull heldur lyf. Hann hafnaði eldri kenningum læknisfræði um að orsakir sjúðóma væri ójafnvægi milli fjögurra líkamssafa (slíms, svarta gallvökvans, gula gallvökvans og blóðsins) og taldi að hver

¹⁰ Holmyard, Eric John (1990). Alchemy.

¹¹ Sheppard, Philip (1968). Alchemy Charles Scribner's Sons New York

¹² Oxford dictionaries. <http://oxforddictionaries.com/definition/english/alchemy>

¹³ Wikipedia grein frá 2012:

http://en.wikipedia.org/wiki/Alchemy#Relation_to_the_science_of_chemistry

sjúkdómur ætti sérstakar orsakir, þar á meðal ytri orsakir. Hann greindi sjúkdóm í öndunarferum hjá námuverkmönnum og náði miklum árangri í lækningum.¹⁴ Á sama hátt og Paracelsus er talinn brautryðjandi í lyfjafræði seinni tíma er viðurkennt að í alkemíunni hafi falist vísir að nútíma raunvísindum, þrátt fyrir þá dulspeki og ýmsar hugmyndir sem teljast fáránlegar nú á tímum.

Ritsafn **Joan's Baptista van Helmont (1579-1644)** *Ortus medicinae* (Uppruni læknisfræðinnar) var gefið út að honum látnum 1648. Bókin er talin marka viss tímamót milli alkemíu og efnafræði, þó svo að Helmont hafi verið hallur undir dulspeki og alkemíu, þá vísuðu aðferðir hans við tilraunir fram á við. Síðar verður skýrt frá tilraun hans til að skýra vöxt plantna. Hann kom tilraunum sínum þar fyrir, sem hægt var að vissu marki að hafa stjórn á breytilegum stærðum. Notkun hans á afmörkuðum eða einangruðum kerfum og viðleitni til að nota magnmælingar hefur verið talið lýsa best framlagi hans til nútíma tilraunstarfs.¹⁵

Helsta framlag van Helmonts til efnafræðinnar voru rannsóknir á lofttegundum. Hann brenndi 61 pund af eikarkolum og eftir var 1 pund af ösku og ályktaði af mismunurinn væri lofttegund sem hann nefndi „gas sylvestris“, og vísaði með sylvestris til þess að lofttegundin hafði losnað úr trjávið. Helmont skrifar að hann gefi þessarri lofttegund nafnið gas og ekki sé hægt að hemja það í íláti eða gera það sýnilegt. Í enskri þýðingu og latneskum texta van Helmonts:

„I call this spirit, hitherto unknown, by the new name of gas, which can neither be retained in vessels nor reduced to a visible form, unless the seed is first extinguished“

„Hunc spiritum, incognitum hactenus, novo nomine Gas voco, qui nec vasis cogi, nec in corpulus visibile reduci, nisi extinctoprius semine, podest“

Partington (1936)

Síðasti hluti setningarinnar („... unless the seed is extinguished“) vísar til þess að van Helmont trúði því að hægt væri að breyta lofttegundinni í vatn (eitt af frumefnunum fjórum samkvæmt alkemíu) með því að eyða einhverjum kjarna („seed“) sem væri til staðar eftir bruna viðarkolanna. Þarna eru enn til staðar leifar af kreddum alkemíunnar, þó að van Helmont hafi hins vegar gert sér grein fyrir varðveislu massans við efnabreytingar og að því leyti verið á undan sinni samtíð.

Þessa sömu lofttegund og van Helmont skýrði „gas sylvestre“ nefndi Joseph Black seinna bundið loft („fixed air“) enda hafði hann losað koltvísýringinn úr kalki við upphitun. Helmont flokkaði lofttegundir eftir uppruna en í sumum tilvikum var um sömu lofttegund að ræða með mismunandi uppruna, 1. tafla.

1. tafla. Gastegundir van Helmont's samkvæmt Partington (1936), Thorburn Burns og Deelstra (2008), Cardillo (2001)

Gas ventosum (andrúmsloft)
Gas sylvestris (frá bruna viðarkola CO, CO ₂)
Gas carbonum (frá kolabruna CO og CO ₂)

¹⁴Thomas Seilnacht <http://www.seilnacht.com/chemiker/chepara.html>
Weisstein Eric W., 1996-2007 <http://scienceworld.wolfram.com/biography/Paracelsus.html>

¹⁵ Ducheyne, Steffen 2005, sjá heimildaskrá

Gas musti (frá alkóhólgerjun, CO₂)
 Lofttegund frá heilsulindum (ölkelduvatn; CO₂)
 Gas sulphuricum (frá bruna brennisteins SO₂)
 Gas pingue (innyflagas H₂, CH₄, H₂S . . .)
 Lofttegundir myndaðar við rotnun (H₂, CH₄, H₂S . . .)
 Rautt eiturgas (NO₂ myndað af áhrifum aqua fortis (HNO₃) á silfur)
 Lofttegund (Cl₂) myndað af aqua fortis (HNO₃) og salammoniac (NH₄Cl)

Hugmyndin um frumefnin fjögur eld, loft, vatn og jörð vék ekki fyrir frumeindakenningu Demókrítosar. Frumefnin voru talin fjögur allt fram á 17 öld, þegar efna- og eðlisfræðingurinn **Robert Boyle (1627-1691)**^{16, 17} setti fram nýjar hugmyndir í bók sinni *The Sceptical Chymist* 1661. Þær hugmyndir þróaði hann áfram í *Origin of Forms and Qualities* (1666).

Boyle véfengdi kröftuglega kreddukenningar um frumefnin fjögur og grunnefnin þrjú, brennisteins kvikasilfur og salt („*the doctrines of the four elements and the three chemical principles of mixed bodies*“). Skilgreiningar hans á frumefnum voru í meginatriðum nútímalegar. Frumefnin taldi hann vera agnir ('corpuscles') mismunandi gerðar og stærðar, sem raða sér saman í efnasambönd. Efnasamböndin væri hægt rjúfa í sundur¹⁸.

„Boyle was an advocate of corpuscularism, a form of atomism that was slowly displacing Aristotelian and Paracelsian views of the world. Instead of defining physical reality and analyzing change in terms of Aristotelian substance and form and the classical four elements of earth, air, fire, and water—or the three Paracelsian elements of salt, sulfur, and mercury—corpuscularism discussed reality and change in terms of particles and their motion. Boyle believed that chemical experiments could demonstrate the truth of the corpuscularian philosophy. In this context he defined the term element in *Sceptical Chymist* (1661) as “. . . certain primitive and simple, or perfectly unmingled bodies; which not being made of any other bodies, or of one another, are the ingredients of which all those called perfectly mixt bodies are immediately compounded, and into which they are ultimately resolved.”

Chemical Heritage Foundation. Chemistry in History. Robert Boyle.¹⁹

„Boyle is often referred to as the father of modern chemistry; he separated chemistry from alchemy and gave the first precise definitions of a chemical element, a chemical reaction, and chemical analysis. He also made studies of the calcination of metals, combustion, acids and bases, the nature of colors, and the propagation of sound. Although he was especially noted for his experimental work, Boyle also contributed to physical theory, supporting an early form of the atomic theory of matter, which he called the corpuscular philosophy, and using it to explain many of his experimental results. His extensive writings contributed greatly to the dominance of the mechanistic theory following Newton's work. Boyle was one of the group at Oxford that later became the Royal Society, but he refused the presidency of the society in 1680, as well as many other honors.“

The Columbia Electronic Encyclopedia, 6th ed. Copyright © 2007, Columbia University Press.²⁰

¹⁶ "Boyle, Robert." *Complete Dictionary of Scientific Biography*. 2008. Retrieved September 12, 2012 from Encyclopedia.com: <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830900586.html>

¹⁸ Gascoigne, Bamber. "History of Chemistry, HistoryWorld. From 2001, ongoing. <http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?historyid=ac20>

¹⁹ Chemical Heritage Foundation. Chemistry in History. Robert Boyle.

Phlogiston kenningin

Tvö efnaferli, bruni og ryðmyndun, urðu efnafræðingum tilefni til skýringa með tilgátum á 18.öld,²¹:

Johann Joachm Becher (1635-1682) setti 1667 fram hugmynd til skýringar á efnabruna. Við brunann átti losna efni, sem Becher nefndi terra pinguis (feit jörð). Nemandi Bechers Georg Ernst Stahl (1660-1734) útfærði hugmyndina nánar og efnið sem átti að losna við brunann fékk heitið phlogiston í staðinn fyrir terra pinguis. Phlogiston (úr grísku *phlogizein: að kveikja í*) átti að vera í öllum brennanlegum efnunum.²² Þegar viður var brenndur losnaði phlogiston og eftir varð viðaraska. Phlogiston tilgátan þótti framför á sínum tíma, en fljótlega komu í ljós vankantar á kenningunni.

Tilgátan átti að skýra bruna og tæringu málma í lofti, t.d. ryðmyndun. Bruni og tæring málma eru hvort tveggja oxunarferli og því réttmætt að líkja þessu tvennu saman en eimitt þar brást phlogiston kenningin.

Þegar járn ryðgar léttist það ekki eins og það ætti að gera ef járníð hefði gefið frá sér phlogiston við brunann, þvert á móti þyngist það. Þetta dugði þó ekki til að sannfæra vísindamenn sem létu sér fátt um finnast eða gripu jafnvel til þeirrar skýringar að að phlogiston hefði enga vigt eða neikvæða.

Efnafræði nútímans í mótun.

Elstu hugmyndir um frumefni (atóm) að vissu marki í ætt við nútíma skilning eru frá þeim Leucippusi (um 440 f. kr.) og Demókrítos (460-370 f. Kr.) komnar. Það var svo ekki fyrr en 1666, að Robert Boyle véfengir hugmyndir Aristotelesar um frumefni fjögur og Paracelsians um salt, brennisteins og kviksílfur sem einhvers konar frumefni allra efna. Boyle setur þá fram hugmyndir sínar um minnstu ósamsettar einingar (corpuscles) sem geti myndað sambönd, ennfremur að þær sé hægt að sanna með tilraunum. Um það var Boyle sannspár.

Frá miðri 18 öld er þróun efnafræðinnar mjög hröð. Fjöldi nýrra frumefna er uppgötvaður með bætum efnagreiningaraðferðum.

From the mid-18th century there is rapid acceleration in the discovery of new elements, as chemists improve their analytical methods in the laboratory. These substances are not at first recognized as elements (a concept only firmly established in the 19th century), but in each case it is evident that a previously unidentified material has been isolated.

<http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?groupid=2461&HistoryID=ac20>rack=pthc> Gascoigne, Bamber. History of Chemistry. HistoryWorld. 2001.²³

²⁰ [Robert Boyle — Infoplease.com](http://www.infoplease.com)

<http://www.infoplease.com/ce6/people/A0808616.html#ixzz26ILONzhv>

²¹ Gascoigne, Bamber. "History of [Chemistry, page 3. Demons in the ore: AD 1742-1751]" HistoryWorld. From 2001, ongoing.

<http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?groupid=2461&HistoryID=ac20>rack=pthc>

²² Ihde, Aaron John, 1984. The development of modern chemistry. Útg. 1984 (fyrsta útg. 1964), General Publishing Company, Canada.

http://books.google.fr/books/about/The_Development_of_Modern_Chemistry.html?hl=fr&id=34KwmkU4LG0C

Eftirfarandi er tekið saman eftir eftir fjölda heimilda sem getið er um neðanmáls og í heimildaskrá. Í ofangreindri heimild (Gascoigne 2001) er saga efnafræðinnar rakin til loka 18. aldar, en þá má segja að efnafræðin hafi þá verið búin að slíta barnsskónum og verið laus úr viðjum efnafræði miðalda og fornaldar.

Bylting hugmynda á 18. og 19. öld. Uppgötvun frumefna. Einangrun og greining lofttegunda.

Nokkur frumefni voru þekkt á dögum Rómarríkis (753 fKr.- 1453 e.kr) og sum þeirra miklu fyrr. Þessi frumefni eru kolefni, brennisteinn, járn, kopar, silfur, tin, gull, kvikasilfur, blý, arsen (1250) og zink (1450). Frá 1451 til 1749 bætast aðeins þrjú frumefni við antimon (Sb, 1650), fosfór (1659) og kóbalt (1735).²⁴ Eftir það er þróunin hröð. Árið 1824 hafa öll þau frumefni verið uppgötvuð sem rannsóknir á 19 og 20. öld leiddu í ljós að væru plöntum nauðsynleg.

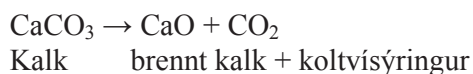
2. tafla. Uppgötvun frumefna

Tímabil	Fjöldi	Þar af plöntunæringarefni
Fyrir 1450	10	C, S, Fe, Cu
1450-1749	4	Zn (1450), P (1659)
1750 -1799	16	H (1766), N (1772), O (1774), Mn (1774), Cl (1774), Mo (1781)
1950 -2000	28	Na ((1807), K (1807), Mg (1808), Ca (1808), B(1808) og Si ²⁵ (1824)
1850 - 1899	24	
1900 -1949	15	
1950 -2000	15	

Joseph Black, bundið loft (koltvísýringur) 1754-1756.

Joseph Black varði doktorsritgerð við Háskólann í Edinborg 1754. Ritgerðin *Experiments upon Magnesia Alba, Quicklime, and Some Other Alkaline Substances* birtist með auknu efni tveimur árum seinna.

Black hitaði kalk (kalsíumkarbónat) og við það myndaðist brennt kalk (kalsíumoxíð) og lofttegund sem hann gat vegið. Hann vildi ekki vera með getgátur og nefndi því lofttegundina bundið loft (e. fixed air), þar eð lofttegundin var bundin í kalkinu og losnaði við brennslu. Á táknmáli seinni tíma efnafræði:



Black tókst að snúa þessu ferli við með því að blanda brennda kalkinu við vatn, brennda kalkið tók þá upp bundna loftið (koltvísýring):



²⁴ The Royal society of chemistry. The history of the periodic table.

<http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/periodictable/>

²⁵ Kísill er talinn gagnlegur fyrir sumar grastegundir, hefur einkum verið rannsakað í ræktun rísgrasa í

Black gat í öðrum tilraunum sýnt fram að þessi sama lofttegund koltvísýringur (CO₂) sem hann nefndi bundið loft (fixed air) myndaðist við kolabruna, gerjun og öndun. Þar með var komin viss tenging milli bruna og efnaskipta í lífverum, við hvort tveggja myndaðist “bundið loft”. Hann sýndi nemendum að sama lofttegundin losnaði við öndun með því að blása í rör ofan í krukku með tæru kalkvatni (vatnslausn af leskjuðu kalki). Hvítur slæðingur og síðan kalkkorn komu fram í lausninni.

Bundna loftið, sem Black nefndi svo, er það sama og Helmont hafði sagt fyrir um einni öld fyrr og nefndi gas sylvestre eða spiritus sylvestris. Samsetning bundins lofts, sem koltvísýrings, var fyrst ákveðin af Lavoisier upp úr 1780 með því að brenna kolefni í súrefni.

Miklar rannsóknir á lofttegundum fylgdu eftir uppgötvun Blacks og sagt hefur verið að mesta bylting í sögu efnafræðinnar hafi orðið á tveimur ártugum frá 1770-1790²⁶.

Rutherford einangrar nítur 1772.

Daniel Rutherford var nemandi Joseph Blacks við háskólann í Edinborg. Black hafði unnið að tilraunum með koltvísýring (“bundið loft”) eins og þegar er greint frá. Hann komst auk þess að því að í lokuðu ílátinu lognaðist kertalogi út af og eftir að koltvísýringurinn var fjarlægður með útfellingu var enn eftir loft sem ljós gat ekki logað í. Hann fól Rutherford að kanna málið betur. Rutherford setti mús í lokað rými þar til músin kafnaði, og í því lofti sem eftir var kveikti hann á kerti uns ljósið slokkaði. Þessu næst brenndi hann fosfór í því lofti sem þá var eftir og að síðustu leiddi hann loftið í gegnum kalíumhydroxíð lausn (e. caustic hydroxide) og fjarlægði þannig koltvísýring úr loftinu. Í því lofti sem eftir var lifði hvorki eldur né mús. Súrefnið hafði verið brennt burt og koltvísýringur fjarlægður og eftir varð nítur. En niðurstöðuna skýrðu þeir Rutherford og Black samkvæmt phlogiston kenningunni og kölluðu þennan hluta loftins “phlogisticated air”.²⁷

Cavendish 1776. Rúmþyngd vetnis.

Henry Cavendish greindi vetni 1766 og nefndi það eldfimt loft (inflammable air). Hann mældi rúmþyngd vetnis með svonefndu loft-trogi (pneumatic trough) sem var uppfinning Stephen Hales 1727 (*Vegetable Staticks, fyrsta bindi af Statical Essays 1727*). Þetta tæki var notað þannig að ílát fullt af vatni var sett á hvolfi ofan í grunt trog með vatni í. Lofttegund er leitt inn í ílátið og hún ryður vatni frá sér efst í ílátinu. Með þessum búnaði gat Cavendish reiknað eðlisþyngd vetnis. Eðlisþyngd vetnisins reyndist vera fjórtandi hluti af eðliþyngd andrúmslofts. Léttara en öll önnur þekkt efni.

Rutherford er réttilega talinn hafa uppgötvað nítur (sem hann nefndi phlogisticated air) þar sem doktorsritgerð hans var birt 1772, ári áður en Scheele uppgötvaði nítur (umfjöllun um Scheele hér á eftir). Cavendish virðist hafa uppgötvað sömu lofttegund fyrir 1772, en ekki er vitað hvaða ár. Hann lýsti í bréfi til Priestleys (frá Priestley er greint að neðan) einangrun á brenndu lofti (“burnt air”) með því að leiða loft margsinnis yfir rauðglóandi kol og fjarlægja þannig súrefni, og leiða loftið í lútlusn af kalíumhydroxíði (caustic soda) til þess að fjarlægja koltvísýring (“fixed air”). Cavendish skrifaði²⁸:

²⁶ http://mattson.creighton.edu/History_Gas_Chemistry/Lavoisier.html

²⁷ <http://suite101.com/article/rutherford-and-nitrogen-a82091>

²⁸ A. Nitrogen." Chemicool Periodic Table. 2/15/2010
<http://www.chemicool.com/elements/nitrogen.html>

"The specific gravity of this air was found to differ very little from that of common air; of the two, it seemed rather lighter. It extinguished flame, and rendered common air unfit for making bodies burn in the same manner as fixed air, but in a less degree, as a candle which burnt about 80" [sekúndur] in pure common air, and which went out immediately in common air mixed with 6/55 of fixed air, burnt about 26" in common air mixed with the same portion of this burnt air."

Brennda loftið ("burnt air") sem Cavendish lýsir er augljóslega hvorki súrefni (dephlogisticated air) né koltvísýringur ("fixed air") þar sem hvorttveggja var fjarlægt með þeim aðferðum sem Cavendish lýsir og mælingar hans á eiginleikum brennd lofts sýna að um sérstaka lofttegund er að ræða eða nítur

Scheele 1773 einangrar tvær lofttegundir úr andrúmslofti

Súrefni og nítur var greint af sænska efnafræðingnum Carl Wilhelm Scheele 1773. Scheele nefndi súrefnið eldloft (þ. *Feuerluft*) og nítur nefndi hann spillt loft (*verdorbene Luft*).²⁹ Hann einangraði einnig vetni en eins og Cavendish áleit hann það vera phlogiston. Niðurstöður Scheeles birtust ekki fyrr en 1777, en rannsóknir hans voru vandlega skráðar og því vitað að hann varð fyrri til en Priestley að uppgötva súrefni.

Priestley einangrar súrefni og sér fyrir notkun þess til lækninga 1774.

Joseph Priestley uppgötvaði súrefni og margar aðrar lofttegundir og birti niðurstöðurnar 1774. Hann notaði stóra 12 þumlunga linsu til að beina sólarljósi að kvikasílfursoxíði og við það myndaðist litlaus lofttegund og í henni varð kertalogi óvenju skær. Hann gerði 44 fleiri tilraunir með þessa lofttegund og skrifar nokkru seinna að "two mice and myself had the privilege to breathe it". Priestley fylgdi phlogiston hugmyndinni og nefndi súrefnið "dephlogisticated air", það er loft sem phlogiston hefur verið fjarlægt úr. Báðir aðhylltust þeir Priestley og Scheele phlogiston kenninguna. Það var svo Lavoisier sem leysti úr þeirri flækju sem phlogiston kenningin í rauninni var. Aðrar lofttegundir sem Priestley rannsakaði voru meðal annars koltvísýringur ("fixed air"), ammoníak ("alkaline air"), níturoxíð eða hláturgas ("phlogisticated nitrous air"). Hann varð fyrstur til að búa til kolsýrt vatn

Frumeftinn fjögur víkja fyrir frumeindunum.

Á síðustu þremur áratugum 18. aldar tókst að greina sífellt fleiri efni og um leið vöknudu efassemdir um hinar fornu hugmyndir um frumefnin fjögur. Nítur var einangrað úr lofti af Rutherford 1772. Loft var aðgreint í súrefni og nítur 1773 af Scheele. Þar með féll hugmyndin um loft sem frumefni. Cavendish blandaði saman vetni og súrefni í hlutföllunum 2:1 og í glerkúlu sem hann hleypti rafstraumi og úr varð vatn. Þar með kom vatn ekki lengur til greina sem frumefni. Niðurstöðurnar birtust 1784 í grein sem hét Experiments in air.³⁰

Í ritskrá á vefsíðunni er hlekkur við ævisögu Cavendish: George Wilson 1851. The life of the honourable Henry Cavendish.: including abstracts of his more important scientific papers, and a critical inquiry into the claims of all the alleged discoverers of the composition of water

²⁹ Thomas Seilnacht: <http://www.seilnacht.com/chemiker/chesch.html>

³⁰ Gascoigne, Bamber. "History of [Chemistry page 3. Cavendish and water: AD 1784]" HistoryWorld. From 2001, ongoing.

<http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?groupid=2461&HistoryID=ac20>rack=pthc>

Hámarki náði þróun efnafræðinnar á þessu tímabili með verkum franska efnafræðingsins Antoine Lavoisier.

Lavoisier (1743 – 1794) mótar grundvöll nútíma efnafræði³¹

Antoine Laurent Lavoisier hefur verið talinn faðir efnafræðinnar. Slíkar nafngiftir orka að sjálfsögðu tvímælis, enda eru þeir oft fleiri en einn sem hljóta slíkar nafngiftir. Aðrir sem hafa verið tilnefndir feður efnafræðinnar eru Robert Boyle og John Dalton. Allir mörkuðu þeir djúp spor í sögu efnafræðinnar hver á sínum tíma.

Um ástæður þess mikla álits sem er á verkum Lavoisiers skrifar Gascoigne (2001)³²:

“The reason is that during the last two decades of the 18th century he interprets the findings of his colleagues with more scientific clarity than they have mustered, and creates the rational framework within which chemistry can develop.”

Lavoisier endurtók tilraun Priestleys og sýndi fram á það loft, sem Priestley og aðrir samtímamenn þeirra beggja nefndu 'dephlogisticated air', væri sérstök lofttegund. Hann gaf árið 1799 þessari lofttegund nafnið oxygen eða sýrumyndandi, dregið af grísku orðunum oxys (sýra) og genno (geta af sér, valda). Hann hafði dregið þá ályktun af tilraunum með fosfór og brennistein, að oxygen (súrefni) væri hluti af öllum sýrum. Bæði fosfórsýra og brennisteinssýra innihalda súrefni og fleiri sýrur, en ekki allar, til dæmis ekki saltsýra. Lavoisier birti niðurstöður sínar í ritum frá 1777 *"Sur la combustion en général"* (Almennt um bruna) og 1778 *"Considérations Générales sur la Nature des Acides"* (Almennt um edli sýru). Hann sýndi fram á mótsetningar í phlogistonkenningunni í ritinu *"Réflexions sur le Phlogistique"* 1783.

Hugmynd Priestleys, Scheele og annarra var hins vegar sú, að væri svonefnt phlogiston fjarlægt úr lofti yrði eftir hreinsað loft (dephlogisticated air'). Einnig átti phlogiston að losna frá járnvið ryðmyndun, en það gat þó ekki staðist þar sem járn þyngist við ryðmyndun (myndun járnhydroxíðs) Þegar allt kom til alls var phlogiston kenningin ekki annað en misheppnuð tilraun til skýringar á efnabreytingum eins og bruna og tæringu málma. Því er nær að tala um kreddu (doctrine) en kenningu (theory). Lavoisier skrifaði í byrjun greinar sinnar að hann setji fram líklegri tilgátu (hypothesis) sem í væru færri mótsagnir en í phlogiston kenningunni en í lok greinarinnar virðist hann vera sannfærður um ágæti sinnar kenningar og skrifar að hún skýri auðveldlega nærri því öll fyrirbrigði edlis- og efnafræði,³³

Lavoisier gaf eins og áður sagði þeim hluta lofts sem tekur þátt í bruna nafnið oxygen (súrefni) og þann hluta sem varð eftir, þegar súrefni og koltvísýringur hafði verið fjarlægt nefndi Lavoisier 1789 azote (án lífs) en heitið nitrogen lagði landi hans, efnafræðingurinn Jean Antoine Chaptal, til árið 1790 eftir að sýnt var fram á að það væri hluti af “nitre” eins og saltpétur var nefndur þá. Helstu tegundir saltpéturs eru þrjár kalíumsaltpétur (kalíumnítrat), Chilesaltpétur (natríumnítrat) og kalksaltpétur (kalsíumnítrat). Nitrogen merkir því eiginlega saltpéturmyndandi. Hydrogen (vetni) merkir vatnsmyndandi og er frá Lavoisier komið.

³¹ a. http://en.wikipedia.org/wiki/Antoine_Lavoisier

b. <http://cti.itc.virginia.edu/~meg3c/classes/tcc313/200Rprojs/lavoisier2/home.html>

³² Gascoigne, Bamber. “History of [Chemistry page 3]” HistoryWorld. From 2001, ongoing.

<http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?groupid=2461&HistoryID=ac20>rack=pthc>

³³ Larson, Philip Gardner, University of Virginia

<http://cti.itc.virginia.edu/~meg3c/classes/tcc313/200Rprojs/lavoisier2/home.html>

Lavoisier sýndi fram á að súrefni tekur þátt í efnaferlum bruna og öndunar og við þau ferli myndast sú lofttegund sem Joseph Black uppgötvaði og nefnd var bundið loft (e. fixed air, koltvísýringur).

Með þremur samlöndum sínum þeim Claude-Louis Berthollet, Antoine Fourcroy og Guyton de Morveau gaf hann 1787 út bók um aðferð við nafngiftir í efnafræði *Méthode de nomenclature chimique*. Þau efnaheiti sem þar voru lögð til hlutu fljótlega almenna viðurkenningu og komu í stað ruglinglegra heita úr efnafræði gullgerðarmanna (e. alchemy).³⁴ Alls eru þar nefnd 33 einföld efni (“substances simples”) sem skiptast í 17 málma, 6 námleysingja (e. non metals), þar af þrjú óþekkt efni, 5 jarðefni þar á meðal kalk, kísiljörð og alunjörð (leirtegundir) og 5 lofttegundir þar á meðal vetni (hydrogène), súrefni (oxygène) og nítur (azote).³⁵ Auk þessarra lofttegunda taldi Lavoisier ljós (Lumière) og hita (Calorique) til lofttegunda.

Bók Lavoisiers *Traité élémentaire de chimie* (1789) er talin fyrsta nútímalega ritið um efnafræði. Hann setur þar fram nútímalega skilgreiningu frumefna. Skilyrt var að frumefni væru einungis þau efni sem ekki yrðu brotin frekar niður í smærri einingar með þekktum efnagreiningaraðferðum. Þessi skilgreining gerði tilraunir að úrslitaatriði við ákvörðun frumefna og bætti þar eldri og frekar heimspekilega skilgreiningu Roberts Boyle á frumefni sem fullkomnlega ósamsettu efni (*perfectly unmingled bodies, neðanmáls tilvísun nr. 19*). Í nýju efnafræðinni sem var að mótast voru frumefnin (e. element) talin einföld efni (e. simple substances) og efnasambönd mynduð af tveimur eða fleiri frumefnum.

Antoine Laurent Lavoisier var ekki einungis afburðasnjall efnafræðingur. Hann aðhylltist frjálslynd viðhorf í stjórnmálum og var sannfærður um nauðsyn félagslegra umbóta í Frakklandi. Fyrir tillögur um bættu götulýsingu í París og framlag til landbúnaðarmála varð hann félagi í frönsku vísindaakademíunni. Lavoisier tók virkan þátt í atburðum sem leiddu til frönsku byltingarinnar, starfaði í nefnd um umbætur í félags- og skattamálum og mótun stefnu í efnahagsmálum. Hann starfaði einnig í nefnd um umbætur í spítölum og í fangelsismálum. Þrátt fyrir verðleika sína var Lavoisier líflátinn í frönsku byltingunni fyrir þá sök að hafa starfað sem skattheimtumaður konungs í einkavæddu fyrirtæki Ferme Générale þar sem einstaklingar tóku að sér skattheimtu á tilteknu svæði. Aftaka Lavoisiers er rakin til rógburðar Jeans Pauls Marats og fleiri harðskeyttra blaðamanna³⁶. en Marat var sjálfur myrtur í baðkeri af konu að nafni Charlotte Corday sem var í hópi svonefndra Giordína pólitískra andstæðinga Jacobína sem Marat tilheyrði.³⁷ Fleyg urðu ummæli þekkts stærðfræðings um líflát Lavoisiers: Það tók þá aðeins augnablik höggva höfuðið af og heil öld mun vart duga til ala annað slíkt.³⁸

³⁴ Gascoigne, Bamber. “History of Chemistry HistoryWorld. From 2001, ongoing. <http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?groupid=2461&HistoryID=ac20>rack=pthc>

³⁵ Giunta, Carmen: *Lavoisier's Elements of Chemistry* <http://web.lemoyne.edu/~giunta/ea/lavprefann.html>

Frederick A. Senese; How did Lavoisier classify elements known in his time? <http://antoine.frostburg.edu/chem/senese/101/history/faq/antoin-es-elements.shtml>

³⁶ <http://cti.its.virginia.edu/~meg3c/classes/tcc313/200Rprojs/lavoisier2/home.html>

³⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Jean-Paul_Marat

³⁸ <http://www.chemheritage.org/discover/chemistry-in-history/themes/early-chemistry-and-gases/lavoisier.aspx>

A noted mathematician, Joseph-Louis Lagrange, remarked of this event: "It took them only an instant to cut off that head, and a hundred years may not produce another like it."

Eftir þau tímamót í efnafræðinni sem urðu með bók Lavoisiers voru þrjátíu frumefni uppgötvað frá 1790 til 1844³⁹ í sumum tilvikum í formi oxíða. Efnin voru greind með hefðbundnum efnagreiningum og í byrjun 18.aldar bættist við rafgreining. Sir Humphry Davy (1778-1829) vann á unglinsaldri hjá apótekara og kynntist þar efnafræðinni og hinni frægu bók Lavoisiers *Traité élémentaire de chimie*, sem vakti áhuga hans á greininni⁴⁰.

Davy vakti athygli fyrir hæfileika sína og var 21 árs gamall ráðinn til starfa við stofnun sem fékkst við rannsóknir á lofttegundum Pneumatic Institute í Bristol. Þar var unnið að rannsóknum á lækningamætti lofttegunda. Davy prófaði stundum að anda að sér þessum lottegundum, skeytingarlaus um áhættuna, og uppgötvaði undarleg áhrif af níturoxíði, (N₂O) Fljótlega var farið að nefna það hláturgas og varð mönnum skemmtiefni, en nærri 50 árum síðar var farið að nota það til deyfingar við lækniáðgerðir. Í dag er það ekki síst þekkt sem öflug "gróðurhúsa"lofttegund.

Davy bjó árið 1807 til rafgeymi sem var sá öflugasti á þeim tíma og notaði hann til rafgreiningar á ýmsum efnum. Hann einangraði 1807 kalíum og natrium með rafgreiningu á bræddri pottösku (kalíumkarbónat e. potash) og sóða (natriumkarbónat). Þessi sölt voru unnin úr vatnslausn af viðarösku. Ári seinna einangraði hann kalsíum, baríum, strontíum og magníum. Davy uppgötvaði bór 1808 á sama ári og frönsku efnafræðingarnir Joseph-Louis Gay-Lussac og Louis-Jaques Thénard⁴¹.

Carl Wilhelm Scheele framleiddi fyrstur lofttegundin klór (Cl₂) þegar hann meðhöndlaði steintegundina pyrolusít (manganoxíð, MnO₂) með saltsýru (HCl) 1774. Scheele taldi að lofttegundin innihéldi súrefni. Davy (1810) sýndi hins vegar fram á að "oxymuriat" lofttegund væri ekki oxíð af ókunnun efnu sem nefnt var murium heldur frumefni sem hann nefndi chlorine.⁴²

Þróun hugmynda um frumeindir (atóm) og sameindir (mólekúl).

John Dalton (1766-1844) enskur veðurfræðingur, sem hafði snúið sér að efnafræði, birti kenningu sína um atómin 1808 í bók sinni *A New System of Chemical Philosophy*..^{43 44 45 46:}

³⁹ The Royal Society of Chemistry. The history of the periodic table. Á vefsíðunni er gagnvirk tafla með lotukerfinu þar sem sjá má hvenær hvert frumefni var uppgötvað og af hverjum:

<http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/periodictable/>

Peter van der Krogt. Elementymology & Elements Multidict.

http://elements.vanderkrogt.net/chemical_symbols.php

⁴⁰ <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/152896/Sir-Humphry-Davy-Baronet>

http://www.encyclopedia.com/topic/Sir_Humphry_Davy.aspx

⁴¹ Thomas Jefferson National Accelerator Facility - Office of Science Education

<http://education.jlab.org/itselemental/ele005.html>

⁴² Jefferson lab. Website maintained by Steve Gagnon.

<http://education.jlab.org/itselemental/ele017.html>

⁴³ <http://www.scs.illinois.edu/~mainzv/exhibit/dalton.htm>

Peter van der Krogt 2010. Development of the chemical symbols and the Periodic Table

Lavoisier - Dalton - Berzelius - Менделеев (Mendeleev) –

Moseley. http://elements.vanderkrogt.net/chemical_symbols.php

⁴⁴ <http://www.tutorvista.com/search/dalton%27s-atomic-theory-are>

⁴⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_mass

1. Allt efni er samsett af óskiptanlegum ögnum sem nefnast atóm.
2. Atóm hvers frumefnis eru eins að lögun og massa en ólík öðrum frumefnum.
3. Atóm er ekki hægt að mynda eða eyða.
4. Atóm mismunandi frumefna geta tengst saman í föstum, einföldum hlutföllum og myndað sambönd atóma
5. Atóm sama frumefnis geta sameinast í mismunandi hlutföllum og myndað mismunandi sambönd
6. Atóm eru minnstu einingar efnis sem taka þátt í efnabreytingum

Chemical analysis and synthesis go no farther than to the separation of particles one from another, and to their reunion. No new creation or destruction of matter is within the reach of chemical agency. We might as well attempt to introduce a new planet into the solar system, or to annihilate one already in existence, as to create or destroy a particle of hydrogen. All the changes we can produce, consist in separating particles that are in a state of cohesion or combination, and joining those that were previously at a distance.

John Dalton í A New System of Chemical Philosophy. Chap. III. On Chemical Synthesis ⁴⁷

Kostir atómkenningar Daltons:

- Kenningin leiddi til skýringa á myndun efnasambanda
- Dalton gerði fyrstur skilmerkilegan greinarmun á frumefni og efnasambandi

Ýmislegt í kenningu Daltons stendst þó ekki til fulls miðað við nútíma þekkingu:

- Atóm eru samsett af rafeindum og kjarna og kjarninn er úr nifteindum (neutron) og róteindum (proton) og atómin því ekki óskiptanleg, en engu að síður eru atómin minnstu agnir sem taka þátt í efnabreytingum
- Af sumum frumefnum eru til atóm með mismunandi massa, svonefndar samsætur eða ísótópar. Til dæmis er mestur hluti níturs 99,634% með massann 14 (N^{14}), en samsætan með massann 15 (N^{15}) er um 0,366 % af heildar N.
- Samkvæmt Dalton eru hlutföll frumefna í efnasamböndum heilar tölur, svo er ekki í sumum lífrænum samböndum eins og $C_{12}H_{22}O_{11}$.
- Kenningin skýrir ekki mismunandi gerðir af sama frumefni (allotrop form), sem stafa af mismunandi byggingu sameinda, til dæmis mismuninn á kolum, grafíti og gimsteinum sem öll eru gerð úr kolefni.

⁴⁶ Science Encyclopedia Atomic weight history <http://science.jrank.org/pages/634/Atomic-Weight-History.html>

⁴⁷ Classic Chemistry compiled by Carmen Giunta. Le Moyne College. Department of Chemistry <http://web.lemoyne.edu/~GIUNTA/DALTON.HTML>

ELEMENTS . Plate

Simple

Binary

Ternary

Quaternary

Quinquenary & Sextenary

Septenary

EXPLANATION OF THE PLATES. 219

PLATE IV. This plate contains the arbitrary marks or signs chosen to represent the several chemical elements or ultimate particles.

Fig.		Fig.	
1	Hydrog. its rel. weight 1	11	Strontites - - - - 46
2	Azote, - - - - 5	12	Barytes - - - - 68
3	Carbone or charcoal, - 5	13	Iron - - - - 38
4	Oxygen, - - - - 7	14	Zinc - - - - 56
5	Phosphorus, - - - - 9	15	Copper - - - - 56
6	Sulphur, - - - - 13	16	Lead - - - - 95
7	Magnesia, - - - - 20	17	Silver - - - - 100
8	Lime, - - - - 27	18	Platina - - - - 100
9	Soda, - - - - 28	19	Gold - - - - 140
10	Potash, - - - - 42	20	Mercury - - - - 167
21.	An atom of water or steam, composed of 1 of oxygen and 1 of hydrogen, retained in physical contact by a strong affinity, and supposed to be surrounded by a common atmosphere of heat; its relative weight = - - - - 8		
22.	An atom of ammonia, composed of 1 of azote and 1 of hydrogen - - - - 6		
23.	An atom of nitrous gas, composed of 1 of azote and 1 of oxygen - - - - 12		
24.	An atom of olefiant gas, composed of 1 of carbone and 1 of hydrogen - - - - 6		
25.	An atom of carbonic oxide composed of 1 of carbone and 1 of oxygen - - - - 12		
26.	An atom of nitrous oxide, 2 azote + 1 oxygen - 17		
27.	An atom of nitric acid, 1 azote + 2 oxygen - 19		
28.	An atom of carbonic acid, 1 carbone + 2 oxygen - 19		
29.	An atom of carburetted hydrogen, 1 carbone + 2 hydrogen - - - - 7		
30.	An atom of oxynitric acid, 1 azote + 3 oxygen - 26		
31.	An atom of sulphuric acid, 1 sulphur + 3 oxygen - 34		
32.	An atom of sulphuretted hydrogen, 1 sulphur + 3 hydrogen - - - - 16		
33.	An atom of alcohol, 3 carbone + 1 hydrogen - 16		
34.	An atom of nitrous acid, 1 nitric acid + 1 nitrous gas - - - - 31		
35.	An atom of acetous acid, 2 carbone + 2 water - 26		
36.	An atom of nitrate of ammonia, 1 nitric acid + 1 ammonia + 1 water - - - - 33		
37.	An atom of sugar, 1 alcohol + 1 carbonic acid - 35		

1. mynd. Hlutfallsleg þyngd frumeinda (nr. 1-20) og sameinda (nr 21-37) í bók Daltons frá 1808 A New System of Chemical Philosophy.

Úr *Alchemy to Chemistry: Five Hundred Years of Rare and Interesting Books. University of Illinois at Urbana-Champaign. Rare Book Room Exhibit*⁴⁸

John Dalton skrifar í bók sinni (1808) að það hafi verið talið mikilvægt að ákvarða hlutfallslegan þunga einfaldra eininga (frumeinda) í efnasamböndum (sameindum) en lengra hafi það því miður ekki náð. Af hlutfallslegri þyngd massans (hlutfallslegri eðlisþyngd) megi álykta um hlutfallslega þyngd frumeinda (*atoms*) og þar með væri unnt að gera sér grein fyrir fjölda frumeinda og þunga þeirra í samböndum:

In all chemical investigations, it has justly been considered an important object to ascertain the relative weights of the simples which constitute a compound. But unfortunately the enquiry has terminated here; whereas from the relative weights in the mass, the relative weights of the ultimate particles or atoms of the bodies might have been inferred, from which their number and weight in various other compounds would appear, in order to assist and to guide future investigations, and to correct their results. Now it is one great object of this work, to shew the importance and advantage of ascertaining the relative weights of the ultimate particles, both of simple and compound bodies, the

⁴⁸ <http://www.scs.illinois.edu/~mainzv/exhibit/dalton.htm>

number of simple elementary particles which constitute one compound particle, and the number of less compound particles which enter into the formation of one more compound particle.

John Dalton í A New System of Chemical Philosophy. Í Chap. III. On Chemical Synthesis ⁴⁹

Dalton valdi léttasta frumefnið, vetni, sem viðmiðunn fyrir atómþunga annarra frumefna. Atómþungi vetnis var skilgreindur 1,00 og atómþungi annarra frumefna metinn hlutfallslega.

Þótt Dalton hafi lagt grunninn að aðferðum til að ákveða hlutfallslegan þunga frumeinda og greiningu á samsetningu sameinda voru niðurstöður hans um þunga frumeinda og samsetningu sameinda vægast sagt ónákvæmar, eins og fram kemur á mynd úr bók hans frá 1808 (1. mynd hér á eftir). Til dæmis er atómþungi níturs (azote í Plate IV á myndinni) og kolefnis talinn vera 5 sinnum atóm þungi vetnis og vatnssameind talin samsett úr einu vetnisatómi og einu súrefnisatómi. En engu að síður var merkur áfanga náð í þróun efnafræðinnar og framþróunin var mjög hröð á næstu árum og áratugum.

Fyrsta heimild um rannsóknir Daltons varðandi atóm er tafla um atómþunga 21 frumefnis í erindi hans um bindingu lofttegunda í vatni og öðrum vökvum “On the Absorption of Gases by Water and Other Liquids, sem hann flutti hjá Literary and Philosophical Society of Manchester 21. Október 1803.⁵⁰ Atóm kenningin í heild sinni birtist 1808 eins og þegar hefur verið nefnt.

Franski efnafræðingurinn **Joseph Louis Proust** (1754–1826) sýndi fram á að frumefni í hverju efnasambandi væru alltaf í sömu hlutföllum af heilum tölum, óháð því hvernig sambandið væri myndað (law of constant composition seinna nefnt law of definite proportions).⁵¹

„In 1799 Proust formulated his law of definite proportions. He pointed out that copper carbonate must always be made from the same fixed proportions of copper, carbon, and oxygen. From this he generalized that all compounds contained elements in certain definite proportions. Proust's law was not immediately accepted by all chemists; in particular, his proposal led to a long and famous controversy with Claude-Louis Berthollet who argued that elements could combine in a whole range of different proportions. It is now clear that Proust was talking about compounds whereas Berthollet was thinking of solutions or mixtures. Berthollet eventually admitted his error.

*The strength of Proust's law was seen a few years later when John Dalton published his atomic theory. The law and the theory fitted exactly – Proust's definite proportions being in fact a definite number of atoms joining together to form molecules.*⁵²

A Dictionary of Scientists, Oxford University Press, © Market House Books Ltd 1999.

Kenning Prousts byggðist á vandaðri greiningu á koparkarbónati, sem hann framleiddi með

⁴⁹ Classic Chemistry compiled by Carmen Giunta. Le Moyne College. Department of Chemistry <http://web.lemoyne.edu/~GIUNTA/DALTON.HTML>

⁵⁰ Dalton's Atomic Theory Copyright © 1997-2005 by Fred Senese <http://antoine.frostburg.edu/chem/senese/101/atoms/dalton.shtml>

⁵¹ Classic Chemistry compiled by Carmen Giunta. Le Moyne College. Department of Chemistry <http://web.lemoyne.edu/~giunta/proust.html> -

⁵² Proust, Joseph Louis (1754 - 1826)

http://www.edu365.com/aulanet/comsoc/Lab_quimica/quimics/JLProust.htm

mismunandi aðferðum og bar saman við greiningu á koparkarbónati úr bergtegundum. Hreint koparkarbónat hafði alltaf sömu samsetningu, sömu hlutföll af kopar súrefni og kolefni, óháð uppruna. Sömu niðurstöðu fékk Proust fyrir fleiri sambönd.

Sænski efnafræðingurinn **Jöns Jakob Berzelius** (1779-1848) hóf um 1807 rannsóknir á samsetningu efnasambanda og staðfesti lögmál Prousts um föst hlutföll frumefna í efnasambandi óháð framleiðsluaðferð. Hann greindi um 2000 einföld og samsett efni á einum áratug og birti 1818 atómþunga 45 frumefna með mikillli nákvæmni.^{53 54}

Berzelius birti 1828 að nýju töflu með atómþunga 54 frumefna og notaði vetni sem viðmiðun eins og Dalton hafði gert en munurinn var sá að tölur Berzeliusar voru mjög nálægt þeim atómþungum sem notaðir eru í dag⁵⁵, til dæmis var kolefni með atómþunga 12. Þegar rússneski efnafræðingurinn Dmitri Ivanovitch Mendeleev (1834-1907) birti lotukerfi sitt 1869 voru 63 frumefni þekkt og enn var vetni viðmiðunin (atómþungi 1,00) og atómþungi annarra frumefna í hlutfalli við atómþunga vetnis.

Þegar Berzelius vann að sínum rannsóknum á samsetningu efnasambanda og ákvörðun á atómþunga, komst hann að þeirri niðurstöðu, að óhægt væri að þurfa að nota alltaf fullt nafn frumefna og jafnframt að táknið sem Dalton notaði hentuðu ekki. Þess í stað lagði Berzelius til að nota fyrsta stafinn í latnesku heiti frumefnis H fyrir hydrogen (vetni), O fyrir oxygen ((súrefni) og C fyrir carboneum (kolefni) og hann skrifaði formúlu vatns $2H + O$ sem síðar varð H_2O þar sem tölustafurinn er með svonefndu hnéletri nánar tiltekið lágletri. Ef tvö frumefni byrja á sama bókstaf eru notaðir tveir fyrstu stafir heitisins eins og Au fyrir aurum (gull) og Ag fyrir argentum (silfur). Berzelius er því höfundur þess alþjóðlega kerfis sem er enn í notkun og má kalla stafró efnafræðinnar og myndar í víðara samhengi tungumál efnafræðinnar.

Það gerði gæfumuninn við ákvörðun atómþunga að Berzelius gerði sér betri grein fyrir samsetningu efnasambanda en Dalton sem til dæmis taldi að í vatnsameind væri eitt vetnisatóm og eitt súrefnis atóm, sjá 1. mynd

Berzelius sýndi fram á að hlutfallslegur atómþungi er ekki í öllum tilvikum í heilum tölum, en ástæðan varð ekki ljós fyrr en á 20.öld, þegar uppgötvaðist að af sama frumefni voru til atóm með mismunandi þyngd eins og nánar verður fjallað um síðar. Til skýringar má nefna atómþunga eða réttara sagt atómmassa klórs⁵⁶:

Af klór eru til tvær samsætur (isotopar) og eru jafnan í hlutföllunum 3 : 1. Að jafnaði 3 atóm af Cl^{35} með massatöluna 35 á móti 1 atómi Cl^{37} með massatöluna 37 og að meðaltali verður hlutfallslegur massi klórs $(3 \cdot 35 + 1 \cdot 37) / 4 = 35,5$. G. Viðmiðun er nú samsæta kolefnis með atómmassa 12.

⁵³ <http://www.scs.illinois.edu/~mainzv/exhibit/berzelius.htm>

⁵⁴ NNDB. Jönd Jacob Berzelius. Copyright ©2010 Soylent Communications
<http://www.nndb.com/people/051/000094766/>

⁵⁵ <http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/history/berzelius.html>
http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_mass, sbr. kaflann History

http://en.wikipedia.org/wiki/J%C3%B6ns_Jakob_Berzelius#Law_of_definite_proportions

⁵⁶ Í stað atómþunga er nú fremur notað atómmassi og nákvæmara er hlutfallslegur atómmassi. Munurinn á þyngd og massa er sá að þyngdin er háð aðdráttarafla en massinn ekki: nánar á Vísindavef Háskóla Íslands. <http://visindavefur.hi.is/svar.php?id=40>

Massatala $A=12$, atóm nr. $Z = 6$ tákna fjölda róteinda (prótónur) auk þess eru nifteindir (neutrónur) 6 í kolefnisatóminu

Franski efna- og eðlisfræðingurinn Gay-Lussac (1778-1850) og þýski náttúrufræðingurinn Alexander von Humbolt (1769-1859) höfðu hvor í sínu lagi unnið að rannsóknum á sameiningu vetnis og súrefnis og hófu 1805 samstarf um áframhald þessara rannsókna. Niðurstaða þeirra var að vatn væri samsett úr tveimur frumefnum vetni og súrefni í hlutföllunum 8 : 1. Við sundrun vatns í frumefni mældust átta hlutar rúmmáls af vetni á móti einum af súrefni.

Í desember 1808 birtist grein eftir Gay-Lussac um sameiningu lofttegunda. Þær niðurstöður sem þar komu fram urðu þekktar sem lögmál Gay-Lussacs: í samböndum eru lofttegundir alltaf í einföldum hlutföllum, ef ein lofttegund í sambandinu er ein rúmálseiningin, þá er önnur 1, 2 eða í mesta lagi 3 einingar. Hann sýndi fjölda dæma úr eigin rannsóknum m.a. á vetni og súrefni, brennisteinstvísýringi (SO_2) og súrefni, kolsýringi (CO) og súrefni auk margra dæma úr rannsóknum annarra annarra⁵⁷:

Gay-Lussac modestly attributed the discovery to the earlier work of Charles, but most modern historians of science have found little precedent in Charles' work for the Law of Dalton and Gay-Lussac. Returning to the hydrogen-oxygen combination Gay-Lussac noted that "hydrogen combines with oxygen in double the volume of the latter" and in 1807, observing the sulfur dioxide and oxygen produced when copper sulfate is heated strongly he remarked "These two gases are approximately in the ratio by volume of 2:1 but I will return later to the exact determination of this ratio." He did!

Harold Goldwhite, California State University, Los Angeles,

Gay-Lussac leit á þetta einfalda lögmál sem staðfestingu á atómkenningu Daltons. Ítalski eðlisfræðingurinn Amadeo Avogadro skrifaði í frægri grein 1811 (í enskri þýðingu "Essay on a manner of determining the relative masses of the elementary molecules of bodies, and the proportions in which they enter into these compounds")⁵⁸:

"M. Gay-Lussac has shown in an interesting Memoir that gases always unite in a very simple proportion by volume The first hypothesis to present itself... and apparently even the only admissible one, is the supposition that the number of integral molecules in any gases is always the same for equal volumes, or always proportional to the volumes."

Þarna er kominn kjarninn í lögmáli Avogadros að í sama rúmmáli mismunandi lofttegunda við sama hitastig og þrýsting sé alltaf sami fjöldi sameinda (molekula). Það var samt ekki fyrr en 1860 að mikilvægi lögmáls Avogadros fyrir ákvörðun sameindapunga varð ljós.

Fyrstu tölur sem fram komu um atómþyngd í töflu Daltons (1. mynd) voru í besta falli ónákvæmar eða fjarri lagi. Á þeim tíma voru hugmyndir um gerð sameinda óljósar og því var gripið til ágiskana. Dalton gerði ráð fyrir fyrir einföldustu hlutföllum frumefna í samböndum til dæmis að í vatni væri vetni og súrefni í hlutfallinu 1:1 og sama hlutfall milli níturs og

⁵⁷ Harold Goldwhite 2005. This Month in Chemical History. Octagon 88, (2) 3- 4
Prepared for SCALACS, the Journal of the Southern California,
Orange County, and San Gorgonio Sections of the American Chemical Society
Harold Goldwhite 2005. This Month in Chemical History. Octagon 88, (2) 3- 4

⁵⁸ Avogadro, Amadeo (1810). "Essai d'une maniere de determiner les masses relatives des molecules elementaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons". *Journal de Physique* 73: 58–76. Ensk þýðing: <http://web.lemoyne.edu/~giunta/avogadro.html>

vetnis í ammoníaki. Niðurstaðan var því að atómþungi súrefnis væri 7 og níturs 5 sinnum atóm þungi vetnis. Fyrst og fremst voru hlutföll frumefnanna í samböndunum röng en auk þess samburðurinn við vetnið ónákvæmur. Með nákvæmari ákvörðunum á atómþunga og réttari mynd af gerð sameinda sem fram kom eftir fyrstu alþjóðlegu ráðstefnu efnafræðinga var haldin í Karlsruhe 1860 náðist betri árangur.

Ítalski efnafræðingurinn Stanislao Cannizzaro fann leið úr þeim vandkvæðum sem voru á ákvörðun atómþunga. Til þess notaði Cannizzaro kenningu Avogadros um að í sama rúmmáli loftegunda væri alltaf sami fjöldi sameinda við sama hitastig og loftþrýsing og þá hugmynd að út frá þyngd sama rúmmáls loftegunda mætti meta atómþunga með ákveðið frumefni sem viðmiðun⁵⁹.

Cannizzaro birti 1858 grein í tímaritinu *Il Nuovo Cimento*, sem í enskri þýðingu frá 1910 heitir *Sketch of a course of chemical philosophy*⁶⁰. Cannizzaro skrifar fyrst að framfarir í vísindum síðustu árin [fyrir 1858] hafi staðfest tilgátu Avogadros, Amperes og Dumas að sama rúmmál loftegunda innihaldi sam fjölda sameinda en ekki atóma því sameindir innihaldi mismunandi fjölda atóma. Hann segist ætla að leiða nemendur sína um sömu slóðir og hann hafi farið til þess að sannfærast um réttmæti tilgátunnar. Þá leið fer Cannizzaro í fimm fyrirlesturum sem greinin samanstendur af. Greinin vakti litla athygli.

Fyrsta alþjóðlega ráðstefna efnafræðinga var haldin í Karlsruhe 1860 til að komast til botns í umræðum samtímans um óleyst vandamál í efnafræði. Umræðan snerist um atómkenninguna eins og kom fram í spurningu eins þáttakenda:

"Shall a difference be made between the expressions 'molecule' and 'atom' such that a molecule be named the smallest particle of bodies which can enter into chemical reactions ... atoms being the smallest particles of those bodies which are contained in molecules?" (DeMilt, p. 38)⁶¹.

Cannizzaro tók virkan þátt í öllum umræðum og vinur Cannizzaros dreifði riti hans "Sketch of a course of chemical philosophy" á ráðstefnunni. Ráðstefnunni lauk þó án þess að niðurstaða lægi fyrir um aðferðir til að ákveða atómþunga. Eftir ráðstefnuna kom hins vegar í ljós að sumir þáttakendur höfðu við lestur greinar Cannizzaros sannfærst um að Cannizzaro hefði fundið réttu leiðina til að ákveða atómþunga. Einn þeirra var Julius Lothar Meyer (1830-1895) sem setti 1864 fram lotutöflu neð 28 frumefnum í kennslubók í efnafræði sem varð sú mest notaða í Þýskalandi á sínum tíma. Í bókinni *The Development of Modern Chemistry* eftir Aaron Ihde (1983) er greint frá þessum atburðum og umsögn Meyers sem hann birti með þýskri þýðingu á grein Cannizzaros. Ensk þýðing á texta Meyers er hér fengin úr bók Ihde.⁶²

⁵⁹ Whitcombe, Todd W. Cannizzaro, Stanislao <http://www.chemistryexplained.com/Bo-Ce/Cannizzaro-Stanislao.html>

⁶⁰ Text Archive > American Libraries > Sketch of a course of chemical philosophy <http://www.archive.org/details/sketchofcourseof00cannrich>

• ⁶¹ DeMilt, Clara (1965). "The Congress at Karlsruhe." In *Selected Readings in the History of Chemistry*, ed. Aaron J. Ihde and William F. Kieffer. Easton, PA: Division of Chemical Education of the American Chemical Society

⁶² Aaron J. Ihde (1983) *The Development of Modern Chemistry*. Bls 229.

http://books.google.com.au/books/about/The_Development_of_Modern_Chemistry.html?id=34KwmkU4LG0C

„At the close of the meeting, Angelo Pavese, professor of chemistry at the University of Pavia and a friend and follower of Cannizzaro, distributed copies of of the latter's paper which had appeared two years earlier in Il Nuovo Cimento. Although most of the reprints may have gone the way of most handouts, that at least one man read the reprint with understanding is evident from the statement of Julius Lothar Meyer (1830-1895) regarding the influence on him I also received a copy which I put in my pocket to read on the way home. Once arrived there I read it again repeatedly and was astonished at the clearness with which the little book illuminated the most important points of controversy. The scales seemed to fall from my eyes. Doubts disappeared and a feeling of quiet certainty took their place. If some years later I was myself able to contribute something toward clearing the situation and calming the heated spirits no small part of the credit is due to this pamphlet of Cannizzaro. Like me it must have affected many others who attended the convention. The big waves of controversy began to subside and more and more the old atomic weights of Berzelius came to their own. As soon as the apparent differences between Avogadro's rule and that of Dulong and Petit had been removed by Cannizzaro both were found capable of practically universal application, and so the foundation was laid for determining the valence of the elements, without which the theory of atomic linking could certainly never have been developed.

Aaron Ihde skrifar að Meyer hafi varið næstu árum unnið að bók sinni Die moderne Theorien der Chemie sem kom út 1864 og mótað efnafræði kenningar byggðar á lögmáli Avogadros. Með bókinni hafi leitt til þess að fleiri fóru að huga að notkun lögmáls Avogadros í efnafræðinni og athygli efnafræðinga hafi verið beint að eðlisfræðilegum þáttum efnafræðinnar.

Nútímanleg framsetning á aðferð til þess að ákveða atómþyngd er líking sem felur í lögmál Boyles um áhrif þrýsting á rúmmál lofttegunda, lögmál Gay-Lussacs um áhrif hitstigs á rúmmál lofttegunda og lögmál Avogadros :

$PV = (g/M)RT$ þar sem

P er þrýstingur í atm t.d við 740 mm þrýsting er $P = 740/760$ atm

V er rúmmál í lítrum, g eru grömm af lofttegund, M er molþungi

R er fasti (gas fasti) 0,08205 lítrar · atm/ gráður

T = 273,1 + °C. T eru gráður á Kelvin skala.

Aðferð sambærileg við líkinguna að ofan hefur verið notuð til þess að finna sameindþunga lofttegunda eftir 1860, en árið 1819 hafði þegar komið fram aðferð til þess að meta atómvigð fasta efna út frá varmarýmd.

Pierre Dulong og Alexis Petit bentu 1819 á að fyrir flest föst frumefni væri varmarýmd/mol (molar heat capacity) föst stærð. Varmarýmd/mol er margfeldi af molmassa (MM) og varmarýmd /massaeiningu (s):⁶³

Varmarýmd/mol = MM · s ~ 25 J/(mol · °C),

Varmarýmd/mol (e. “molar heat capacity”):

varmi sem þarf til að hækka hitastig 6.022×10^{23} sameinda (1 mol) af frumefni um 1 °C

Mol: sameindarmassi í g (vetni 1g, súrefni 16 g o. s. fv.)

Hlutfallslegur atómþungi ákveðinn af Dulong og Petit var miðaður við að þungi súrefnisatóms væri 1,0. Atómþungar samkvæmt aðferð Dulong og Petit umreiknaðir, miðað

við að atómpungi súrefnis sé 16, eru mjög nálægt atómpunga alþjóðlega efnafræðisambandsins (International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) 2007).

3. tafla. Tafla úr grein Petit og Dulong 1819⁶³ og samburður við atómpunga 2007. Margfeldi atómpunga og varmarýmdar massa er um það bil föst stærð. Hlutfallslegur atómpungi í töflu Petit og Dulong er miðaður við að atómpungi súrefnis sé 1,0.

Tafla Petit og Dulong				Atómvigt 1815 og 2007. Varmarými í Joule		
	A	B	C = A · B	D	E	F = E · B
	Specific heats	Relative weights of the atoms. Oxygen =1,0	Products of the weight of each atom by the corresponding specific heat	Atómvigt í töflu Petit og Dulong umreiknuð miðuð við atómvigt súrefnis =16	Atómpungi IUPAC 2007	Varmarými (Specific heat)
	cal/(g °C)		cal/ mol °C		g/mol	J/(mol °C)
Bismuth	0,0288	13,3	0,383	212,80	208,98	25,18
Lead	0,0293	12,95	0,379	207,20	207,20	25,40
Gold	0,0298	12,43	0,370	198,88	196,97	24,56
Platinum	0,0314	11,16	0,350	178,56	195,08	25,63
Tin	0,0514	7,35	0,378	117,60	118,71	25,53
Silver	0,0557	6,75	0,376	108,00	107,87	25,14
Zinc	0,0927	4,03	0,374	64,48	65,38	25,36
Tellurium	0,0912	4,03	0,368	64,48	127,61	48,69
Copper	0,0949	3,957	0,376	63,31	63,55	25,23
Nickel	0,1035	3,69	0,382	59,04	58,69	25,42
Iron	0,1100	3,392	0,373	54,27	55,85	25,70
Cobalt	0,1498	2,46	0,369	39,36	58,93	36,94
Sulphur	0,1880	2,011	0,378	32,18	32,07	25,222
Meðaltal			0,374			25,31
Staðalfrávik			0,008			0,31

Fleiri efni en þau 31 sem uppgötvuð voru milli 1790 til 1844 voru ekki uppgötvuð fyrr en 1860²⁶, þegar Robert Bunsen (1811–1899) og Gustav Kirchhoff (1824–1887) uppgötvuðu tvo alkalimálma cesium og rubidium með notkun litrófsgreiningartækis (spectroscope) sem þeir höfðu fundið upp árið áður. Þeir tóku eftir bláum línunum í litrófi af salti og gáfu efninu, sem talið var að línurnar stöfuðu frá, heitið caesium eftir latneska orðinu caesius sem táknar himinnbláma. Árið eftir greindu þeir efni sem gaf frá sér dökkrauðar línur og nefndu það rubidium sem vísar til rauða litarins. Litrófgreiningar áttu þátt í uppgötvun thallium 1861,

⁶³ <http://web.lemoyne.edu/~giunta/classicalcs/DP.html>

Carmen Giunta 2003. Dulong & Petit law. Permission is granted to reproduce for non-commercial educational purposes.

Reference: Alexis-Thérèse Petit (1791-1820) and Pierre-Louis Dulong (1785-1838. Recherches sur quelques points importants de la Théorie de la Chaleur. *Annales de Chimie et de Physique* 10, 395-413 (1819); contemporary translation from *Annals of Philosophy* 14, 189-198 (1819)

indium 1863 og gallium 1875, svonefndra sjaldgæfra jarðtegunda og í uppgötvun eðalloftegunda⁶⁴

Eðallofttegundir

- | | |
|----|---|
| 1. | Argon úr grísku merkir latur og vísar til þess hve óvirk (inert) lofttegundin er. |
| 2. | Neon merkir nýr |
| 3. | Krypton merkir hulinn |
| 4. | Xenon merkir sérkennilegur |

Lotukerfið.

Árið 1862 kynnti Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois grein í frönsku vísindaakademíunni sem birtist síðar í timariti akademíunnar *Comptes Rendus*. Hann varð fyrstur til að setja fram lista yfir frumefnin eftir vaxandi atómpunga, Framsetning hans var ekki í töfluformi heldur sem línurit sem þótti torskilið og var því ekki birt fyrr en seinna í lítt þekktu jarðfræðiriti. Því urðu hugmyndir Chancourtois ekki kunnar fyrr en hann vakti athygli á þeim eftir að Mendeleev hafði birt sínar niðurstöður um lotukerfið⁶⁵.

Julius Lothar Meyer birti 1864 í bók sinni “Die modernen Theorien der Chemie” *töflu* þar sem 28 frumefnum er raðað í línur eftir atómpunga og í dálka eftir gildistölum (P. Werthigkeit, e. valence)⁶⁶.

Meyer (1830–1895) og Mendeleev (1834-1907) áttu ýmislegt sameiginlegt⁶⁷ Þeir störfuðu báðir með Robert Bunsen í Heidelberg með fimm ára millibili og voru ungir að árum á ráðstefnunni í Karlsruhe 1860, þar sem Cannizzaro kynnti aðferðir sínar við ákvörðun atómpunga. Meyer og Mendeleev skrifuðu hvor um sig kennslubók í efnafræði sem varð þeim tilefni skoðunar á eiginleikum og skyldleika frumefna, sem leiddi af sér lotukerfi í töfluformi, þar sem frumefnum var raðað í röð eftir atómpunga þar sem skyld efni röðuðust saman í dálka (tafla Meyers) eða línur (tafla Mendeleevs).

Englendingurinn John Newlands setti upp lotutöflu með 7 frumefnum í hverri lotu og segir í grein sem birtist í Chemical News fjórum árum áður en tafla Mendeleevs kom fram⁶⁸:

‘If the elements are arranged in order of their equivalents [ie relative atomic masses in today’s terminology] with a few transpositions, it will be seen that elements belonging to the same group appear in the same horizontal line. Also the numbers of similar elements differ by seven or multiples of seven. Members stand to each other in the same relation as the extremities of one or more octaves of music. Thus in the nitrogen group phosphorus is the

⁶⁴ http://elements.vanderkrogt.net/chemical_symbols.php

J. L. Heilbron 2005. Nobel gases í The Oxford guide to the history of physics and astronomy, Volume 10. Ritstj. John L. Heilbron <http://books.google.com/> og The Discovery of the Rare Gases, A Life of Sir William Ramsay, The Noble Gases <http://science.jrank.org/pages/49327/noble-gases.html>

⁶⁵ Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois <http://www.rsc.org/education/teachers/learnnet/periodictable/pre16/develop/index.htm>

⁶⁶ Julius Lothar Meyer – the first identifier of periodicity?

<http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/periodictable/>

⁶⁷ Julius Lothar Meyer (1830–1895) and Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834–1907)

<http://www.chemheritage.org/classroom/chemach/periodic/meyer-mendeleev.html>

⁶⁸ Could the original formulation of the Periodic Table be regarded as British?

<http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/periodictable/pre16/develop/newlands.htm>

seventh element after nitrogen and arsenic is the fourteenth elements after phosphorus as is antimony after arsenic. This peculiar relationship I propose to call The Law of Octaves'.

Newlands kynnti hugmyndir sínar 1865 í erindi í Chemical Society (seinna nefnt Royal Society of Chemistry), en útgáfunnefnd félagsins neitaði að birta erindið og einn fundarmanna hæddist að hugmyndinni með því að segja að eins mætti raða efnunum í stafrófsröð. Newlands líkti lotunum við áttundir í tónlist (sbr. tilvitnun að ofan) Eftir að lotukerfið hafði hlotið almenna viðurkenningu bætti félagið (Chemical Society) nokkuð fyrir mistökin með því að bjóða Newlands að halda fyrirlestur um lotukerfið, en fulla viðurkenning fyrir uppgötvun lotukerfisins veitti félagið honum fyrst 1998 heilli öld eftir fráfall Newlands.

Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907) fæddur í Síberíu varð prófessor í efnafræði við Háskólann í Pétursborg. Þar sem kennslubók í efnafræði samtímans var ekki fánleg samdi hann kennslubók í efnafræði árin 1868 og 1870 (*The Principles of Chemistry* í enskri þýðingu) Við samningu bókarinnar skrifaði hann frumefnin, atómþunga og eiginleika á spjöld og raðaði þeim upp eftir atómþunga og tók eftir því að efni sem skyld voru að eiginleikum röðuðust með ákveðnu millibili í lotur. Eftirfarandi tilvitnun er þýðing úr bók Mendeleevs á vefsíðu American Institute of Physics (2000 – 2010)⁶⁹

“I began to look about and write down the elements with their atomic weights and typical properties, analogous elements and like atomic weights on separate cards, and this soon convinced me that the properties of elements are in periodic dependence upon their atomic weights.”

Mendeleev, Principles of Chemistry, 1905, Vol. II

Í úrdrætti greinar Mendeleevs (2. mynd) segir: Ef frumefnunum er raðað eftir atómþunga í dálka þannig, að í hverri línu raðist skyld efni einnig eftir atómþunga, þá raðast þau á eftirfarandi hátt og af því má draga nokkrar almennar ályktanir (texti efst í 1. mynd).

Ályktanir Mendeleevs eru þessar (texti neðan við töflu í

Í röð frumefnanna eftir atómþunga koma fram breytingar eiginleika þrep fyrir þrep.

1. Skyld frumefni eru annað hvort með svipaða atómþunga (Pt, Ir, Os) eða bilið milli atómþunga efnanna er svipað (K, Rb, Cs).
2. Röð eftir atómþunga svarar til gildis frumefnanna (þ. Werthigkeit, sbr. þ ýskan texta í grein Mendeleevs í 2. Mynd, bls.27, e. valence eða valency, t.d. er gildistala vetnis = +1, súrefnis = -2) og að vissu marki til efnafræðilegra eiginleika (þ. chemisches Verhalten), til dæmis Li, Be, B, C, N, O, F.
3. Atómþungi frumefna sem algengust eru í náttúrunni er lítill.

Í töflu Mendeleevs frá 1869 (2. mynd) eru loturnar 6 talsins í dálkum. Á þeim tíma voru rúmlega 60 frumefni kunn.

Í seinni tíma útgáfum lotukerfisins er töflunni snúið þannig að loturnar eru í línunum, eins og sést í lotukerfi alþjóðlega efnafræði félagsins (Union of Pure and Applied Chemistry í 5. töflu. Þar eru loturnar 7. Viðurkennd frumefni eru þar 111 og auk þess eru frumefni nr. 112 - 118 til athugunar.

⁶⁹ <http://www.aip.org/history/curie/periodic.htm>

Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Von D. Mendelejeff. — Ordnet man Elemente nach zunehmenden Atomgewichten in verticale Reihen so, dass die Horizontalreihen analoge Elemente enthalten, wieder nach zunehmendem Atomgewicht geordnet, so erhält man folgende Zusammenstellung, aus der sich einige allgemeinere Folgerungen ableiten lassen.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
		Ni =	Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	J = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

1. Die nach der Größe des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen eine stufenweise Abänderung in den Eigenschaften.
2. Chemisch-analoge Elemente haben entweder übereinstimmende Atomgewichte (Pt, Ir, Os), oder letztere nehmen gleichviel zu (K, Rb, Cs).
3. Das Anordnen nach den Atomgewichten entspricht der *Werthigkeit* der Elemente und bis zu einem gewissen Grade der Verschiedenheit im chemischen Verhalten, z. B. Li, Be, B, C, N, O, F.
4. Die in der Natur verbreitetsten Elemente haben *kleine* Atomgewichte

2. mynd Lotukerfi Mendeleevs. Úrdráttur úr fyrstu grein Mendeleevs um lotukerfið 1869: Um samband einleika frumefnanna við atómpunga (Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Zeitschrift für Chemie 1869)⁷⁰

Þegar Mendeleev ráðaði frumefnum eftir einleikum komu fram eyður og hann leyfði sér að spá um einleika óþekktra efna sem gætu fyllt í eyðurnar. Hann reyndist sannspár um einleika þessarar óþekktu efna og ekki liðu mörg ár þar til þau voru uppgötvuð, gallium 1875, scandium 1879 og germanium 1886. Efnin voru skýrð eftir þeim löndum þar sem þau voru uppgötvuð (í Frakklandi, Skandinavíu og Þýskalandi. Gallium er fornt heiti á Frakklandi).

4. tafla. Tilgátur Mendeleevs um einleika áður óþekktra frumefna og uppgötvun og mældir einleikar þeirra. Trapp D. 2007. Repetitious Patterns. Invention of the period chart for chemical elements.

<i>Mendeléeff's Predictions for Three Missing Elements</i>	
Predicted Properties	Properties as Discovered
Eka-Aluminum (as predicted 1871)	Gallium (discovered 1875)
Atomic Weight: 68	Atomic Weight: 69.3
Low melting point	Melting point: 30.15°C
Density: 5.9 g/mL	Density: 5.93 g/mL
Formula of Oxide: Ea ₂ O ₃	Oxide: Ga ₂ O ₃

⁷⁰ <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/periodictable/pre16/develop/mendeleev.htm>

Chloride: Ea_2Cl_6	Chloride: Ga_2Cl_6
Eka-Boron (as predicted 1871) Atomic Weight: 44 Oxide: Eb_2O_3 with density 3.5 g/mL	Scandium (discovered 1879) Atomic Weight: 44.7 Oxide: Sc_2O_3 , density 3.8 g/mL
Eka-Silicon (as predicted 1871) Atomic Weight: 70 Grey, difficult to melt Oxide: EbO_2 Chloride: $EbCl_4$, boiling $\sim 100^\circ C$ Fluorides: EbF_4 & M_2EbF_6	Germanium (discovered 1886) Atomic Weight: 72.04 Grey-white; melts $\sim 900^\circ C$ Oxide: GeO_2 Chloride: $GeCl_4$, boils $86^\circ C$ Fluorides: $GeF_4 \cdot 3H_2O$ & M_2GeF_6

Hugmyndin að lotukerfinu er oftast eignuð Mendeleev (1869), en fleiri áttu hlut að máli um svipað leyti, franskur jarðfæðingur Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois (1862), þýskur efnafræðingur Julius Lothar Meyer (1864) enski efnafræðingurinn John Alexander Reina Newlands (1865).

Núverandi lotukerfi ber mestan svip að kerfi Mendeleevs og hann notaði kerfið til að setja fram tilgátur um eiginleika óþekktra efna eins og rakið er að ofan og tilgáturnar reyndust réttar. Að öllum líkindum er það síðastnefnda ástæðan fyrir því að lotukerfið er fyrst og fremst rakið til Mendeleevs.

Yfirlit um þróun atómkenningar og lotukerfis á 19.öld.

Nokkrir frumkvöðlar í þróun hugmynda um frumefnin frá alkemíu til lotukerfis:

Joan Baptista van Helmont 1579 – 1644	John Dalton 1766 – 1844
Robert Boyle 1627-1691	Jons Jacob Berzelius 1779 – 1848
Joseph Black 1728 – 1799	Joseph-Louis Gay-Lussac 1778 – 1850
Henry Cavendish 1731 – 1810	Amedeo Avogadro 1776 – 1856
Joseph Priestley 1733 – 1804	Stanislao Cannizzaro 1826 – 1910
Carl Wilhelm Scheele 1742 – 1786	Béguyer de Chancourtois 1820 – 1886
Antoine Lavoisier 1743 – 1794	Julius Lothar Meyer 1830 – 1895
Daniel Rutherford 1749 – 1819	John Newlands 1737–1898
Joseph Louis Proust 1754–1826	Dmitri Ivanovich Mendeleev 1834 – 1907

John Dalton 1808: birti kenningu sína um atómin 1808 í bók sinni A New System of Chemical Philosophy.

Joseph Louis Proust (1799): frumefni í efnasambandi eru alltaf í sömu heilla talna hlutföllum óháð því hvernig sambandið er myndað (e. law of constant composition eða law of definite proportions)

Jöns Jakob Berzelius (1818) hóf um 1807 rannsóknir á samsetningu efnasambanda og staðfesti lögmál Prousts um föst hlutföll frumefna í efnasambandi óháð framleiðsluaðferð. Hann greindi um 2000 einföld og samsett efni á einum áratug og birti 1818 atómpunga 45 frumefna með mikilli nákvæmni⁷¹

Gay Lussac 1808: Í samböndum lofttegunda eru alltaf einföld hlutföll milli lofttegundanna

⁷¹ NNDB. Jönd Jacob Berzelius. Copyright ©2010 Soyilent Communications
<http://www.nndb.com/people/051/000094766/>

Avogadro 1811: Í sama rúmmáli af mismunandi lofttegundum er alltaf sami fjöldi sameinda að því tilskyldu að hitastig og loftþrýstingur sé eins.

Cannizzaro 1858: Ákvörðun atómpunga lofttegunda með notkun lögmáls Avogadros.
Chancourtois (1862), Meyer (1864), Newlands (1865), Mendeleev (1869): Lotukerfi.

5. tafla. Lotukerfi International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) 2007

http://old.iupac.org/reports/periodic_table/

Time of Discovery		Before 1800																1800-1849				1850-1899				1900-1949				1950-1999			
1	2																	13	14	15	16	17	18										
H 1.0079	He 4.0026																	B 10.811	C 12.011	N 14.007	O 15.999	F 18.998	Ne 20.180										
3	4																	13	14	15	16	17	18										
Li 6.941	Be 9.0122																	Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.065	Cl 35.453	Ar 39.948										
11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	31	32	33	34	35	36																
Na 22.990	Mg 24.305	Sc 44.956	Ti 47.867	V 50.942	Cr 51.996	Mn 54.938	Fe 55.845	Co 58.933	Ni 58.693	Cu 63.546	Zn 65.38	Ga 69.723	Ge 72.64	As 74.922	Se 78.96	Br 79.904	Kr 83.798																
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																
Rb 85.468	Sr 87.62	Y 88.906	Zr 91.224	Nb 92.906	Mo 95.96	Tc -	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.60	I 126.90	Xe 131.29																
55	56	57-71		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86															
Cs 132.91	Ba 137.33	89-103		Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.84	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po -	At -	Rn -															
87	88	89-103		104	105	106	107	108	109	110	111																						
Fr -	Ra -	89-103		Rf -	Db -	Sg -	Bh -	Hs -	Mt -	Ds -	Rg -																						
																		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
																		La 138.91	Ce 140.12	Pr 140.91	Nd 144.24	Pm -	Sm 150.36	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.93	Dy 162.50	Ho 164.93	Er 167.26	Tm 168.93	Yb 173.05	Lu 174.97	
																		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
																		Ac -	Th 232.04	Pa 231.04	U 238.03	Np -	Pu -	Am -	Cm -	Bk -	Cf -	Es -	Fm -	Md -	No -	Lr -	

Notes

- Element with atomic numbers 112 and above have been reported but not fully authenticated; see *Pure Appl. Chem.* **75**(10), pp. 1601-1611, 2003.

http://old.iupac.org/reports/periodic_table/

Heimildir um frumefni og sögu efnafræðinnar

Asiado, Tel 2008. Rutherford and Nitrogen. Scottish Chemist and the Chemical Element He Discovered

http://great-scientists.suite101.com/article.cfm/rutherford_and_nitrogen#ixzz0caq7e03X

Cardillo, Paolo 2001. Some historical accidental explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 14, 69-76

Carnegie, Douglas (1894) *Law and Theory in Chemistry: A Companion Book for Students* http://books.google.is/books?id=tfPrgz3gLLMC&dq=inauthor%3A%22Douglas%20Carnegie%22&hl=is&source=gbs_similarbooks

Cohen, S. Marc 2002. Lecture notes. Focuses on the relation of Anaximander's thought to that of Thales. <http://faculty.washington.edu/smcohen/320/anaximan.htm>

O'Connor J J and E F Robertson 2000. Empedocles of Acragas

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Empedocles.html>

Dalton John (1808). *A New System of Chemical Philosophy*. [excerpts], (Manchester, 1808) [from facsimile edition (London: Dawson)] CHAP. II. On the Constitution of Bodies of *Selected Classic Papers from the History of Chemistry. Classic Chemistry compiled by Carmen Giunta Le Moyne College, Department of Chemistry*

Ducheyne, Steffen 2005. J.B. Van Helmont and the Question of Experimental Modernism, *Physis: Rivista Internazionale di Storia della Scienza*, vol. XLII, 2005, pp. 305-332. [kom út 2007]

Gascoigne, Bamber. "History of Chemistry HistoryWorld. From 2001, ongoing.

<http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?historyid=ac20>

Giunta, Carmen. *Classic Chemistry*. Le Moyne College Department of Chemistry.

<http://web.lemoyne.edu/~giunta/>

Graham, Daniel W., 2008. Heraclitus. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2008 Edition)*,

Zalta Edward N. (ed.), <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/heraclitus/>

Holmyard, Eric John (1990). *Alchemy*.

Ihde, Aaron John, 1984. *The development of modern chemistry*. Útg. 1984 (fyrsta útg. 1964), General Publishing Company, Canada.

Knierim, Thomas 2009. *Greek Philosophy*.

<http://www.thebigview.com/greeks/>

van der Krogt, Peter 2010. *Development of the chemical symbols and the Periodic Table. Lavoisier - Dalton - Berzelius - Менделеев (Mendeleev) – Moseley*.

http://elements.vanderkrogt.net/chemical_symbols.php

Larson, Philip Gardner. Lavoisier. Grein á vefsíðu University of Virginia 2009.
<http://cti.itc.virginia.edu/~meg3c/classes/tcc313/200Rprojs/lavoisier2/home.html>

Mattson, Bruce 2001. History of gas chemistry.
http://mattson.creighton.edu/History_Gas_Chemistry/

Parington, J.R. 1936. Joan Baptista van Helmont. *Annals of Science*, 1:4,359-384

Seilnacht, Thomas 2010. Chemiker portraits.
<http://www.seilnacht.com/chemiker/chepara.html>

Sheppard, Philip (1968). *Alchemy* Charles Scribner's Sons New York

Smith, R. Angus (1856). *Memoir of John Dalton and History of the Atomic Theory*. London: H. Bailliere.
<http://books.google.com/books>

The Periodic Table of Elements. Dmitri Ivanovich Mendeleev. *American Institute of Physics* 2000 – 2010. (Höfundur ekki tilgreindur.) <http://www.aip.org/history/curie/periodic.htm>

Thorburn Burns, D. og Hendrik Deelstra, 2008. Analytical chemistry in Belgium: an historical overview. *Microchim Acta* (2008) 161: 41–66.
<http://www.springerlink.com/content/162r67331t21n4p2/fulltext.pdf>

Weisstein Eric W., 1996-2007 <http://scienceworld.wolfram.com/biography/Paracelsus.html>

Wilson, George 1853. *The life of the honourable Henry Cavendish. Including abstracts of his more important scientific papers, and a critical inquiry into the claims of all the alleged discoverers of the composition of water.* Printed for the Cavendish Society.

Nitrogen." *Chemicool Periodic Table*. 2/15/2010 <http://www.chemicool.com/elements/nitrogen.html>

Í ritskrá á vefsíðunni er hlekkur við ævisögu Cavendish: George Wilson 1851. *The life of the honourable Henry Cavendish*

Leitin að skýringum á vexti plantna

Skýring á vexti plantna er hér notað fyrir hugtak frá fyrri öldum sem á ensku var nefnt “principle of vegetation” eða grundvöllur gróðurs og átti eiginlega við næringu plantna eða með orðalagi Russels 1915:

„The earlier investigators sought for a "principle" of vegetation to account for the phenomena of soil fertility and plant growth”.

Humuskenningin

Aristoteles (384-322 f. Kr.) gerði ráð fyrir að plönturnar nærast á moldarefnum (húmus) og þau skili sér aftur til jarðar með plöntuleifum. Hugmyndin um að lífræn efni í plöntum ættu uppruna sinn í moldarefnum jarðvegs varð býsna lífseig. Það er ekki fyrr en með rannsóknum Spenglers (1828) og með riti Liebigs um efnafræði í landbúnaði og lífeðlisfræði 1840 (Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie) að humuskenningin er úr sögunni, eins og síðar verður rætt um.

Þróun hugmynda um vatn og vöxt plantna

Francis Bacon (1561-1626) gerði tilraunir með ræktun allmargra planta í vatni og komst að því að sumar uxu betur í vatni en jarðvegi og ályktaði að vatn væri allt í öllu sem næring plantna og jarðvegur væri til þess að halda plöntunum uppréttum og til hlífðar gegn of miklum hita eða kulda, Egerton, F. N. 2004b.

„It seemeth by these instances of water that for nourishment the water is almost all in all, and the earth doth but keep the plant upright, and save it from overheat and over-cold.“

Francis Bacon (1627) í *Sylva Silvarum tilvitnun hjá Hersey 2003*

Tilraun van Helmonts og skýring á vexti plantna

Joan Baptista van Helmont (1579-1644) gerði um miðja 17. öld tilraun til að skýra vöxt planta með því að fylgjast með vexti stiklings af víði í trjástærð. Stiklingnum var komið fyrir í leirkeri og lok úr tinhúðuðu járn sett á kerid yfir jarðveginn til að koma í veg fyrir að svifryk bærist í jarðveginn. Mörg göt voru á plötunni. Vökvað var eftir þörfum með rigningavatni eða eimuðu vatni. Stiklingurinn var 5 pund í byrjun og rúm 169 pund að 5 árum liðnum, en jarðvegurinn léttist aðeins um nokkur hundruð grömm. Jarðvegurinn léttist það lítið að van Helmont taldi að plantan lifði á vatni einu saman.

Aðferð Helmonts var sú að einangra plöntuna í kerinu og útiloka, eins og fært var, að nokkuð bættist í jarðveginn en hann gaf því ekki gaum að plantan var umlukin lofti. Helmont hafði þó fyrstur notað orðið „gas“ og greindi frá því að gas sylvestre (koltvísyringur) myndaðist við gerjun og við bruna 62 punda af eikarkolum mynduðust 61 pund af „gasi“ og 1 pund af ösku, Hershey 2003. En tillífun koltvísyrings var á þessum tíma ókunn, auk þess aðhylltist van Helmont þá hugmynd að allt efni væri komið frá vatni. Það skýrir rangtúlkun hans á niðurstöðum tilraunarinnar með víðiplöntuna.

Hugmynd að tilrauninni er að líkindum sótt í bók sem kom út árið 1450, *Idiota de staticis experimentis*. Þar lýsir Nicolaus Krebs frá Cusa (eða Nicholas Cusanus) (1401-1464)

upphugsaðri samskonar tilraun og spáir sömu niðurstöðu og Helmont fékk og dregur sömu ályktun, Hersey 2003⁷² og Ducheyne 2005.

Í texta Nicolaus frá Cusa kemur einnig fram sú hugmynd að vatn geti breyst í önnur efni: *Therefore the waters being engrossed (or impregnated) in the earth, attracted a terrestreity, and by the operation of the Sunne, upon the Herb were condensed (or were condensed into an Herb). If those Herbs bee then burn't to ashes, mayest not thou guesse by the diversity of the weights of all; How much earth thou foundest more than the hundred weight, and then conclude that the water brought all that? For the elements are convertible one into another by parts...*

Úr grein Egertons (2004b)

Tvennt nefnir Nicolaus frá Cusa í sinni tilraunlýsingu umfram van Helmont í fyrsta lagi gerði hann ráð fyrir að nota fræ sem hann vigtaði fyrir sáningu og í öðru lagi að brenna plöntuna til ösku í lok tilraunar og vigta öskuna. Það var galli á tilraun Helmonts að víðiplantan var eingöngu vegin fersk, en til bóta hefði verið að mæla einnig þurrefni. Þá hefði van Helmont getað ályktað að megnið af vökvunarvatninu hefði gufað út úr plöntunni, og jafnvel komist að þeirri niðurstöðu að sá hluti sem ekki kæmi úr jarðvegi og vatni væri kominn úr lofti. Ítarlega gagnrýni á skipulagi tilraunar van Helmonts og greiningu gagna er að finna í grein Hersheys 2003.

Talið er að van Helmont hafi með tilraun sinni orðið fyrstur til að nota ker við ræktunartilraun sem síðar varð algeng aðferð við nákvæmnistilraunir.

Helmont var fordæmdur af sínum eigin háskóla í Louvain og katólska rannsóknaréttinum fyrir bók um lækningar sára með notkun seguls, ári eftir fordæmingu Galileos og var dæmur í stofufangelsi. Helmont birti ekkert af því sem hann skrifaði um vísindi og læknisfræði eftir fordæmingu rannsóknaréttarins illræmda 1625. Þessi seinni verk van Helmonts voru fyrst gefin út (*Ortus medicinae*) af syni hans Franciscus Mercurius 1648 og í ýtarlegri útgáfu 1652.

⁷² Í grein Herseys 2003 er ensk þýðing frá 1662 á tilraunalýsingu van Helmonts og þýðing á texta Nicholas Cusanus. Svo líkar eru lýsingarnar á tilraun van Helmonts og hugsanatilraun Nicholas Cusanus tvö hundruð árum fyrr að vart getur verið um tilviljun að ræða.

- A. Texti van Helmonts: "But I have learned by this handicraft-operation that all Vegetables do immediately, and materally proceed out of the Element of water onely. For I took a Earthen vessel, in which I put 200 pounds of Earth that had been dried in a Furnace, which I moystened with Rainwater, and I implanted therein the trunk or stem of a Willow tree, weighing five pounds; and at length, five years being finished, the Tree sprung from thence. Did weigh 169 pounds, and about three ounces; But I moystened the Earthen Vessel with Rain-water, or distilled water (alwayes when there was need) and it was large, and implanted into the Earth, and least the dust that flew about should be co-mingled with the Earth, I covered the lip or mouth of the Vessel with an Ironplate covered with Tin, and easely passable with many holes. I computed not the weight of the leaves that fell off in the four Autumnes. At length, I again dried the Earth of the Vessell, and there were found the same two hundred pounds, wanting about two ounces. Therefore 164 pounds of Wood, Barks, and Roots, arose out of water onely."
- B. Texti Nicholas Cusanus: "If a man should put an hundred weight of earth into a great earthen pot, and then should take some Herbs, and Seeds, and weigh them, and then plant or sow them in that pot, and then should let them grow there so long, untill hee had successively by little and little, gotten an hundred weight of them, hee would finde the earth but very little diminished, when hecame to weigh it againe: by which he might gather, that all the aforesaid herbs, had their weight from the water...."

Sölt og jarðvegur mikilvæg fyrir vöxt plantna

Ályktun Helmons að vöxtur planta byggðist eingöngu á upptöku vatns var afturför frá skýringu Palissy 1563 á vexti plantna sem taldi salt sem plöntur taki úr jarðvegi skipti mestu máli og að það skili sér aftur í jarðveg sem aska og frá ályktun efnafræðingsins Glauber's (1656) sem taldi að saltpétur (nitrastsölt) væri undirstaða vaxtar plantna (e. principle of vegetation)⁷³.

Þótt tilraun van Helmons væri eins og Russell orðar það⁷⁴, einföld og sannfærandi, þá er ályktunin röng, þar sem ekki var tekið tillit til áhrifa lofta og til þess sem jarðvegur hafði lést um. Helmont gerði einfaldlega ráð fyrir að mismunurinn á jarðvegi í byrjun og lokin hefði tapast, Ducheyne 2005. Á þessum tíma hafði ekki verið sýnt fram til lífun kolefnis með sólarorku og að steinefni úr jarðvegi væru sú næring sem plöntur sækja úr jarðvegi.

Egerton 2004b bendir á að nokkru yngri samtímamaður Helmons, stærðfæðingurinn og heimspekingurinn René Descartes hafi birt ritgerð sína *Discours de la méthode* (1637) um hvernig eigi að haga vísindalegum rannsóknum, það tímanlega að Helmont hefði getað tekið þær til athugunar. Descartes setti fram fjórar meginreglur sem yrði að fylgja, en sú fjórða var að skráning skyldi vera svo fullkomin og yfirlit svo ítarlegt að fullvíst væri að ekkert hefði verið undanþegið.

“The first was never to accept anything as true that I did not clearly know to be such. That is to say, to carefully avoid precipitation and prejudice in judgement to accept in them nothing more than what was presented to my mind so clearly and distinctly that I could have no ground to doubt it.

The second is to divide each of the difficulties which I examined into as many parts as possible, and as requisite in order that it might be resolved in the best manner as possible.

The third, to carry on my reflections in due order, commencing with objects that were the most simple and easy to understand, in order to rise little by little or by degrees, as it were—to knowledge of the most complex, assuming an order, even a fictitious one, among those which do not follow a natural sequence relatively to another.

The last was, in all cases to make enumerations so complete and reviews so general, that I could be certain of having omitted nothing.”⁷⁵

⁷³ Russell 1915: Some years later about 1650 Glauber (107) set up the hypothesis that saltpetre is the "principle of vegetation. Having obtained saltpetre from the earth cleared out from cattle sheds, he argued that it must have come from the urine or droppings of the animals, and must, therefore, be contained in the animal's food, i.e., in plants. He also found that additions of saltpetre to the soil produced enormous increases in crop. He connected these two observations and supposed that saltpetre is the essential principle of vegetation. The fertility of the soil and the value of manures (he mentions dung, feathers, hair, horn, bones, cloth cuttings) are entirely due to saltpetre.

⁷⁴ Russell 1915: The experiment is simple and convincing, and satisfied Boyle who repeated it with "squash, a kind of Indian pompion" and obtained similar results. Boyle further distilled the plants and concluded, quite justifiably from his premises, that the products obtained, "salt, spirit, earth and even oil (though that be thought of all bodies the most opposite to water) may be produced out of water". Nevertheless the conclusion is incorrect, because two factors had escaped Van Helmont's notice the parts played by the air and by the missing two ounces of soil. But the history of this experiment is thoroughly typical of experiments in agricultural chemistry generally: in no other subject is it so easy to overlook a vital factor and draw from good experiments a conclusion that appears to be absolutely sound, but is in reality entirely wrong.

⁷⁵ Haldane E.S. and G.R.T. Ross 1911. Discourse on the method of rightly conducting the reason and seeking of truth in the sciences, bls. 81-130 í *The philosophical works of Descartes*. Þýðing Haldanes og Ross. Volume 1. Cambridge University Press, UK.

Ályktun Helmons hafi að vöxtur planta sé alfarið byggður á vatni og uppgötvun hans á lofttegund sem losnaði við bruna trjáviðar sem gaf Egerton tilefni til að ætla að Helmont hefði getað komist að annarri niðurstöðu hefði hann fylgt fjórðu reglu Descartes um vísindalega aðferð:

It seems ironic that he who distinguished gases from air did not notice that his willow was in contact not just with dirt and water but also air, from which it might also have absorbed substance. His younger contemporary, René Descartes (1596–1650), published his Discours de la méthode (1637), on how to do science, in time for van Helmont to have pondered his four rules, the fourth of which was “to make enumerations so complete and reviews so general that I should be certain of having omitted nothing” (Descartes 1911:92), but in this case, van Helmont failed to follow rule 4 (not that Descartes always followed his own rules either). If van Helmont had followed rule 4, he might have itemized air as a potentially relevant factor. Of course, he might have reasoned instead that since everything comes from water, and he was already allowing for the plant to absorb water, that air need not be considered; but if this was his thought, most likely he would have said so.⁷⁶

Hvað sem líður ályktun Helmons um hlutverk vatns í vexti planta er enn þann dag í dag litið svo á að tilraun hans og tilraunir Roberts Boyle (1627-1691) hafi verið grundvöllur að tilraunum seinni tíma í efnafræði.

The principles of experiment enter chemistry in the work of van Helmont, and are developed by another aristocrat fascinated by the puzzles of science - Robert Boyle. Gascoigne, Bamber. 2001,⁷⁷

Van Helmont's usage of relatively isolated physical systems and a moderate degree of quantification is the feature that best characterizes his contributions to “modern” experimentation. Ducheyne, Steffen 2005.

Efna- og eðlisfræðingurinn Robert Boyle og starfsfélagi hans Robert Sharrock (1630-1684) við háskólann í Oxford fengu árið 1658 áhuga á vexti plantna, Egerton (2004b). Sharrock vild prófa ályktun Bacons að vatn væri það sem nær öllu máli skipti í næringu plantna. Hann setti smáplöntur án róta í glös með vatni og 24 plöntutegundir mynduðu mynduðu rætur en 17 tegundir ekki. Nokkrar þeirra sem mynduðu rætur drápu en Sharrock vígaði þær sem lifðu af eftir tiltekinn tíma og birti niðurstöðurnar (*The Propagation and Improvement of Vegetables by the Concurrence of Art and Nature*) 1660, ári áður en Boyle birti sínar. Sharrock tileinkaði bók sína Boyle, sem hafði fylgst með sumum tilraunum Sharrocks.

Boyle er m.a. þekktur fyrir lögmál um lofttegundir sem við hann er kennt. Bók Boyles *The Sceptical Chymist* kom út 1661 og þar er gefið í skyn að hann hafi byrjað sínar tilraunir áður en vissi um verk van Helmons. (Nash 1957:331, Krikorian and Steward 1968:289, tilvitnun hjá Egerton 2004 b). Eins og kemur fram neðanmáls⁷⁸, telur Russell að Boyle hafi fallist á

⁷⁶ Egerton, F. N. 2004b. A history of the ecological sciences, part 14: plant growth studies in the 1600s. *Bulletin of the Ecological Society of America* 85:208–213.

⁷⁷ Gascoigne, Bamber. “History of Chemistry HistoryWorld. From 2001, ongoing. <http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?historyid=ac20>

⁷⁸ Russell 1915: The experiment is simple and convincing, and satisfied Boyle who repeated it with "squash, a kind of Indian pompion " and obtained similar results. Boyle further distilled the plants and concluded, quite justifiably from his premises, that the products obtained, "salt, spirit, earth and even oil (though that be thought of all bodies the most opposite to water) may be produced out of water ". Nevertheless the conclusion is incorrect, because two factors had escaped Van Helmont's notice the

niðurstöður Helmons. Samt sem áður bendir Boyle á að plöntur lifi ekki á vatni einu saman (í *The Origin of Forms and Qualities 1666-67*):

"And indeed experience shews us, that several plants, that thrive not well without rain water, are not yet nourish'd by it alone, since when corn in the field, and fruit-trees in orchards have consum'd the saline and sulphureous juices of the earth, they will not prosper there, how much rain soever falls upon the land, till the ground by dung or otherwise be supply'd again with such assimilable juices" (Hunter and Davis, 1999, tilvitnun hjá Ducheyne 2005).

John Woodward (1665—1728) hafði lesið það sem Bacon, Helmont og Boyle skrifuðu að vatn væri eina næring plantna en hafði sínar efasemdir einkum um að vatnið sem notað var í fyrri tilraunum hefði verið hreint og ákvað að gera eigin tilraunir, Egerton 2004. Hann hafði áður tekið sýni af vatni víða á Englandi og komst að því að það var aldrei hreint. Þegar tærasta vatn var sett glas og glasinu lokað og þau látin standa í óhreyfð nokkra daga settust stundum til agnir af steinefnum eða græn sliðja myndaðist.

6. tafla. Þrjár tilraunir Woodward's með ræktun myntuplantna í mismunandi hreinu vatni.

Ræktun í	Þyngd myntuplöntu, grain (1 grain = 64,8 mg)				Vatnsnotkun:vöxtur
	Í byrjun	Eftir 77 daga	Vöxtur	Vatnsnotkun	
Uppsprettuvatni	27	42	15	2588	172,5
Rigningarvatn	28,25	45,75	17,5	3004	171,7
Árvatn úr Thames	28	54	26	2493	95,9

John Woodward afsannaði hugmynd van Helmons um vatn sem einu orsök vaxtar eins og kemur fram í ályktunum Woodward's samkvæmt Egerton 2004 (Woodward 1699:207–225):

- 1) *In Plants of the same kind, the less they are in bulk, the smaller the Quantity of the Fluid Mass in which they are set is drawn off...*
- 2) *The much greatest part of the Fluid Mass that is drawn off and convey'd into the Plants, does not settle or abide there: but passes through the Pores of them, and exhales up into the Atmosphere.*
- 3) *A great part of the terrestrial Matter that is mixt with the Water, ascends up into the Plant as well as the water.*
- 4) *The Plant is more or less nourish'd and augmented in proportion as the Water in which it stands contains a greater or smaller quantity of proper terrestrial Matter in it.*
- 5) *Vegetables are not form'd of Water: but of a certain peculiar Matter. It hath been shewd that there is a considerable Quantity of this Matter contain'd both in Rain, Spring, and River Water...*

parts played by the air and by the missing two ounces of soil. But the history of this experiment is thoroughly typical of experiments in agricultural chemistry generally : in no other subject is it so easy to overlook a vital factor and draw from good experiments a conclusion that appears to be absolutely sound, but is in reality entirely wrong.

6) *Spring and Rain water contain pretty near an equal Charge of Vegetable Matter: River-water more than either of them.*

7) *Water serves only for a Vehicle to the terrestrial Matter which forms Vegetables: and does not it self make any addition unto them. Where the proper terrestrial Matter is wanting, the Plant is not augmented tho' never so much Water ascend into it.*

8) *Water is not capable of performing this Office to Plants unless assisted by a due Quantity of Heat...*

Meginatriðin sem koma fram í ályktunum Woodward's eru:

1. Vatnsupptaka plantna sömu tegundar fer eftir stærð þeirra.
2. Mesti hluti vatns sem plöntur taka upp gufar út úr plöntunum (útgufun, transpiration).
3. Mikill hluti jarðefna sem blandast jarðvatni flyst með vatninu í plönturnar.
4. Plöntur nærast og stækka að miklu leyti í hlutfalli við magn jarðefna í vatninu sem þær standa í.
5. Plöntur eru ekki myndaðar af vatni heldur af sérstöku efni. Sýnt hefur verið fram á að talsvert er af þessu efni í rigningrvatni, uppsprettu- og árvatni.
6. Svipað magn er af þessu "plöntuefni" (Vegetable matter) í uppsprettuvatni og rigningrvatni en meira í árvatni.
7. Hlutverk vatns er að aðeins að flytja jarðefnið sem myndar plöntur en bætir engu við plöntuvefina (Vegetable). Vanti jarðefnin í vatnið vex plantna ekki sama hversu mikið vatn plantan tekur til sín.
8. Án nægilegs hita getur vatn ekki gegnt hlutverki sínu.

Woodward (1699) gerir grein fyrir útgufun vatns og honum er ljóst að jarðefni (plöntunæringarefni) eru í uppsprettu- og rigningrvatni. Hins vegar hefur hann ekki haft hugmynd um að plöntur sækja næringu úr lofti enda kom það fyrst í ljós á seinni hluta 18. aldar. Woodward talar um plöntuefni (vegetable matter) í uppsprettuvatni, rigningrvatni og árvatni og má vera að það bendi til þess að hann hafi aðhyllst humuskenninguna.

Um tilraunir Woodward's skrifar Egerton (2004):

Woodward was a more sophisticated experimenter than his predecessors, but in disproving that the growth of plants comes only from water, he went too far by denying that water contributes to growth at all. Furthermore, although he said he placed his vials where the plants could get air and sun, he did not consider either as potential factors in growth.

Each of these authors built upon the work of his predecessors and improved somewhat the understanding of plant growth and how to study it. However, they still fell short of a basic understanding of plant growth. Before that could be achieved, chemists would have to identify the gases in the air. That would happen in the next century.

Fyrirrennarar Woodward's sem Egerton nefnir eru Francis Bacon, Johannes Baptista van Helmont og Robert Boyle. Enginn þeirra náði jafnlangt og Woodward, þegar hann komst að þeirri niðurstöðu að megnið af því sem plöntur taka til sín af vatni úr jarðvegi streymir út frá plöntunni ofanjarðar og að jarðefni (þ. e. plöntunæringarefni) í vatni gegndu hlutverki í næringu og vexti plantna.

Eins og Egerton bendir á gekk Woodward þó of langt með því að fullyrða að vatn hefði enga þýðingu fyrir vöxt. Mikilvægt er að rannsóknir hans voru skref fram á við. Eldri verk eru jafnan hvatinn að nýjum rannsóknum jafnvel þótt með þeim verði fyrri ályktanir afsannaðar.

Englendingurinn Jethro Tull (1674-1741) lagði áherslu á mikilvægi jarðvinnslu til að auðvelda plöntum nýtingu moldarefna og hannaði raðsáningarvél og hreykijárn dregið af hestum. Tull áleit að jarðvegurinn gæti séð plöntum fyrir næringu, ef vatni og hita væri miðlað eins og til þyrfti. Með hreykingu jarðvegs væri yfirborð jarðvegs (beitarlands plantna, e. „pasture of plants“) aukið. Búfjáráburður hefði samskonar áhrif en í minna mæli og notkun hans væri auk þess kostnaðarsöm, Russel 1915.

Tull gaf út rit um hugmyndir sínar um landbúnað og plöntunæringu (*The New Horse Houghing Husbandry: or, an Essay on the Principles of Tillage and Vegetation,*) árið 1731)⁷⁹

Stöðunni í lok þess tímabils sem Russell nefnir “The Search for the "Principle" of Vegetation” 1630-1750 telur Russell (1915) best lýst með orðum Tull's⁸⁰:

"It is agreed that all the following materials contribute in some manner to the increase of plants, but it is disputed which of them is that very increase or food : (1) nitre⁸¹, (2) water, (3) air, (4) fire, (5) earth".

Humuskenningin var enn við líði og töldu sumir að moldarefni ein gæfu plöntunum næringu auk þess sem vatn væri nauðsynlegt. Samkvæmt humuskenningunni nærðust plöntur á efnum sem losnuðu úr mold (þ. Extraktivstoff) vatnsleysanlegum samböndum af kolefni, vetni, súrefni og nítri og mynduðu úr þeim flóknari plöntuvefi. Áburður eins og kalk eða sölt gerðu ekki meira en að örva niðurbrot moldarefna og upplausn þeirra í jarðvatni. Margir áhrifamenn í landbúnaði voru sannfærðir um að moldarefnin væru aðalnæring plantna ekki síst vegna þess að bestu vaxtarskilyrði eru yfirleitt á moldarjarðvegi og bæta má jarðveg með lífrænum áburði.

Helsti talsmaður humuskenningarinnar á 18 öld er oft talinn vera J.G. Walerius (1709-1785) prófessor í efnafræði við við Uppsalaháskóla. Meðal stuðningmanna humuskenningarinnar má nefna búvísindamanninn Albrecht Daniel Thaer (1752–1828) í Þýskalandi og sænska efnafræðinginn Jöns Jakob Berzelius (1779–1848), einn af mikilhæfustu efnafræðingum síns tíma. Thaer stofnaði m.a. fyrstu rannsóknastofu í landbúnaði í Þýskalandi árið 1802 og varð fyrstur til að búa til fóðurmatskerfi sem byggt var á heyeiningu, auk þess telst hann frumkvöðull í rektrarfræði landbúnaðar.

*”Fyrstu tilburði til fóðurmats má rekja til í upphafs 19. aldar. Sá sem talinn er feta þá braut fyrstur manna var Þjóðverjinn Albrecht Thaer. Í umfangsmiklu ritverki, sem hann gaf út árið 1809 og kallaði „Höfuðatriði landbúnaðarhagfræðinnar“, lagði hann fram **heyeininga** útreikning sinn þar sem hann áætlað hversu mikið þurfi af ýmsu fóðri til að jafngilda sambærilegri framleiðslu og 100 kg af meðaltöðu gat skilað. Albrecht Thaer byggði mat sitt á efnamælingum fóðurs en einnig á reynslu bænda og fóðrunartilraunum sem hann gerði sjálfur.”*

Gunar Guðmundsson 1995

⁷⁹[Tull, Jethro, 1674-1741;](#)

⁸⁰ <http://archive.org/details/horsehoeinghusba00tull>

⁸¹ Nitre er annað nafn fyrir kalíum nítrat (KNO₃), en gat líka átt við natríum nítrat (NaNO₃) og jafnvel kalíum- eða natríumsölt af karbónati (K₂CO₃, Na₂CO₃).

Thaer varð með tímanum mikill áhrifamaður í landbúnaði bæði í heimalandi sín og í Frakklandi. Í tiltölulega nýlegum heimildum, Köhne 2002⁸² og Feller o.fl. 2003⁸³, er Thaer lýst sem framsýnum vísindamanni með yfirgripsmikla og alhliða þekkingu á landbúnaði og viðhorf til landbúnaðar sem segja má að séu nútímaleg með kröfum um að litið sé á landbúnað sem atvinnuveg með áherslu á hagkvæmni til lengdar í takt við hugmyndir um búrekstur með sem mesta sjálfbærni að markmiði. Í úrdrætti úr grein Fellers o.fl. 2003 segir að verk Thaers séu þess virði að þeim sé veitt athygli á nýjan leik enda sé þar fjallað um nútímaleg viðfangsefni, sjálfbærni ræktunar og búrekstrarkerfa:

„The identification of quantitative fertility indicators for evaluating the sustainability of cropping and farming systems has become a major issue. This question has been extensively studied by the German agronomist Albrecht Daniel Thaer at the beginning of the 19th century. In this paper Thaer's work is set in its historical background, from the end of the 16th century (Palissy; 1580) to the middle of the 19th century (Liebig, 1840). Then the paper focuses on Thaer's quantitative and complex fertility scale (expressed in "fertility degrees"), which was based on soil properties, on the requirement of nutrients by plants, and on the cropping system (including crop rotation). Thaer expressed soil fertility and economic results as a function of rye production in "scheffel of rye per journal" (ca. 200 kg per hectare). He also proposed a scale to describe the intrinsic fertility of soil. Thaer used this approach to assess the effect of major German cropping systems on soil fertility. He applied it to eight theoretical systems and nine existing systems in a true modeling approach. Thaer completed the fertility evaluation for the nine existing systems with a detailed economical analysis commenting the limits and potentialities of each system. Thaer's approach was used with success during half a century as it combined numerous empirical findings on soils and fertilization with organic substances in a sophisticated model. Unfortunately and despite effective practical applications, the scientific foundations of Thaer's "Humus Theory" proved definitively false as soon as 1840 when Sprengel and Liebig published on mineral nutrition of plants. Thaer's work deserves to be rediscovered since it approaches the modern issue of the sustainability of cropping and farming systems“

Feller o.fl. 2003.

Thaer þekkti til rannsókna og kenningar Saussure um uppruna kolefnis í plöntum úr koltvísýringi úr andrúmslofti, úr rotnandi plöntuleifum og eftir losun úr moldarefnum (humus). Upptöku af kolefni frá losun úr moldarefnum taldi Saussure að væri aðeins 5% af upptöku kolefnis úr andrúmslofti. Thaer studdi niðurstöður Saussures fyllilega, en hvarf þó ekki frá sinni túlkun á humuskenninguni, Feller o.fl. 2003. Thaer áleit að úr humus og einkum úr þeim hluta sem leysanlegur er í sjóðandi vatni kæmi næringarsafi eða næringarefni (í enskri þýðingu á texta Thaers eru nafngiftirnar nutritive juices, nutritive matter eða succulent matter), Feller o.fl. 2003.

⁸² Manfred Köhne 2002. Albrecht Thaer – Gründer einer wissenschaftlich fundierten Agrarproduction. <http://www.albrecht-thaer-gesellschaft.de/Albrecht-Thaer-Vortrag.pdf>

⁸³ Christian L. Feller, Laurent J.-M. Thuries, Raphael J. Manlay, Paul Robin, and Emmanuel Frossard, 2003. "The principles of rational agriculture" by Albrecht Daniel Thaer (1752-1828). An approach to the sustainability of cropping systems at the beginning of the 19th century. J. Plant Nutr. Soil Sci. 166, 687-698.

Umfangsmestu bækur Thaers og þær sem oftast er vitnað til voru:

1. Einleitung zur Kenntnis der Englischen Landwirtschaft. 1801-1804. Titill fyrsta bindis var lengri, lauslega þýtt: Inngangur að þekkingu á landbúnaði í Englandi og nýjustu hagnýtum og fræðilegum framförum þar, með tilliti til framfara í landbúnaði í Þýskalandi
2. Grundsätze der rationalen Landwirtschaft. Berlin 1908 Ensk útgáfa: The principles of practical agriculture, 551 bls. New York 1856. Frönsk útgáfa: Principes raisonnés d'agriculture 1811-1816. Í tilvitnun bls. 40 um upphaf fóðurmatskerfis er bókin nefnd Höfuðatriði landbúnaðarhagfræðinnar en beinni þýðing á upprunalega heitinu er: Grundvöllur skynvædds landbúnaðar.
3. Bók sem í dag flokkast undir rekstrarfræði landbúnaðar með heitinu: Leitfaden zur allgemeinen landwirtschaftlichen Gewerbs-Lehre útgefin 1815. Titillin er í lauslegri þýðingu: Leiðarvísir um almenna landbúnaðarstarfsemi.

Tekið saman eftir Köhne 2002 og Feller o.fl. 2003

Fyrsta bindi Grundvallaratriðanna nær yfir flest sem búrekstur varðar, frá vísindalegum forsendum landbúnaðar, lýsingu á einstökum hlutum búans, vinnu og verkstjórn, bókhaldi, og rekstrarskipulagi varðandi áburðarnotkun, fóðrun og ræktunarkerfi. Í öðru bindinu eru í beinu framhaldi af því fyrri borin saman mismunandi búrekstrarkerfi með talnagögnum í töflum og Thaer gerir grein fyrir nauðsynlegum breytingum á rekstrarformum. Einnig er gerð grein fyrir samsetningu jarðvegs og áburðargjöf. Þriðja bindið fjallar um jarðvinnslu, framræslu, áveitur, ræktun túna og haglendis. Fjórdða bindið er um ræktun nytjajurta frá sáningu til uppskeru og um nýtingu uppskerunnar, að meðatalinni fóðrun búfjár.

Köhne (2002) bendir á að rit Thaers hafi jafnan byggt á fyrri grunni, hann byrjar á kynningu á landbúnaði í Englandi hagnýtum og fræðilegum framförum, síðan fylgja Grundvallaratriði skynvædds landbúnaðar í 4 bindum á 1468 blaðsíðum. Loks fullkomnar hann verk sitt í rekstrarfræðinni. Haft er eftir Thaer að rekstrarfræðin sé kjarninn úr báðum fyrstu hlutum Grundvallaratriða skynvæðingar landbúnaðarins (tilvitnun til Koerte í grein Köhne 2002). Manfred Köhne tekur fram í grein sinni að Thaer hafi tvímælalaust með bók sinni um rekstrarfræði í landbúnaði verið frumkvöðull nýrrar vísindagreinar.

Upphaflega var Thaer læknismenntaður, lauk því námi aðeins 22 ára og bar af samnemendum sínum. Hann hóf læknisstörf í Celle í Neðra Saxlandi, þar sem hann byrjaði einnig á ræktunartilraunum um það bil 1786, fyrst á 4 hektunum lands, nokkrum árum síðar stækkaði landareignin í 33 hektara og um það var sagt að úr garðyrkjumanni varð bóndi, sem lagði sig fram um að kynnast hreinni ásjónu náttúrunnar og lögmálum hennar (tilvitnun hjá Köhne í Woermann: Große Landwirte. Frankfurt 1970). Ennfremur skrifar Woermann að úr áhugaefni og tólmstudastarfi urðu rannsóknir og úr rannsóknunum lífsstarf.

Árið 1791 birtir Thaer fyrstu grein sína um landbúnað: Kennsla um ræktun smára og fóðrun í formi spurninga og svara fyrir bændur (Unterricht über den Kleebau umd Stallfütterung in Fragen und Antworten für den lüneburgischen Landmann).

Árið 1802 hafði hann sett á laggirnar kennslustofnun sem var ígildi háskóladeildar (Hochschulseminar skv. grein Köhne). Rannsóknir, skrif og þátttaka Thaers í umræðum öfluðu honum viðurkenningar sem leiddi til þess að Friedrich Wilhelm 3. Prússakóngur bauð Thaer 1804 að flytja til Prússlands og halda þar áfram rannóknum sínum og tilraunum í stærri stíl en áður. Í nágrenni Berlínar keypti hann 300 hektara stórbýlið Möglin til þess að sinna þessum verkefnum.

Að tilhlutan Englendings að nafni Joung, sem gaf út ársrit um landbúnað á Englandi, hafði Thaer þegar 1799 hafið útgáfu ársrits undir heitinu *Annalen der niedersächsischen Landwirtschaft* og hélt þeirri út gáfu áfram eftir flutninginn með öðru heiti, síðast nefnt *Möglische Annalen*. Thaer var 1804 kjörinn í Vísindaakademíu Berlínar, þar sem voru fyrir virtustu vísindamenn á borð við náttúruvísindamanninn Alexander von Humboldt. Með því höfðu búvísindin færst hátt upp á við í virðingarstiganum. Loks hlaut Thaer 1810 stöðu prófessors í svonefndri Kameralistik⁸⁴ við háskólann í Berlín, en þeirri kennslugrein var ætlað að veita embættismönnum tilsögn fyrir störf í stjórnarráði einveldisríkja.

Berzelius, annar virtur og áhrifamikill stuðningsmaður humuskenningarinnar, var einn af frumkvöðlum nútíma efnafræði og innleiddi táknmál efnafræðinnar, eins og greint er frá á bls.20. Hann varð fyrstur til að ákveða atómþunga margra frumefna en var þeirrar skoðunar að plöntur tækju kolefni úr moldarefnum upp í gegnum rætur (1838). Það voru því öflugir og velmetnir vísindamenn sem ennþá aðhylltust húmuskenninguna á þessum tíma.

Russell (1915) segir í bók sinni að í Englandi hafi vaknað mikill áhugi á landbúnaði á seinni helmingi átjándu aldar og vitnar í ummæli þess efnis að allar stéttir manna frá hertoga til lærlings leggi stund á landbúnað:

"The farming tribe," writes Arthur Young during this period, "is now made up of all ranks, from a duke to an apprentice."

Tilraunastarfsemi var mikil, margt staðreynt, fjöldi bóka skrifaður og félög stofnuð til eflingar landbúnaði. Eitt þeirra The Edinburgh Society, stofnað 1755, fól Francis Home að kanna hvað efnafræði gæti lagt til að skýra grundvallaratriði landbúnaðarins "*to try how far chymistry will go in settling the principles of agriculture*". Home skrifar að list landbúnaðarins felist öll í því að næra plönturnar og bætir við að í frjósömum jarðvegi séu olíur, sem hljóti að vera næring plantna. Home prófaði áhrif ýmissa efna á vöxt planta í pottatilraunum og segir að því meira sem bændur viti um áhrif mismunandi efna á plöntur því fremur geri þeir sér grein fyrir næringu þeirra og það sé eina leiðin að settu marki:

" The more they (i.e. farmers) know of the effects of different bodies on plants, the greater chance they have to discover the nourishment of plants, at least this is the only road."

Saltpétur (kalíumnítrat), Epsom salt (magníum sulfat) og vitriol tartar (kalíumsulfat) auki öll vöxt plantna að sögn Homes. Fæða plantna sé því margvísleg og hann telur upp sex tegundir plöntunæringar: loft, vatn, jörð, mismunandi sölt olíu og eld í bundnu formi (fire in a fixed state). Þótt hér kenni ýmissa grasa, misjafnlega merkilegra í ljósi seinni tíma þekkingar, þá kemur fram í skrifum Homes að plöntunæring er margþætt og hann bendir á tvær leiðir til þess að kanna þörf plantna fyrir næringu pottatilraunir og efnagreiningar.

Þekkingu í þessum efnunum fleytti lítið fram á seinni hluta 18. aldar en eftir aldamótin og fram eftir 19. öld rofar til, bæði hvað varðar tillífun kolefnis og næringarefni plantna í jarðvegi.

⁸⁴ Skilgreining Wikipediu á Kameralisma: Cameralism has often been viewed as the science of government, dedicated to reforming society and promoting economic development in the lands of 18th-century Germany. According to the published teachings of cameralist academics, the state should not focus on maintaining the law and promoting collective prosperity. Its stated objective was to mobilize the resources of land and population in service of the common good. There is, however, considerable debate about whether cameralist policy reflected the stated goals of academic cameralism.

Russell (1915) telur að tölfræðileg aðferð byggð á magnmælingum (“quantitative statistical method”), sem rakin er til Theodore de Saussure (1804), hafi meir en nokkuð annað rutt brautina fyrir landbúnaðarefnafræðina og hafi lagt grunninn að rannsóknum Boussingaults, Liebig, Lawes og Gilberts⁸⁵.

Ljóstillifun kolefnis skýrð

Það var ekki fyrr en phlogiston kenning var leyst af hólmi með uppgötvun súrefnis og uppgötvun hæfleika planta til að „hreinna“ loft í dagsbirtu að ljóst var að plöntur vinna kolefni úr lofti en ekki úr jarðvegi.

Stephen Hales: Plöntur taka mæringu til sín úr lofti í gegnum laufblöð. Hugmynd um hlutverk ljóss í vexti plantna.

Á seinni hluta 18. aldar voru loftskipti plantna skýrð. Stephen Hales (Vegetables Staticks 1727) mældi loftskipti dýra og plantna í tilraunum. Hann ræktaði plöntu í lokuðu rými yfir vatni og rúmmál loftsins minnkaði um 14% eftir nokkurn tíma. Hales ályktaði því að plöntur fengu líklega hluta af næringu sinni úr lofti :

„ *Plants very probably draw through their leaves some part of their nourishment from the air.* “

og varpaði fram þeirri spurningu hvort ljós sem færi í gegnum yfirborð laufblaða og blómblaða gegndi ekki einnig miklu í að auðvelda vöxt plantna.

„ *..may not light also, by freely entering surfaces of the leaves and flowers, contribute much to enobling the principles of Vegetables?* “

Tilvitnanir til Stephan Hales eru frá Rabinowitch 1945.

Rabinowitch (1945) greinir frá þeim rannsóknum sem skýrðu fyrst undirstöðuatriði ljóstillifunar (e. Photosynthesis) í kaflanum Discovery of Photosynthesis í bók sinni Photosynthesis and related Processes Volume 1. Margt af því sem hér er sett á blað er úr smiðju Rabinowitch, eins og vitnað er til.

Fyrst gerir Rabinowitch grein fyrir frumkvöðlinum Stephen Hales (1677 – 1761) og framförum í rannsóknum á lofttegundum (Pneumochemistry) á seinni hluta 18. aldar. Þessar framfarir í rannsóknatækni voru nauðsynleg forsenda rannsókna í framhaldi af skarpskyggnum hugmyndum Stephans Hales um að plöntur fengu næringu úr lofti og ljós gæti átt þátt í vexti plantna.

Eftir fylgir svo afar skrautleg lýsing á þremur af þeim, sem skýrðu undirstöðuatriði ljóstillifunar með rannsóknum sínum og ályktunum, næst á eftir Hales: Priestley (1733-1804), Ingen-Housz (1730-1799), Senebier (1742-1809):

„*Of three men whose names are associated with this discovery, Priestley, Ingen-Housz and Senebier, two were clerics, like Hales, and one a physician; all were typical amateur naturalists of the Age of Enlightenment. There their similarity ended; for it would be difficult*

⁸⁵ Russell (1915) Soil condition and Plant growth 1915 bls. 6.

<http://www.archive.org/stream/plantgrowth00russrich#page/6/mode/2up>

to find men more unlike each other than the militant nonconformist minister, Joseph Priestley, the pompous, brilliant, court physician, Jan Ingen-Housz, who was equally at home in Amsterdam, London, Paris and Vienna, and Jean Senebier, a plodding, provincial pastor from the pious and savant town of Geneva.“

Joseph Priestley: Grænar plöntur hreinsa loft.

Joseph Priestley hafði 1771 gert sér grein fyrir að loft mengast við öndun dýra og manna, bruna, rotun o.fl. og það hlyti því að eiga sér stað hreinsun lofts með einhverjum hætti annars væri líf ekki mögulegt⁸⁶ og það varð honum tilefni til að kanna áhrif myntusprota á mengað loft.

Priestley segir í skrifum sínum frá 1772⁸⁷ frá tilraun þar sem hann hvolfdi gleriláti yfir myntuplöntu, mús og logandi keru og kertið hélst logandi og músin varð ekki fyrir óþægindum. Hann skrifar:

„I have been so happy as by accident to hit upon a method of restoring air which has been injured by the burning of candles and to have discovered at least one of the restoratives which Nature employs for this purpose. It is vegetation. One might have imagined that since common air is necessary to vegetable as well as animal life, both plants and animals had affected it in the same manner; and I own that I had that expectation when I first put a sprig of mint into a glass jar standing inverted in a vessel of water; but when it had continued growing there for some months, I found that the air would neither extinguish a candle, nor was it at all inconvenient to a mouse which I put into it.“

„Finding that candles would burn very well in air in which plants had grown a long time ... I thought it was possible that plants might also restore the air which had been injured by the burning of candles. Accordingly, on the 17th of August 1771 I put a sprig of mint into a quantity of air in which a wax candle had burned out and found that on the 27th of the same month another candle burnt perfectly well in it.“

Tilvitnun í Philosophical Transactions of the Royal Society 1772 hjá Rabinowitch 1945, bls.14

Um niðurstöðurnar skrifaði hann enn fremur⁸⁸:

“ that plants instead of affecting the air in the same manner with animal respiration, reverse the effects of breathing, and tend to keep the atmosphere pure and wholesome, when it is become noxious in consequence of animals either living, or breathing, or dying, and putrefying in it ”

Tilvitnun hjá Russell 1915 bls 5,

Þegar Priestley gerði þessa tilraun hafði hann ekki uppgötvað súrefni (“dephlogisticated air”⁸⁹) og gat því ekki skýrt niðurstöður sínar nánar en að myntan hreinsaði loft mengað af öndun dýra.

⁸⁶ Russell 1915 tilvitnun í Priestley, Joseph, Experiments and Observations on Different Kinds of Air, 1775, London, bls 5. Soil condition and Plant growth 1915
<http://www.archive.org/stream/plantgrowth00russrich>

⁸⁷ Tilvitnun í Philosophical Transactions of the Royal Society 1772 hjá Rabinowitch 1945, greinin var endurprentuð í fyrsta bindi af Experiments and Observations on Different Kinds of Air, 1776.

<http://www.archive.org/details/photosynthesisre01rabi>

⁸⁸ Russell (1915) Soil condition and Plant growth 1915 bls.5 .

<http://www.archive.org/stream/plantgrowth00russrich#page/6/mode/2up>

⁸⁹ Priestley fylgdi phlogiston hugmyndinni og nefndi súrefnið “dephlogisticated air”, það er loft sem phlogiston hefur verið fjarlægt úr., nánar á bls.14

Priestley hélt rannsóknum sínum ekki áfram fyrr en 1777 og birtir niðurstöðurnar 1779⁹⁰. Hann hafði áður uppgötvað súrefni, sem hann nefndi „dephlogisticated air“ (1774). En tókst þó ekki að staðfesta fyrri niðurstöður þar sem niðurstöðurnar voru ekki alltaf jákvæðar. Ástæðan var að hann gerði sér ekki grein fyrir því að ljós þarf til þess að plöntur gefi frá sér súrefni. Rabinowitch (1945) bendir á að Priestley hafi álitid að þau áhrif plantna (hreinsun lofts), sem hann hafði áður kannað væru ekki tilkomin fyrir áhrif ljóss: „ (*... the previously observed plant effects were genuine and not due to the illumination of water, Rabinowitch 1945, bls 16*). Hér er vísað til þess að Priestley hafði tekið eftir því að grænt efni safnaðist fyrir á veggjum vatnsíláta og gaf frá sér loftbólur (sjá tvær næstu tilvitnanir hér fyrir neðan, en ekki er ljóst af hverju Priestley taldi sig geta útilokað að ljós þyrfti til.

Talið hefur verið að þær tilraunir hans, sem ekki staðfestu að plötur hreinsuðu andrúmsloft, hafi verið gerðar í of lítilli birtu.

„Before he succeeded in finding an explanation for the irregular results (which, we think now, might have been caused by poor illumination), Priestley's attention was, diverted by an observation which he called "the most extraordinary of all my unexpected discoveries." He found, namely, that a "green matter" deposited on the walls of many of his water containers, formed bubbles of pure "dephlogisticated air" (that is, oxygen), whenever it was illuminated by the sun. At first, Priestley thought this matter to be of vegetable nature. How close he was, at this point, to the final discovery of photosynthesis! However, he let himself be deceived by microscopic observations which revealed no organic forms in the green matter, and by the formation of this matter in closed vessels, and decided that it was a thing "sui generis." of mineral rather than organic character.“

Rabinowitch (1945), bls. 15-

16

Græna efnið („the green matter“) sem Priestley tók eftir að settist innan á vegg vatnsíláta og myndaði bólur af hreinsuðu lofti („dephlogisticated air“ í skrifum Priestleys). Í framhaldinu flæktist málið enn frekar, þegar Priestley tók eftir því að vatn sem hafði verið umhellt úr ílátum með „græna efninu“ gaf líka frá sér hreinsað loft (súrefni) og það gerði jafnvel brunnavatn eftir að hafa staðið í sólarljósi, þótt ekki væri sýnilegt „grænt efni“ í vatninu. Priestley taldi í fyrstu að um plöntuefni væri að ræða en við smásjárskoðun sáust engin lífræn form og því ályktaði Priestley í fyrstu, að „græna efnið væri sérstakt ólífrænt efni.

Priestley fór ekki dult með efasemdir sínar um fyrri niðurstöður sínar:

*"It will probably be imagined that the result of the experiments recited in this section throws some uncertainty on **the result of those from which I have concluded that air is ameliorated by the vegetation of plants, and especially as the water by which they were confined was exposed to the open air and the sun in the garden.** To this I can only say that I have represented the naked facts, as I have observed them; and having not great attachment to any particular hypothesis, I am very willing that my reader should draw his own conclusions for himself." (However, he added some arguments which made him believe that the previously observed plant effects were genuine and not due to the illumination of water.)“*
Frá Rabinowitch 1945, bls.16.

Það er næsta einkennilegt að Priestley greinir frá því að plöntur bæti loftið þegar vatnið sem þær voru í var undir beru lofti og sólskininu í garðinum (sbr. feitletraða enskan text Priestleys að ofan og hafi

⁹⁰ Í fyrsta bindi af Experiments and Observations Relating to various branch,,,,,es of Natural Philosophy

síðan færst rök fyrir því að það væri aðeins fyrir eiginleika plantanna sjálfra en ekki vegna sólnarljóssins Priestley var maður staðreynda, vandvirkur vísindamaður og kaus fremur að greina frá niðurstöðum sínum um áhrif plantna á andrúmsloft en tengja þær við ákveðnar tilgátur.

Rabinowitch (1945 er óspar á lofið og telur Priestley í fremstu röð þeirra sem við tilraunir hafa fengist frá upphafi, en hæfileika sína til greiningar og rökfærslu hafi hann helgað öðrum fræðigreinum, heimspeki og guðfræði. Auk þess hélt hann sig við phlogiston kenninguna og það eftir að almennt var viðurkennt að hugmyndir Lavoisiers hefðu rutt phlogiston kenningunni úr vegi⁹¹. Hins vegar hafði Priestley síður en svo nokkuð á móti því að aðrir ályktuðu af rannsóknum hans: „*I can only say that I have represented the naked facts, as I have observed them; and having not great attachment to any particular hypothesis, I am very willing that my reader should draw his own conclusions for himself.*”

Að lokum varð þó staðfest að „græna efnið“ sem myndaði loftbólurnar í vatni væri plöntuefni:

His doubts were cleared away two years later, when he published the second volume of Observations and Experiments in Natural Philosophy. By then, the green matter was definitely identified as vegetable in nature. (It is interesting to reflect that the same unicellular green algae, which have recently become the favourite subjects of photosynthetic study, served in the discovery of this phenomenon over a century and a half ago.) The action of water decanted from the green algal deposits, which baffled Priestley in 1779, was explained in 1781 as an effect of supersaturation with oxygen; the formation of green deposit in closed vessels was attributed to imperfect closure and contamination of water with "seeds" before corking. Thus, the picture of oxygen being formed by the cooperation of green vegetable matter and sunlight emerged clearly from the temporary confusion.

Rabinowitch (1945) bls. 16

Græna efnið reyndist við smásjárskoðun vera einfrumu grænþörungar (þá taldir til Conferva þörungna). Priestley greindi frá því að:

„Several of my friends, however better skilled in botany than myself, never entertained any doubt of its being a plant; and I had afterwards the fullest conviction that it must be one. Mr. Beverly has lately observed the regular form of it in the microscope, I will come most properly under the denomination of the Conferva.“

Tilvitnun úr bók Gibsons Outlines of Botany, 1999, bls 63

Jan Ingen-Houzs: Grænar plöntur hreinsa loft í birtu, en menga það í myrkri.

Hollenski læknirinn Ingen-Houzs hafði hlustað á fyrirlestur í Royal Society 1773 til heiðurs Priestleys og það vakti áhuga hans á efnaskiptum plantna. Árið 1779 þegar Ingen-Houzs

⁹¹ „*Throughout his life, Priestley enjoyed playing about with gases; his writings reveal him as one of the most skillful and successful experimentalists of all times; but his powers of logic and analysis were reserved for philosophy and theology, and in the presentation of his experiments he stuck to the old phlogiston theory—long after the new concepts of Lavoisier had found general acceptance. Thus, the wide implications of Priestley's greatest discovery—oxygen escaped him; and he was even less aware of the general import of his experiments with green plants, and quite willing to leave their exploitation to others.*“ Rabinowitch 1945 bls.14

dvaldi í leyfi á Englandi frá störfum við hirðina í Vínarborg gerði hann meir en 500 tilraunir og með undraverðum hraða náði hann að birta niðurstöðurnar í október á sama ári í bók sem nefndist *Experiments upon Vegetables, discovering Their Great Power of Purifying the Common Air in Sunshine and Injuring it in the Shade and at Night*.⁹²

Í löngum titli bókarinnar komu fram grundvallaratriði tillífunar úr lofti: plöntur hreinsa loftið í birtu, en í myrkri menga þær loftið. Með seinni tíma orðalagi: plöntur þurfa ljós til að tillífa koltvísýring úr lofti og gefa þá frá sér súrefni, en í myrkri gefa þær frá sér koltvísýring við öndunarferli. Ingen-Housz túlkaði hins vegar tillífunin samkvæmt phlogiston tilgátunni: Í birtu gefa plöntur frá sér dephlogiston og binda phlogiston. Hann nefnir ekki „bundið loft“ (þ.e. koltvísýring) í sambandi við tillífun, en eingöngu sem afurð öndunar. Hann áleit bundið loft (koltvísýring) skaðlegt fyrir lofthreinsun plantna (súrefnismyndun við tillífun).

Eins og Rabinowitch 1945 (bls.21) bendir á hefði Ingen-Housz, ef líkingar efnaferla hefðu þekkt á þeim tíma, skrifað líkingu tillífunar svona:

Plöntur

Loft + ljós → phlogiston bundið einhverju í plöntu + hreinsað loft (e.dephlogisticated air)

Ingen-Housz hafði enga hugmynd um hvers konar loft plantan notaði í þessu ferli og velti fyrir sér, hvort um væri að ræða „eldfimt loft“ (vetni) fremur en andrúmslofts (common air).⁹³ Margt var enn óljóst um tillífunarferlið og það sem Ingen-Housz hafði ekki síst bætt við niðurstöður Priestleys var, að ljós þyrfti til þess að plöntur gætu hreinsað loft. Egerton 2008 birtir ítarlegri lista yfir framlag Ingen-Housz (skv. Morton 1981 en stytur og með nútíma efnaheitum):

- 1) *Losun súrefnis á verður aðeins í ljósi, í grænum plöntuhlutum.*
- 2) *Losun súrefnis stöðvast í myrkri.*
- 3) *Koltvísýringur [CO₂] myndast í öllum plöntuhlutum í myrkri.*²²²
- 4) *Losun súrefnis að degi til er langt umfram losun koltvísýrings að næturlagi.*
- 5) *Hraði losunar súrefnis er háður ljósstyrk.*
- 6) *Súrefni losnar einkum frá neðra borði blaðanna.*

Þessi atriði koma fram texta Ingen-Housz frá 1779 þar sem hann skýrir niðurstöður sínar og megniatriði ljóstillífunar af mikilli snilld:

" I observed that plants not only have a faculty to correct bad air in six or ten days, by growing in it, as the experiments of Dr. Priestley indicate, but that they perform this important office in a complete manner in a few hours; that this wonderful operation is by no means owing to the vegetation of the plant, but to the influence of the light of the sun upon the plant. I found that plants have, moreover, the most surprizing faculty of elaborating the air which they contain, and undoubtedly absorb continually from the common atmosphere, into real and fine dephlogistiated air; that they pour down continually a shower of this depurated air, which . . . contributes to render the atmosphere more fit for animal life; that this operation . . . begins only after the sun has for some time made his appearance above the horizon . . .; that this operation of the plants is more or less brisk in proportion to the

⁹² Rabinowitch Eugene I. 1945. Photosynthesis and Related Processes, bls. 18. Interscience Publ. New York <http://www.archive.org/details/photosynthesisre01rabi>.

⁹³ Rabinowitch Eugene I. 1945. Photosynthesis and Related Processes, bls.19 Interscience Publ. New York <http://www.archive.org/details/photosynthesisre01rabi>

clearness of the day and the exposition of the plants; that plants shaded by high buildings, or growing under a dark shade of other plants, do not perform this office, but, on the contrary, throw out an air hurtful to animals; . . . that this operation of plants diminishes towards the close of the day, and ceases entirely at sunset; that this office is not performed by the whole plant, but only by the leaves and the green stalks; that even the most poisonous plants perform this office in common with the mildest and most salutary; that the most part of leaves pour out the greatest quantity of this dephlogisticated air from their under surface . . .; that all plants contaminate the surrounding air by night; . . . that all flowers render (lie surrounding air highly noxious, equally by night and by day; that roots and fruits have the same deleterious quality at all times; . . . that the sun by itself has no power to mend the air without the concurrence of plants."

Textinn úr bók Rabinowichs (1945), bls.18-19.

Jean Senebier: bundið loft (CO₂) þarf að vera til staðar til þess að plöntur losi frá sér súrefni í birtu.

Nokkru síðar kom fram í skrifum Svisslendingsins Jean Senebiers (1782) að „bundið loft“ (CO₂) varð að vera til staðar til þess að plöntur gætu gefið frá sér súrefni (sem á þeirra tíma ensku var nefnt dephlogisticated air). Þessi niðurstaða er af mörgum talin veigamesta uppgötvun Senebiers Jafnframt var staðfest í tilraunum Senbiers að ljós er nauðsynlegt fyrir tillifunina. Hins vegar gat hann ekki staðfest þá niðurstöðu Ingen-Housz að plöntur spilli lofti að næturlagi:

Senebier concluded in his Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire pour modifier les êtres des trois règnes de la nature et surtout ceux du règne vegetal (1782) that fixed air must be present for plants to make dephlogisticated air. This was his most important discovery (Nash 1957:388–391, Morton 1981:334–336). Ingen-Housz considered Senebier's Mémoires to be "a copy of his own work from the evidence of the planning and sequence of the experiments performed, the eudiometric units used and the terminology" (Smit 1980:130). However, the acknowledged repetition of one scientist's experiments by another is not plagiarism. In 1782 Senebier announced he was unable to confirm Ingen-Housz's conclusion that plants vitiate the atmosphere at night, but in 1788 he admitted that his further experiments did confirm it, though he believed it less important than Ingen-Housz thought (Nash 1957:385–386).

Egerton 2008, bls 167.

Ingen-Housz taldi að Senebier hefði einungis endurtekið þær rannsóknir sem Ingen-Housz sjálfur hafði áður gert, það væri ljóst af skipulagi rannsóknanna og aðferðunum. Spunnust af þessu harðvítugar deildur, Senebier hafði þó viðurkennt frumkvæði Ingen-Housz, en tók fram að hann hefði byrjað rannóknir sínar áður en verk Ingen-Housz urðu honum kunn.

Senebier kom laufblöðum fyrir í tveimur bikarglössum, öðru með kolsýrðu vatni og hinu með hreinu vatni (án kolsýru). Loftmyndun (súrefnislosun) varð frá glössunum með kolsýrða vatninu en stöðvaðist, þegar frá leið. Senebier setti þá fersk blöð í vatnið og engin loftmyndun varð. Blöðin sem fjarlægð voru setti Senebier í ferskt kolsýrt vatn og þá losnaði loft á ný.

Ingen-Housz hafði áður gert tilraun til að mæla losun súrefnis frá laufblaði, sem sett var í eimað vatn, en laufblaðið gaf ekki frá sér „dephlogistrated“ loft, það er að segja súrefni, enda var enginn koltvísýringur í vatninu. Þeir Ingen-Housz og Senbier vissu báðir að í brunnavatni er mikið af „bundnu lofti“ (CO₂), Egerton 2008. Munurinn var sá að Senebier varð ljóst eftir tilraunirnar með laufblöðin í kolsýrða vatninu, að hreint loft (súrefni) losnar og koltvísýringur binst í laufblöðum fyrir áhrif sólarljóssins, en Ingen-Housz nefnir ekki einu

sinni „bundið loft“ (CO₂) í skrifum sínum frá 1779 og í síðari skrifum frá 1789 er einungis um losun „bundins lofts“ frá plöntumí myrkri að ræða, en hann lagði ofuráherslu á skaðsemi þess í vistarverum.

Senebier skrifar (þýðing á íslensku úr frönskum texta Senebiers í bók Rabinowitch⁷³ (bls.21):

Það er ljóst að loftið, sem laufblöð undir vatni gefa frá sér í sólarljósi, verður til vegna sérstakrar sameiningar bundins lofts [koltvísýrings] í laufblöðunum fyrir áhrif sólarljóssins.

og síðar skrifar hann:

Ég felst ekki á að andrúmsloft sé síað inn í blöðin til þess að skilja eftir phlogiston hluta sinn þar og út fari loft hreinsað af phlogiston. (...et en sortir air dephlogistique apres cette depuration).

Senebier hafnar hér tilgátu Priesleys og Ingen-Houzs. Þess í stað setur Senebier fram þá skýringu, *„að bundið loft leyst upp í vatni væri sú næring sem plönturnar draga til sín úr lofti og þaðan kæmi það hreina loft sem þær gefa frá sér eftir úrvinnslu“.*

Nicolas Théodore de Saussure: Í sólarljósi taka grænar plöntur upp koltvísýring og vatn og breyta í lífræn efni og súrefni.

Tveimur áratugum eftir að Senebier birti fyrst sínar niðurstöður, skýrði Nicolas Théodore de Saussure (1804) magnhlutföll tillífunarferlisins^{94, 95}. Saussure mældi loftskipti plantna með því koma plöntum fyrir í lokuðu gleriláti og hann vigtaði plönturnar og koltvísýringinn í byrjun og eftir nokkurn tíma. Niðurstaða var að plönturnar höfðu þyngst og koltvísýringur hafði minnkað. Þar sem plönturnar þyngust meir en nam minnkun kolefnis ályktaði Saussure að plönturnar hefðu tekið upp vatn. Hann komst einnig að því aukning rúmmáls af súrefni var jafn mikil og minnkun rúmmáls af koltvísýringi.

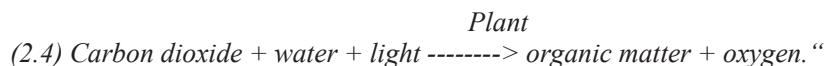
Plönturnar í tilrauninni skiluðu sem sagt sama rúmmáli af súrefni frá sér og þær tóku til sín af koltvísýringi. Plönturnar voru ræktaðar í hreinu vatni og í lofti með koltvísýringi Því hlaut þyngdaraukning plöntunnar að vera komið úr vatni að hluta til. Hlutverk vatns í tilífun var þar með staðfest, Rabinowitch (1945) bls. 23-24:

„De Saussure made the first comparison of the amounts of carbon dioxide absorbed and of oxygen liberated by the plants; and most important of all, he proved-that the increase in dry weight caused by the assimilation of a certain quantity of carbon dioxide, is considerably larger than the weight of carbon contained in it. Since the equivalent of all the oxygen contained in the decomposed carbon dioxide is evolved into the air, the large weight increase cannot be attributed to a coassimilation of oxygen from this source. The plants grew in pure water and air containing air carbon dioxide; therefore the only other possible source of weight increase was water (taken up in a form not removable by drying). De Saussure thought at that time that the assimilation of water is an independent process, merely coupled with the decomposition of carbon dioxide. However, the experimental results do not warrant

⁹⁴Biology reference: De Saussure, Nicolas-Théodore
<http://www.biologyreference.com/Co-Dn/De-Saussure-Nicolas-Th-odore.html>

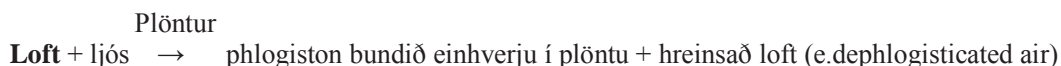
⁹⁵ Rabinowitch Eugene I. 1945. Photosynthesis and Related Processes, bls. 18. Interscience Publ. New York
<http://www.archive.org/details/photosynthesisre01rabi>

such a separation of the two processes; what they prove is the participation of water in photosynthesis. They require an amplification of the over-all equation (2.3), which we may now write in the form:



Rabinowitch lýsti stöðu rannsókna á tillífun á síðasta fjórðungi 18. aldar með líkingum:

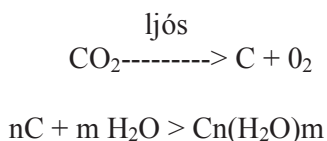
1. Tillífunarlíking eftir uppgötvanir Ingen-Houzs:



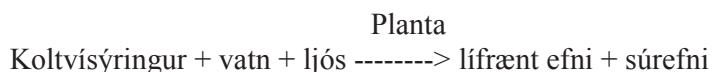
2. Framlag Senebiers var að í stað andrúmsloft var kominn koltvísýringur (CO₂):



Á þessu tíma var hugmyndin af tillífun sú, að súrefni sem losnar við tillífun kolefnis sé komið úr kolefnistvísýringi og og vatn sameinaðist síðan kolefni í myndun lifrænna efna. Sú hugmynd varð býsna lífseig Rbinowitch (1945):



Rabinowitch telur að hugmyndin um niðurbrot koltvísýring geti átt rætur sínar að rekja til þess að vatn var ekki nefnt til sögunnar fyrr en mörgum árum seinna en koltvísýringur. Niðurstöðum rannsókna Saussure sé betur lýst með eftirfarandi líkingu:



De Saussure mældi einnig súrefnisnotkun spírandi fræs og planta í myrkri og ályktaði að súrefnisnotkun planta og dýra væri með sama hætti, plöntur binda binda súrefni við öndun og gefa frá sér koltvísýring.

Robert Mayer: Varðveisla orkunnar. Ljósorka verður að efnaorku.

Julius Robert Mayer (1814-1878), læknir að mennt, setti fyrstur fram lögmálið um varðveislu orkunnar. Hann áleit að umsetning sólorku í efnaorku við tillífum kolefnis í plöntum væri mikilvægt dæmi um varðveislu orkunnar.

Mayer lýsir hugmyndum sínum um varðveislu orkunnar í lifferlum í riti sem gefið var út 1845, hér í íslenskri þýðingu (Mayer notaði orðið „kraftur“ þar sem nú er skrifað „orka“):

Náttúran hefur sjálf tekið sér fyrir hendur að fanga ljósið á flugi sínu til jarðar og safna í forða hinum hreyfanlegasta allra krafta, eftir umbreytingu í fast form. Til þess að ná þessu

markmiði hefur hún þakið jarðskorpuna með lífverum, sem taka til sín sólarljósið og mynda stöðugt efnaorku með krafti ljóssins.,

Þessar lífverur eru plönturnar: Plöntuheimurinn myndar forða, þar sem hinir hverfulu sólargæislar eru bundnir og geymdir til notkunar af hagkvæmri fyrirhyggju, sem tilvist mannkynsins er órjúfanlega tengd.

Þýtt úr þýskum texta hjá Rabinowitch 1945

Tveir miklir áfangar í vísindum voru forsenda uppgötvana og aukinnar þekkingar á ljóstillífum (photosynthesis):

1. Mótun nútíma efnfræði einkum á seinni hluta 18 aldar og byrjum þeirrar 19. og má þar nefna þar til sögunnar framlag Daltons (A New System of Chemical Philosophy 1808) og Lavoisiers (*Traité élémentaire de chimie* (1789 o.fl. ritmiðar).
2. Lögmálið um varðveislu orkunnar og tengingin við ljóstillífum plantna.

Þegar líður á 19. öld og fram á þennan dag fjölga útgefnum greinum um rannsóknir á ljóstillífum stöðugt og því verður hér eftir verður aðeins verður aðeins stiklað á stóru í framvindu rannsókna á ljóstillífum kolefnis (e. photosynthesis, carbon assimilation). Stuðst er m.a við grein Govindjee og Krogmann (2005)⁹⁶ og Photosynthesis Timelines eftir Thomas Brennan:

1862: Julius von Sachs sýnir fram á að sterkja er fyrsta sýnilega afurð ljóstillífunar kolefnis í laufblöðum. Sachs setti laufblað í dagsbirtu en haldi helminginn af laufblaðinu. Joðprófun sýndi að sterkja myndaðist í þeim hluta laufblaðsins sem naut dagsbirtunnar en ekki í hinum. Sachs (1832- 1897) var áhrifamikill frumkvöðull í plöntulífeðlisfræði og grasafræði og höfundur nokkurra kennslubóka, sem teljast klassískar.

1864. Jean Baptiste Boussingault mældi með meiri nákvæmni en áður (og staðfesti um leið mælingar Saussure 1804) hlutfall milli upptöku koltvísýrings og losunar súrefnis í tillífum, CO₂, sem reyndist 1,0.

1905. Frederick Frost Blackman setur fram, lögmálið um takmarkandi þætti: það ferli sem gengur hægst eða sá þáttur sem minnst er af, takmarkar hraða ljóstillífunar. Þeir þættir sem Blackmann prófaði eru ljósstyrkur, hitastig og styrkur koltvísýrings.

1922-1923. Warburg og E. Negelein: greina frá lágmarks kvanta þörf í tillífum, sem reyndist síðar ofmetin.

1924. Otto H. Warburg og T. Uyesugi skýrðu niðurstöður Blackmans á þann veg að ljóstillífum samanstæði af tveimur ferlum, hröðu ljósefnaferli og hægara lífefnaferli. Warburg nefndi lífefnaferlið Blackman ferlið (Blackman reaction).

1937. Robert Hill uppgötvaði að einangruð grænukorn geta myndað súrefni ef ljósi er beint að þeim, með heppilegum rafeindaþega, jafnvel þótt enginn koltvísýringur (CO₂) sé er til staðar. Þessi niðurstaða er fyrsta vísbendingin um að súrefni sé komið frá vatni. Ferlið er er þekkt sem Hill ferlið (e. the Hill reaction).

⁹⁶ Photosynthesis Timelines eftir Thomas Brennan www.photobiology.info

Govindjee og Krogmann (2005). Discoveries in oxygenic photosynthesis (1727-2003): a perspective. Í Discoveries in Photosynthesis. Bls. 63-105. Ritstjórn : Govindjee, J.T. Beatty, H.Gest og J.F. Allen.

1941. Samuel Ruben, Merle Randall, Martin Kamen og James Logan Hyde staðfesta að súrefni sem losnar í ljóstillífun kolefnis komi frá vatni með því að nota vatn merkt með þungri samsætu af súrefni O¹⁸ í mælingum á tillífun

1948-1954. Melvin Calvin (1912-1997), Andrew Benson og James A. Bassham notuðu koltvísýring merktan með samsætu af kolefni, ¹⁴CO₂ við rannsóknir á Blacman ferlinu og komust að því að

1. 5-C sykra, ribulosafosfat, tekur við koltvísýringnum.
2. Fyrsta stöðuga efnið í afoxun CO₂ er fosfó-glyeraldehyd, þriggja kolefna samband.
3. Mótökuefnið (e. acceptor), ribulósafosfatið endurnýjast í hringrás efna.

1954. Daniel Arnon sýnir fram á myndun ATP í blaðgrænu óháð ljósi.

1960. Robin Hill og Fay Bendall lýsa svonefndu Z-skema fyrir tvö efnaferli í ljóstillífun (ljóskerfi 1 og 2) fyrir flutning rafeinda frá vatni til ADP og NADP⁺ og myndunar ATP og NADPH. Kerfin tvö byggja á rannsóknum Roberts Emerson og annarra, en Rabinowitch setti fyrst fram hugmyndina um tvö ljóskerfi 1956.

Fæðuöflun, fólksfölgun og áburðarnotkun.

Thomas Robert Malthus (1766- 1834), stærðfræðingur mennaður í Cambridge, setti fram hina frægu kenningu sína um fólksfölgun og fæðuöflun í An essay on the Principle of Poulation, as it Affects the Future Improvement of Society⁹⁷. Bókin kom fyrst út 1798, án þess að höfundar væri getið, og spratt upp úr samræðum feðganna Roberts og Daniels, þar sem sonurinn andæfði bjartsýnum skoðunum föðurins að með nýtingu vísinda í landbúnaði og iðnaði stefndi samfélagið inn í framtíð gullaldar⁹⁸. Engu að síður hvatti faðir Roberts hann til að koma hugmyndum sínum á framfæri á bók.

Robert Malthus sýndi fram á að við hagstæðustu skilyrði gæti fólksfölgun vaxið exponentialt, það er tvöfaldast á ákveðnum tíma (1, 2, 4, 8, 16...; geometrískur vöxtur), en fæðuöflun gæti aðeins vaxið í minni skrefum (1, 2, 3, 4, 5, 6...; arithmetískur vöxtur). Fólksfölgunin er því miklu hraðari en vöxtur fæðuöflunar samkvæmt kenningunni. Af því leiðir að hungursneyð er óhjákvæmileg, nema til komi takmörkun fólksfölgunar með öðrum hætti. Merki þess að kenningin sé rétt, er hungursneyð og barnadaudi eins og er á ýmsum svæðum í Afríku, en þar veldur uppskerubrestur af völdum þurrka miklu eins og kunnugt er. Hins vegar hefur kenningin ekki staðist í velmegunarríkjum þar sem matvælaframleiðsla er ríkuleg, byggð á tækni framförum eins og notkun tilbúins áburðar, kynbótum nytjajurta og búpenings og margvíslegum öðrum þáttum, til dæmis sáðskiptum í stað einhæfrar ræktunar, eyðingu illgresis og varnir gegn plöntusjúkdómum. Framfarir í landbúnaði hafa þó sætt harkalegri gagnrýni vegna mengunar eins og er sú fullyrðing hagfræðingsins Jeffrey Sachs sýnir að landbúnaður sé helsta orsök flestra vistfræðilegra vandamála á jörðinni ("Agriculture

⁹⁷ Lee, Jun-Oh 2008. Malthus' Essay on the Principle of Population and its Historical Impact.. <http://www.zum.de/whkmla/sp/0809/massai/massai1.html>

⁹⁸ John Avery 2013. Malthus' Essay on the Principle of Population. The Danish Peace Academy. <http://www.fredsakademiet.dk/library/avery/malthus.htm>

is the main driver of most ecological problems of the planet“⁹⁹). Þegar allt kemur til alls þarf bæði að koma til aukin öflun matvæla, þar sem hungur ríkir og takmörkun fólksfjöldunar eins og kom fram í ræðu Normans Borlaug við afhendingu Nóbelsverðalauna fyrir umbætur í plöntukynbótum, sem hlaut nafnbótina græna byltingin:

“That's what Norman Borlaug and his colleagues achieved in the 1960s and 1970s with the Green Revolution that staved off famine for millions. Yet, "there can be no permanent progress in the battle against hunger until the agencies that fight for increased food production and those that fight for population control unite in a common effort," Borlaug said in his acceptance speech for the Nobel Peace Prize in 1970. "[Man] is using his powers for increasing the rate and amount of food production. But he is not yet using adequately his potential for decreasing the rate of human reproduction. The result is that the rate of population increase exceeds the rate of increase in food production in some areas."

David Biello 2009.

Græna byltingin varð ekki sú bylting sem vonast varð eftir vegna þess að afkastamikil kvæmi af nytjaplöntum, eins og komu fram í rísplöntum og hveiti, eru viðkvæm fyrir sjúkdómum og krefjast miklis áburðar sem var af skornum skammti víða í þróunarlöndum.

Notkun tilbúins áburðar hefur leitt til hvað mestrar uppskeruaukningar á þessum tveinur öldum frá því að Malthus setti fram kenningu sína, en er jafnframt orsök nítratmengunar þar sem áburðarnotkun er mikil. Eitt mesta skref framfara í áburðarframleiðslu má telja að sé vinnsla níturs úr lofti með Haber Bosch aðferðinni.

Að sjálfsögðu gat Robert Malthus ekki sé fyrir tæknilegar framfarir næstu tvær aldirnar og það má segja að bjartsýnismenn á borð við föður Roberts, Daniel Malthus hafi haft mikið til síns máls, þótt sonurinn hafi greint vandamálið rétt í grundvallaratriðum. Hér má nefna til sögunnar danska hagfræðinginn Ester Boserup sem gagnrýndi þá hugsun sem felst í kenningu Malthusar að landbúnaður (fæðuöflun) takmarki fólksfjöldann. Í helstu bók sinni, *The Conditions of Agricultural Growth: The Economics of Agrarian Change under Population Pressure* 1965, hélt Boserup því þvert á móti fram að fólksfjöldinn móti landbúnaðinn¹⁰⁰:

“A major point of her book is that "necessity is the mother of invention". It was her great belief that humanity would always find a way and was quoted in saying "The power of ingenuity would always outmatch that of demand" in a letter to Northern Irish philosopher T.S. Hueston. She also influenced the debate on the role of women in workforce and human development, and the possibility of better opportunities of work and education for women.”

Heimildir um Malthus kenninguna

Avery, John 2013. Malthus' Essay on the Principle of Population. The Danish Peace Academy. <http://www.fredsakademiet.dk/library/avery/malthus.htm>

⁹⁹ David Biello 2009. Another Inconvenient Truth: The World's Growing Population Poses a Malthusian Dilemma. Scientific American. <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=growing-population-poses-malthusian-dilemma>

¹⁰⁰ Wikipedia, the free encyclopedia: Ester Boserup.

Biello, David 2009. Another Inconvenient Truth: The World's Growing Population Poses a Malthusian Dilemma. Scientific American.

<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=growing-population-poses-malthusian-dilemma>

Lee, Jun-Oh 2008. Malthus' Essay on the Principle of Population and its Historical Impact..

<http://www.zum.de/whkmla/sp/0809/massai/massai1.html>

Wikipedia, the free encyclopedia 2013: Ester Boserup.

Rætur plöntunæringarfræðinnar

Bók Nicolas Théodore de Saussure's "Recherches chimiques sur la Végétation", safn greina um efnafræði plantna kom út 1804¹⁰¹. Bókin markar tímamót í rannsóknum á tillifun kolefnis í plöntum og upptöku plöntunæringarefna úr jarðvegi.

Þær rannsóknir¹⁰² leiddu meðal annars í ljós að plöntur vinna kolefni úr andrúmslofti. Um það skrifar Saussure í formála bókarinnar:

Rannsóknir mínar hafa gert mér kleyft að sýna fram á að vatn og loft eiga stærri hlut í myndun þurrefnis í plöntum en þau moldarefni sem þær taka upp í rætur úr vatnslausn. Þýtt úr enskum texta í bók Browne 1944¹⁰³.

Svo gæti virst af þessari tilvitnun sem de Saussure hafnaði ekki alfarið humuskenningunni. Þess ber þó að gæta að hann ræðir um moldarefni í vatnslausn og er þá eins líklegt að þar sé um að ræða nítur og steinefni sem losna úr moldarefnum (humus) eins og kemur fram í bók Russells (1915):

“On comparing the amount of dry matter gained from these sources [úr lofti og vatni] with the amount of material that can enter through the roots even under the most favourable conditions, he concludes that the soil furnishes only a small part of the plant food. Small as it is, however, this part is indispensable: it supplies nitrogen – une partie essentielle des végétaux – which as he has shown, was not assimilated direct from the air; and also ash constituents, qui peuvent contribuer à former, comme dans le animaux, leur parties solides ou osseuses[öskuefni, sem geta verið til stoðar, eins og hinir föstu hlutar beinanna í dýrum]”.

Tilvitnun Russells sýnir að Saussure kemst að þeirri niðurstöðu að nítur og steinefni séu tekin upp úr jarðvegi um rætur plantna og að nítur sé lífsnauðsynlegt plöntum. En hlutverk steinefna í plöntum hefur engan veginn verið þekkt, þar sem Saussure telur þau gegna svipuðu hlutverki og föst efni beina í dýrum. Eldri heimildir eru til um áhrif níturs á vöxt plantna, Gorham (1991):

¹⁰² Í kaflanum um tillifun bls. 42 er í stuttu máli grein frá niðurstöðum af rannsóknum Saussures á tillifun kolefnis og öndun plantna.

¹⁰³ Browne C.A. 1944. A source book of agricultural chemistry. Í Chronica Botanica ritstj. F. Verdoorn. The Chronica Botanica Co., Waltham MA. <http://books.google.com/books> leita þar að Browne C.A. 1944. A source book of agricultural chemistry

Digby (1669) claimed to have grown barley luxuriantly by watering it with a weak solution of nitre (potassium nitrate). Although Davy (1813) later expressed some suspicion about Digby's results, he himself found carbonate of ammonia to be an excellent fertilizer.

Gorham vitnar jafnframt til þess að Saussure hafi 1804 ályktað af tilraunum sínum að nítur væri plöntum nauðsynlegt en bætir við að Liebig hafi komið búfræðingum þeirra tíma í uppnám með því að sýna fram á að plöntur geti lifað af ólífrænum efnum einum saman þar á meðal ammóníum.

De Saussure (1804) also observed from his experiments that plants require nitrogen for growth. However, it was Liebig (1840) who upset traditional agriculturists by demonstrating conclusively that plants can grow from wholly inorganic sources: carbon dioxide, water, ammonia, and certain mineral elements - whether made available by the decay of organic manures or provided initially as inorganic compounds.

Síðar átti eftir að koma í ljós að Saussure var ekki horfinn frá humuskenningunni, og hélt henni fram í andstöðu við Liebig. Saussure taldi að ammóníum og nítrat væru ekki eiginleg plöntunæringarefni heldur væri hlutverk þeirra að leysa upp moldarefni, Sachs í enskri þýðingu Garney og Balfours 1906: Fyrst nefnir Sachs umræður sem spunnust um bók Liebig (1840) svo sem hvert sé fyrsta myndefni tillífunar og um hlutverk steinefna í plöntum og fleiri umræðuefni án stuðnings viðeigandi rannsókna. Fyrst eftir 1860 hafi verið leitað nýrra leiða með marktækum árangri. Að því sögðu bætir Sachs við (í þýðingu Balfours):

“More important at the time for the advance of the science was the further examination of the question respecting the source of nitrogen which plants assimilate; it was the more necessary that this point should be finally settled because Liebig's deductions still gave room for many doubts and the first of vegetable physiologists, de Saussure, in his later days made the mistake of coming forward in opposition to Liebig as a defender of the humus theory, maintaining (1842) that ammonia and nitrates are not themselves food-material of plants, but only serve to dissolve humus.”

Fleiri en Saussure áttu erfitt með að segja skilið við humuskenninguna og má þar nefna Albrecht Thaer sem eins og áður er greint frá þekkti rannsóknir Saussures. Báðir töldu humuskenninguna ekki úr sögunni þrátt fyrir að Þær niðurstöður Saussures að plöntur fengju megnið af kolefni sínu úr andrúmslofti en miklu minni hluta úr lofti í jarðvegi.

Saussure velti því einnig fyrir sér að steinefni geti haft áhrif á form plantna, á sama hátt og þau móta fastan hluta beina í dýrum. Samlíkingin við bein dýra getur ekki beinlínis átt við stoðvef plantna, þó að gott jafnvægi plöntunæringarefna sé mikilvægt fyrir stoðvefsmyndun sem og fyrir vöxt og þroska að öðru leyti.

Saussure hafnar alfarið hugmyndum sem eigna plöntum skapandi kraft, að í þeim geti ný efni orðið til eða orðið til við ummyndun (transmutation) annarra eins og kemur fram í formála de Saussure að bókinni frá 1804. Nánari skýringu er að finna í bók Russels frá 1915:

Planta ræktuð af fræi í vatni bætir ekki neinu við steinefnahluta sinn umfram það sem var í fræinu, ef undan er skilið það ryk úr lofti sem fellur á plöntuna. Þessi tilraun gerði endanlega út af við þá hugmynd að plöntur nýmynduðu kalí (potash).

Saussure skilgreindi moldarefni (humus) sem svart efni sem myndast fyrir áhrif vatns og súrefnis á plöntuleifar. Hann rannsakaði einnig myndun moldarefna af eikarvið. Kolefnisinnihald moldar reyndist meira en í plöntuleifunum sem þau myndast af, en súrefni og vetni er hinsvegar minna í moldinni. Saussure tekur fram að í vatnsskoli af mold séu klóríð (muriat), karbónöt (potash¹⁰⁴) og súlföt af alkalímálmum (kalíum og natríum) og dregur þá ályktun að vatnsskolið hafi áburðaráhrif.

Saussure greindi kalíum natríum kalsíum, magníum, fosföt, kísil, járn og mangan í plöntuösku. Hann bar saman steinefnasamsetningu ösku af plöntum og jarðvegi og hlutföll steinefna voru ekki þau sömu í ösku af jarðvegi og ösku af plöntum sem í jarðveginum uxu. Þar með var sýnt fram að plöntur velja að einhverju leyti milli steinefnanna í jarðvegi (valupptaka plöntunæringarefna, e. selective uptake of plant nutrients), en taka ekki einfaldlega upp jarðvatn með steinefnum eins það kemur fyrir í jarðvegi.

Rannsóknir Nicolas Théodore de Saussure voru upphaf nýrra tíma í lífeðlis- og plöntunæringarfræðum á sama hátt og rannsóknir og hugmyndir Lavoisiers í efnafræðinni. Það var þó ekki fyrr en um miðja nítjándu öld með steinefnakenningu Sprengels og Liebig að ranghugmyndum humuskennningarinnar um næringu plantna er endanlega rutt úr vegi. Þó var nítturnæring plantna enn ekki skýrð til fulls og þörf fyrir snefilefni hafi að mestu verið ókunn. Með steinefnakenningunni og vitneskju um upptöku koltvísýrings úr lofti voru grundvallaratriði plöntunæringar að nokkru leyti kunn, það er upptaka næringarefna úr jarðvegi og lofti. Lágmarkslögmálið og seinna lögmálið um minnkandi vaxtarauka skýra svo magnáhrif næringarefnanna á vöxt plantna og uppskeru.

Steinefnakenningin og lágmarkslögmálið

Nýjar hugmyndir um sölt eða steinefni í jarðvegi sem meginþátt í næringu plantna komu fram á fyrri hluta 19 aldar og eru einkum eignaðar þremur mönnum Carl Sprengel, Jean Baptiste Boussingault og Justus von Liebig.

Mikilvægum áfanga var þó náð 1804, tuttugu og fjórum árum áður en Sprengel varð manna fyrstur til að gera grein fyrir plöntunæringarefnum í jarðvegi og áhrifum þeirra á plöntuvöxt (lágmarkslögmálinu). Tilraunir de Saussure (1804) með ræktun í vatnslausnum sýndu, eins og þegar hefur verið rætt um, að plöntur taka upp sölt (jónir)¹⁰⁵ í gegnum rætur. Einnig var þá ljóst að plöntur þurfa koltvísýring, loft og vatn til vaxtar og auk þess steinefni úr jarðvegi.

Carl Sprengel (1787-1859) varð fyrstur til að birta á prenti grundvallaratriði steinefnakenningarinnar. Athyglisvert er að kennari Sprengels Albrecht Thaer (1752-1828) var meðal þekktustu talsmanna humuskennningarinnar. Sprengel hafnaði humuskennningunni í grein sem birtist 1826 (tilvitnun hjá Ploeg o.fl. 1999).

Ploeg o.fl 1999 og Browne 1944 fjalla ítarlega um störf og rannsóknir Sprengels á jarðvegi og plöntum og um viðhorf hans til humuskennningarinnar og er hér stuðst við þá umfjöllun:

¹⁰⁴ aska af trjávið (potash) samanstendur aðallega af kalíumkarbónati og natríumkarbónati

¹⁰⁵ Á þessum tíma og fyrr var talað um upptöku salta. Það ekki fyrr en 1834 að fræðiheitin „ion, anion, cation (cathion)“ komu fram í grein sem Michael Faraday birti í *Philosophical Transactions* of the Royal Society of London.

Sprengel hlaut doktorsgráðu í efnafræði og hagfræði 1832 frá háskólanum í Göttingen og varð fyrstur í Þýskalandi til þess að kenna landbúnaðarefnafræði í Göttingen 1827-1828 og 1831-1839 var hann prófessor í búvísindum og landbúnaðarefnafræði í Braunschweig. Kennsluáðferðir hans eru athyglisverðar frá sögulegu sjónarmiði. Sprengel kenndi aðferðir við efnagreiningar jarðvegs, áburðar og nytjajurta á rannsóknastofu jafnfram því sem hann kenndi almenna búfræði. Hann fór með nemendur í ferðir þar sem hann kynnti þeim mismunandi jarðvegsgerðir, vatnsmiðlun, landgræðslu, jarðabætur, nautgriparækt og kynnti þeim góðan og slæman búrekstur. Fræðileg og hagnýt kennsla fóru saman.

Snemma á starfsferlinum fór Sprengel að birta greinar um rannsóknir sínar. Rannsóknir Sprengels byggðust einkum á efnagreiningum á jarðvegi og plöntum bæði ræktuðum og villtum. Fyrsta grein hans (með titilinn Um plöntuhumus, humussýru og sölt af húmussýru¹⁰⁶) fjallaði um humuskenninguna og hlutverk lífræns efnis í jarðvegi sem einu uppsprettu plöntunæringar. Sprengel mældi mörg steinefni í vatnslausn af mold úr fjölda jarðvegsgerða. Meðal vatnsleysanlegra steinefna voru alkalisölt, það er kalíum og natríumsölt af nitrati, sulfati, klóríði og fosfati. Sömu steinefni hafði Sprengel mælt í plöntum og og hann ályktaði þessi leysanlegu efni væru hin raunverulegu plöntunæringarefni.

Niðurstöður og ályktanir Sprengels voru í mótsögn við humuskenninguna, og hann mótmælti eindregið þeirri skoðun að að steinefni mynduðust í plöntum. Hann studdist einnig við rannsóknir de Saussure sem sýndi fram á að sölt væru tekin upp í plönturætur og CO₂ úr lofti. Hann gekk þarna á móti skoðunum kennarara síns Thaers en byggði ályktanir sínar bæði á eigin rannsóknum og annarra.

Í grein Sprengels 1828 um jarðvegsefnafræði, steinefnanæringu plantna voru einnig meginatriði lágmarkslögmálsins svonefnda (e. law of minimum). Hann taldi að minnsta kosti 15 frumefni mikilvæg fyrir plöntur: C, H, O, N, P, K, S, Mg, Ca, Na, Cl, Al, Si, Fe og Mn. Hann áleit einnig að sum frumefni gætu verið plöntum skaðleg svo sem arsen, selen og blý. (Sparks D. L. 2006).

Í sömu grein kemur lágmarkslögmálið fram í meginatriðum, eins og eftirfarandi texti ber með sér. Textinn er þýðing úr á tilvitnun Ploeg o.fl 1999 í grein Sprengels :

Eins og áður er sagt er oft salt í regnvatni og af því leiðir að það er til staðar í jarðvegi, en þar með er ekki sagt að í jarðvegi sé alltaf nægilegt salt fyrir gróskumiklar plöntur. Þetta á ekki síst við um ræktun nytjaplantna og þess vegna hafa sölt í vaxandi mæli verið notuð sem áburður. Hafi áburðarsölt ekki alltaf komið að sama gagni er ástæðan annað hvort sú að í jarðvegi hefur verið nóg af þeim eða önnur nauðsynleg efni hefur skort. Það er óumdeilanlegt að þurfi planta 12 efni til vaxtar og þroska mun hún ekki vaxa vant eitt þeirra og plantan mun þrífast illa ef ekki er nóg af einu þeirra til að uppfylla þarfir plöntunnar.

Í síðust setningunni eru hugmyndir um takmarkandi vaxtarþætti settar fram á skýru máli. Hins vegar ræðir Sprengel um að plöntunæringarefni (salt) í jarðvegi séu úr regnvatni komin, en megnið af plöntunæringarefnum í jarðvegi losnar þó vafalaust við veðrun bergefna og losun úr moldarefnum (humus).

¹⁰⁶ Sprengel, C. 1826. Ueber Pflanzenhumus, Humussäure und humussaure Salze (About plant humus, humic acids and salts of humic acids). Archiv für die Gesamte Naturlehre 8:145–220

Það er fyrst með bók efnafræðingsins Justus von Liebig (1803-1873) um notkun efnafræði í landbúnaði og lífeðlisfræði 1840 (*Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie*) að steinefnakenningin (e. the mineral theory) fær almenna viðurkenningu ekki síst fyrir það álit sem Liebig naut sem efnafræðingur víða um heim. Hann er talinn einn af feðrum lífrænnar efnafræði. Efni bókar Liebigs kom fyrst fram í skýrslu Liebigs til breska vísindafélagsins British Association for Advancement of Science¹⁰⁷, en margir Bretar voru meðal nemenda Liebigs í Giessen (nú Justus-Liebig-Universität Giessen) og hann var gestur félagsins á fundum þess í Liverpool 1837 og í York 1844, auk þess sem hann ferðaðist um Bretland og kynnti sér landsins gagn og nauðsynjar meðal annars landbúnað.

Í umsögn um bók Brocks frá 1997 (*Justus von Liebig: The Chemical Gatekeeper*)⁶ segir að Liebig hafi haft mikil áhrif á vísindamenntun, lækningapraxis og landbúnað í Bretlandi. Hann hafi flutt efnafræðina á markaðstorg félags- og stjórnsmála með því að sýna fram á gildi hennar fyrir fæðuframleiðslu, næringu og almenna heilbrigði.

Eftirfarandi kafli í bók Brocks 1997 og sýnir ljóslega, að menn álitu með réttu að efni bókar Liebigs væri mikilvægt framlag í baráttu gegn hungurvofunni, mætti segja upphaf að grænni byltingu þeirra tíma.

Kaflinn hefst með tilvitnun til bókar Liebigs hér í íslenskri þýðingu:

Sá tími mun koma, að á akra verður dreift lausn af kalíumsilikati, ösku af hálm og söltum af fosfórsýru framleiddum í efnaverksmiðju alveg eins og lyf eru nú gefin við sjúkdómum.

Síðan segir:

Með útgáfu „Efnafræði og notkun hennar í landbúnaði og lífeðlisfræði“ 1840 var Liebig ekki lengur aðeins þekktur sem þýskur efnafræðingur meðal þeirra sem áhuga höfðu á að rata um frumskóg lífrænnar efnafræði heldur hafði hann öðlast alþjóðlega frægð. Þessi upphefð var ekki eingöngu komin til vegna þess að bókin var mjög fljótt þýdd á frönsku, ensku, ítölsku, rússnesku, hollensku, dönsku og sænsku heldur vegna bjartsýni boðskapar um að með aðferðum byggðum á vísindum mætti auka matvælaframleiðslu og aldrei aftur kæmi til hungursneyð eins og herjaði á fimmta áratugnum („but because its optimistic message was that by scientific management food yields could be increased and the „hungry forties“ be forever eradicated“

Þýðing úr bók Brooks (1997): Justus von Liebig: *The Chemical Gatekeeper*.

Áhrifum af bók Liebigs lýsir Russell (1915) með nokkrum tilvitnunum í texta Liebigs:

*“But all this was changed in 1840 when Liebig's famous report to the British Association upon the state of organic chemistry, afterwards published as *Chemistry in its Application to Agriculture and Physiology* came like a thunderbolt upon the world of science. With polished invective and a fine sarcasm he holds up to scorn the plant physiologists of his day for their continued adherence, in spite of accumulated evidence, to the view that plants derive their carbon from the soil and not from the carbonic acid of the air.*

¹⁰⁷William H. Brock: Justus von Liebig: *The Chemical Gatekeeper*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

http://books.google.is/books?id=VugoemP2th0C&dq=the+british+association+and+liebig&source=gs_navlinks_s

" All explanations of chemists must remain without fruit, and useless, because, even to the great leaders in physiology, carbonic acid, ammonia, acids, and bases, are sounds without meaning, words without sense, terms of an unknown language, which awake no thoughts and no associations. "

The experiments quoted by the physiologists in support of their view are all " valueless for the decision of any question ". " These experiments are considered by them as convincing proofs, whilst they are fitted only to awake pity." Liebig's ridicule did what neither de Saussure's nor Boussingault's logic had done : it finally killed the humus theory. Only the boldest would have ventured after this to assert that plants derive their carbon from any source than carbon dioxide, although it must be admitted that we have no proof that plants really do obtain all their carbon in this way. "

Russell (1915)¹⁰⁸bls. 10

Russell nefnir rannsóknir Sprengels en gerir lítið úr þeim, og segir að engar mikilvægar uppgötvanir hafi verið gerðar á árunum 1830-1840 en þá breytist allt með framlagi Liebig's.

Fram hefur komið að Sprengel átti í viðræðum við Liebig um efni í bók Liebig's sem tekið var úr verkum Sprengels án þess að heimilda væri getið (Wendt 1950 samkvæmt grein Ploeg o.fl. 1999). Engu að síður hirti Liebig ekki um að geta heimilda. Framlag hans var engu að síður mikilvægt: hann kom þessum kenningum á framfæri svo að eftir var tekið, meðal annars vegna þess að efnistökin þóttu ögrandi og sumt var mótsagnakennt, enda var Liebig aðeins í meðallagi kunnugur efninu (Ploeg o.fl. 1999).

Bók Liebig's 1840 vakti einnig mikla athygli, þar sem áhyggjur voru teknar að vakna vegna hnignandi frjósemi jarðvegs og ótta við hungursneyð, sbr. kenningar um að fæðuframléiðsla gæti ekki haldið í við fólksfjölgun og afleiðingin væri óhjákvæmilega hungursneyð, Malhus, 1798¹⁰⁹.

Bók Liebig's kom út á nokkrum árum í meir en 20 útgáfum og endurprentunum í Þýskalandi (6), Englandi (5), Bandaríkjunum (3), Frakklandi (2), Ítalíu (2) og í Danmörku, Hollandi, Póllandi og Rúslandi. En hlutur Liebig's var í rauninni fyrst og fremst sá að koma efninu á framfæri. Þegar árið 1955 var hlutur beggja Sprengels og Liebig's viðurkenndur í heimalandi þeirra með því að stofnað var til verðlauna á vegum tilrauna- og rannsóknastöðva þar í landi í beggja nafni og eru þau veitt fyrir mikilvert framlag til eða þjónustu við landbúnað, Ploeg o.fl. 1999.

Lágmarkslögmálið var sett fram í þremur hlutum af Liebig (1855):

1. Við skort á nauðsynlegu næringarefni og að því tilskildu að öll önnur séu til staðar geta plöntur, sem á efninu þurfa að halda sér til lífsviðurværis, ekki þrífist.
2. Við sömu skilyrði í andrúmslofti verður uppskera í beinu hlutfalli við næringarefni í áburði.

¹⁰⁸ <http://www.archive.org/details/plantgrowth00rusrich>

¹⁰⁹ <http://www.ucmp.berkeley.edu/history/malthus.html>

3. Í jarðvegi sem auðugur er af plöntunæringarefnum er ekki hægt að auka uppskeru með því að bæta við meiru af sömu efnum.

Yfirleitt er lágmarkslögmál Liebig's orðað á annan hátt (sbr. til dæmis eftirfarandi texta)¹¹⁰:

*“Justus von Liebig's **Law of the Minimum** states that yield is proportional to the amount of the most limiting nutrient, whichever nutrient it may be. From this, it may be inferred that if the deficient nutrient is supplied, yields may be improved to the point that some other nutrient is needed in greater quantity than the soil can provide, and the Law of the Minimum would apply in turn to that nutrient.”*

Phillip Barak, Univ. of Wisconsin, 2000. Essential Elements for Plant Growth. Law of the Minimum

Uppspera stendur í réttu hlutfalli við magn þess plöntunæringaefnis sem er mest takmarkandi fyrir vöxt. Af því má álykta að það gildi að því marki að sé þörfinni fyrir þetta tiltekna næringarefni fullnægt með áburði, þá geti annað næringarefni eða vaxtarþáttur orðið takmarkandi.

Kunn er samlíking lágmarkslögmálsins við tunnu með misháa tunnustafi, fyllta af vatni. Tunnstafirnir tákna plöntunæringarefnin (eða framleiðsluþætti) og vatnið uppskeruna (eða afurðir). Tunna rúmar ekki meira vatn en lægsti tunnustafurinn leyfir.

Liebig hefur verið talinn vera upphafsmaður steinefnakenningarinnar og honum hefur verið eignað lágmarkslögmálið (e. law of minimum), þó svo að grein Sprengels hafi birst tólf árum áður.¹¹¹

Liebig taldi að plöntur tækju nítur upp sem ammoníak úr lofti en steinefni eins og fosfór, kalíum, kalsíum og brennstein úr jarðvegi. Hann bjó til áburð með steinefnum og lítilháttar af ammoníaki, þar sem hann áleit að upptaka þess úr lofti væri í sumum tilvikum of hæg. Hann gerði árið 1845 tilraun með þennan áburð á um 5 hekturum af rýru landi á sandjörð. Áburðinn reynist ekki sem skyldi og varð Liebig síðar ljóst að áburðurinn var of torleystur, en það var með ráði gert þar sem Liebig vildi koma í veg fyrir að næringarefnin töpuðust við útskolun. Þótt Liebig taldi að plöntur tækju nítur til sín sem ammoníak úr loft gerði hann sér grein fyrir mikilvægi notkunar búfjáráburðar eins kemur fram í skrifum Liebig's:

“It should be the care of the agriculturalist so to employ all the substances containing a large proportion of nitrogen, which his farm affords in the form of animal excrements, that they should serve as nutriment to his own plants” (Bradfield, 1942 heimild sjá neðamál¹¹²).

¹¹⁰ <http://www.soils.wisc.edu/~barak/soilscience326/lawofmin.htm>

¹¹¹ Ploeg o.fl. 1999
http://www.absoluteastronomy.com/topics/Justus_von_Liebig#encyclopedia

¹¹² Bradfield, R. 1942. Liebig and The Chemistry of the Soil, p. 48-55. In: F.R. Moulton (ed.). Liebig and after Liebig. Amer. Assn. Adv. Sci. Special Publ. 16, Washington, D.C. samkvæmt:
READING 31-2 .Soure: Ronald F. Korcak, History of the Organic Movement, 1991. Early Roots of the Organic Movement: A Plant Nutrition Perspective. Department of Horticulture and Landscape Architecture at Purdue University.

Liebig gerði sér grein fyrir losun N í formi ammoníks við rotnun plöntuleifa og búfjáburðar, en taldi ranglega að nítur væri fyrst og fremst tekið upp sem lofttegund, það er að segja sem ammoníak.

Lögmálið um minnkandi vaxtarauka

Lögmálið um minnkandi vaxtarauka var fyrst sett fram af Anne Robert Jacques Turgot 1767. Tilefnið var það álit að framleiðsla landbúnaðarafurða takmarkaðist af einum þætti: landrými. Kjarni lögmálsins var að með vaxandi vinnuafli og fjármagni á hverja einingu lands kæmi að því marki að frekari tilkostnaður skilaði engu. Væri tilkostnaður aukinn í smáum skrefum að því marki að aukning skilaði engu, færi aukning framleiðslu á hverja kostnaðareiningu minnkandi, þar til ekkert fengist fyrir kostnaðaraukann.¹¹³

Turgot er fremur þekkur sem hagfræðingur og talsmaður svonefndrar *laissez faire* stefnu, sem nefna mætti afskiptaleysisstefnu. *Laissez faire*¹¹⁴ stefnan tók mið af þeirra tíma pólitísku aðstæðum. og markmiðið var sem mest fjálsræði í viðskiptum. *Laissez faire* þýðir orðrétt: látið (okkur) gera og sagan segir að franskur ráðherra hafi spurt hóp kaupmanna hvað franska ríkið gæti gert fyrir þá og einn þeirra hafi svarað: *laissez nous faire* sem gæti útlagst: látið okkur höndla:

Wikipedia: According to historical legend, the phrase stems from a meeting in about 1680 between the powerful French finance minister Jean-Baptiste Colbert and a group of French businessmen led by a certain M. Le Gendre. When the eager mercantilist minister asked how the French state could be of service to the merchants and help promote their commerce, Le Gendre replied simply "Laissez-nous faire" ("Leave us be", lit. "Let us do").^[citation needed]

Mitscherlich 1909¹¹⁵ tengdi lögmálið um minnkandi vaxtarauka við vöxt plantna (uppskeru). Vaxtarauki á hverja einingu plöntunæringarefnis fer minnkandi með vaxandi skömmtum uns hármarki er náð. Gert er ráð fyrir að aðrir þættir séu ekki takmarkandi. Uppskeran nálgast hámarksgildi með stöðugt minnkandi vaxtarauka (e. asymptotic yield curve). Þessu samhengi áburðar og uppskeru er oft lýst með veldisvísislíkingu, sem kennd er við Mitscherlich:

$$y = A (1 - 10^{-c \cdot (b + x)})$$

eða

$$\log(A - y) = \log A - c \cdot (b + x)$$

y = uppskera (t.d. hkg þurrefni á ha) við áburðargjöf x

x er magn áburðarefnis (plöntunæringarefni t.d. kg/ha N, P, K eða S)

A er hámarksgildi uppskeru sem næst þegar x nálgast óendanlega stærð

b er nýtanlegt magn frumefnis í jarðvegi fyrir áburðargjöf

¹¹³Murray N. Rothbard *Biography of A.R.J. Turgot (1727-1781) Brief, Lucid, and Brilliant.* Ludwig von Mises Institute. Auburn, Alabam a <http://mises.org/about/3244>:

“ In short, Turgot had worked out, in fully developed form, an analysis of the law of diminishing returns which would not be surpassed, or possibly equaled, until the twentieth century. Increasing the quantity of factors raises the marginal productivity (the quantity produced by each increase of factors) until a maximum point is reached, after which the marginal productivity falls, eventually to zero, and then becomes negative.”

¹¹⁴ <http://en.wikipedia.org/wiki/Laissez-faire>

¹¹⁵Mitscherlich, E.A. 1909. Das Gesetz des Minimums und das gesetz des abnehmendens Bodenertrages. Landwirtschaftliches Jahrbuch der Schweiz 38, 337-552
Rubio G., J. Zhu og j. P Lynch 2003.

c er breytilegur stuðull sem upphaflega var talið að væri föst stærð fyrir hvert frumefni (hallastuðull línu í logaritnisku jöfnunni).

Aðhvarfslíkingar fyrir niðurstöður úr langtímatilraunum. Dæmi úr langtímatilraunum um lámarslög málið og lögmálið um minnkandi vaxtarauka.

Aðhvörfín eru reiknuð af meðaltölum ára úr langtímatilraunum á Sámstöðum og Geitasandi. Fyrsta dæmið er úr tveimur tilraunum með vaxandi skammta af N. Önnur tilraunin er á túni á mýrarjörð og hin á móatúni. Þá eru tvær tilraunir með vaxandi skammta af fosfór annars vegar á túni á Geitasandi og hinsvegar heima á Sámstöðum á móajörð.

Tvær mismunandi aðhvarfslíkingar fyrir minnkandi vaxtarauka fyrir hverja viðbótareiningu af áburði er notaðar.

Veldisvísislíkingin, sú sem kennd er við Mitscherlich, er hér notuð á öðru formi en kynnt var að framan. Hyperbóla hentar einnig til að lýsa minnkandi vaxtarauka og í dæmum sem hér fara á eftir (fosfóráburður á sanda og mýrartún) fellur aðhvarfslína hyperbólu betur að uppskerumælingum við vaxandi P áburð.

Hyperbóla er auk þess notuð til að lýsa upptöku næringarefna, efnabreytingum sem lífhvatar örva (Michelis Menten líking¹¹⁶) og vexti örvera (Monod líking¹¹⁷).

Veldisvísislíking (e. exponential equation).

$$y - y_0 = Y_{\max} \cdot (1 - \exp(-k \cdot x))$$

$$y = Y_{\max} \cdot (1 - \exp(-k \cdot x)) + y_0$$

Hyperbola

$$y - y_0 = Y_{\max} \cdot x / (th + x)$$

$$Y = Y_{\max} \cdot x / (th + x) + Y_0$$

y = uppskera við áburðargjöf x
y₀ er uppskera þegar x=0
x er magn áburðarefnis (plöntunæringarefni t.d. P) á ha
Y_{max} er hámarksgildi uppskeru (y-y₀), aðhvarfslína

Stuðullinn k í veldisvísislíkingunni er ekki föst stærð (fasti) fyrir hvert frumefni, heldur breytilegur stuðull eftir vaxtarskilyrðum. Áburðaskammtur x sem gefur helming af mestu uppskeru (y = 0,5 · Y_{max}) er x_{0,5} = 0,6932/k

Stuðullinn th í hyperbolu er magn næringarefnis (t.d. N kg/ha) sem gefur helming af hámarksuppskeru Y_{max}.

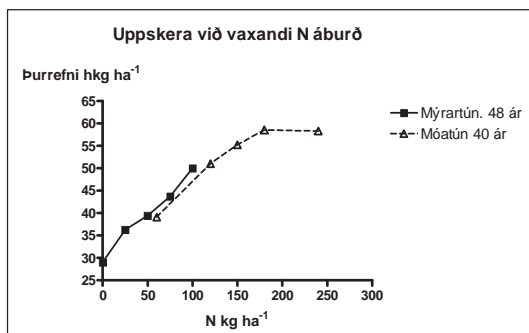
Vaxandi skammtar af N á túnum á mýrarjörð og á móajörð. 118

Niðurstöður tilraunanna eru það einsleitir að þær falla vel saman á beinni línu upp að 180 kg á ha af N. Frávik frá aðhvarfslínu er aðeins 1,7 hkg á ha (S_{y,x}) og 97% af breytileika í uppskeru má rekja til breytilegs fosfóráburðar.

¹¹⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Enzyme_kinetics

¹¹⁷ Charles Roth, Spring 1999. Basics of Growth and the Monod Equation. Semester project for Introduction to Biochemical Engineering. Rensseler Polytechnic Institute, Troy, New York. <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/FERMENT/roth1.html>

¹¹⁸ Niðurstöður tilrauna með N, P og K áburð sem stuðst er við í þessum kafla eru ár Fjölriti RALA nr 215 Jarðræktarrannsóknir 2003. Ritsjórar Hólmgeir Björnsson og Þórdís Anna Kristjánsdóttir.



3. mynd. Uppskera í tilraun á Sámstöðum við vaxandi N áburð á mýrartún (0-100 kg/ha N) og móatún (60-240 kg/ha N).

Uppskera (y hkg/ha) var línulegt fall af níturáburði allt að 180 kg/ha N eins og kemur fram á 3. mynd, og aðhvarfslíkingunni:

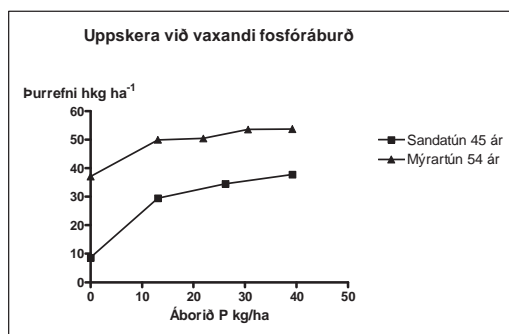
$$Y = 31,0 + 0,163 N$$

$$r^2 = 0,974, \text{ staðalfrávik frá línu } S_{y.x} = 1,7 \text{ hkg/ha, } P < 0,0001$$

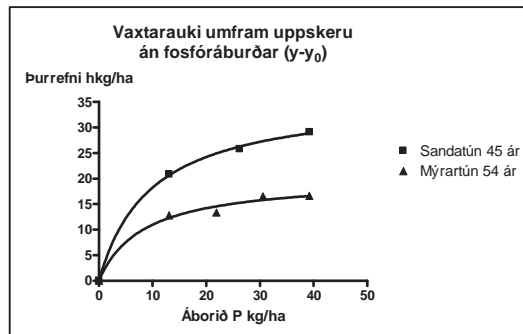
Uppskeran vex um 0,163 hkg/ha fyrir hvert áborið kg af N. Línulega aukningin er í samræmi við lágmarkslögmálið.

Línulegur uppskerauki (hkg þe. / kg N í áburði) að 180 kg/ha N í áburði, enginn uppskeruauki við aukna áburðargjöf frá 180 N til 240 N kg/ha áborið. Annar vaxtarþáttur en nítur er þá takmarkandi fyrir vöxt við 240 kg/ha N.

Vaxandi skammtar af fosfóráburð á sandatún og móatún.



A.



B.

4. mynd. Uppskera við við vaxandi P-áburð á sandatún á Geitasandi á Rangárvöllum og mýrartún á Sámstöðum í Fljótshlíð.

A. Uppskera.

B. Uppskeruauki fyrir fosfóráburð umfram uppskeru án áburðar

Minnkandi vaxarauki er greinilegur á sandatúni en ekki jafn greinilegur á mýrartúninu, ef lítið er á uppskeruna, 4. mynd A. Þegar lítið er á vaxtarauka umfram uppskeru án fösforáburðar (y-y₀ á 4. mynd B) sést hins vegar greinilega að vaxtarauki á hverja einingu P í

áburði fer minnkandi með vaxandi áburðargjöf í báðum tilraunum. Vaxtaraukinn er meiri á sandatúninu og fosfórþörf meiri en á mýrartúninni.

Gera verður greinarmun á vaxtarauka umfram uppskeru án áburðar og vaxtarauka á hverja áburðareiningu. Vaxtarauki á áburðareiningu fer minnkandi við vaxandi áburðargjöf.

Aðhvörf fyrir vaxtarauka ($y - y_0$) og uppskeru (y):

Sandatún: $y - y_0 = 29,41 \cdot (1 - \exp(-0,09051 \cdot P))$ $R^2=0,998$, frávik frá línu $Sy.x=0,77$

Jafna 1

Mýrartún: $y - y_0 = 16,78 \cdot (1 - \exp(-0,09679 \cdot P))$ $R^2=0,984$, frávik frá línu $Sy.x=1,01$

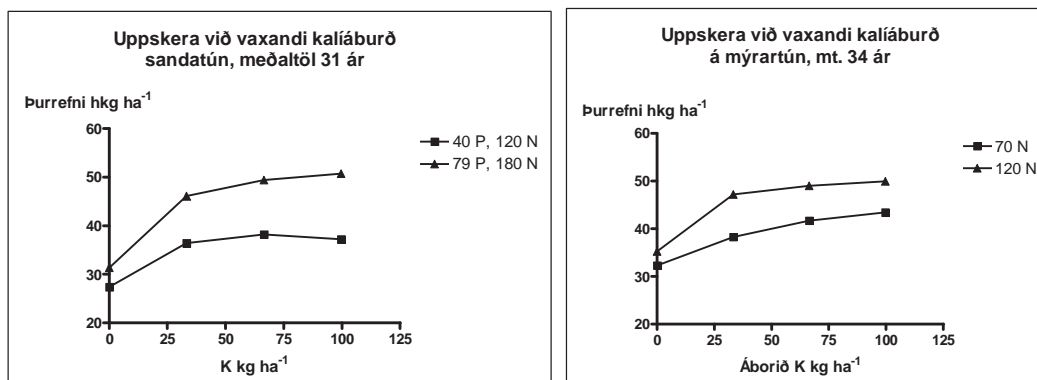
Jafna 2

Sandatún: $y_0 = 8,7$ sett inn í líkingu 1 $\rightarrow y = 38,11 - 29,41 \cdot \exp(-0,09051 \cdot P)$

Mýrartún: $y_0 = 37,1$ sett inn í líkingu 2 $\rightarrow Y = 53,88 - 16,78 \cdot \exp(-0,09679 \cdot P)$

y : uppskera hkg/ha þurrefni, P : kg/ha P í áburði

Kalí á sandatún og mýrartún



5. mynd Áhrif vaxandi kalíáburðar á uppskeru af túnnum. Myndin til vinstri sýnir niðurstöður af sandatúninu á Geitasandi og til hægri eru niðurstöður af mýrartúninu á Sámstöðum.

Vaxtarauki fyrir kalí fór minnkandi með vaxandi kalíáburði við stærri skammtana af N og P á Geitasandi og mýrartúnið á Sámstöðum.

Verkefni: Reiknið aðhvörf fyrir uppskeru sem fall af kalí, annars vegar við 70 N og hins vegar 120 N kg/ha og við hvorn grunnáburð (N, P) fyrir sig á Geitasandi. Notið forrit fyrir aðhvarfslíkingar og uppskerutölur hér að neðan.

Kalíáburður á mýrartún.

Áburður kg/ha K	70 N, 31 P	120 N, 31 P
	Uppskera hkg/ha	
Meðaltöl 34 ára		
0	32,3	35,2
33,2	38,3	47,2
66,4	42,7	49,0
99,6	43,4	49,9

Kalíáburður á sandatún.

Áburður kg/ha K	120 N, 40 P	180 N, 79 P
	Uppskera hkg/ha	
Mt 31 árs		
0	27,4	31,4
33,2	36,4	46,1
66,4	38,2	49,4
99,6	37,2	50,7

Tilraunstarfsemi eflist, nútímaþekking á plöntunæringu mótast

Grundvöllur tilraunastarfs í landbúnaði.

Skotinn James Johnston (1793-1855) skrifaði bók um tilraunir í landbúnaði *Experimental agriculture* og mælir þar með akurtilraunum með aðferðum sem að mörgu leyti jöfnuðust á við síðari tíma tilraunir, m.a. að hafa skyldi sem mesta fjarlægð milli endurtekninga á tilraunaliðum. Hann komst einnig að því að víxlverkun væri milli áburðartegunda.

Jean Baptiste Boussingault (1802-1887) vann að rannsóknum sínum á níturnæringu planta, sáðskiptum og efnajöfnuði í jarðrækt og búfé á búgarði sínum í Elsass (fr. Alsace). Hann var frumkvöðull akurtilrauna, sem hann hóf um 1834 og búgarður hans varð fyrsta tilraunstöðin í jarðrækt, en áður höfðu tilraunir ýmist verið pottatilraunir eða gerðar á rannsóknastofu. Hann varð fyrstur manna til að setja upp næringarefnabókhald byggt á akurtilraunum og hefur verið talinn fyrsti landbúnaðarefnafræðingurinn og upphafsmaður búvísinda. Hann vann að rannsóknum á níturnæringu planta bæði í pottatilraunum 1827-1828 og á rannsóknastofu í því skyni að kanna hvort plöntur taki upp nítur úr lofti¹¹⁹.

Boussingault deserves the title of founder of scientific agriculture because he studied problems both in the field and in the laboratory. He conducted experiments on soils, crops, fertilizers, the assimilation of atmospheric nitrogen by plants, and changes in composition of seeds during germination, as well as utilization of food by animals, and applied all available knowledge in the planning and conduct of his experiments. He was the friend and collaborator of Dumas, one of the greatest French chemists of alltime. All of his studies bear the stamp of philosophic insight.

McCullum, E. V. 1957 tilvitnun hjá Cowgill, George R. 1964

Boussingault notaði magnmælingar í akurtilraunum sínum sem hefur verið líkt við aðferðir de Saussure við rannsóknir á tillífun:

*“He reintroduced the **quantitative methods of de Saussure**, weighed and analysed the manures used and the crops obtained, and at the end of the rotation drew up a balance sheet, showing how far the manure had satisfied the needs of the crop and how far other sources of supply air, rain, and soil had been drawn upon.” Russell 1915*

Boussingault fékst ekki aðeins við rannsóknir á plöntunæringu hann var einnig frumkvöðull í búfjár- og fôðurrannsóknum. Til dæmis um það eru rannsóknir hans á níturnæringu í búfénaði, sem voru meðal hinna fyrstu á því sviði ef ekki þær fyrstu. Boussingault gerði í því sambandi greinarmun á vexti og viðhaldi. Hann greindi nítur í fjölda fôðurtegunda með aðferð kenndri við Dumas (aðferðin á nú vaxandi vinsældum að fagna á síðasta hluta 20. aldar með tilkomu nútímalegra tækja sem gera greiningu níturs mun þægilegri en með Kjeldahl aðferð). Þeir Dumas og Boussingault voru samstarfsmenn við háskólann í Sorbonne (Svartaskóla) í Paris. Boussingault skipti starfskröftum sínum milli háskólans og tilraunastöðvarinnar og búgarðsins í Elsass, sem var arfur konu hans. Boussingault setti up jafngildistöflu fyrir 24 fôðurtegundir. Taflan byggði á níturnæringu með hey sem viðmiðun, þar fôðurgildið var reiknað sem jafngildi tíu punda af heyi. Töfluna nefndi hann “Fræðilegt magn

¹¹⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Jean-Baptiste_Boussingault

mismunandi fódurtegunda, sem framkalla jöfn áhrif á vöxt vöðva“, , Carpenter 2003¹²⁰, Cowgill 1964 bls. 66-67¹²¹.

*Um rannsóknir Boussingaults er ítarleg umfjöllun í bók Mc Cosh F.W.J. 1984. Boussingault, chemist and agriculturalist og í greinum Cowgills (1964) og Aulies (1970).*¹²¹

Elsta starfandi tilraunstöð í jarðrækt er í Rothamsted á Englandi, stofnuð 1843 af John Bennet Lawes. Hann hafði árið áður framleitt fosfatáburð í stórum stíl með því að meðhöndla beinamjöl með brennsteinssýru. Lawes fékk einkaleyfi á framleiðsluáðferðinni. Þetta er upphafið að framleiðslu á superfosfati og tilbúnum áburði. Með samstarfsmanni sínum Joseph H. Gilbert gerði hann fyrstu áburðartilraunirnar. Gilbert var um tíma nemandi Liebig, áður en hann hóf samstarf með Lawes. Elstu tilraunirnar eru með áburðargjöf í hveitiræktun hófust 1843 og standa enn¹²².

Russell (1915) greinir frá því að um 1855 hafi með niðurstöðum Rothamsted tilraunanna verið sýnt fram á þörf plantna fyrir fosfór, alkalisölt og nítursambönd. Auk þess að viðhalda megi frjósemi jarðvegs um að minnsta kosti nokkur ár með tilbúnum áburði og gagnsemi þess að hvíla akur plægðan og ósáinn (e. fallowing) væri fölginn í auknu nýtanlegu N í jörð:

(1) Crops require phosphates and salts of the alkalis, but the composition of the ash does not afford reliable information as to the amounts of each constituent needed, e.g. turnips require large amounts of phosphates, although only little is present in their ash.

(2) Non-leguminous crops require a supply of some nitrogenous compounds, nitrates and ammonium salts being almost equally good. Without an adequate supply no increases of growth are obtained, even

when ash constituents are added. The amount of ammonia obtainable from the atmosphere is insufficient for the needs of crops. Leguminous crops behaved abnormally.

(3) Soil fertility may be maintained for some years at least by means of artificial manures.

(4) The beneficial effect of fallowing lies in the increase brought about in the available nitrogen compounds in the soil.

Á vefsíðu Rothamsted tilraunastöðvarinnar⁸¹ er fróðlegt yfirlit um tilraunastarfsemina þar frá byrjun og þar segir:

Megin tilgangur tilraunanna var að mæla áhrif N, P, K, Na og Mg í ólífrænum söltum á uppskeru nýtjajurta. Á þeim tíma vissu menn að þessi frumefni eru í talsverðu magni í plöntum og búfjáráburði, en áhrif hvers frumefnis fyrir sig á uppskeru höfðu ekki verið könnuð kerfisbundið.

¹²⁰ Carpenter Kenneth J. 2003. A Short History of Nutritional Science: Part 1 (1785–1885)

<http://jn.nutrition.org/content/133/3/638.abstract>

¹²¹ Mc Cosh F.W.J. 1984. Boussingault, chemist and agriculturalist. D.Reidel Publishing Company

<http://books.google.com/> leita þar eftir: Boussingault, chemist and agriculturalist

George R. Cowgill 1964. Jean Baptiste Boussingault: — A Biographical Sketch • (February 2, 1802 – May 11, 1887). *J. Nutr.* 1964 84: 1-9. <http://jn.nutrition.org/cgi/reprint/84/1/1.pdf>

Aulie, Richard Paul 1970. Boussingault and the nitrogen cycle. *Proceedings of the American Philosophical Society of America*, 114 (6) 435-479.

http://books.google.is/books?id=qUwLAAAIAAJ&pg=PA471&lpg=PA470&dq=Boussingault+1891&hl=is&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

¹²² <http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/resources/LongTermExperiments.pdf>

Áburður notaður var superfosfat (fyrst framleitt á Rothamsted með því að meðhöndla bein með brennisteinssýru), súlföt af K, Na og Mg (sem þá voru oft nefnd steinefni, e. minerals,) ammoníum sölt og natríumnítrat. Áhrif þessarra ólífrænu áburðartegunda voru í flestum tilraunanna borin saman við búffjáráburð og svonefndar repjukökur. Lawes og Gilbert skráðu uppskeru og sýni voru geymd fyrir efnagreiningar. Með skráðum gögnum að meðtöldum upplýsingum um magn og efnasamsetningu áburðar var unnt að setja upp næringaefnabókhalda fyrir megin næringarefni (macronutrients) fyrir hvern reit. Jarðvegsefnagreiningar sýndu uppsöfnun eða minnandi magn plöntunæringarefnanna í jarðvegi allt eftir áburðargjöf, efnamagn sem fjarlægð var með uppskeru og með frárennsli,Gögnum var ekki aðeins safnað á tilraunareitum, veðurmælingar voru einnig gerðar frá um 1850 og efnamagn í úrkomu mælt, skordýrum safnað, fiðrildum og blaðlúsum. Skordýraskráningin er einstæð á heimsvísu.

Tilraunirnar eru ekki síður einstæðar, fyrir það hvað þær hafa staðið lengi og verið vel nýttar. Má til dæmis nefna ýtarlegar rannsóknir á hringrás níturs og brennisteins með notkun á samsætum þessarra frumefna:

Rannsóknir á hringrás níturs með ^{15}N samsætu leiddu í ljós að 50% af N í áburði var að meðaltali endurheimt í uppskeru, 25 % varð eftir í jarðvegi sem lífrænt N og er þá ekki gerð grein fyrir 25%.¹²³

Í þeim fjórðungi af N í áburði sem hvorki kemur fram í uppskeru eða jarðvegi er það sem tapast úr jarðvegi við útskolun í grunnvatn eða í andrúmsloft sem lofttegundir.

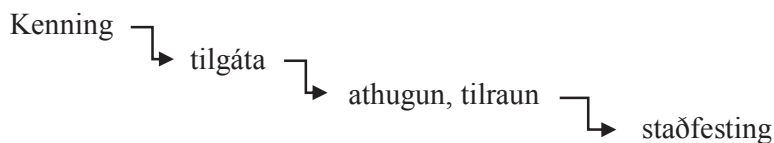
Mikil mengun af brennisteinstvíldi (SO_2) var í lofti fram eftir 20.öld til um það bil 1970 en hefur minnað verulega síðan. Þessi loftmengun sá þó nytjagróðri fyrir miklum hluta brennisteinsþarfar plantna. Útreikningar byggðir á mælingum á samsætu brennisteins (^{34}S) sýna að um 50% af S í plöntum kemur frá loftmengun af manna völdunm (anthrogenic sources.)¹¹⁰

Frá því um 1860 hefur brennsteinn uppskeru aukist frá um það bil 0,25% í um 0,37% S í þurrefni 1970 en hefur lækkað síðan í um 0,2% undir lok 20. aldar samkvæmt línuriti í tilvitnaðri grein frá Rothamsted tilraunstöðinni (Guide to the Classical and other Long-term Experiments, Datasets and Sample Archive)¹¹⁰

¹²³ Guide to the Classical and other Long-term Experiments, Datasets and Sample Archive
<http://www.rothamsted.ac.uk/resources/LongTermExperiments.html>

Kenningar og rannsóknir

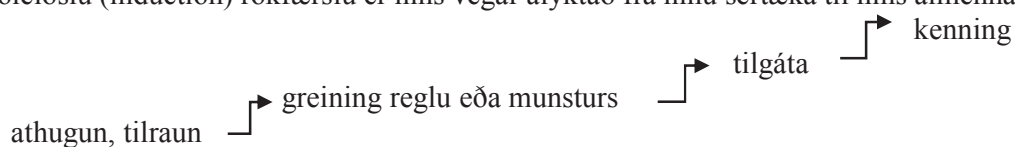
Afleiðslu (deduction) rökfærsla felst í ályktunum frá hinu almennta (þekkingu) til hins sértæka. Tilgátu, sem byggist á almennri þekkingu, má prófa eftir á með tilraunum:



William M.K Tochim 2006¹²⁴.

Út frá almennri þekkingu, setjum við fram kenningu (teoría) og síðan tilgátu (hypótesa) fyrir sértækari aðstæður og reynum að sanna tilgátuna með athugunum (observation) og tilraunum (experiment). Á ensku hefur þessi aðferð stundum verið nefnd frá toppi og niður á ensku „top-down“

Með aðleiðslu (induction) rökfærslu er hins vegar ályktað frá hinu sértæka til hins almenna:



Byrjað er á athugunum eða tilraunum, síðan greining munsturs (e. pattern) eða reglu í niðurstöðum, tilgáta er sett fram. Þessi aðferð er stundum nefnd á ensku „bottom up“ eða frá botni og upp.

Liebig beitti báðum þessum aðferðum. Afleiðslu aðferðinni (deduction), þegar hann ályktaði að plöntur fengju nítur yfirleitt að mestu úr andrúmslofti en sú niðurstaða stóðst ekki eins og kunnugt er. En hann hafði áður sett fram lágmarkslögmálið en þar byggði hann að öllum líkindum á tilraunum og ályktunum Sprengels (eins og þegar hefur verið rætt, bls. 47) og því er þar um að ræða aðleiðslu (induction).

Russell (1915, bls.11¹²⁵) ræðir kenningar Liebigs um vaxtarauka og takmarkandi vaxtarþætti sem oftast hafa verið eignaðar Liebig meðal annars af Russell:

„Liebig's book was meant to attract attention to the subject [steinefnaþörf plantna] and it did, it rapidly went through several editions, and as time went on Liebig developed his thesis and gave it a quantitative form: „The crops on the field diminish or increase in exact proportions to the diminution or increase of the mineral substances conveyed to it in manure“. He further adds what afterwards became known as the Law of the Minimum „by the deficiency or absence of one necessary constituent, all other being present, the soil is rendered barren for all those crops to the life of which that one is indispensable“*

**“The underlying principle was not discovered by Liebig, having already been enunciated by political economists of the Malthus School. He was however the first to apply it to plant nutrition“.*

Russell (1915) rekur rök Liebigs fyrir því að plöntur taki nítur að mestu úr lofti og er sú ályktun byggð á almennri þekkingu. Ályktunin var engu að síður röng. Russel nefnir einnig að Liebig hafi bætt textanum um lágmarkslögmálið og fleiru inn í þriðju útgáfuna 1843 og

¹²⁴ William M.K Tochim 2006. *Deduction & Induction. Deductive and Inductive Thinking. A Research methods and Knowledge base.* <http://www.socialresearchmethods.net/kb/dedind.php>

¹²⁵ <http://archive.org/details/plantgrowth00russrich>, Book contributor: [University of California Libraries](http://www.library.berkeley.edu/)

hafi það orðið ágreiningsefni. Lítum á texta Russells og rök Liebigs fyrir upptöku nítur s úr lofti:

*„So much did Liebig insist, and quite rightly, on the necessity for alkalis and phosphates, and so impressed was he by gain of nitrogen in meadow land supplied with alkalis and phosphates alone, and by the continued fertility of some fields in Virginia and Hungary and the meadows of Holland that he began to regard the atmosphere as the source of nitrogen for plants. Some of the passages of the first and second editions urging the necessity of ammoniacal manures were deleted from the third and later editions. „If the soil is suitable, if it contains a sufficient quantity of alkalis and phosphates, nothing will be wanting. The plants will derive their ammonia from the atmosphere as they do carbonic acid“ he writes in the Farmers magazine. Ash analysis led him to consider the turnip as one of the plants „which contain the least amount of phophate and therefore require the smallest quantity for their development. These and other **practical deductions** were seized upon and shown to be erroneous by Lawes who had for some years been conducting vegetation experiments. Lawes did not discuss the theory as such, but tests the deductions Liebig himself draws and finds them wrong“.*

Niðurstöður tilrauna Lawes eru raktar hér á bls. 63-64 eins og Russell greinir frá þeim.

Aðferðir við rannsóknir á næringarþörf plantna

Ályktanir Sprengels og Liebigs um mikilvægi steinefna fyrir plöntur byggðust á efnagreiningum á plöntum og jarðvegi en skáru ekki úr um lífsnauðsyn hvers og eins þeirra fyrir plöntur. Um og eftir að steinefnakenningin kom fram leituðu ýmsir leiða til að kanna þörf plantna með öðrum hætti en efnagreiningum á plöntum, þar sem ekki væri víst að öll efni í plöntum væru nauðsynleg næringarefni plantna og enn síður fyrir það eitt að vera til staðar í jarðvegi.¹²⁶

Tvenns konar aðferðir, sem má kalla nákvæmnistilraunir, voru notaðar til kanna **þörf plantna fyrir steinefni**, Joseph Reynolds Green, 1909, Hoagland og Arnold 1950. Forsenda tilraunanna var í fyrstu að í stað venjulegs jarðvegs var valinn næringarsnauður jarðvegur, helst sandur og lífræn efni brennd og síðar var notuð sýra til að fjarlægja það sem eftir var og þeim næringarefnum bætt við í formi salta, sem talin var þörf á. Með samburðarliðum með og án einstakra efna var svo þörfin metin. Nokkru síðar kom ræktun í vatnslausnum af næringarsöltum til sögunnar:

Boussingault hóf ræktunartilraunir sínar fyrir 1840 og notaði sand eða kvartssand, þar sem lífrænt efni var fjarlægt og jarðvegurinn dauðhreinsaður með glæðingu, einnig notað hann sykirkol sem ræktunarefni og vökvaði með lausnum með þekktri samsetningu. Boussingault rannsakaði níturupptöku plantna 1837-1838 og aftur 1854-1855 (nánar í kaflanum um nítur bls.77-83) og kannaði 1857 hvort nítur, fosfór og kalí skýrðu vaxtarauka eftir áburð með tilraun í þremur liðum (McCosh 1984):

- (a) Enginn áburður
- (b) Kalsíumfosfat og kalíumnítrat borið á
- (c) Kalsíumfosfat og kalíumkarbónat borið á.

¹²⁶ Peter v. Sengbusch - 2003 Mineral Nutrients <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e16/16a.htm>

Jarðvegurinn var gersneyddur næringarefnum og notaðar voru sólblómaplöntur. NPK áburðurinn (b-liður tilraunarinnar) gaf langmesta vöxt, en án nitrats (c-liður) var vöxtur lítið betri en án áburðar. Seint á sama ári greindi Boussingault frönsku akademíunni frá því að plöntur þrífist illa í jarðvegi sem eingöngu fær fosfat, nokkru betur sé níturat gefið í stað fosfats en mjög vel séu bæði níturat og fosfat borin á.

Georges Ville fyrrum nemandi Boussingaults gerði sambærilegar tilraunir 1856 og 1857 og krafðist höfundaréttar á þeim ályktunum sem Boussingault setti fram með nokkrum rétti að sögn McCosch (1984).

Salm-Horstmar 1856¹²⁷ notaði kolasalla sem fenginn var við bruna á kandísykri, ársand eftir glæðingu, einnig kvartssand, hreint kvarstsduft og ýmsar leirtegundir í stað jarðvegs. Auk þess notaði hann í einni tilraun ársand sem var skolaður með saltsýru eftir glæðingu til samanburðar við ársand sem eingöngu var glæddur. Hans niðurstöður voru að **nítur, fosfór, brennisteinn, kalíum, kalsíum, magníum, járn, kísill og mangan** væru öllum plöntum nauðsynlegar.

Við járnkort gulnuðu blöðin á bygginu en voru með eðlilegum grænum lit í tilraun þar sem jární var bætt við. Hann hafði taldi klór nauðsynlegt fyrir fræmyndun en tilraunir hans skáru ekki úr um þörf fyrir natríum sem virtist þó gagnlegt í sumum tilvikum. Byggplöntur sem ekki fengu kísil lögðust og voru smávaxnar.

Tilraunirnar voru gerðar í herbergi við suðurglugga og í hverri tilraun virðist af lýsingu furstans frá Salm Horstmar¹²⁸ að dæma aðeins hafa verið ein planta, en tilraunirnar þeim mun fleiri. Ræktunin var í tíu mismunandi ræktunarefnum að meðtöldum leirtegundunum. Plönturnar voru hafrar, sumarbygg, vetrarhveiti, sumarhveiti, sumarrepja og vetrarrúgur. Í texta kemur fram að kannað var hvort mælanlegt magn væri af ýmsum efnum í ræktunarmiðlum (kolum, ársandi o.s. fv.) t.d. af klór.

Salm Horstmar varð fyrstur til að nota svonefndar mínus-tilraunir, þar sem nauðsyn frumefnis fyrir plöntur og hlutverk þess var prófað með því að sleppa einu frumefni í hverri tilraun (hverjum tilraunlið) í senn úr alhliða áburði, sem í voru öll nauðsynleg næringarefni, Gorhan 1991¹²⁹. Ekki var um að ræða könnun á hlutverki frumefnis í efnaskiptum heldur á áhrifum frumefnis á vöxt plöntunnar

Loks notaði Salm Horstmar hafra til að kanna ástæður fyrir hve snauður sendinn heiðajarðvegur í Westfalen er¹²⁸. Notuð voru 65 g af jarðvegi í hverjum potti. Áburður var eftirfarandi:

¹²⁷ Johnston H. W. 1976 *The Biological and Economic Importance of Algae. Part 4: the Industrial Culturing of Algae*

Tuatara Journal of the Biological Society Victoria University of Wellington, New Zealand, 22, (2), 1-

115

<http://www.nzetc.org/tm/scholarly/tei-Bio22Tuat02-t1-body-d1.html>

¹²⁸ Fürst zu Salm Horstmar, 1856. Versuche und resultatate über die Nahrung von Pflanzen.

Braunschweig 1856. [http://books.google.is/books?id=V3g-](http://books.google.is/books?id=V3g-AAAAcAAJ&printsec=frontcover&vq=Salm-)

[AAAAcAAJ&printsec=frontcover&vq=Salm-](http://books.google.is/books?id=V3g-AAAAcAAJ&printsec=frontcover&vq=Salm-)

[Horstmar+1856&hl=is&redir_esc=v#v=onepage&q&f=false](http://books.google.is/books?id=V3g-AAAAcAAJ&printsec=frontcover&vq=Salm-)

¹²⁹ Gorham E. 1991. Biogeochemistry: its origin and development. *Biogeochemistry* 13, 199-239

<http://www.springerlink.com/content/pv330220818318v8/>

1. Enginn áburður gaf mjög smáa plöntu.
2. Ammóníumkarbónat 0,01 g → plantan myndaði tvö blöð áður en hún drapst
3. Kalsíumfosfat (CaHPO_4) 0,05 g, ammóníumkarbónat 0,01 g → mjög smá planta, blöðin drápu eitt af öðru.
4. Kalsíumfosfat (CaHPO_4) 0,05 g, kalíumnítrat 0,02 g → fremur smávaxin planta, gulir blettir á 4. blaði.
5. Kalíumnítrat 0,01 g → plantan varð 7,8 sm há og grannvaxin.
6. Kalíumnítrat 0,02 g, kalsíumsúlfat 0,03 g → smávaxin planta.
7. Kalsíumfosfat (CaHPO_4) 0,05 g, kalsíumsúlfat 0,03 g, kalíumnítrat 0,02 g → mjög kraftmikil planta með breiðum, dökkgrænum blöðum og kröftugum hálmi (stönglum).
8. Kalk (kalsíumkarbónat) 0,01 g, kalsíumfosfat (CaHPO_4) 0,05 g, kalsíumsúlfat 0,01 g, kalíumnítrat 0,02 g → mjög kröftug planta.
9. Kalsíumfosfat (CaHPO_4) 0,05 g, kalsíumsúlfat 0,03 g, magníumkarbónat 0,02 g, kalíumnítrat 0,02 g → mjög kröftug planta.

Tilraunir nr 7-8 eru með N, P, S, K, Ca og árangurinn virðist af lýsingu á plöntunum vera svipaður, þó getur lýsing á lið 7 ef til vill bent til þess að þar hafi plantan vaxið einna best. Gallinn við þessar tilraunir (eða tilraunliði) er sá að aðeins í einni tilrauninni er getið um mælingu og þá aðeins hæðarmælingu, en plönturnar voru ekki vegnar og þurrefni ekki mælt. Hún gefur þó hugmynd um rannsóknir á þeim tíma þó ekki sé víst að aðferðin sé að öllu leyti dæmigerð.

Allrar athygli verðar eru þó ályktanir Salms Horstmar sérstaklega lokályktunin: *Plönturnar sjálfar eru bestu efnafreðingarnir fyrir hagnýta jarðvefnafræðingningu og ekki síst fyrir bændur:*

“Die Pflanzen selbst sind die besten Chemiker für die praktische Bodenanalysen und für die Landwirthe überhaupt.”

Nú er ljóst að í niðurstöðum efnagreininga jarðvegs og plantna felast mismunandi upplýsingar. Efnagreiningarnar gefa upplýsingar annars vegar um hvað plantan getur nýtt sér af nauðsynlegum næringarefnum úr jarðvegi (plöntuefnagreining) og hins vegar hve mikið mælist af leysanlegu næringarefni í jarðvegi (jarðvefnafræðing). Beri jarðvegfnafræðingningu og plöntuefnagreiningu ekki saman þá þarf að leita nánari skýring. Til dæmis getur jarðvegfnafræðingning getið til kynna að ekki skorti á leysanlegt næringarefni t.d. fosfór eða kalí en plöntuefnagreiningin bendir til skorts. Má þá ráða af líkum að aðstæður hafi verið takmarkandi fyrir nýtingu þess efnis sem mælt var t.d. gæti ástæðan verið léleg framræsla eða óhagstætt tíðarfar svo sem þurrkar eða kuldatið.

Þess verður þó að geta að mismunandi skolaðferðum aðferðum við úrdrátt nýtanlegs efnis úr jarðvegi ber ekki alltaf saman. Plöntuefnagreining mælir hinsvegar heildamagn í plöntusýni og er að því leyti til öruggari mæling en mæling nýtanlegs efnis í jarðvegi, sem er mæling á leysanlegum hluta af heildarmagni. Oft er talað um nýtanleg magn næringarefnis í jarðvegi samkvæmt mælingu á leysanlegu magni með tiltekinni aðferð (t.d. leysanlegt með ammóníum laktati lausn, þekkt sem AL aðferð). Þá er um að ræða aðferð sem hefur verið prófuð í áburðartilraunum og marktækt samhengi hefur mælt milli leysanlegs magns af næringarefni í jarðvegi annars vegar og hinsvegar uppskeru eða magns næringarefnis í uppskeru.

Ályktanir Salm Horstmars voru að öðru leyti þær að ástæðan fyrir ófrjósemi heiðajarðvegsins væri skortur á fosfór, brennisteini, kalki og kalí. Hann lætur þá athugasemd fylgja að niðurstöður þessara tilraun (með heiðajarðveginum) séu sérstaklega áhguaverðar vegna þess að

þær sýni að það sé ekki eingöngu fosfór sem ráði frjósemi jarðvegs eins og fram hafi komið í hinum mjög svo áhugaverðum rannsóknum Englendingsins Ch. Daubeny, sem ræktaði byggplöntur í dufti margra bergtegunda og dró þá almennu ályktun að fosfór væri eina frumefnis sem takmarkaði frjósemi jarðvegs.

Julius von Sachs (1832-1897) ræktaði **1860** fyrstur plöntur í vatnslausn af næringarsöltum (e. hydroculture, hydroponics) og nokkru seinna **Wilhelm Knop 1865**. Næringarlausn Knops var lengi einna mest notuð við rannsóknir á plötnæringu. Margar fleiri uppskriftir að næringarlausnum komu fram, en sú sem virðist oftast vera notuð í rannsóknum er **Hoagland næringarlausn** sem kom fyrst fram 1920 og í ítarlegri grein **Hoaglands og Arnons 1950**¹³⁰. Í upphaflegu gerð Hoagland næringarlausnar voru í ýmis frumefni, sem ekki er vitað til að séu nauðsynleg. Þessi efni (lithium, ál, tin, nikkell, jöð, titan og bróm) voru í stofnlausn snefilefna sem Hoagland nefndi A-Z lausn en af henni var notaður 1 ml í 1 lítra af lausn meginefna t.d. Knop lausn, Sengbusch 2003⁴¹:

Í næringarlausnum Sachs og Knops voru meginefni N, P, K, S, Ca og Mg auk þess örlítið af járn.

Lausn Sachs:

1g KNO₃, 0.5g CaSO₄, 0.4g MgSO₄ x 7 H₂O, 0.5g CaHPO₄ og vottur af FeCl₃ í 1000 ml af vatni

Lausn Knops:

1g Ca(NO₃)₂, 0.25g MgSO₄ x 7 H₂O, 0.25g KH₂PO₄, 0.25g KNO₃ og vottur af f FeSO₄ í 1000 ml af vatni.

Snefilefnum öðrum en járn var ekki bætt í lausninar en að líkindum hafa þau verið í einhverjum mæli í þeim söltum sem notuð voru. Á þessum tíma var lítið sem ekkert vitað um þörf plantna fyrir snefilefni ef undan er skilið járn og klór sbr. kafla um sögu snefilefna sem plöntunæringarefni .

Með tilraunum Sachs var sýnt fram á að plöntur þurfa til vaxtar og viðhalds katjónirnar K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ og í minni mæli Fe²⁺ eða Fe³⁺ auk þess anjónirnar SO₄²⁻, H₂PO₄⁻ eða HPO₄²⁻ og NO₃⁻.

Sumar aðrar jónir sem plöntur taka upp eru ekki taldar lífnauðsynlegar plöntum, þótt dæmi séu um að þær séu einstökum tegundum gagnlegar. Sengebusch¹³¹ nefnir tvö dæmi, annað er natríum í saltþolnum plöntum, hitt dæmið er kísill í elftingum og í sumum grösom:

“Certain other ions can be taken up by some plants without being used. Halophytes, for example, take up Na⁺ only because they have a stronger resistance against it than other plants. They have thus opened up an ecological niche for themselves. Silicon (SiO₂) is found in the ashes of horsetail and in the shoots of grasses sometimes even in considerable

¹³⁰ Hoagland, D.R. 1920. Optimum nutrient solution for plants. Science 52 (1354), 562-564.

<http://www.jstor.org/stable/view/1644972>

Hoagland, D.R og D.I. Arnon 1950. The water culture method for growing plants without soil.

California Agricultural Experiment Station. Circular 347. Univeristy of California. Berkeley.

<http://archive.org/details/watercultureme3450hoag>

¹³¹ Peter v. Sengbusch - 2003 Mineral Nutrients <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e16/16a.htm>

amounts. But it is not essential. Only diatoms and some other algae need it for the production of their shells. Some marine algae (especially brown algae) accumulate iodine but nothing is known about its significance.”

Jónskipti í jarðvegi voru uppgötvað 1850 þegar Englendingurinn I.T. Way sýndi fram á jarðvegur gat bundið auðleyst næringarefni og Daninn Johan Georg Forchhammer að umskipti urðu á kalsíum og magníum þegar sýni af leirjarðvegi var hrist með sjó.

Steinefnakenningin staðfest

Steinefnakenningin var staðfest í marvíslegum rannsóknum á næstu áratugum eftir að hún kom fram 1840, í tilraunum með ræktun í sandi og vatnslausnum, efnagreiningum plantna, potta- og akurtilraunum.

Steinefnakenningin frá 1840 í stuttu máli, Finck (1969):

1. Steinefni eru nauðsynleg plöntum og þær þurfa 10 frumefni (C, O, H, N, P, K, S, Ca, Mg, Fe) og þau fá plöntur úr jarðvegi að undanskildum C, O og H.
2. Þörf plantna fyrir næringarefni er mismunandi eftir tegundum.
3. Með áburði má bæta úr skorti á næringarefnum í jarðvegi
4. Plöntur þurfa ekki moldarefni sem næringu en moldarefnin gefa frá sér næringarefni.

Skilgreining á lífsnauðsynlegu næringarefni.

Eftir að ljóst var að plöntur þurfa mangan, bór og kopar til vaxtar, en í mjög litlu magni bæði í lífeðlisfræðlegum tilraunum og til lausnar á ræktunaryndamálum í landbúnaði tóku Arnon og Stout (1939) sér fyrir hendur að skilgreina hugtakið lífsnauðsynleg plöntunæringarefni. Þeir tóku kopar sérstaklega fyrir þar sem rannsóknir höfðu sýnt ótvíræð áhrif kopars á vöxt og æxlun plantna, Sommer (1931) og Lipman og MacKinney (1931), sjá nánar í kaflanum um kopar.

Þrjú skilyrði eru fyrir því að frumefni teljist lífsnauðsynlegt plöntunæringarefni samkvæmt Arnon og Stout (1939) :

- (a) Skorti næringarefnið nær plantan hvorki fullum vexti né lýkur blómgun og fræmyndun
- (b) Annað frumefni getur ekki komið í stað næringarefnisins
- (c) Næringarefnið hefur taka beinan þátt í efnaskiptum plöntunnar, það er að segja verður að gegna sérstöku lífeðalisfræðilegu hlutverki

Phillip Barak (1999)¹³² bætir því við ekki sé nóg að ein eða tvær plöntutegundir þurfi á næringarefninu sð halda og uppfylli skilyrðin þrjú, það þurfi að sýna fram þörfina fyrir mun fleiri tegundir.

„Although common sense goes a long way in defining the concept of an essential element, a more precise set of criteria were established by Arnon and Stout in 1939, who stated that an essential element (1) must required for the completion of the life cycle of the plant, (2) must not be replaceable by another element, (3) Must be directly involved in plant metabolism, that is, it must be required for a specific physiological function. To Arnon and Stout's three requirements for essential elements should be added a fourth: (4) The element must required

¹³² Phillip Barak (1999). Essential Elements for Plant Growth. Dept. of Soil Science, University of Wisconsin-Madison <http://www.soils.wisc.edu/~barak/soilscience326/essentl.htm>:

by a substantial number of plant species, not just a single species or two.” Phillip Barak (1999).

Eins og þeir sem birtu greinar um tilraunir með snefilefni í vatnsræktun 7 áratugum fyrr (Sommer 1931 og Lipman og MacKinney 1931) nefnir Barak vandkvæði við að sýna fram á að lítið magn af tilteknu efni (snefilefni) sé nauðsynlegt plöntum. Vandinn er annars vegar að snefilefnin eru til staðar í fræjum sem plönturnar eru ræktaðar upp af og hins vegar að vottur af viðkomandi snefilefni getur verið í söltum sem notuð eru í næringarlausnir og í vatninu. Jafnvel þótt söltin séu 99,99% hrein og vatnið tveímað.

Skilgreining Arnons og Stouts (1939) á lífsnauðsynlegum plöntunæringarefnum hefur verið tekin góð og gild alla 20 öldina, en nú hafa önnur viðmið komið fram. Brown (2006)¹³³ telur að með vaxandi getu til að ákveða byggingu og hlutverk sameinda og stjórn lífrænna kerfa, sé líklegt að í ljós komi að fleiri frumefni, en hingað til hefur verið talið, séu ómissandi í lífferlum (biological processes) sem eru mikilvægir fyrir lífstarfsemi plantna. Með framförum í líffræði sameinda og vefja (molecular and structural biology) verði auðveldara að segja fyrir um svipuð ferli í mismunandi lífverum. Þannig megi nota uppgötvanir gerðar á einföldum lífverum eins og bakteríum og prófa hvort þær eigi við í lífsstarfssemi plantna og dýra.

Brown (2006) bendir á að nikkell sé það fyrsta af fleiri frumefnum, sem gætu bæst í flokk lífsnauðsynlegra plöntunæringarefna, með því að sýnt verði að þau skipti máli í algengum ferlum efnaskipta í plöntum, án þess að þau séu nauðsynleg til að plantna geti undir öllum kringumstæðum lokið lífsferli sínum. Síðan bætir Brown (2006) því við að núverandi skilgreining á nauðsynlegu (essential) plöntunæringarefni sé augljóslega óviðeigandi og hindri leitina að nauðsynlegum næringarefnum. Því er lagt til að taka upp nýja skilgreiningu á nauðsynlegum næringarefnum fyrir plöntur sem er í betra samræmi við þá sem notuð er fyrir dýr:

Frumefni skal talið lífsnauðsynlegt fyrir plöntur, ef styrkur þess í plöntuvefjum neðan ákveðinna marka leiðir stöðugt til röskunar á mikilvægu lífeðlisfræðilegu ferli og styrkur efnisins umfram þessi mörk við óbreyttar aðstæður að öðru leyti kemur í veg fyrir röskunina; og umfang skortseinkenna vex eftir því sem plöntunni stendur minna til boða af frumefninu. Nielson (1984).

¹³³ Brown Patrick H. 2006. Nickel. Í Handbook for Plant Nutrition, ritstj. Allen V. Barker og David J. Pilbeam. Útgefandi CRC
<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9781420014877.ch14>

Plöntunæringarefni

Nauðsynleg plöntunæringarefni eru alls 17 talsins að meðtöldu kolefni, súrefni og vetni, sem eru megihluti lífrænna sambanda. Þeim er skipt í meginefni (makroefni) og snefilefni (mikroefni).

Meginefni (macro nutrients) eru C, H, O, N, P, K, Ca, Mg og S.

Snefilefni (micro nutrients) eru Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo og Cl, Ni.

Gagnleg efni fyrir sumar plöntutegundir eru kóbalt (Co), kísill (Si) og natríum (Na).

7. tafla. Steinefni í nytjaplöntum, Epstein 1994.

Frumefni		Athugasemdir
	% í þurrefni	
Nítur <i>Nitrogen</i>	0,5-6	Lífisnauðsynleg meginefni
Fosfór <i>Phosphorus</i>	0,15-0,5	
Brennisteinn <i>Sulfur</i>	0,1-1,5	
Kalíum <i>Potassium</i>	0,8-8	
Kalsíum <i>Calcium</i>	0,1-6	
Magníum <i>Magnesium</i>	0,05-1	

	ppm í þurrefni.	
Járn <i>Iron</i>	20-600	Lífisnauðsynleg snefilefni
Mangan <i>Manganese</i>	10-600	
Sínk <i>Zinc</i>	10-250	
Kopar <i>Copper</i>	2-50	
Nikkel <i>Nickel</i>	0,05-5	
Bór <i>Boron</i>	0,2-800	
Klór <i>Chlorine</i>	10-80,000	
Mólybdín <i>Molybdenum</i>	0,1-10	
Kóbalt <i>Cobalt</i>	0,05-10	Lífisnauðsynlegt í öllum níturbindandi kerfum

	% í þurrefni	
Natríum <i>Sodium</i>	0,001-8	Lífisnauðsynleg sumum plöntum, oft gagnleg öðrum
Kísill <i>Silicon</i>	0,1-10	
	ppm í þurrefni	
Al <i>Aluminum</i>	0,1-500	Ekki nauðsynlegt svo vitað sé, oft í skaðlegu magni í súrum jarðvegi

8. tafla. Meltanleiki og efnamagn í túngrösnum á Korpu 1966, 1967, 1982 og 1983, Gunnar Ólafsson 1979, Hólmgæir Björnson og Friðrik Pálmason 1994. Meðaltöl ára.

	Meltanleiki	N	P	Ca	Mg	K	Na
Vallarfoxgras	68,8	1,85	0,20	0,27	0,15	1,67	0,08
Vallarsveifgras	68,1	2,17	0,23	0,36	0,20	1,91	0,10
Túnvingull	65,8	2,02	0,20	0,40	0,18	1,71	0,11
Língresi	64,9	2,31	0,23	0,30	0,21	1,78	0,22
Háliðagras 1966-67	61,5	2,14	0,18	0,28	0,20	1,57	0,19
Hávingull 1966	64,9	2,08	0,16	0,52	0,23	0,94	
Snarrót 1967	64,3	2,01	0,18	0,26	0,16	1,50	0,20

9. tafla. Snefilefni (e. minor nutrients) í heysýnum, Þorkell Jóhannesson o.fl. 2007

	mg kg ⁻¹ þurrefni (ppm)
Járn (e. iron) Fe	57-1379
Kopar (e. copper) Cu	4-16
Mangan (e. manganese) Mn	40-550
Sink (e. zink) Zn	14-85
Molybdín (e. molybdenum) Mo	0,0043-2,37
Bór (e. boron) B	20
Klór (e. chlorine) Cl	100
Kóbalt (e. cobalt)	0,041-2,01

Ekki er vitað til þess að selen sé nauðsynlegt plöntum, en selen er hins vegar mikilvægt búfænaði. Selen í heyi hefur mælst á bilinu 6-96 µg kg⁻¹

Hlutfall meginefna er venjulega gefið upp í % í þurrefni plantna og magn sem kg/ha í uppskeru eða í áburði. Hlutfall snefilefna í plöntum er oftast gefið upp sem mg í kg þurrefnis (ppm, parts pro million) og magn g/ha í uppskeru eða í áburði.

Næringarlausnir.

Ræktun í næringarlausnum var og er notuð við rannsóknir á þörfum plantna fyrir næringarefni ekki síst snefilefni, en er einnig notuð í garðyrkju (hydroponics).

Í fyrstu næringarlausnum sem sögur fara af (Sachs og Stöckhard, Knop um 1860) voru eingöngu sölt með meginefnum fyrir utan járn. Í þeim söltum var meira af snefilefnum en nú í hreinum söltum (pro analysis) og því síður nauðsynlegt að bæta við söltum með snefilefnum eins og hefur tíðast þegar leið fram á 20. öld og alla tíð síðan.

Dæmi um nútímalegar næringarlausnir eru afbrigði af Hoagland lausn með 1/4 til 1/3 af upphaflegum styrk meginefna og fullum styrk snefilefna í Hoagland næringarlausn, Barak 2009 og Gibeaut o.fl. 1997¹³⁴.

Gibeaut o.fl. 1997¹³⁵ benda á að tilbúna næringarlausnir sem eru í boði sem verslunarvara séu yfirleitt því sem næst með fullum styrk meginefna eins og upprunalegu Hoagland lausnirnar. Hins vegar hefur verið lagt til að nota lausnir með fjórung af styrk meginefna í upprunalegu Hoagland næringarlausnum til þess að forðast osómtísk áhrif, það er skaðleg áhrif af of miklum saltstyrk og óhagstæð áhrif milli næringarefna (Hoagland og Arnon, 1950; Johnson o.fl., 1957; Epstein, 1972), en snefilefni eru þó jafnan í sama styrk og í upphaflegu Hoagland lausninni.

¹³⁴ Barak, Phillip 2009. Essential Elements for Plant Growth. Hydroponics.

<http://www.soils.wisc.edu/~barak/soilscience326/hydropon.htm> og

Gibeaut, David M., John Hulett, Grant R. Cramer, Jeffrey R. Seemann. Maximal biomass of *Arabidopsis thaliana* using a simple, low maintenance hydroponic method and favorable environmental conditions. Modified from the original article in *Plant Physiology* (1997) 115:317-319).

<http://www.ag.unr.edu/Cramer/hydroponic.html>

Gibeaut o.fl. 1997 leggja til að nota lausn með þriðjung af upphaflegum styrk meginefna í Hoagland lausn, og fullum styrk snefilefna fyrir ræktun salatplantna¹³⁶. Með því er ætlunin að koma í veg fyrir að næringarefnin verði uppurin í langtíma tilraunum og jafnframt að halda lágum osmótískum þrýstingi.

10. tafla. Næringarlausn fyrir ræktun salatplantna eftir Gibeaut o.fl. 1997.

Meginefni	Mólpungi	Stofnlausn	Stofn g/L vatn	Ræktunarlausn mL stofn/ L	Styrkur ræktunarlausnar
Ca(NO ₃) ₂ x 4H ₂ O	236,15	1M	236,15	1,50	1,50 mM
KNO ₃	101,11	1M	101,11	1,25	1,25 mM
Mg(SO ₄) x 7H ₂ O	246,48	1M	246,48	0,75	0,75 mM
KH ₂ PO ₄	136,09	1M	136,09	0,50	0,50 mM
Na ₂ O ₃ Si x 9H ₂ O	284,20	0,1M	28,42	1,00	0,1 mM
Fe (Sprint 330) - FeDTPA	468,5	0,072 M	40,0	1,00	72 µM
Snefilefnalausn				1,00	
KCl	74,56	50mM	3.728		50 µM
MnSO ₄ x H ₂ O	169,01	10mM	1.690		10 µM
CuSO ₄ x 5H ₂ O	249,68	1,5mM	0.375		1,5 µM
ZnSO ₄ x 7H ₂ O	287,54	2mM	0.575		2,0 µM
H ₃ BO ₃	61,83	50mM	3.092		50 µM
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	1235,9	0.075mM	0,093		0,075 µM

Samkvæmt Gibeaut o.fl. 1997 er 10% Fe í Sprint 330 og höfundar gefa þessar upplýsingar um járn sambandið (Fe-DTPA eða Fe-diethylene triamine pentaacetate) sem notað er, pH og leiðnitölu ræktunarlausnar ennfrenur gildi þess að bæta kísil (silcon) í lausnina og leiðbeiningar um hvernig framleiða skuli lausnina::

...Fe-diethylene triamine pentaacetate (Sequestrene 330, Ciba-Geigy and can be purchased from Hummert International, as Sprint 330). The final solution pH is 6.0, and the electroconductivity is 0.66 dS m⁻¹. Even though Si is not recognized as an essential mineral for plants, we include Si because Si is naturally present in the soil solution and in the plant cell wall. Silicon may confer benefits including mechanical strengthening, improved nutritional balance and pathogen resistance (Epstein, 1994).

How to make Gibeaut's solution. Note: the macronutrient stock solutions are kept in separate containers. The Fe stock solution is kept in aluminum-foil-covered or dark-brown bottle to prevent light degradation. The micronutrient stock solution is a mixture of all micronutrients combined together in one container. Be sure to make with distilled-deionized water. After making the complete Gibeaut's solution, the pH will be quite high and must be adjusted to approximately 6.0 with 10 M HNO₃. A general rule of thumb is to change the solution when it goes above pH 7.0 or add HNO₃ to reduce pH back to pH 6.0.

Auk þess eru í greininni gagnlegar upplýsingar um hvernig ráðlegt er að haga ræktun í næringarlausn.

Resh HM (1995) Hydroponic Food Production: a Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower. 5th ed Woodbridge Press Publishing Co, Santa Barbara CA

Þróun rannsókna á plöntunæringarefnum

Nær öll meginefni og auk þess járn, sem telst til snefilefna, urðu kunn sem lífsnauðsynleg plöntunæringarefni á 19. öld. Með uppgötvun Senebiers 1782, að plöntur bindi koltvísýring og rannóknum Saussure 1804, að vatn eigi hlut í tillífunarferlinu var uppruni kolefnis, vetnis og súrefnis í plöntum í meginatriðum ljós. Þörf plantna fyrir snefilefni önnur en járn var staðfest á árunum 1922-1954, eins og kemur fram í 11.töflu.

11. tafla. Uppgötvun frumefna og staðfesting á nauðsyn frumefna fyrir vöxt og þroska plantna. Glass D.M. 1989 (uppgötvun frumefna). Epstein 2000 (nauðsynleg frumefni fyrir vöxt og þroska plantna).

Frumefni	Uppgötvun frumefnis		Nauðsyn fyrir vöxt plantna staðfest	
N	Rutherford	1772	De Saussure	1804
P	Brand	1772	Georges Ville	1861
S			von Sachs, Knop, Birner og Lucanus	1865, 1866
K	Davy	1807	Birner og Lucanus	1866
Ca	Davy	1807	Stohmann	1862
Mg	Davy	1808	Salm Horstmar, Boehm	1856, 1875
Fe	**	**	Eusube Gris	1843
Mn	Scheele	1774	McHargue	1922
Cu			Sommer og Lipman & MacKinnon	1931
Zn			Sommer & Lipman	1936
Mo	Hzelm	1782	Arnon & Stout	1939
B	Gay Lussac og Thenard	1808	Sommer & Lipman	1926
Cl	Scheele, Davy	1774, 1810	Broyer, Carlton, Johnson og Stout	1954

Þegar saga rannsókna á plöntunæringarefnum er skoðuð kemur í ljós að oft er hæpið að eigna einhverjum einum heiðurinn af því að hafa tekið af allan vafa um nauðsyn tiltekins frumefnis fyrir plöntur sérstaklega ef miðað er við ýtrustu kröfur um skilyrði fyrir viðurkenningu á nauðsyn næringarefnis fyrir vöxt og þroska.

Meginefni (e. macronutrients)

Þrjú meginefnanna kolefni (C), vetni (H) og súrefni (O) eru tekin upp sem koltvísýringur (CO₂) og vatn (H₂O) og ummynduð í sykrur (kolhydröt) við ljóstillifun (e. photosynthetic assimilation). Steinefni (e. mineral nutrients) eru nítur (N), fosfór (P), brennisteinn (S), kalíum (K), kalsíum (Ca) og magníum (Mg). Í plöntuösku er P, K, Ca og Mg auk snefilefna en N og S tapast við brennslu.

Nítur

Eftir að nítur var uppgötvað 1772 (Daniel Rutherford) var það greint í plöntum og dýrum, fyrst 1785 af Claude Louis Berthollet (1748-1822) og 1789 greindi Atoine Francois Fourcroy (1755-1809) nítur í vöðvum kjötæta og grasæta. Það var svo Jean Antoine Chaptal (1756-1832) sem vakti fyrst máls á því að nítur í plöntum gæti verið komið úr andrúmslofti:

“The existence of nitrogen in certain products of vegetation is referable, probably in part to a portion of this gas introduced into plants introduced by atmospheric air in combination with water which holds it in solution”

Tilvitnun í Chaptal hjá Mc Cosh F.W.J. 1984

Framan af nítjándu öld voru ríkjandi hugmyndir um nítunæringu planta af tvennum toga, önnur var sú að plöntur tækju nítur upp úr lofti, en hin að plöntur fengju nítunæringu sína úr búfjáraburði. Chaptal taldi að nítur væri tekið upp í vatnslaun úr lofti og Justus von Liebig (1805-1873) taldi að plöntur tækju nítur í formi ammóníum úr lofti og Boussingault gerði einnig ráð fyrir þeim möguleika.

Áhuga Boussingaults á upptöku níturs í plöntum rekur hann sjálfur til þess þegar hann sá hvernig ófrjó jörð hafði breyst í frjóan jarðveg eftir dreifingu gúanóáburðar. Það var í upphafi starfsferlis hans, þegar hann var við kennslu og rannsóknir í Suður Ameríku:

Boussingault hafði þegar um tvítugt vakið athygli fyrir hæfileika til rannsóknastarfa. Hann stundaði nám við námuskóla í Saint- Etienne suðvestur af Lyon í Rhone Alpes héraðinu í Frakklandi (ekki í Alcase (Elsass) eins og stendur í tilvitnuðum texta hér á neðanmáls)¹³⁷

Alexander von Humboldt, sem var einn áhrifamesti vísindamaður síns tíma, fékk áhuga á ferð Boussingaults til Suður Ameríku, þegar þeir hittust í fyrsta sinn í París 1822 á sama ári og ferðin var farin. Humboldt hafði tuttugu árum fyrr farið til Suður Ameríku og gerðist nú leiðbeinandi Boussingaults og studdi hann með ráðleggingum um rannsókaefni, og leiðbeiningum um notkun mælitækja. Hann átti í þeim tilgangi marga viðræðufundi með Boussingault og skrifaði honum fjölda bréfa. Aulie segir í grein sinni um Boussingault: „When Baron Friedrich Heinrich Alexandervon Humboldt (1769-1859) heard the news [um Suður Ameríkuferðina], he became quite exercised about the scientific possibilities of the young adventurer, who without doubt reminded him of his own trip to South America twenty years before“. Eftir það urðu þeir nánir samstarfsmenn í mörgum viðfangsefnum og vinátta þeirra entist fyrir lífstíð. Boussingault var tíu ár í Suður-Ameríku frá tvítugs aldri til þrítugs, fyrstu sex árin við kennslu og önnur störf fyrir stjórnvöld í Kólombíu, en ferðaðist um Kólombíu, Ekvator, Venesúela, Peru og Síle við marvíslegar rannsóknir og í bréfum sínum lýsir hann lifnaðarhátum indiána og frelsistríðum undir forystu Simons Bolivars. (nánar í grein Aulies 1970)

Þeir Humboldt og Boussingault unnu meðal annars saman að rannsóknum á jöðinnhaldi í mismunandi saltnámum í Suðurameríku, í framhaldi af lýsingu Humbolths 1824 á skjaldkirtilssjúkdómi í Kólombíu, þar sem hann greinir frá vitneskju indjana um lækningamátt salts úr sumum jarðlögum. Efnagreiningar Boussingaults leiddu í ljós að “góðu” söltin voru joðríkari en þau sem áhrifalaus voru. Boussingault ráðlagði 1831 stjórnvöldum í Kólombíu að dreifa þessum náttúrulega joðríku söltum til almennings til að stuðla að almennri

¹³⁷ *Boussingault's parents allowed him to enter the recently opened École des Mineurs (School of Mines), a practical school for miners with little or no training in the sciences, at Saint-Etienne near Lyon, in Alsace, to begin the 2-year course. Classes were limited to eight or nine students in each of the two years of the course. Toward the end of his second year, after finishing with top grades the chemistry and mineralogy courses, Beaunier, the Director of the school, appointed him student-demonstrator (élève-breveté) in the chemistry courses, a position that carried privileges such as access to the laboratory for his own study. The results were somewhat unusual: he got his first publication, at the age of 19 years, on the presence of silicon in steel and in a specimen of platinum, and during the experimental work set fire accidentally to the laboratory ...*

In 1820 Boussingault went to work at the lignite mine in Alsace and became friendly with a local family, the Le Bels, who operated the Bechelbronn farm and on which asphalt and petroleum were mined. Boussingault's opportunity came in 1821 when Simon Bolivar (1783-1830), who had recently liberated Colombia and Venezuela (NewGranada) from Spain, sent Francisco Antonio Zea (1770-1822), his vicePresident to Paris to recruit technically trained young men to staff a new school of technology (Escuela Nacional de Mineros) in Bogotá for training civil and military engineers, as well as investigate the mineral and agricultural potential of newly liberated Colombia. Simeon-Denis Poisson (1781-1840) and Jean Baptiste Biot (1774-1862) gave him letters of introduction to Bolivar. Boussingault received a four-year contract as professor and an appointment in Bolivar's army which he kept until he left South America 10 years later with the rank of lieutenant colonel.” Wisniak 2007

heilbrigði. Cowgill (1964). *Boussingault skrifaði fjölda greina um margvíslegar athuganir sínar í Suður Ameríku og sendi sumar þeirra í bréfum til Alexander von Humboldt sem bjó í París og var þar í góðu sambandi við fjölskyldu Boussingaults. Humboldt kom greinunum á framfæri í virtu vísindatímariti Annales de Chimie (endursagt eftir Aulie 1970, Romero-González 2001 og Wisniak 2007).*

Í ársbyrjun 1832 nokkrum vikum áður en Boussingault hélt heim til Frakklands skoðaði hann setlög af guanó á strönd Perú við 5° suðulægrar breiddar. Hann lýsir sjálfur því sem fyrir augu bar og viðbrögðum sínum:

“On a vast coastal plain of Peru, the extremely sterile soil is rendered fertile by the application of guano; the soil, composed of a quartz sand mixed with clay, then produces abundant crops. Fertilizer that evokes a change at once prompt and favourable, is formed almost exclusively of ammoniacal salts. It was in the presence of that fact in 1832, the period of my life when I found myself on the coast of the south sea, that I adopted the opinion that I hold today on the phenomenon of vegetation. I formulated my ideas on this subject in a memoire published in 1837”

Enskur texti úr grein Aulie 1970 (*Boussingault and the nitrogen cycle*)

Framleiðsla í landbúnað fór smám saman vaxandi í Evrópu á 17 og 18 öld með tilkomu sáðskipta, notkun belgjurta í sáðskiptum og tæknilegum framförum og sagnfræðingar hafa talað um landbúnaðarbyltingu á þessum tíma, Aulie 1970. Þessar framfarir voru fyrst og fremst byggðar á reynslu, en skilning skorti að mestu leyti á því hvað var að baki þessum árangri, einkum á jarðvegsbætandi áhrifum belgjurta og yfirhöfuð á níturæringu plantna. Snemma á 19.öld beindust rannsóknir margra að þessum mikilvæga uppskeruþætti sem níturæring plantna er.

Þar var hlutur Boussingault mikill, einnig í lífeðlis- og fóðurfræði búfjár. Það var ekki aðeins að reynslan úr dvölinni í Suðurameríku sem mótaði hugmyndir hans um líf plantna (“the phenomenon of vegetation” í þýðingu Aulie að ofan). Aulie (1970) bendir á að Boussingault hafi hugleitt með hvaða hætti hann gæti notað vísindin til þess að auka fæðuframleiðslu, þegar hann eftir dvöl sína í Suðurameríku byrjaði ræktunartilraunir á búgarði sínum í Elsass, þá um þritugt. Aulie nefnir kafla úr æskuminningum Boussingaults sem hann skrifar á gamals aldri og vitnar um samúð hans með sveltandi fátæklingum:

Í okkar hverfi bjó fólk sem taldist til hinna aumustu í París.... Börn þjáðust af hungri og kulda; þau komu til þess að betla um brauð og matarleifar, sem voru af skornum skammti á okkar heimili.

Hann gerði sér því ljóst að nauðsynlegt væri að auka fæðuframleiðslu í landbúnaði til að bæta úr skorti og neyð sem stöðugt var yfirvofandi vegna fólksfölgunar og uppskerubrests. Þetta áttu þeir Liebig sameiginlegt, en sá munur var á þeim að Boussingault stóð fyrir búrekstri auk þess að vera mjög fær efnafræðingur en Liebig var fyrst og fremst afburðasnjall efnafræðingur. Aulie (1970) vitnar í heimildir um að margar nefndir hafi á þessum árum fjallað um landbúnaðarframleiðslu og talið að í efnafræðinni fælust lausnir á framleiðsluvanda í landbúnaði.

Í ýmsar greinar í frönskum og enskum tímaritum var skrifað um bætt fæðuval (diet) sem átti að hjálpa fátæklingum sem liðu matarskort. Rannsóknir í næringarfræði komu tilsögunnar í fyrstu snerist umræðan um kjötseyði og hlaup (gelatin) en síðan greiningu á próteinum, kolhydrötum (sykrum) og fitu og síðar steinefnum og vítamínum

Boussingault (1836,1838) áleit að fóðurgildi til vaxtar réðist af níturinnihaldi fóðurtegundar. Í samræmi við þá skoðun reiknaði hann jafngildistölur (franska: équivalens) fyrir fóðurtegundir og notaði N í heyi sem viðmiðun. Samkvæmt því voru 25 kg ($1,033 \cdot 100 / 4,08 = 25$) af baunaplöntum og 63 kg af máis jafngildi 100 kg af heyi.

12. tafla. Jafngildi þriggja fóður tegunda til vaxtar (vöðvamýndunar) samkvæmt Boussingault.

	% N í þe	Jafngildi
Hey	1,033	100
Baunapl.	4,08	25
Máis	1,64	63

Níturjafngildi Boussingaults er gjörólíkt seinni tíma fóðurmatskerfum sem byggð eru á orkugildi fóðurs, t.d er skandinavísk fóðureining 1 FE skilgreind sem nettóorkugildi í 1 kg af byggi með 85% þurrefni.

Boussingault kannaði nítur í fjölda jarðvegsgerða, bæði heildar N og ólífrænt N (ammóníum og nítrat), 13. Tafla. Hann gerði því greinarmun á heildar N í jarðvegi og því N sem er nýtalegt hverju sinni, sem er ólífrænt N, uppleyst eða umskiptanlegt. Ekki kemur fram í grein Aulies hvort nítrat og ammóníum var mælt í vatnslausn sem nær þá ekki nema að takmörkuðu leyti til umskiptanlegs N og heldur ekki úr hvaða jarðvegsdýpt sýni voru tekin.

Til samanburðar við mælingar Boussingaults má geta þess að í íslenskum jarðvegi hefur mælst frá 280 til 12300 kg/ha heildar N í 30 sm dýpt. Minnst í Mýrdalssandi og mest í mýrarjarðvegi frá Hvanneyri.

13. tafla. Nítur í jarðvegi, kg/ha N. Boussingault efnagreiningar frá 1857. *Aulie 1970.*

Staður	Heildar N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Laust N (NH ₄ +NO ₃)-N	Laust N % af heild
Bischviller	14755	82	1057	1139	7,7
Liebfrauenberg	12970	82	121	203	1,6
Bechelbronn	6985	37	10	47	0,7
Herbage d'Argentan	2565	247	32	279	10,9
Rio Madeira	7140	370	3	373	5,2
Rio Trombetto	5955	151	1	151	2,5
Rio Negro	3440	123	1	124	3,6
Sarracca	9100	173		173	1,9
Santarem	32450	341	8	349	1,1
Cupari	34250	2365		2365	6,9
Iles di Salut	27170	329	445	774	2,9
Marinique	5590	226	129	355	6,4

Laust N í efstu 20 sm móajarðvegs á tilraunastöðinni á Korpu mældist mest 17- 20 kg/ha í maí og júní 2003 og lækkaði í 4- 5 kg/ha síðsumars, 14. tafla. Heildarmagn N var 4643 kg/ha í jarðvegslaginu. Mest af lausu N var því aðeins 0,6% af heildar N yfir sumarmánuðina. Tölur Boussingault fyrir ólífrænt N eru mjög háar en ekki er ljóst hversu þykku jarðvegslagi var mælt. Hugsnalegt er einnig að að losun úr níturforða jarðvegs hafi átt sér stað fyri mælingu enda hefur á þeim tíma ekki verið kostur á kælingu sýna eftir sýnatöku fram að mælingu.

14. tafla. Laust N (ammóníum og nítrat-N) kg/ha í efstu 20 sm móajarðvegs í bygggræktun á Korpu 2003.

	Meðaltal	Staðalfrávik meðaltals	Tilraunliðir· Samreitur· sýnitökudagar	Lægstu og hæstu gildi
Maí	17,3	3,5	2·4·2	11,6-26,9
Júní	20,4	1,8	2·4·2	16,9-23,5
Júlí	6,0	0,4	2·4·2	5,1-6,7
Ágúst	4,2	0,9	2·4·2	2,2-6,1
September	4,6	0,6	2·4·3	2,8-7,3

Níturnám úr lofti

Boussingault hóf akurtilraunir um 1834 (*Russell 1915*) á búgarði sínum í Alsace (Elsass) sem þá eins og nú tilheyrði Frakklandi. Fram að þeim tíma höfðu tilraunir með plöntur verið gerðar á rannsóknastofum eða í pottum. Hann notaði magnmælingar eins og de Saussure vigtaði og efnagreindi búfjáraburð sem notaður var og uppskeruna og setti upp efnajöfnuð sem sýndi að hve miklu leyti áburðurinn dugði til að sjá fyrir því sem fjarlæggt var með uppskeru. Dygði það ekki til, var það sem á vantaði komið frá jarðvegi, lofti eða úrkomu.

Tilraunirnar voru gerðar á fimm ára tímabili með sáðskiptum. Sáðskipti voru í tilrauninni annars vegar með belgjurttum og hins vegar var ræktun með hveiti eingöngu auk þess sem landið var hvílt og búfjáraburður borinn á og svo liður með refasmára samfelld í fimm ár. Ekki hafði gengið á forða jarðvegs og nítur í uppskeru var meira en borið var á. Nítur í uppskeru umfram það sem borið var á (15. og 16. tafla) hlaut því að vera komið úr lofti eða úrkomu. Sama á við um kolefni, súrefni og vetni.

15. tafla. N úr lofti eða regni kg/ha. Sáðskiptatilraunir Boussingaults. Heimild Russell 1915.

Sáðskipti	N í uppskeru umfram N í búfjáraburði Meðaltöl ára
a. (1) Karöflur, (2) hveiti, (3) smári, (4) hveiti, gulrófur ¹³⁸ , (5) hafrar...	9,5
b. (1) Fóðurrófur, (2) hveiti, (3) smári, (4) hveiti, gulrófur ¹⁰⁷ , (5) hafrar...	10,2
c. (1) Kartöflur, (2) hveiti, (3) smári, (4) hveiti, gulrófur ¹⁰⁷ , (5) ertur (6)rúgur..	18,3
d. (1) Búfjáraburður á land í hvíld, (2) hveiti, (3) hveiti...	1,5
e. Refasmári (e. lucerne) fimm ár...	171

Á þessum tíma var ekkert vitað um níturnám baktería í rótarnýðum belgjurta sem eru augljóslega ástæðan fyrir miklu N í uppskeru refasmárans umfram áborið N, (í 15. töflu) og níturnám í rótathnýðum smárans hefur átt hlut í upptöku N umfram áborið N í þremur fyrst

¹³⁸ Rófur ræktaðar með (e. catch crop) hveiti og uppskornar á eftir hveitinu.

töldu sáðskiptunum hefur (a-c í töflunni). Í einhliða hveitræktun á landi sem fyrsta árið var í hvíld (d) er nítur upptakan svipuð og N í búfjáraburðinum.

Uppskera af fódurrófum, hveiti og höfrum á fyrsta, öðru og fimmta ári sáðskiptanna, var aðeins 2-3 tonn af þurrefni á hektara. Það telst ekki mikið miðað við það sem gerist í nútímaræktun, enda var eingöngu notaður búfjáaburður og aðeins sem svarar um 40 kg/ha N árlega. Uppskera var nokkru meiri af smáraheyinu á þriðja ári sáðskiptanna, rúm 4 tonn og af samræktun hveitis og gulrófna á fjórða ári samanlagt um tæp 5 tonn af þurrefni á hektara.

Hugmyndir Boussingault um níturæringu planta koma m.a fram í grein frá 1838¹³⁹ Þar skrifar hann að það sé “Engu að síður er það *vel þekkt staðreynd í landbúnaði sem gefur tilefni til að ætla að hluti af níttri í plöntum sé í mörgum tilvikum kominn úr andrúmslofti. Til þess að skilja þessa staðreynd að fullu þurfi að setja hana í samhengi við þá næringu sem dreift er í jarðveg og plantan tekur til sín um rætur*”.

Boussingault sneri sér að því á árunum 1837 til 1838 að kanna hvort plöntur tækju nítur upp úr lofti. Það gerði hann með að því að útiloka upptöku úr jarðvegi. Hafrar, hveiti, rauðsmári, refasmári (lúserna) og ertur voru ræktaðar í dauðhreinsuðum sandi og vökvað með eimuðu vatni. Öllu lífrænu efni í sandinum var eytt með glæðingu sandsins fyrir notkun, og þar með var upptaka N úr jarðvegi útilokuð. Nítur, vetni og kolefni var mælt í fræum eftir þurrkun.

16. tafla. Uppskera og efnaupptaka og jöfnuður í fimm ára sáðskiptum Boussingault (1841). Heimild Russell 1915.

Tegundir í sáðskiptum 1.-5. Ár	Ensk heiti	Þurrefni	Kolefni C	Vetni H	Súrefni O	Nítur N	Steinefni alls
		kg ha ⁻¹					
1. Fódurrófur	Beets	3172	1357,7	184,0	1376,7	53,9	199,8
2. Hveiti	Wheat	3006	1431,6	164,4	1214,9	31,3	163,8
3. Smárahey	Clover hay	4029	1909,7	201,5	1523,0	84,6	310,2
4. Hveiti	Wheat	4208	2004,2	230,0	1700,7	43,8	229,3
4. Gulrófur	Turnips	716	307,2	39,3	302,9	12,2	54,4
5. Hafrar	Oats	2347	1182,3	137,3	890,9	28,4	108,0
		Efnajöfnuður					
<i>I uppskeru alls í 5 ára sáðskiptum</i>		17478	8192,7	956,5	7009,0	254,2	1065,5
Í búfjáraburði		10161	3637,6	426,8	2621,5	203,2	3271,9
Mismunur úr lofti, regni eða jarðvegi		+7317	+4555,1	+529,7	+4387,5	+51,0	-2206,4

Aukið nítur mældist í rauðsmáranum, refasmáranum og ertunum en ekki í höfrum og hveiti. Boussingault (1838) skrifar¹⁴⁰ að tilraunirnar sem hann gerði á 1837 hafi staðfest að

¹³⁹ Néanmoins, il est des faits agricoles bien constatés, qui tendent à faire penser que dans plusieurs circonstances, les végétaux trouvent dans l'atmosphère une partie de l'azote qui concourt à leur organisation; mais pour bien saisir la valeur de ces faits, il convient de discuter d'une manière générale la nature de l'aliment répandu dans le sol et qui est recueilli par les racines.

¹⁴⁰ *Les expériences que j'ai faites dans le courant d l'année dernière ont établi que le tréfle, né et cultivé dans du sable préalablement calciné, admet dans son organisation une certaine quantité d'azote, provenant très probablement de l'atmosphère. En cultivant cette année des pois semés dans des*

smáraplöntur ræktaðar í sandi gersneyddum af lífrænum efnnum taki upp nokkurt magn af N, mjög líklega úr andrúmslofti. Sömu niðurstöður fengust fyrir erturnar og Boussingault bætir við að þær hafi blómgast og gefið fullþroska fræ.

Ályktanir Boussingault af rannsóknunum 1837-1838 eru skýrar og hann dregur ekki viðtækari ályktanir en þekking á þessum tíma gaf tilefni til:

Tilraunir þær sem sagt er frá í þessarri grein sýna að:

ertur sem plantað var í algjörlega gersneyddan jarðveg og vökvaðar með hreinu vatni geta þroskast, lokið vaxtarferli sínum og gefið fullþroska fræ. Nítur eitt frumefnanna er annað hvort tekið upp í vatni eða úr andrúmslofti og tillífað í plöntunni
smári í fyrstu ræktaður í frjóum jarðvegi og síðan án lífræns efnis bindur einnig nítur

hafrar sem fluttir voru í brenndan jarðveg og ræktaðir við sömu aðstæður og smárin taka kolefni úr lofti, súrefni og vetni en tillífa ekki nítur, efnagreiningar sýna þvert á móti lítilsháttar tap níturs úr höfrunum

Tilraunir þær sem ég hef gert virðast staðfesta að sumar plöntur geta við margvíslegar aðstæður unnið nítur úr lofti. Enn sem komið er vitum við ekki við hvaða aðstæður eða í hvaða formi nítur binst í plöntum.¹⁴¹

Þegar þessar rannsóknir voru gerðar 1837-38 var hvorki kunnugt um samlífi belgjurta og níturbindandi örvera, né um tilvist slíkra örvera á þessum tíma. Boussingault hefur hins vegar í þessum rannsóknum uppgötvað níturnám úr lofti í tveimur tegundum belgjurta og sýnir einnig fram á að ekki vinna allar tegundir plantna nítur úr lofti.

Boussingault ráðgerði frekari rannsóknir, sem frestur varð þó á, m.a. vegna tilrauna með búfénað og afskipta Boussingaults af stjórn málum, *Cowgill 1964*

Georges Ville kannaði níturupptöku plantna með svipuðum hætti í tilraunum á árunum 1849-50. Hverri plöntu var komið fyrir undir glerkúpli sem stóð í vatnsbakka. Andrúmsloft með auknu koltvísýringmagni var leitt inn í kúpulinn og ammoníak mælt við inntak og útak úr

conditions semblables j'obtenu les mêmes résultats, et de plus j'ai eu l'occasion de constater un fait assez inattendu, c'est que les pois sous l'influence de ce régime, n'ayant pour tout aliment que l'eau l'air, ont fleuri et donné des semences d'une maturité parfaite. Boussingault (1838)

¹⁴¹ Les expériences rapportées dans ce mémoire montrent:

1. Que les pois semés dans une sol absolument stérile et arrosé avec l'eau pure, peuvent acquérir un développement complet et accomplir toutes les phases de la végétation, jusqu'à donner des graines d'une maturité parfaite. **L'azote fait partie des éléments pris à l'eau ou prélevés sur l'atmosphère, et qui se sont assimilés dans le plant.**
2. Que le trèfle développé dans un sol fertile, et cultivé ensuite sans le concours de matières organique mortes, a fixé également de l'azote.
3. Qui l'avoine enlevée à un sol fumé et placée dans les mêmes conditions que le trèfle, a pris à l'air du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène, sans assimiler de l'azote, l'analyse indiquant, au contraire un faible perte de ce principe.

Les recherches que j'ai entreprises semblent donc établir que dans plusieurs conditions certaines plantes sont aptes à puiser de l'azote dans l'air. Mais dans quelles circonstances, à quel état l'azote se fixe-t-il dans les végétaux ? c'est ce que nous ignorons encore.

kúplinum á hverjum degi í heilt ár. Enginn munur reyndist á ammóníaki í inntaki og úttaki en Ville var sérfræðingur í mælingum á ammóníaki í lofti. Plöntutegundir í þessum tilraunum voru repja, lúpína, hveiti, rúgur og maís. Hann taldi fullvíst áður en mælingar á N í plöntunum lágu fyrir að málið væri útkljáð. Það var svo staðfest að N í plöntunum hafði aukist á vaxtartímanum. Ville ályktaði að plönturnar hefðu tekið upp nítur (N_2) úr andrúmslofti. Þessi ályktun getur þó ekki átt við repju, hveiti, rúg og maís en á þessum tíma var lítil sem engin þekking á níturnámi plantna úr lofti, þó svo að Boussingault hafi gert sér grein fyrir því að munur væri á plöntutegundum í þessu tilliti eins fram kemur í tilvitnun hér að framan (atriði 1-4 og í texta frumheimildar neðanmáls).

En nú var að því komið að Boussingault (1854) endurtæki tilraunir sínar frá 1837 og 1838. Hann notaði loft sem ammoiak og ryk var hreinsað úr, koltvísýringur (CO_2) var stöðugt endurnýjað. En loftið var ekki endurnýjað, ólíkt því sem var í tilraunum Ville. Engin aukning varð nítri í plöntunum. Hvernig stóð á þessum mismunandi niðurstöðum? Um það deildu Boussingault og Ville sem hafði áður verið nemandi Boussingaults. Um samskipti þeirra skal vísað til Aulie (1970) þar sem m.a. niðurstöður seinni tilrauna Boussingaults (1854) eru sýndar í töfluformi og *Mc Cosh (1984)* sem rekur einnig sögu þessa ágreinings og fyrri samskipti þeirra, þar sem gekk á ýmsu.

Ville varði sínar niðurstöður fyrir Academie des Sciences og gagnrýndi tilraun Boussingaults fyrir tvennt: að andrúmsloftið var ekki endurnýjað og ræktun í postulínsskálum í stað leirpotta. Hvort tveggja væri plöntum ekki eðlilegt. Ville bauðst til að endurtaka tilraunirnar fyrir Akademiuna og gerði það, þó ekki áfallalaust en viðurkennt var að tilraunin hefði staðfest fyrri niðurstöður þrátt fyrir ýmsar athugasemdir.

Boussingault (1855) endurtók rannsóknir sínar í þriðja sinn, nú með breytingum sem tóku tillit til gagnrýni Ville. Í einni tilraunaröð voru plönturnar í lokuðu rými en loft var stöðugt endurnýjað með koltvísýringi en án ammoníaks. Einnig voru plönturnar í annarri tilraunaröð í opnu rými með þaki yfir til skjóls fyrir regni. Niðurstöðurnar voru þær sömu og áður, plönturnar bættu ekki við sig nítri. Plöntutegundir í þessum tilraunum voru lúpínur (6 plöntur), baunaplöntur (7), karsi (garðaperlur *Lepidium sativum L.*, e. cress, 252), hafar (4) og hveiti (5). Steinefni fengu plönturnar úr ösku af lúpínu og baunaplöntum, sem var valin vegna þess að lítið er af kolefni í ösku þessarar plantna en með kolefninu fylgir nítur. Augljóst er að belgjurtirnar í tilraununum hafa ekki verið smitaðar með níturnámsbakteríum.

Á þeim tíma var talið að ástæðan fyrir níturupptöku plantna í tilraunum Ville væri tilkomin vegna þess að með hröðum loftskipti hefði plöntunum borist vatn með uppleystu ammóníum. *Mc Cosh (1984)* gefur aðra skýringu: með loftstraumnum bárust nítunámsbakteríur (sem þá voru óþekktar) í jarðveginn í ræktunarpottunum í tilraun Ville, en ekki í tilraunum Boussingault.

Hver sem skýringin er á þessum mismunandi niðurstöðum er þá voru ályktanir Ville um að plöntur gætu nýtt sé nítur (N_2) úr lofti ekki réttar eins og sést af því að í fyrstu tilraun hans mældist níturupptaka, sem hann taldi vera úr lofti ekki aðeins í lúpínu heldur einnig í repju, hveiti, rúg og maísplöntum. Hvorugur þeirra Ville og Boussingaults vissi þó að nítur nám úr lofti færi fram í samlífisbakteríum belgjurta eða öðrum örverum. Þeir geta þess heldur ekki hvort rótarhnýði hafi verið á belgjurtunum. Eins og þegar er sagt er ljóst að í seinni tilraunum Boussingaults voru ekki verið virk rótarhnýði á lúpínu- og baunaplöntunum. Í tilraunum Ville átti sér að líkindum stað níturupptaka af öðrum toga en tillífun N_2 eins og sést af því að aukning mældist N upptaka í repju, hveiti, rúg og maís.

Í Rothamsted var gerð vönduð tilraun sem ætlað var að skera úr um upptöku belgjurta á nítri úr lofti. En níturnám úr lofti, það er upptaka og tillífun N_2 úr lofti var raunar útilokuð með því að jarðvegur var hitaður að háu hitastigi, sem drap rótarbakteriurnar, því mældist ekkert níturnám úr lofti, Burris 2000 (tilvitnun til Lawes o.fl. 1860¹⁴²).

Rótarhnýði á rótum belgjurta sáust á myndum Malphigi 1679, sem áleit hnýðin vera gallhnúða (sjúklegir hnúðar á plöntun). En það er ekki fyrr en tveimur öldum seinna að Hellriegel og Wilfahrt (1888) sýndu fram á níturnám úr lofti í rótarhnýðum belgjurta ($N_2 \rightarrow NH_3$, lífrænar sýrur + $NH_3 \rightarrow$ aminósýrur \rightarrow prótein) á þann hátt að þeir mældu níturnám úr lofti í belgjurtum með rótarhnýðum en ekki ef rótarhnýðin vantaði.

Á sama ári og Hellriegel og Willfarth sýndu fram á að níturnám væri tengt rótarhnýðum belgjurta hreinræktaði Hollendingurinn Martin Beijerinck níturendandi bakteríur úr rótarhnýðum margra belgjurtategunda. Þær voru settar í ættkvísl með heitinu *Rhizobium* (rhiza = rót og bios = líf), sem síðar var skipt uppí fleiri ættkvíslir, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium* og fleiri, Hirsch (2000).

Gilbert, Lawes og Pugh birtu eins og áður var sagt árið 1860 niðurstöður rannsókna í Rothamsted, þar sem ekki tókst að mæla níturnám úr lofti í belgjurtum vegna þess að jarðvegurinn sem notaður var dauðhreinsaður með upphitun. Burris (2000) segir frá því að Gilbert frá Rothamsted var fundarstjóri á 59. Ráðstefnu Þýskra náttúrufræðinga og lækna 1886 þar sem Hellriegel¹⁴³ kynnti rannsóknina sem tengdu níturnámið við rótarhnýði belgjurta. Eftir að Martin Beijerinck sýndi fram á tilvist baktería í rótarhnýðum mátti ljóst vera hvað varð þess valdandi að níturnám mælist ekki í belgjurtunum í Rothamsted tilraununum.

Það athyglisverða við þessa sögu er að þeir Lawes og Gilbert birtu árið 1892 niðurstöður sem staðfestu að nítur í belgjurtum er unnið úr lofti. Þar sem tilraunirnar í Rothamsted nutu mikils trausts leiddi grein þeirra Lawes og Gilberts til almennrar viðurkenningar á að lífrænt níturnám úr lofti ætti sér stað, með orðum Burris (2000) “..this led to unequivocal acceptance of the validity of biological nitrogen fixation”.

Burris (2000) rekur þróun rannsókna á níturnámi frá tilraunum Boussingaults á 19. öld allt til rannsókna á síðasta áratug 20. aldar á gerð og samsetningu nítrógenasa sem er lífhvati níturnáms úr lofti og í eftirfarandi eru rakin nokkuratriði úr grein Burris (2000) að viðbættum skýringum á Michelis Menten líkingunni. Líkingin er notuð er til að lýsa efnabreytingum sem lífhvatar örva, í þessu tilviki níturnámi úr lofti sem stjórnað er af lífhvatanum nítrógenasa:

Næstu áfangar í rannsóknum á níturnámi úr lofti: Winogradsky (1893) sýndi fram á að *Clostridium* baktería, sem lifir við loftfirð skilyrði í jarðvegi óháð plöntum, vinnur nítur úr lofti (“*free-living bacterium, an anaerob Clostridium species*”) og 1901 uppgötvar Beijerinck að lofháð bakteríuteygund *Azotobacter croococcum* vinnur nítur úr lofti án þess að vera í samlífi við plöntur.

¹⁴² Lawes, J.B., Gilber, J.H. og >Pugh, E., 1860. On the source of the nitrogen of vegetation. Abstract Royal Society, London June 21.

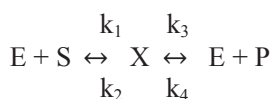
¹⁴³ Hellriegel H. 1886. Welche Sticstoffquellen stehen der Pflanze zu gebotte. Tageblatt der 59. Versammlung Deutscher Naturforscher und Aerzte in Berlin 18.21 Sept;290

Eftir það tóku við rannsóknir á eðlis- og efnaeiginleikum níturnámskerfa. Fyrstu rannsóknir af því tagi voru gerðar á *Azotobacter vinelandii* af Meyerhofer og Burk (1928). Burk (1934) greindi frá því að níturbinding næði helmingi af hámarkshraða (*Michaelis fasti*) við 0,21 atm. Þrýsting af N_2 (hlutþrýstingur pN_2 , partial pressure). Þó þetta gildi sé talið of hátt þá vakti grein Burks athygli og leiddi til frekari rannsókna á lífefnafræði níturbindingar úr lofti.

Rannsóknahópur við Wisconsin University undir forystu P.W. Wilsons rannsakaði lífefnafræði níturbindandi ferla í rauðsmára á árunum eftir 1930. Þær rannsóknir leiddu í ljós að súrefni og vetni hamlar nítur nám, hvort fyrir sig. Samkvæmt mælingum á nítur námi við mismunandi styrk af N_2 var Michaelis fastinn 0,05 atm. N_2 , Wilson P.F.(1940). Hlutþrýstingur N_2 í andrúmslofti er um 0,8 atm.

Hraði lífefnabreytinga. Michaelis Menten líkingin.

Hvatar efnabreytinga í lifverum nefnast lífhvatar (enzym). Þeir stjórna því hvaða efnabreytingar eiga sér stað í frumum lífvera og hraða þessarra efnabreytinga. Allir lífhvatar eru prótein og sameindabýngd þeirra er allt niður í 15 000. Sumir lífhvatar þurfa ákveðnar málmjónir (coenzym), sem oxast og afoxast til skiptis við efnabreytingarnar, sem lífhvatarirnir stjórna. Efnabreytingum af þessu tagi má lýsa þannig¹⁴⁴:



E = lífhvati (enzym), S = hvarfefni eða hráefni, (substrat), X eða ES er hverfult samband lífhvata og hvarfefnis og P er myndefni eða afurð (produkt), k_1 og k_3 eru hraðafastar efnahvarfsins í aðra áttina og k_2 og k_4 í hina áttina.

Rannsóknir á hraða efnabreytinga eru oftast gerðar þegar jafnvægi er komið á ferlið, þannig að engin breyting er á styrk milliefnisins ES:

$$d[X]/dt = 0$$

$d([X])$ er breyting á styrk milliefnis ES á minnstu tímaeiningu, dt. Að því gefnu að myndefnið P sé fjarlæggt jafnóðum verður $k_4=0$ og:

Líkingin er eftir nánari útfærslu oft skrifuð á eftirfarandi formi:

$$v = V/(1+km/[S]) \quad \text{umritað } v = V/([S]+km)$$

ef við heimfærum líkinguna upp á nitrogenasa og bindingu níturs er v hraði myndunar þess efnis (NH_3) sem myndast við nítur námið og V er hámarkshraðinn, $[S]$ er styrkur N_2 í lofti (hlutþrýstingur pN_2)

Þetta er Michaelis Menten líkingin sem að formi til hyperbóla en henni má breyta í línulega líkingu: $1/v = 1/V + (km/V) \cdot (1/[S])$ þar sem breytur eru $1/v$ og $1/[S]$ og fastana má reikna af skurðpunti við y -ás $1/V$ og hallatölunni km/V .

Michaelis fastinn, km er styrkur hvarfefnis (hér 2 í lofti) við hálfan hámarkshraða nítur náms:

$$Km = [N_2] \text{ við } V/2$$

¹⁴⁴ Farrington Daniels og Robert A. Alberty Physical chemistry 2nd edition 1961. John Wiley & Sons

Schloesing and Müntz (1877) sýndu fram að níturat myndaðist af ammóníum í jarðvegi og myndun þess stöðvaðist við klóroform gjöf. Þeir ályktuðu að ummyndunin yrði fyrir áhrif hvata í örverum (organized ferments, tilvitnun hjá Russell 1915).

Warington (1884) staðfesti þessar niðurstöður og komst að því að í tilraunum að breyting ammóníum í níturat verður í tveimur ferlum og í tveimur mismunandi örverum. Fyrst er myndun níttríts sem svo myndar níturat:

1. $2\text{NH}_4^+ + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+$ (nitrosomonas)
2. $2\text{NO}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_3^-$ (nitrobacter)
3. Ferlið í heild : $2\text{NH}_4^+ + 4\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_3^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+$

Warington tókst ekki að einangra örverurnar þrátt fyrir margar tilraunir til að rækta þær á gelatin plötum. Ástæðan var sú þessar örverur vaxa ekki á æti sem inniheldur níturæringu.

Winogradsky (1890) tókst hinsvegar að einangra örverurnar og sýndi fram á að níturastmyndun er hröð og af því var dregin sú ályktun að plöntur taki nítur til sín að mestu leyti sem níturat. Þar með var því ekki lengur haldið fram að aðrar plöntur en belgjurtir taki upp nítur sem lofttegund.

Í bók *Joseph Reynolds Green, 1909. History of botany 1860-1900 being a continuation of Sachs History of Botany 1530 -1860* er kafli sem heitir *The progress of our knowledge of role of the constituents of the ash of the plant*. Í bókinni er meðal annars greint frá rannsóknum á seinni hluta 19. aldar á lífeðlisfræðilegu hlutverki plöntunæringarefna. Umfjöllun Green um fosfór og kalíum er hér á eftir þýdd og endursögð:

Boussingault sýndi 1860 fram á að fosfat á þátt í nýtingu nítrats og á sama ári komust þeir Lawes og Gibert að sömu niðurstöðu. Macallum greindi 1898 fosfór í frumkjörnum (nucleus) og í kjarnakörnum (nucleolus).

Nobbe, Schroeder and Erdmann komust að þeirri niðurstöðu 1871 að sterkja myndaðist ekki í grænuörnum ef kalíum skorti. Schimper 1890 lýsir kalískorti, sem fram kom í tilraun með Tradescantia, þar sem kalínæring var takmörkuð. Nývöxtur stöðvaðist þegar kalíforðinn var tæmdur. Kalí í eldri blöðum þvarr fyrst og nýmyðuð blöð voru minni og þynnri en áður og að lokum örsmá. Þegar kalíforði eldri blaða tæmdist visnuðu blöðin og að lokum vaxtarbroddurinn.

Athuganir Macallums í lok 19. aldar á ýmsum tegundum plantna bentu til þess að kalíum gegndi hlutverki í tillifun og starfsemi grænuörna, þar sem kalíum safnast fyrir í sumum hlutum frymisins, einkum við litfrumurnar (chromatophore), en ekki í frumkjarnanum. Einnig kom fram að kalíum safnaðist fyrir í frumveggjum leiðsluvefja (fibrio-vascular tissue) plantna.

Einnig reyndust frumur sem mynda frumrætur elftingar (equisetum), þegar sporar elftingar spíra, kalíumríkar. Athuganir á vexti frjópípa plantna af liliuætt og samruna fruma grænþörunga (Spireogyra) bentu einnig til þess að kalíum hefði þar hlutveki að gegn.

Ljós var að undir aldamótin 1900 var orðið ljóst að kalíum gegni margvíslegu hlutverki í vexti plantna.

Salm-Horstmar (1849 og 1851) ræktaði hafra í næringarsnaudum sandi og vökvaði með næringaralausnum. Hafrarnir þrífust illa ef **kalsíum** var ekki í næringarlausnum. Sachs sýndi 1860 fram á nauðsyn plantna fyrir kalsíum og Knop skömmu síðar á sama ári. Snemma á 20. öld varð ljóst að gróðurfar er annað á kalkríkumjarðvegi en kalsnaudum. Skipta má plöntum í kalksæknar (calcicole) og kalkfælnar (calcifuge), Barker og Philbeam. 2006. Stohmann sýndi fram á kalkskort í maís með ræktun í næringarlausnum. Vöxtur stöðvðist við kalsíumskort í plöntuvefjum en fór aftur stað þegar kalsíum var bætt í næringarlausnina. Í rannsóknnum Palladins 1891 gulnuðu laufblöð þegar kalsíummagn í blöðunum fór niður fyrir fimmta hluta af magni í grænum blöðum.

Schimper(1890) taldi að hlutverk kalsíumværi að fella út oxalsýru í plöntum. Loew benti á að kalsíum væri í sumum próteinsamböndum sem eru nauðsynleg fyrir frumukjarna og grænuhorn og 1892 sýndi Mangin fram á að kalsíum er í pektínsamböndum í frumuveggju.

Eins og áður kom fram sýndi Salm-Horstmar fram á að **magníum** nauðsynlegt plöntum Einnig mældi Schmiedeberg 1877 **magníum** í vitellin próteinkristöllum í hnetum af trjátegundinni *Bertholletia excelsa* (brasilískar hnetur) og Grübler (1881) mældi magníum í prótíni úr graskerjum. Green 1909.

Snefilefni (e. micronutrients).

Snefilefni lífsnauðsynleg plöntum eru járn (Fe), mangan (Mn), kopar (Cu), sink (Zn), molybdín (Mo), bór (B) og klór (Cl)

Á árunum 1922-1954 eru sýnt fram þörf plantna fyrir snefilefni mangan (1922), bór (1923), sink (1926), kopar (1931), molybdín (1939) og klór (1954). Ýmsar eldri heimildir eru þó til um þörf fyrir snefilefni, þótt öll skilyrði fyrir viðurkenningu þeirra sem plöntunæringarefni hafi fyrst verið uppfyllt síðar. Þegar á 19.öld var staðfest að járn væri nauðsynlegt plöntunæringarefni.

Járn. Eusèbe Gris sýndi 1843 fram á að járn væri nauðsynlegt fyrir myndun blaðgrænu. Um tíma var því haldið fram að járn væri í blaðgrænu en svo reyndist ekki vera. Það kom í ljós með nákvæmum efnagreiningum á grænuhornum 1891 (Macallum) og á phylloxanthin (Gautier 1892, Erncih 1892, Molish 1892) en phylloxantin myndast við niðurbrot blaðgrænu (chlorophyll).¹⁴⁵

Sachs (1865) staðfesti að járn væri plöntum lífnauðsynlegt næringarefni og lýsti (1882)¹⁴⁶ járnskorti sem kom fram í plöntum ræktuðum í næringarlausnum án járns:

".....But after some time when the third or fourth leaf of our experimental plant unfolds, the symptoms of an illness become apparent: the leaves that begin to unfold from now on are completely white and produce no chlorophyll. The microscopic analysis shows that no chlorophyll grains exist in the protoplasm of such colourless leaves. This now is the proof that something was missing in our nutrient mixture; we know from earlier observations by Gris that the illness of our plant, the so-called chlorosis is caused by the lack of iron.....it is

¹⁴⁵ Green, J.R. 1909.

¹⁴⁶ Peter v. Sengbusch - 2003 Botany online: Ions and Small Molecules - Mineral Nutrients
<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e16/16a.htm>

sufficient to add a small amount of a soluble iron salt to the water that the roots take up,....to let the previously completely white leaves become green.....This observation proves very obviously that iron is necessary for the production of chlorophyll though it does not show whether the iron is actually a component of the green colour itself."

Tilvitnun í Julius von Sachs 1882. Die Vorlesungen über Pflanzenphysiologie hjá Peter v. Sengebusch 2003¹⁴⁷

Raulin (1869), Molisch (1892) og Benecke (1895) sýndu fram á að járn væri nauðsynlegt sveppum. Járn var greint í litni (chromatin, í kjarnafrymi, kjarnsýrur og prótín sem mynda litningana) í lok 19. aldar. Þótt fremur fátt kæmi fram á þessum tíma í lok 19. aldar um hlutverk járn í plöntum voru þó ýmsar vísbendingar:

- Kunnugt var að járn flýtti fyrir þroska og yki uppskeru hafra og hveitis
- járn skipti miklu fyrir vöxt sveppa
- það örvaði níturnám baktería í jarðvegi
- staðhæft var að blaðgrænuleysi væri óbein afleiðing af járnskorti vegna vannæringar
- hlutverk járn í frumum væri tengt oxun og afoxun.
- talið var að mangan gengdi líka hlutverki í oxun og afoxun

Heimild Joseph Reynolds Green, 1909

Mangan

McHargue (1922) sýndi fram á að mangan væri nauðsynlegt plöntunæringarefni og greindi frá því að manganskortur dragi úr vexti planta og frá myndaðuðust ekki við manganskort. Plöntur voru ræktaðar kvartssandi eða næringarlausn án mangans eða að viðbættu mangan. Uppspera var mæld þegar plönturnar nálgðuðust fullan þroska og mangan mælt í plöntunum. Í grein McHargue segir að að í byrjun aldarinnar fram hafi farið miklar rannsóknir á mangan með tilliti til jarðvegsfrjósemi og plöntunæringar og honum sé kunnugt um ekki færri en 150 rannsóknir sem tengist efninu. Jafnframt að af þeim rannsóknum sem beinist að mangan sem áburði fyrir plöntur hafi aðeins fáar bent til þess að hagur væri að því að bera mangan og því hefði þeirri spurningu verið ósvarað hvort mangan væri plöntum nauðsynlegt. Hafrar eru sérstaklega næmir fyrir manganskorti, Boken 1966.

Bór

Í lok fyrsta áratugar tuttugustu aldar kom í ljós að notkun bóraburðar í sandræktun jók uppskeru korntegunda (Agulthon H. 1910) þar á meðal uppskeru af maís sem var seinna staðfest af Maze (1919), tilvitnanir hjá Ainsworth 1981. Uppskeruauki við gjöf snefilefnis er þó ekki talin næg sönnun fyrir því að snefilefni sé lífsnauðsynlegt. Kathleen Warrington (1923) á tilraunastöðinni í Rofhamsted sýni fram á að bór væri nauðsynlegt fyrir vöxt hestabauna (*Vicia faba*) og nægði að 0,1 ppm (mg/l) af bórsýru í næringarlausn til að tryggja eðlilegan vöxt en án bórs í næringarlausn komu fyrst fram sjúkdómseinkenni og plönturnar vesluðust upp og drápuð, Biswas 1995. Því er miðað við að Warrington hafi sýnt fram á að bór sé lífsnauðsynlegt plöntum 1923. Bórskorti í sykkurófum í Hollandi var lýst af Brandenburg ((1931) sem svonefndri hjarta og þurrrotun. Sjúkdómurinn reyndist útbreiddur í Evrópu og Ameríku og í ljós kom að koma mátti í veg fyrir hann með því að bera á borax

(natriumteraborat), Ainsworth 1981. Bórskortur er einnig þekktur í gulrófum og einkenni hans sjást í miðjum þverskurði af rófunum og má lýsa sem marmaralítum bletti.

Sink

Miller (1931) segir áhrif sinks á plöntur óljós:

The action of zinc compounds on plants is very uncertain. Mazé (1915) considered it one of the elements essential for the best development of the corn plant, and his statement has been verified, to some extent at least, by Lipman, Davis, and West (1926). Nakamura (1904), however, could observe no stimulatory effect of zinc, cobalt, or nickel upon the growth of rye, peas, onion, or mustard. Conner (1920) observed that the zinc salts formed by the action of acid soils on galvanized iron containers were very toxic to the plants of oats and buckwheat growing therein.

Kopar - staðfesting á lífsnauðsyn snefilefnis

Mc Hargue (1925) mældi mikið koparmagn í kími hveiti- og maísfræs og taldi að kopar væri með einhverjum hætti nauðsynlegur kímínu en frekari sannanir vantaði. Samkvæmt Felix (1927) örvaði kopar vöxt salats (*Lactuca sativa L.*) og laukplantna (*Allium cepa L.*). Allison (1927) greindi frá því að kopar hefði greinlega jákvæð áhrif á vöxt fjölda nytjajurta á mýrarjarðvegi á Everglade svæðinu í Flórída. (Heimildir samkvæmt Gupta (1997).

Árið 1931 birtust tvær greinar um tilraunir með kopar sem plöntunæringarefni. Í báðum tilvikum voru plönturnar ræktaðar í vatnslausn af plöntunæringarefnum með eða án kopars. Þess var gætt að notuð væru eftir föngum koparsnauð sölt (hreinsuð með endurkritöllun) og vatn var tvíeimað í eimingartækjum úr pyrexgleri (Sommer 1931). Í annari greininni (Lipman og MacKinney) er samsetning næringarlaunarinnar tíunduð og framgangi og skráningu lýst. Í Viðhengi er aðferðalýsingin notuð sem fyrirmynd að æfingaverkefni.

Í tilraun Sommers (1931) með ræktun tómata, sólblóma og línplantna í næringarlausnum með eða án kopars annað hvort drápust plönturnar án kopars eða eða þrífust illa. Sommer tekur fram að ekki sé útilokað að vottur af kopar hafi komið með næringarsöltum (KNO_3 , KH_2PO_4 , MgSO_4 og CaSO_4) sem voru notuð í lausnirnar án kopars. Lipman og MacKinney (1931) ræktuðu bygg í næringarlausnum með og án kopars, sjá viðauka 1. Eins og Sommer ræða höfundar vandkvæði á að hreinsa kopar algjörlega úr söltum með umkristöllun og úr vatni með eimingu, auk þess sem ryk í lofti geti borið með sér kopar. Í endursögn voru helstu ályktanir þeirra:

- 1 Byggplöntur geta ekki myndað fræ nema kopar sé til staðar í næringarlausn.
- 2 Þetta þarf ekki að þýða að sérstök koparþörf sé fyrir fræmyndun. Sú ályktun er einnig möguleg að kopar sé nauðsynlegt fyrir alla þætti vaxtar.
- 3 Rannsóknin staðfestir fyrri niðurstöður í tilraun með línplöntur án kopars og með 0,125 ppm Cu (mg/litra) í næringarlausn. Vöxtur var svipaður fram að blómgun, en plöntur sem ekki fengu kopar blómgudust miklu minna og engar þeirra plantna sem voru án kopars í næringarlausn mynduðu fræhylki eða fræ.
- 4 Höfundar benda á að nægar heimildir séu fyrir því að kopar sé í öllum plöntuveffjum en hins vegar sé ekki vitað hvert hlutverk kopars sé.

Arnon og Stout (1939) sýndu í tilraun með tómatplöntur í vatnsræktun með og án kopars fram á sérstök einkenni koparskorts í tómataplöntum (mjög smáaxnar plöntur og rætur þrífast illa, dökk blagrænn blaðlitur, krunpuð blöð, plantan blómgast ekki). Koparsúlfatlausn (0,02 ppm Cu) var úðað á blöð ungra tómataplantna með einkenni koparskorts. Við það hurfu sjúkdóms-einkennin. Þar með voru hvað kopar varðar uppfyllt öll skilyrði sem Arnon og Stout settu fyrir staðfestingu á að plöntunæringarefni væri lífsnauðsynlegt fyrir plöntur

Molybdín (endursagt eftir Finck 1969).

Á árunum um 1930 kom í ljós við rannsóknir örverufræðings, Þjóðverja að nafni Bortel á Bacterium azotobacter að níturám bakerianna jókst þegar jarðvegsskoli var bætt við ætið sem notað var. Frekari rannsókn leiddi í ljós að molybdín í jarðvegskolinu var ástæðan. Nokkrum árum síðar var sýnt fram á þörf annarra baktería fyrir molybden óháð níturámi (Steinberg USA). Arnon og Stout í Kaliforníu sýndu fram á nauðsyn molybdens fyrir tómataplöntur 1939 og síðar fyrir margar aðrar plöntur. Þetta var þó fyrst um sinn ekki talið hafa nokkra hagnýta þýðingu. Þar sem nægilegt magn af molybden væri í öllum jarðvegi.

Annað kom á daginn upp úr 1940, þegar Ástralir tóku sér fyrir hendur að stórauka ullarframleiðslu með því að bæta rýrt graslendi til beitar með sáningu smára. Á stórum svæðum þreifst smárinn ekki þrátt fyrir endurteknar tilraunir og engar þær áburðartegundir sem þá voru notaðar gátu bætt úr. Smárinn spíraði að vísu en lifði ekki af. Undantekningar voru á afmörkuðum blettum þar sem bændur grunaði að tré hefðu verið brennd.

Með mikilli þraustseigju tókst Anderson (1942) með efnagreiningu ösku að sýna fram að molybdín var efnið sem skipti máli fyrir smárann eftir greiningu á fjölda þá lítt þekktra frumefna. Með því að bera á aðeins nokkur hundruð grömm af molybdín á hvern hektara og góðri umhirðu tókst að breyta rýru graslendi í gjöfult beitiland. Þar sem áður ein mögur sauðkind fann varla næga næringu gengu nú tíu feitar kindur. Ekkert annað snefilefni hefur haft jafnmikla umbyltingu víðlendra landbúnaðarsvæða í för með sér eins og molyden hafði á fáum árum í Ástralíu.

Klór. Þó að klór skorti yfirleitt ekki í ræktun nytjajurta, að minnsta kosti ekki hér á landi, er hér gerð grein fyrir rannsóknum sem leiddu til þess að klór var viðurkennt sem lífsnauðsynlegt plöntunæringarefni. Enda gefa þær góða hugmynd um hve miklar og vandaðar rannsóknir þarf til að frumefni geti talist lífsnauðsynleg plöntunæringarefni (e, essential plant nutrient) er þó engan veginn allt tíundað hér sem fram kemur í tilvitnuðum greinum.

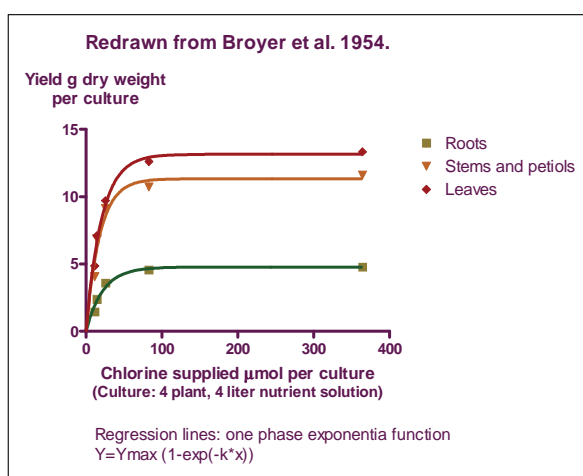
Þó svo að ýmsar rannsóknir frá 19. öld bendi til þess að plöntur þurfi klór til vaxtar telst fyrst sýnt fram á að klór sé plöntum lífsnauðsynlegt með rannsóknum Broyers, Carltons, Johnsons og Stouts 1954. Þá áttu þau skilyrði sem Arnon og Stout (1939) settu að vera uppfyllt. Þó ekki komi fram í greininni hvaða hlutverki klór gegnir í efnaskiptum, er enginn vafi þörfinni til vaxtar og eðlilegs þroska. Enn frekari sönnun kom fram í seinni grein þeirra þar sem sýnt var fram á klórþörf 10 plöntutegunda auk tómataplantna, (Johnson, Stout, Broyer og Carlton. 1957).

Skal þá vikið að elstu rannsóknum á þörf planta fyrir klór. Með ræktun bókhveitis í næringarlausnum sýndi Nobbe 1862 fram á að bókhveitið nær ekki fullum þroska án klóriðs í næringarlausn. Sambærilega niðurstöðu fékk Wolff fyrir hafra 1868 og Aschoff 1890 fyrir baunaplöntur og maís. Í tilraunum Nobbes myndaði bókhveitið engin fræ við klórskort og var það staðfest af Leydbecker 1865 og 1866. Í tilraunum Aschoffs þroskuðust

blómhnappar ekki á baunaplöntum og maís og í blöðunum var mikil fylling af sterkjukornum, en ekki var þó sýnt fram á tiltekið hlutverk klóríðs í efnaskiptum plantna. *Heimild Joseph Reynolds Green, (1909).*

Marktækur vaxtarauki fyrir klór mældist í tómataplöntum og bómullarplöntum Eaton (1942) og í rauðrófum Raleigh (1948) hvort tveggja í tilraunum í vatnsrækt (næringarlausnir með og án klórs), *Broyer og samstarfsmenn 1954.*

Broyer o.fl. (1954) sýndu fram á klórþörf tómataplantna með tilraunum í vatnsrækt. Í ljós kom að í plöntum með einkenni klórskorts var klórmagn í blöðum $7 \mu\text{mol}$ í g af þurrvigt (250 ppm (mg Cl í kg af þurrefni)). Til samburðar nefna höfundar að í því snefilefni sem minnst þarf af er við sýnilegan skort af svipaðri gráðu var $1.4 \times 10^{-3} \mu\text{mol}$ í g af þurrvigt (0.1 ppm) eða minna molybdín. Sambærileg mörk fyrir snefilefni sem voru kunn til þess tíma (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo) liggja þar á milli.



6. mynd. Fylgni vaxtar tómataplantna við klórstyrk næringarlausna. Rætur ($R^2=0,96$), stönglar + blaðstilkir ($R^2=0,93$), og laufblöð ($R^2=0,98$). Broyer og fl. 1954.

Á 6. mynd tákna ræktun (culture) 4 tómataplöntur ræktaðar saman í 4 lítrum af næringarlausn. Línuritinn er endurteiknuð eftir 2. mynd í grein eftir Broyer, Carlton, Johnson og Stout (1954) University of California, Berkeley.

Broyer o.fl. (1954) nefna vegna viðurkenningar á klór sem plöntunæringarefni að bróm geti komið að hluta til í stað klórs, eins er kunnugt að natríum getur að hluta til komið í stað kalíum og strontíum fyrir kalsíum:

In recognizing chlorine as a plant nutrient, it is with the realization from this experiment that Br can substitute at least partially in plant functions normally dependent on Cl, in a way reminiscent of the sparing effect of Na for K or Sr for Ca. Whether or not Br can substitute completely for Cl must remain a subject for future investigation.

Þeir lýsa einkennum klórskorts og að við alvarlegan skort myndist ekki aldin. Hæfilegt magn af klór í næringarlausn kemur í veg fyrir sjúkdóminn og plöntur með alvarlega skort náðu viðunandi vexti eftir að klór var bætt í næringarlausnina.

Einnig kom í ljós fylgni vaxtar við klórstyrk í næringarlausn. Línurit í grein Broyers og meðhöfunda sýnir að vaxtaraukinn fór ótvírætt minnkandi með klórstyrknum í samræmi við lögmálið um minnkandi vaxtarauka og ber vitni um mikla nákvæmni í vandaðri vatnsræktunartilraun, 6. mynd.

17. tafla. Uppskera plantna í klórsnauðri vatnsræktun, % af uppskeru í ræktun með klórsölt (50 $\mu\text{mol KCL}$ í lítra) og klór í þurrefni plantna. Úr töflu í grein eftir Johnson o.fl. 1957.

	Plöntuhluti	Uppskera % af uppskeru samanburðarplöntu með næga klórningu	Cl $\mu\text{g atóm g}^{-1}$ þe.	Cl $\mu\text{g g}^{-1}$ þe. (ppm)
Plöntutegundir með sterk skortseinkenni				
	blöð og stönglar	29	4,0	142
Tómatar <i>Lycopersicum esculentum</i>	Laufblöð	36	6,5	231
Hvítkál <i>Brassica oleracea</i>	blöð og stönglar	42	1,5	53
Gulrætur <i>Daucus carota</i>	blöð og stönglar	47	2,5	89
Sykkurófur <i>Beta vulgaris</i>	Laufblöð	49	1,7	60
Bygg <i>Hordeum vulgare</i>	blöð og stönglar	65	4,0	142
Refasmári <i>Medicago sativa</i>	Laufblöð	70	2,9-3,4	103-121
Plöntutegundir með óljósum skortseinkennum				
Bókhveiti <i>Fagopyrum esculentum</i>	Laufblöð	73	2,5	89
Máis <i>Zea mays</i>	Laufblöð	78	3,0	107
Dvergrunna baunir <i>Phaseolus vulgaris</i>	Laufblöð	92	5,1	181
Grasker <i>Cucurbita</i>	Laufblöð	102	2,9	103

Johnson, Stout, Broyer og Carlton. 1957 fylgdu rannsókninni eftir með tilraunum með tómataplöntur og tíu aðrar plöntutegundir. Einkenni klórskorts á háu stigi komu fram í salati, hvítkáli, gulrótum, sykkurófum, byggi og refasmára (e. alfalfa, lucerne). Sýnileg einkenni skorts voru ekki augljós í bókhveiti (korntegund af súruætt), maís og baunum og aðeins vottaði tímabundið fyrir skortseinkennum í graskersplöntum (“..chlorosis of the younger leaves..rather transistory”).

Ef plöntutegundum sem ekki fengu klór er skipt í plöntur með skortseinkenni á háu stigi og þær sem lítil einkenni sýndu þá kemur í ljós uppskera plantna með sterk skortseinkenni var á bilinu 29 til 70% af uppskeru samburðarplantna af sömu tegund sem fengu nægilegan klór í næringarlausn. Hins vegar var uppskera plantna sem ekki voru með greinileg einkenni 73-102 % af uppskeru samanburðarplantna, 8. tafla. Klórmagn í skortsplöntum var fyrst og fremst mismunandi eftir plöntutegundum og plöntuhlutum, 17. tafla.

Johnson o.fl. (1957) benda á að klór bindist ekki fast í svifefnum jarðvegs og verði því að berast að í jarðveg til að endurnýja það sem skolast út með frárennsli. Plöntur noti sem svarar 1 kg af klór á 10 tonn af þurrefni: Endurnýjun klórs í jarðvegi verður með úrkomu og klór berst með sjávarúða inn yfir land. Plöntur geta því tekið klór upp um laufblöð, eins og

kunnugt er að á sér stað um loftborinn flúor. Skýring á mismikilli klórurptöku plöntutegunda er álitinn stafa af mismunandi gerð laufblaða, Johnson o.fl. (1957).

Nikkel

Árið 1975 uppgötvaðist að nikkel er hluti af ureasa í plöntum, hvata sem stjórnar umsetningu þvagefnis (urea) og aminosýrunnar arginin, Dixon o.fl (1975). Polacco (1977) sýndi fram á að soyabaunir (*Glycine max*, Merr.) sem fá nítur eingöngu sem þvagefni (urea), þrífast ekki nema nikkel sé til staðar.

Á árunum 1983-1999 fylgdu margar greinar um nikkel í næringu plantna. (Eskew o.fl. 1983 og 1984, Walker o.fl. 1985, Brown o.fl. 1987, Gerendas og Sattlemacher 1997a, 1997b og 1999)

Fyrstu tilraunir sem gáfu uppskeruauka eftir nikkeláburð voru gerðar 1945 á Englandi á jarðvegi (Romney Marches) sem er þekktur fyrir skort á snefilefnum, einkum mangan og sinki. Marktækur vaxtarauki mældist í kartöflum, hveiti og baunum (*Phaseolus vulgaris L.*), Roach og Barclay 1946. Vel var vandað til þessarra tilrauna og útilokað var að önnur snefilefni skorti (Mn, Zn, Fe, Cu og B) og því var engin ástæða til að ætla að nikkel hefði að einhverju leyti bætt upp skort á þessum efnum. Nikkeláburðinum var úðað í veikri lausn og magnið var hæfilegt miðað við það sem vitað er um þörf fyrir nikkel. Líklegt er að skortur sé á nikkel í þessari jarðvegsgerð (súr, sendinn jarðveg, lágt hlutfall steinefna, skortur á mangan og sinki). Sama jarðvegsgerð er ríkjandi á svæðum í suðvesturhluta Bandaríkjanna þar sem kunnugt er um nikkelskort, Brown 2006. Þessar tilraunir sýndu fram á nikkel er við vissar aðstæður gagnlegt fyrir þrjár ólíkar tegundir plantna.

Í tilraunum Eskew's o.fl. (1983) komu skemmdir (necrotic lesions) fram á blaðbroddum sojaplantna sem voru ræktaðar í næringarlausnum með níturat og ammóníum sem níturgjafa. Þessir skemmdu blaðbroddar innihéldu 2,5 % þvagefni (urea) í þurrefni og skemmdirnar voru mestar á sojaplöntum sem voru háðar níturnámi N₂ úr lofti. Höfundar ályktuðu að þvagefni myndist við venjuleg efnaskipti níturs í æðri plöntum og plöntur séu háðar nickel sem hluta af ureasa hvata til þess að koma í veg fyrir uppsöfnun þvagefnis í skaðlegu magni.

Í rannsóknum Eskew's o.fl 1984 voru soyaplöntur ræktaðar af fræi með mismunandi nickel innihaldi. Skemmdir á blaðbroddum voru miklu minni á blöðum plantna sem ræktaðar voru af fræi með 13 nanogrömm (ng) Ni en blöð á plöntum af fræi með 2,5 ng og nær engar skemmdir voru á blaðbroddum plantna af fræi með 160 ng N. Hvorki Al, Cd, Se eða V gat komið í stað nikkels. Ástæðan fyrir því að prófa hvort þessi efni gætu komið í stað nikkels er sú, að þegar nikkel er hreinsað úr þeim söltum sem notuð eru, eru þessi efni líka fjarlægð. Því þurfti að kanna hvort skortur á einhverju þeirra gæti framkallað blaðskemmdirnar.

Í annarri tilraun Eskew's o.fl 1984 var kannað hvort koma mætti í veg fyrir skortseinkennin með 1 micromolar Ni-EDTA í næringarlausn umfram EDTA sem var notað til að klóbinda önnur snefilefni. Tilgangurinn með því að nota EDTA í næringarlausnir, er að koma í veg fyrir útfellingar af járn. Þessi styrkur af Ni-EDTA dugði til að koma í veg fyrir blaðskemmdir í soyplöntum sem fengu ammóníum og níturatnæringu en hinsvegar kom sama magn af Ni-EDTA ekki í veg fyrir sakemmdir á blöðum sojaplantan sem unnu nítur úrlofti.

Þvagefni (urea) safnaðist fyrir í blaðbroddum hveitis, byggs og hafra sem ekki fengu nikkell og var 15-20 % meira en í plöntum sem fengu nikkell næringu, Brown o. fl. 1987b. Vöxtur byggplantna var marktækt minni (30%) án nikkels en með.

Byggfræ af plöntum snauðum af nikkell spíruðu ekki hvort sem byggplönturnar fengu nítur sem þvagefni eða sem ólífærent N, Brown o.fl.1987a. Höfundar ályktuðu að telja mætti nikkell nauðsynlegt plöntunæringarefni, þar sem (a) byggplöntur geti ekki lokið lífsferli sínum án nikkell næringar, það er að segja myndað spírunarhæft fræ, (b) með því að bæta nikkell við næringu plantanna hverfa skortseinkennin og (c) áður hafi verið sýnt fram á þörf belgjurta fyrir nikkell og með þeim rannsóknum sem Brown og samstarfsmanna var ljóst að nikkell var nauðsynlegt næringarefni fyrir bygg.

Á vefsíðu háskólans í Minnesota er greint frá nikkelskortu í birki plöntum sem fyrst kom fram í birki ræktaðu í mýrarmó (peat based container mix), Rosen Carl og Foord Karl 2009¹⁴⁸:

.. strange leaf symptoms on [a] river birch tree, were diagnosed as birch abnormal growth syndrome or BAGS. New leaves are severely stunted and take on a mouse ear appearance. For many years the cause of this disorder was a mystery, but it is now known to be due to a deficiency of nickel.

Nickel is an element only recently shown to be essential for plant growth and is required in very small amounts. Almost all soils have enough nickel to support plant growth, but under some conditions, nickel deficiency can still occur. The mouse ear symptoms on this river birch were first seen when growing in a peat-based container mix, and were initially misdiagnosed as bud damage from a late frost. However, after the tree was transplanted into the soil in mid-May, the symptoms, after continuing for the next few months, have now begun to appear normal.

Based on research conducted at the University of Minnesota and in other areas of the country, BAGS almost exclusively occurs on river birch when grown in peat-based media and can be corrected by soil or foliar applications of nickel.

Nikkell er talið lífnauðsynlegt plöntunæringarefni samkvæmt skilgreiningu Nielsons (1984) á lífsnauðsynlegum næringarefnum fyrir plöntur, einnig kóbalt sem er nauðsynlegt níтурbindandi plöntum. Áður var nikkell ekki talið lífsnauðsynlegt plöntum þar sem það uppfyllti ekki ýtrustu kröfur samkvæmt skilgreiningu Arnon og Stouts 1939 sjá bls. 56. Nikkell var þá flokkað sem gagnlegt fyrir sumar plöntur.

¹⁴⁸ Carl Rosen and Karl Foord. 2009 Birch Abnormal Growth Syndrome (BAGS) aka. Mouse Ear Disorder. University of Minnesota Extension. <http://blog.lib.umn.edu/efans/ygnews/2009/10/>

Gagnleg efni

Kísill (Si, silicium)

Þegar árið 1819 skrifaði Sir Humphrey Davy um kísil í yfirhúð (siliceous epidermis) plantna og telur hann vera til styrktar og vernda barkarlagið gegn skordýrum og kísil gegna hlutverki í grösom og elftingum:

The siliceous epidermis serves as support, protects the bark from the action of insects, and seems to perform a part of the economy of these feeble tribes (Grasses and Equisetables) similar to that performed in the animal kingdom by the shell of crustaceous insects.

Tilvitnun í Davy H. 1819. The elements of Agricultural Chemistry hjá Snyder o.fl, 2006

Í fjölda rannsókna í rísplöntum hefur á 20. öld verið staðfest að kísill eykur þol plantna gagnvart sjúðómum og álagi af ýmsu tagi. Kísill myndar lag undir vaxhúð (e. cuticule) yfirhúðar, og benda rannsóknir til að það sé vörn gegn sveppasjúkdómum og skordýrum. Einnig benda rannsóknir til þess að notkun kísiláburðar hafi áhrif á myndun fenólefna og fleiri varnarefna gegn sveppasýkingu í rísplöntum, Rodrigues og Datnoff 2005.

Árið 1840 lagði Liebig til að natriumsilkat væri notað sem kísiláburður og gerði fyrstu tilraunina með kísiláburð. Tilraunin var gerð í gróðurhúsi með sykkurófur. Árið 1856 byrjuðu Gilbert og Lawes á tilraun á graslendi í Rothamsted á Englandi (Park Grass Experiment) með kísiláburð auk annarra áburðarefna (níturat-N, ammóníum-N, P, K, Mg og Na). Þessi tilraun stendur enn yfir (2010).

Áhrif kísils á kornplöntur voru könnuð af Kreuzhage and Wolff 1883 og niðurstaða þeirra var að kísill væri nauðsynlegur fyrir fullan þroska, bætti nýtingu annarra næringarefna, bætti fræmyndun og flýtti fyrir þroska korns. *Green 1909*. Hins vegar greinir Epstein (2005) frá því að ríkjandi viðhorf á 19 öld og í byrjun 20.aldar hafi verið að ekki væri þörf fyrir kísil í næringu og til vaxtar. Þá hafi kísill ekki verið notaður í næringarlausnir:

Silicon was not included in those early nutrients solutions of the 1860s, although it was well known that plants, and particularly grasses, contain it at appreciable concentrations. "Although in such plants half of the total ash often consists of silica, I (and subsequently other observers also) nevertheless succeeded in bringing maize plants to vigorous and complete development with the help of nutrient solutions to which not even a trace of silica was added" (Sachs 1887). Sachs even condemned as "thoughtless" Knop's conclusion that silicon is helpful in keeping cereals from lodging. Sachs thus was quite convinced that silicon "is superfluous for the purposes of nutrition and growth." That, then, was the view of the world's foremost plant scientist of that time, the second half of the 19th century. Similar opinions were expressed in England (Green 1911) and Russia (Palladin 1918).

En snemma á 20 öld breyttust viðhorfin. Sýnt hefur verið fram á gagnsemi kísils í ræktun ríspantna í rannsóknum í Japan allt frá 1934, Lanning 1963.

Í tilraunum Raleighs (1939) með rauðrófur (table beets, *Beta vulgaris* L.) þar sem notuð voru notuð asfalhúðuð járnlát og plönturnar í fyrstu ræktaðar í næringarlausn í eimuðu vatni sem mengaðist af kranavatni en þegar þær voru fluttar í næringarlausnir með ómengduðu eimuðu vatni með lágum styrk næringarefna visnuðu þær illa á nokkrum dögum og ræturnar urðu dökkar á lit. Þær sem voru fluttar í sterkari næringarlausnir þrífust eðlilega. Raleigh taldi ástæðuna vera að eitthvert nauðsynlegt frumefni væri sem óhreinindi í næringarsöltum sem

notuð voru og í nægum mæli í sterkari lausninni en ekki í þeirri veikari.. Rannsóknunum var haldið áfram með mismunandi snefilefnagjöf og fór ræktunin fram annars vegar í járnílatum og hins vegar í glerílatum, hvor tveggja voru húðuð með asfalti. Eftir þriggja vikna ræktun var vöxtur róta góður í glerílatunum og þær voru ljósari en ræturnar í járnílatunum. Þar með vaknaði sá grunur að kísill hefði losnað úr glerinu og flætt í gegnum asfalhúðina í næringarlausnina. Í framhaldi af því voru bornar saman næringarlausnir með og án kalíumsilikats (10 ppm K_2SiO_3). Plöntur ræktaðar í lausn með kísil uxu hratt, urðu vel grænar og rætur gulleitar, en án kísil dökknuðu rætur þegar á þriðja degi og síðar mjög dökkar og voru þaktar [smásæum] gróðri. Einnig komu fram sveppsýkingar í ræktun án kísils.

Kísill (Si) er um 23-33 % (50-70 % SiO_2) í jarðvegi og er þar annað algengasta efnið á eftir súrefni. Plöntur taka kísil upp um rætur sem kísilsýru $Si(OH)_4$. Grastegundir (*Graminaea*) og hálfgrös (*Cyperaceae*) taka upp mikið magn af kísil, tvíkímblöðungar yfirleitt lítið, Ma Jian Feng og Yamaji Naoki 2006.

Kísill í plöntum er á bilinu 0,1-10% af þurrefni, um 0,1% í tvíkímblöðum, um 1% í grösom á þurrlendi svo sem höfrum og rúg en um 5% eða meir í rísplöntum í ræktuðum í votlendi (e. rice paddy, paddy field), Epstein 1994¹⁴⁹.

Kísilskortur getur komið fram í jarðvegi ríkum af lífrænum efnum (histosol) með lágu innihaldi steinefna og í röku hitabeltisloftslagi þar sem hröð veðrun með mikilli losun kísils leiðir til myndunar jarðvegs ríkum af járn- og áloxíðum og snauðum af kísil og basískum steinefnum (Ca, Mg, K, Na, Mn o.fl.) , Rodrigues og Datnoff 2005.

Uptaka kísilis úr næringarlausn fer fram með burðarefnum í yfirhúð (endodermis) rótar og er orkukræf. Styrkur kísils í barkarfrumum sem eru milli yfir húðar og viðaræða er meiri en í næringarlausn utan rótar og gildir það jafnt um plöntur sem safna í sig miklu magni af kísil og um þær sem taka lítið af kísil til sín úr næringarlausn, Munurinn á upptökufærli þessara plantna er hins vegar við flutning kísils úr barkarlaginu inn í viðaræðarnar. Í samanburði á upptöku kísils í rísplöntur, agúrkuplöntur og tómataplöntur kom í ljós að í rísplöntum var upptaka með burðarefnum og orkukræf en í agúrkuplöntum og tómataplöntum var um að ræða flæði (diffusion) með fallandi styrk kísils frá því að kísillinn er tekinn upp um yfirhúð rötanna og inn í viðaræðarnar. Í rísplöntunum fer hins vegar styrkurinn vaxandi. Kísilstyrkurinn í samfrymi barkarlagsins í rísrótum er þrefalt meiri en í agúrkurótum og og fimmfalt meiri en í tómatarótum og í viðaræðum rísplantna tuttugufalt meiri en í agúrkuplöntum og hundraðfalt meiri en í viðaræðum tómata, Mitani N. og Ma J.F. 2005. Því má segja að kísilsöfnunar plantan dæli kísilnum inn í viðaræðarnar með tilheyrandi orkukostnaði en tvíkímblöðungarnir hafi aðeins eina dælu við í yfirborðslagi rötanna og hún afkasti minna en dælan í grastegundinni. Þessar niðurstöður eru fengnar með mælingum á styrk kísils í samfrymi barkarlags róta og í vökva viðaræðanna, með eða án hömlunar virkar upptöku, annars vegar með hömlunarefni efnaskipta og hins vegar með kælingu niður í 4°C, eins og nánar er lýst í grein Mitani og Ma 2005.

Kísill (Si, silicium) telst ekki enn sem komið er til lífnauðsynlegra næringarefna plantna ef undaskildar eru elftingar en aska þeirra var áður fyrr notuð til að þrifa potta og pönnur og hentuðu til þess vegna kísilsins (elftingar voru á ensku nefndar “scouring rushes”). Einnig er

Epstein vitnar til japanskra rannsókna með mælingum níu steinefna (Si, Ca, Mg, K, P, Fe, Mn, B, og Al) í 175 tegundum plantna ræktuðum í sama jarðvegi, Takahashi E. og Miyake Y. 1977. Proc.Int. Semin. Soil Environ. Fertil. Manage. Intensive Agric. 603-611.

kísill lífnauðsynlegur kísilþörungum og öðrum gulbrúnum þörungum (Chrysophyceae), Epstein (1999).

Kísil er þó að mörgu leyti gagnlegt fleiri plöntum. Það er engin tilviljun að gagnsemi kísils fyrir nytjaplöntur var fyrst og fremst uppgötvað í Japan, Epstein 2005. Tvær ástæður nefnir Epstein, önnur er sú að rís er helsta nytjajurtin og fæða í Japan og rísplöntur taka meir upp af kísil en nokkur önnur nytjajurt en við ræktun í votlendi getur kísilmagn verið mjög lítið í rísplöntum. Hin ástæðan er að í ljós kom að minna var af kísil í plöntum sýktum af sveppategundinni *Pyricularia grisea*¹⁵⁰, en í heilbrigðum plöntum, Onodera (1917)¹⁵¹ tilvitnun hjá Epstein 2005. Snyder og fl. 2006 skrifa um notkun kísiláburðar í rísræktun Japan:

Japanese agricultural scientists appear to have been the most advanced regarding the practical use of silicon fertilizers, having developed the most complete technology for using silicon fertilizers for rice in the 1950s and 1960s.

Datnoff (2005) skrifar um vaxandi áhuga á áhrifum kísils á líf og afköst plantna í byrjun 21. aldar. Hann nefnir sem dæmi áhrif kísils á grös sem notuð eru í grasvelli enda leiti ræktendur grasvalla eftir auknum upplýsingum um hlutverk kísils í plöntum.:

Despite the abundance of Si in most mineral soils worldwide, Si deficiency can still occur due to Si depletion from continuous planting of crops that demand high amounts of this element, such as rice (11). Rice can uptake roughly 230 to 470 kg of Si per ha and intensive cropping results in the removal of Si from the soil solution at a rate faster than it can be replenished naturally (11,33). Silicon deficiency occurs more often in highly-weathered, low-base-saturation, and low-pH soils such as Oxisols and Ultisols which are used to cultivate upland rice in Asia, Africa, and Latin America (32).

*Heavy rainfall in regions where these two types of soils occur can cause high degrees of weathering, leaching, and desilification (33). **Organic soils (Histosols) are also deficient in plant-available Si because of the greater content of organic matter (> 80%) and low content of minerals. Those Entisols having a high content of quartz sand (SiO₂) are also low in plant-available Si (6).** Such Si-deficient conditions may be prevalent on USGA-based quartz sand greens and tees.*

Soil solutions generally have a Si concentration of 3 to 17 mg of Si per liter (19). This is considered low, but nevertheless it is 100 times greater than phosphorus in most soil solutions.

Grein Datnoffs gefur jafnframt gott yfirlit um kísil í jarðvegi og plöntum og jákvæð, bein eða óbein áhrif kísils til varnar margs konar streytuálagi á plöntur, þar á meðal ríspöplöntur, hafrar, bygg, hveiti, gúrkur, skrautplöntur og gras í garðflötum. Kísill styrkir plöntur á margan hátt, meðal annars dregur kísill úr úr hættu á legu og eykur þurrkþol.

Fróðlegt yfirlit um kísil í jarðvegi og plöntum er einnig í greinum Epsteins frá 1994 og 1999.

Epstein (1994) leggur áherslu á að kísilsölt þurfi að vera í næringarlausnum sem notaðar eru fyrir ræktun plantna, en svo hefur yfirlétt ekki verið nema þegar verið er að prófa áhrif kísils

¹⁵⁰ E. blast disease, nánar um "blast" sjúkdóminn í http://www.grain.org/briefings_files/blast.pdf

¹⁵¹ Onodera I. 1917. Chemical studies on rice blast (1). J. Sci. Agric. Soc. 180: 606-617.

á plöntur. Epstein telur engin rök séu fyrir því að nota ekki kísil í næringarlausnum og alls ekki þau að Si teljist ekki lífsnauðsynleg plöntunæringarefni samkvæmt skilgreiningu (plöntur geti náð þroska og lokið lífsferlinum án kísils). Þvert á móti hnígi öll rök að því að nota skuli kísil í næringarlausnir, í fyrsta lagi sé jafnan kísill til staðar í náttúrunni og í plöntum og í öðru lagi séu gagnleg áhrif kísils á plöntur svo margvísleg að plöntur ræktaðar í næringarlausnum án kísils verði í raun í mikilvægum atriðum eins konar frávik frá náttúrlegum plöntum (“experimental artifacts”). Til þessa þarf að taka tillit ekki aðeins í tilraunum heldur í atvinnuræktun með fljótandi næringu (“hydroponics”).

Í grein Epsteins frá 1999 gagnrýnir hann skilgreiningu Arnon og Stout (1939) á lífsnauðsynlegum næringarefnum og hefur þá í huga [a] að erfitt sé að útiloka kísil úr næringu og umhverfi plantna og á það einnig við ræktun í næringarlausnum, (b) kísill sé við vissar aðstæður og fyrir sumar tegundir plantna lífsnauðsynlegt plöntunæringarefni og (c) plöntur sem sýnt sé að geti ekki vaxið án kísils þurfi kísil sem meginefni, það er í magni sem mælist í % af þurrefni og í kg/ha. Þótt ekki hafi verið sýnt fram á þörf annarra plantna fyrir kísil sem snefilefni sé ekki hægt að útiloka að kísill sem sé þeim nauðsynlegur í minni mæli en unnt er að prófa í tilraunum.

Til nánari skýringar nefnir Epstein dæmi og segir:

að Wooley (1957) hafi með réttu ályktað að svo framarlega sem kísill sé nauðsynlegur fyrir tómataplöntur þurfi þær innan við 2 míkrómól í grammi af þurrefni eða innan við 0,0006% Si í þe. fyrir eðlilega vöxt. Í tilraunum Wooleys voru notaðar næringarlausnir úr vandlega hreinsuðum söltum og vatni en mjög torvelt er að útiloka kísil í ræktunartilraunum. Til samanburðar nefnir Epstein að til þess að sýna fram að nikkell sé plöntum lífnauðsynlegt hafi þurft að rækta plöntur með minna en 0,00001 % Ni í þurrefni.

Plöntur taka kísil upp sem óhlaðna sameind af kísilsýru H_4SiO_4 og einmitt þessi sameind fer í gegnum jónasíur (e. ion exchangers) sem oft eru notaðar til vatnshreinsunar á rannsóknastofum.

a. Skilgreining Arnon og Stouts á lífsnauðsynlegu næringarefni gerir ráð fyrir að það sé flestum ef ekki öllum plöntun lífsnauðsynlegt eða með orðum Epsteins: “*The second reservation about the definition of essentiality is that it conveys an impression of general applicability that is not warranted*”. Natrium er snefilefni fyrir C_4 plöntur en ekki er vitað til þessað það sé snefilefni fyrir aðrar pöntur.

b. Klór er snefilefni fyrir sumar plöntur og megin efni fyrir aðrar. Klór er talinn snefilefni fyrir æðri plöntur (Broyer, Carlton, Johnson og Stout 1954) en getur verið meginefni ekki aðeins fyrir saltplöntur (e. halophytes) heldur einnig fyrir sumar arfgerðir plantna og við ákveðnar aðstæður og á það við jafn algenga nytjajurt og vetrarhveiti (Engel, Bruchner og Eckhoff 1998; Koenig og Pan 1996)

Epstein ályktar að að nauðsynlegt sé að ganga lengra en flokka næringarefni einfaldlega í lífsnauðsynleg og önnur sem teljist ekki lífsnauðsynleg:

“ Thus it is necessary to go beyond mere listings of elements as essential or not known to be so, and to give judicious interpretations of the complexities of the real world. In view of what follows, Si will be considered “quasi essential” for many of those plants for which its absolute essentiality has not been established. An element is defined quasi-essential if it is

ubiquitous in plants, and if a deficiency of it can be severe enough to result in adverse effects or abnormalities in respect to growth, development, reproduction or viability.”

Rannsóknir á hlutverki kísils í plöntum og margvíslegri gagnsemi fyrir plöntur eins hér hefur komið fram styðja þessar röksemdafærslu og ályktun, auk þess sem kísill er lífsnauðsynlegur sumum plöntum. Epstein leggur til að kísill verði að vissu leyti talinn lífsnauðsynlegur, “quasi essential”. Latneska orðið “quasi” merkir: svo gott sem, allt að því eða að hluta til.

Kóbalt (Co)

Ahmed og Evans (1959) rannsökuðu kóbaltþörf sojaplantna Ahmed og Anderson greina frá eldri rannóknum á kóbalt sem næringarefni. Sýnt var fram á að kóbalt væri lífsnauðsynlegt næringarefni fyrir sauðfé árið 1952.¹⁵² Einnig varð kunnugt að kóbalt væri lífsnauðsynlegt blágrænþörungum 1954¹⁵³ og öðrum þörungum og örverum 1950 og 1953¹⁵⁴. Rannsóknir á þörf æðri planta höfðu hins vegar litinn árangur borið¹⁵⁵ en þó hafði komið fram marktækur vaxtarauki í tómata- og gúmmítrjáplöntum, þegar 0,005 ppm af kóbalt var bætt í ræktun í hreinsuðum sandi, en engin skortseinkenni komu þó fram í sandi án kóbalts¹⁵⁶.

Í rannsóknnum Ahmeds og Evans voru sojaplöntur smitaðar með rótarhnýðisbakteríum (rhizobia) og ræktaðar í næringarlausnum án nítursalta. Ahmed og Evans taka fram að við þær aðstæður séu hver þau áhrif sem kóbalt hafi á plönturnar vegna samanlagðra áhrifa á rötatbakteríurnar og sojaplönturnar.

Vatn og sölt notuð voru vandlega hreinsuð, vatn var eimað og hreinsað í jónasíu. Vöxtur sojaplantna sem ræktaðar voru í lausnum með kóbaltklóríði, 1 og 50 ppb (parts per billion) Co, var marktækt meiri (1% líkindamörk, P=0,01) en vöxtur samanburðarplantna í næringarlausn án kóbalts. Þurrefnisuppskera var 52% meiri af plöntum við 1 ppb Co en af plöntum án kóbalts. Kóbalt er hluti af B₁₂ vítamíni og í einum tilraunaliðum var B₁₂ notað í stað kóbalt salts í styrk sem svarar til 1 ppb Co. Vítamíngjöfin gaf 48% meiri uppskeru en liður án kóbalts og munurinn var marktækur (5% líkindamörk).

Með rannsóknnum Ahmed og Evans voru leiddar líkur að því að hlutverk kóbalts í sojaplöntum væri tengt virkni B₁₂ vítamíns í sojaplöntum. Væg einkenni níturskorts komu fram.

Í framhaldsrannsóknnum Ahmeds og Evans (1960) komu fram sterk einkenni níturskorts í sojaplöntum sem ekki fengu kóbalt í næringarlausn. Kóbalt, sem bætt var í næringarlausn sojaplanta með sterk einkenni níturskorts, kom innan 10 til 21 dags í veg fyrir að skortseinkenni kæmu fram í nýmynduðum vefjum plöntanna. Kannað var hvort V, Ni, Ga og Al og átta frumefni sem gera mátti ráð fyrir að hefðu verið fjarlægð við hreinsun salta sem notuð voru í næringarlausnina gætu gert sama gagn og kóbalt og svo reyndist ekki vera.

Tilvitnanir hjá Ahmed og Evans 1959

Marston HR og Lee 1952. Nature (London) 170,791 og Anderson, JP og Andrews ED. 1952. Nature (London) 170,807

¹⁵³ Holm-Hansen G, Gerloff GC og Skogg F 1954. Physiol. Plant. 7, 665

¹⁵⁴ Hutner SH, Provasoli L, Schatz A og Haskins GP 1950. Proc. Am. Phil. Soc. 94,152

Darken MA 1953. Btan. Rev. 19,99

¹⁵⁵ Hewitt EJ og Bolle-Jones EW 1952. Rep. Agric. Hort. Res. Sta. Bristol 62

¹⁵⁶ Bolle-Jones EW og Mallikarjuneswara 1967. J. Rubber Research Institute Malaya 15,128

Skýringin á áhrifum kóbalts er sú að kóbalt er hluti af B₁₂ vítamíni sem einnig er nefnt cobalamin með tilvísun í kóbalt (e. cobalt). Cowles o.fl. (1969) sýndu fram á að virkni ribonukleótíð reductasa sem unnin var úr rótarbakteríum ýmissa belgjurta er háð B₁₂ vítamíni. Þetta á við um ribonukleótíð reductasa úr m.a. smára (*Rhizobium trifolii*), baunaplöntum (*R. phaseoli*) sojabaunum (*R. japonicum*) og afbrigði af rótarbakteríum refasmára (lúsernu, *R. meliloti*). Afbrigði af rótarbakteríum refasmára er ófært um að tillífa nítur úr lofti. Ekki er vitað til þess að ribonukletíð reductasi háður B₁₂ vítamíni sé í öðru lífverum en rótarbakteríum og tegundum af mjólkursýrubakteríum (Cowles o.fl. 1969).

Í kjölfarið á uppgötvun á kóbaltþörf planta fylgdu akur- og pottatilraunir með jarðveg og er greint hér á eftir frá tilraunum sem gerðar voru í Ástralíu og Noregi og að lokum er yfirlit um rannsóknir á kóbaltþörf búfjár og plantna frá 1964.

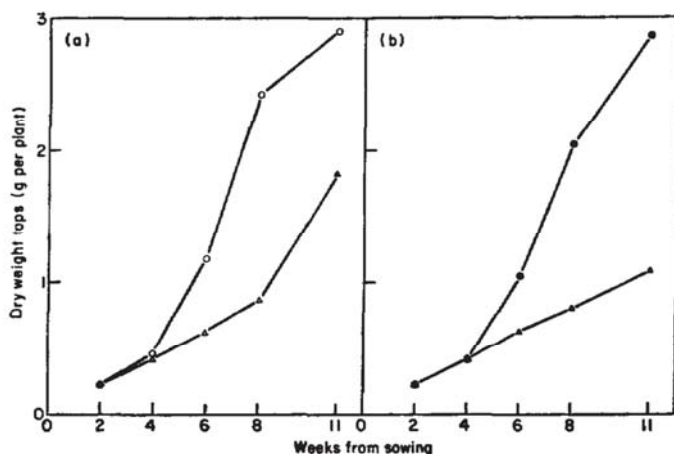
Ozanne o.fl. (1963) gerðu akurtilraunir með kóbaltáburð á sendnum jarðvegi (*Muchea sandur* í Bassendean jarvegsgerð í suðvesturhluta Ástralíu) á svæði þar sem útskolun var mikil og kunnugt var um kóbaltskort í búfé. Mest uppskera var við 140 og 700 g á hektara af CoSO₄·7H₂O og var um 30 % umfram samanburðarlið. Jarðvegur var djúpur kísilsandur dökkgrár við yfirborðið en varð ljósari eftir því sem neðar dró. Tilraunirnar voru gerðar á beitilandi eftir jarðvinnslu og sáningu með jarðsmára (subterranean clover, *Trifolium subterraneum*).

Uppskeruaukning var um 30 % á reitum sem árið 1961 fengu 140 g og við lægri N skammtinn

1960 við 700 g/ha af kóbaltsúlfati (CoSO₄·7H₂O) 18, tafla. Þessi uppskerauki fékkst við takmarkaðan níturáburð 11 og 37 kg/ha N. Við mikinn N áburð, 185 kg/ha N, varð enginn vaxtarauki af kóbalti. Kóbalt áburðurinn jók N í smáranum í öllum tilvikum. Þessar niðurstöður benda eindregið til þess að kóbalt hafi sérstaklega þýðingu fyrir níturnám úr lofti þar sem enginn vaxtarauki varð við ríflega níturáburð sem hamlar níturnámi úr lofti.

18. tafla. Áhrif kóbaltáburðar á níturnám úr lofti. Ozanne o.fl. 1963.

Ár	N kg ha ⁻¹	Kóbaltsulfat g ha ⁻¹		
		0	701	3503
		Uppspera kg/ha þurrefni		
1960	37	1540	2002	1627
1960	185	3144	2701	2257
		Kóbaltsulfat g ha ⁻¹		
		0	28	140
		Uppspera kg/ha þurrefni		
1961	11	1454	1744	1933



7. mynd. Áhrif kóbalts á vöxt blálúpínu (*Lupinus angustifolius* L.), þurrefni g/plöntu á tímabilinu frá tveimur til ellefu vikum eftir sáningu. (a) smitað með *Rizobium lupini*, (b) ósmitað. ○ smitað, Co borið á, Δ smitað enginn Co áburður; ● ósmitað, Co borið á ▲ ósmitað, enginn Co áburður. Vaxtarauki efir kóbalt er marktækur ($P < 0,001$), áhrif smitunar og vixlverkun eru marktæk ($P < 0,05$). Robson o.fl 1979

19. tafla, Kóbalt í rótum, hnýðum og toppi af blálúpínu í tilraunum Robson o.fl.1979. Smitað með *Rhizobium lupini* og kóbalt borið á.* Mæligildi lesin af línuriti á 4. mynd í grein Robson o.fl. 1979

Vikur	Rætur	Hnýði	Toppar
	ng Co g ⁻¹ þurrefni*		
2	530	140	26
4	970	120	28
6	960	120	33

Robson, Dilworth og Chatel 1979 rannsökuðu áhrif kóbalts á vöxt einærrar blálúpínu (*Lupinus angustifolius* L.) og á styrk kóbalts í hinum ýmsu hlutum lúpínunnar. Rannsóknin var gerð í pottatilraun með sendinn jarðveg þar sem kóbaltskortur hafði komið fram í akurtilraunum. Kóbaltáburður jók vöxt 7. mynd og níturstyrk ofanjarðarhluta lúpínunnar og heildarþyngd rótarhnýða. Heildar níturmagn í ofanjarðarhluta jókst meir en vöxtur þurrefnis.

Styrkur kóbalts var langmestur í rótum um það bil áttfaldur styrkurinn í rótarhnýðum og nær þrítugfaldur styrkurinn í toppi (blöðum og stönglum) sex vikum eftir sáningu, 19. Tafla

Kóbaltstyrkur í laufblöðum lúpínunnar sýnir eins og vænta má hvort plöntuna skorti kóbalt eða ekki, 20. tafla. Talsverður munur er þó á styrk kóbalts eftir tilraunaliðum (án kóbaltáburðar eða með kóbaltáburði) sérstaklega við seinni sýnitökutímana 4 og 6 vikum eftir sáningu og þá óljóst við hvaða kóbaltmagn skortsmörkin eru. Munurinn var minnstur við fyrstu uppskeru (2. vikum frá sáningu) í yngstu blöðunum (4.-5. blað) þar sem ætla má að skortsmörks séu milli 8 og 16 nanogröm Co g⁻¹ þurrefni.

Sömu höfundar og könnuðu áhrif kóbalts á blálúpínu birtu aðra grein um hlutverk kóbalts í hnýðismyndun og níturnámi lúpínu, Dilworth, Robson og Chatel 1978.

20. tafla Áhrif kóbalt áburðar á kóbalt í laufblöðum af blálúpínu smitaðri með rôtarsmiti (*Rhizobium lupini*). Robson o.fl. 1979. Kóbaltáburður 0,9 mg CoSO₄ · 7H₂O á pott (6 kg af jarðvegi með 8 plöntum).

Tilraunaliðir	Engin kóbaltáburður			Kóbalt borið á		
Vikur frá sáningu	2	4	6	2	4	6
	Co nanogram g ⁻¹ þurrefni					
Laufblöð 1 og 2	11	15	18	36	63	83
Laufblöð 3 og 4	13*	16	25	24*	59	67
Laufblöð 4 og 5	8	em	18	16	em	61

* Nýgræðingur, em: ekki mælt

Sivertsen T. og Plassen C. (2004) mældu kóbalt og kopar í 599 sýnum af lambalifur sem safnað var 6 héruðum í Noregi. Lömbin voru úr 58 hjörðum. Sýnum frá strandhéruðum var safnað í Vesterålen nyrst, Sogn og Fjordane og Rogaland syðst og inn í landi Troms nyrst, nyrðri Þrændalög og syðst Rudshøgda í Heiðmörk. Auk þess var aflað upplýsinga um fôðrun og steinefnagjöf. Meðaltöl kóbalts í hjörðunum var frá <0,003 til 0,22 µg/g og kopars frá 5 til 240 µg/g.

Samkvæmt heimildum Sivertsens og Plassens er eðlilegt kóbaltmagn í lifur 0.03 and 0.1 µg/g. Kóbalt minna en 0.02 µg/g ww (0.07 µg þurrefni) er samfara klíniskum kóbaltskorti og skortsmörk (critical level) eru við 0.015 µg/g ww (0.05 µg þe.).

Kóbaltskortur eða kóbalt á mörkum skorts (“marginal cobalt status”) var greindur á öllum svæðum um sunnanverðan Noreg en einkum þó vestan og suðvestan til. Höfundar vitna til heimilda um kóbaltskort í lömbum sem beitt var á ræktað land um sunnaverðan Noreg. Kóbaltskortur hafði samkvæmt tilvitunum verið greindur í strandhéruðum en aldrei í héruðum inn til landsins.

Kóbalt var mælt í 112 gróffóðursýnum einkum heysýnum úr rúlluböggum í rannsókn á snefilefnum á bæjum með eða án riðusjúkdóms í sauðfé Þorekell Jóhannesson o.f. 2007. Styrkur kóbalts mældist á bilinu 0,4-2,0 og að meðaltali 0,32 mg/kg þurrefni. Höfundar ályktuðu að í stöku tilfellum geti komið fram kóbaltskortur í sauðfé hér á landi.

Bæjunum var skipt í fjóra flokka (1) riðulausa bæi á svæðum þar sem riða hafði ekki komið upp, (2) bæi á riðusvæðum þar sem riða hafði ekki komið upp og bæi þar sem riða greindist fyrir 1960 og fjárskipti höfðu átt sér stað og riða ekki greinst síðan, (3) Bæi sem riða hafði greinst á eftir 1980 og fjárskipti höfðu átt sér stað og (4) bæi þar sem riða hafði komið upp 2002 til 2004. Ekki var marktækur munur á kóbaltmagni eftir því hvort riða hafði verið greind í sauðfé eða ekki.

Saga plöntunæringar- og áburðarfræði á Íslandi

Í þessum kafla er í stuttu máli rakin saga jarðræktartilrauna á Íslandi á 20. öld og fram þá 21. með áherslu á áburðartilraunir og rannsóknir á vaxtarskilyrðum í jarðvegi og á ferlum plöntunæringar-efna. Einnig er getið heimilda um jarðræktartilraunir.

Yfirlit um skipulag og framkvæmd jarðræktartilrauna á Íslandi á 20. öld¹⁵⁷

„Tilraunaráð jarðræktar gaf árið 1947 út ágríp íslenskra jarðræktartilrauna í samantekt Sigurðar Elíassonar tilraunastjóra á Reykhólum. Í skýrslum tilraunastöðvanna 1947-1950 ritar Árni Jónsson tilraunstjóri á Akureyri um skipulag og sögu tilraunastarfseminnar. Hér verða aðeins fáein atriði úr sögu jarðræktartilrauna hér á landi rakin. Þeim málum eru gerð fyllri skil í ofanefndum greinum, skýrslum þeirra Ólafs Jónssonar og Klemensar Kristjánssonar sem vitnað er til hér á eftir og í Skrá um rannsóknir í landbúnaði 1900-1965, sem Guðmundur Jónsson tók saman í tilefni af 10 ára afmæli Rannsóknastofnunar landbúnaðarins 1975. Í skýrslum tilraunastöðvanna 1947-1951 rekja tilraunastjórnir á stöðvunum fjórum einnig sögu hverrar stöðvar um sig.

Skipuleg tilraunastarfsemi í jarðrækt hefst árið 1900 með stofnun gróðrarstöðvar í Reykjavík, sem rekin var af Búnaðarfélagi Íslands.

Ræktunarfélag Norðurlands var stofnað árið 1903 og Gróðrarstöðin á Akureyri tók til starfa árið 1904. Búnaðarsamband Austurlands rak tilraunastöð á Eiðum á Héraði árin 1905-1918 og 1927-38. Búnaðarsamband Vesturlands starfrækti tilraunastöð 1908-1918 á Ísafirði.

Tilraunastöðin á Sámsstöðum tók til starfa árið 1927 og var rekin af Búnaðarfélagi Íslands. Búnaðarfélagið stóð auk þess allt frá aldamótum fyrir margvíslegum dreifðum tilraunum á bændabýlum, stóð fyrir verkfæratilraunum, tilraunum með votheysverkun, áveitur og sandgræðslu.“

Áburðartilraunir og tengdar rannsóknir 1923-1947

Áburðartilraunir á tímabilinu 1923-1947 eru taldar upp hér að neðan og auk þess nefndar tilraunir sem gefa upplýsingar um áburðargildi belgjurta. Þessi upptalning gefur hugmynd um viðfangsefnin á þessu tímabili, sem einkennist af tilraunum með lífrænan áburð, meðal annars dreifingartíma búfjáráburðar. Auk þess voru gerðar tilraunir með áburð í byggærktun og sáningu smára.

Ítarlegri lýsingu á tilraunum og niðurstöðum þeirra á þessu tímabili og allt aftur til aldamóta er að finna í skýrslum þeirra Ólafs Jónssonar (1950) og Klemensar Kristjánssonar (1953), þar sem Ólafur fjallar um helstu niðurstöður af tilraunum Ræktunarfélags Norðurlands í 45 ár og Klemenz um tilraunir á Sámsstöðum á tímabilinu 1928-1950.

Tilraunir með áburðarnotkun og belgjurtaærktun 1923-1947. Tekið saman eftir ágrípi Sigurðar Elíassonar (1947).

Vaxandi skammtar af köfnunarefnisáburði í byggærkt. Sámsstaðir 1934-36. Forrækt 1-2 ár. Vaxandi skammtar af fosfóráburði í byggærkt. Sámsstaðir 1938-42.

¹⁵⁷ Úr grein um áburðartilraunir á Íslandi (Friðrik Pálmason 1991. Áburðartilraunir á Íslandi Ráðumautafundur 1991, bls. 1-7)

Vaxandi magn af smárafræi 1933-1942. Akureyri og Sámstaðir.
 Áburðartími mykju. Reykjavík 1923, Eiðum 1932-45, Akureyri 1939-46 og á Sámstöðum 1939-45.
 Áburðartími þvags. Sámstaðir 1941-45 og Akureyri 1939-1946.
 Yfirbreiðsla og niðurfelling mykju. Akureyri 1931-36 og Sámstaðir 1941-46.
 Dreifingartími og ávinnsla mykju. Eiðar 1932-41.
 Áburðartími mismunandi tegunda köfnunarefnisáburðar. Akureyri 1928-37 og Sámstaðir 1941-42.
 Áburðartími ammóphos 16/20. Sámstaðir 1942-45.
 Haust- og vorbreiðsla fosfóraburðar. Reykjavík 1925-29.
 Haust- og vorbreiðsla kaliáburðar. Reykjavík 1924-29.
 Vaxandi skammtar af köfnunarefnisáburði. 1929-33.
 Saltþétur borinn á í einu og tvennu lagi. Gróðrarstöðinni Akureyri, Borgum Hornafirði, Eiðum á Fljótsdalshéraði, Hólum í Hjaltadal og Sámstöðum í Fljótshlíð.
 Samanburður á tilbúnum áburði, síldarmjöli og fiskimjöli. Akureyri 1933-1937 og Sámstaðir 1934-37.
 Vaxandi skammtar af kalí á kartöflur. Sámstaðir 1938-40.

Uppskerumælingar úr ofangreindum tilraunum eru í grein Sigurðar Elíassonar (1947).

Áburðartilraunir á búnaðarskólunum og tilraunastöðvum

Tilraunastöðvar: Eiðar, Hólar, Hvanneyri, gróðrarstöðvarnar á Akureyri og í Reykjavík, tilraunstöðvarnar á Sámstöðum, Reykhólum, Skriðuklaustri og Korpu. Dreifðar tilraunir í öllum landshlutum.

Með lögum frá árinu 1940 um rannsóknir og tilraunir í þágu landbúnaðarins eru tilraunaráð jarðræktar og búfjárræktar stofnuð. Lögin tengdu m.a. saman rannsóknir Búnaðardeildar Atvinnudeildar Háskólans og tilraunir í jarðrækt. Tilraunaráði jarðræktar var ætlað að samræma verkefni tilraunastöðvanna, gera tillögur um dreifðar tilraunir og sjá um birtingu á niðurstöðum. Búnaðardeild Atvinnudeildar Háskóla Íslands rak tilraunastarfsemi fyrst í Kópavogi, síðan við Úlfarsá, Varmá og frá 1960 á Korpu þar sem áhersla var lögð samanburð á stofnum ýmissa nytjajurta og jurtakynbætur, eftir flutninginn að Korpu bættust við margvíslegar áburðartilraunir. Á tilraunastöðvum jarðræktar og Bændaskólunum voru áburðartilraunir frá upphafi stór þáttur í starfseminni.

Tilraunastöðvar jarðræktar urðu fjórar, á Akureyri, Sámstöðum og nýjar stöðvar bættust við á Reykhólum og Skriðuklaustri. Tilraunaráð jarðræktar tók við Gróðrarstöðinni á Akureyri árið 1947 af Ræktunarfélagi Norðurlands og við tilraunastöðinni á Sámstöðum af Búnaðarfélagi Íslands. Lög um tilraunastöð í jarðrækt á Reykhólum voru samþykkt á Alþingi árið 1944 og tilraunastarfsemin hefst árið 1947 eftir allmikinn undirbúning. Jarðræktartilraunir á Austurlandi á vegum tilraunaráðsins voru fyrst hafnar á Hafursá í Vallahreppi á Fljótsdal árið 1948, en hún flyst vorið 1949 að Skriðuklaustri. Jarðræktartilraunir hafa farið fram á Bændaskólanum á Hvanneyri samfelld frá 1955.

Með lögum um rannsóknir í þágu Atvinnuveganna frá 1965 er svo Rannsóknastofnun landbúnaðarins stofnuð og fær hún meðal annars yfirráð yfir tilraunastöðvum fjórum, sem tilraunaráð jarðræktar rak fram að þeim tíma. Margvíslegar rannsóknir og tilraunir hafa farið fram í miðstöð Landgræðslunnar í Gunnarsholti margar þeirra í samstarfi Landgræðslunnar og Rannsóknastofnunar Landbúnaðarins.

Rannsóknastarfsemi landbúnaðarins er svo sameinuð undir eina stjórn með stofnun *Landbúnaðarháskóla Íslands* árið 2005. Tilraunastöðvar í jarðrækt eru nú (2010) á Korpu, Hvanneyri og Möðruvöllum í Hörgárdal auk þess eru ýmsar tilraunir utan stöðvanna.

Grundvöllur áburðarleiðbeininga.

Frá miðri 20. öld og fram undir aldamótin hefur áherslan verið á tilraunir með tilbúinn áburð, auk þess sem tilraunum með búfjáráburð hefur verið haldið áfram. Með þessum tilraunum hefur verið lagður grunnur að leiðbeiningum um áburðarnotkun bæði á ræktað land og úthaga, jafnhliða því sem áburðarnotkun fór vaxandi uns hún náði hámarki miðað við hvern hektara af ræktaðu landi á árunum 1962-1980. Tilraunirnar lögðu jafnt grunninn að almennum leiðbeiningum, eins og þeim sem koma fram í Handbók bænda, og að leiðbeiningum byggðum á jarðvegsefnagreiningum. Áburðartilraunir hafa einnig verið notaðar til þess að túlka niðurstöður af gras og heyefnagreiningum með tilliti til áburðarnotkunar og nýtingar áburðar.

Aðferðir við áburðarleiðbeiningar

Leiðbeiningar um áburðarnotkun eftir jarðvegsefnagreiningum hafa verið endurskoðaðar, Þorsteinn Guðmundsson og Jóhannes Sigvaldason 1991) í kjölfar umræðu um breytingar á notkun fosfóráburðar með tilliti til uppsöfnunar á fosfórforða í jarðvegi eftir langvarandi notkun fosfóráburðar. Í grein þeirra Þorsteins og Jóhannesar er skrá um 20 heimildagreinar. Notkun heyefnagreininga til áburðarleiðbeininga hefur farið vaxandi. Forsendum fyrir notkun þeirra og aðferðum til túlkunar á niðurstöðum hefur verið lýst (Friðrik Pálmason 1972, 2000 og 2001).

Langtímatilraunir

Langtímatilraunir hafa verið notaðar til þess að meta áhrif veðurfars á grasvöxt. Þessar tilraunir hafa sérstakt gildi til þess að meta bæði áhrif af veðurfarsveiflum og langtímaáhrif ræktunar og annarra umhverfisþátta á jarðveg og gróður, Hólmgeir Björnsson og Áslaug Helgadóttir (1988) Í grein Þorsteinns Guðmundsson, Hólmgeirs Björnssonar og Guðna Þorvaldssonar (2007) er ítarlega rætt um gildi langtíma tilrauna og í heimildalista eru 18 íslenskar heimildir varðandi langtímatilraunirnar..

Ferli plöntunæringarefna

Frá árinum eftir 1980 hafa rannsóknir beinst að ferlum plöntunæringarefna milli jarðvegs, plantan, lofts og grunnvatns. Í eftirtöldum greinum er greint frá eru niðurstöður varðandi ferli plöntunæringarefna, efnajafnvægi í jarðvegi, það er jafnvægi milli annars vegar aðfærslu efna í jarðveg með áburði, úr lofti með níturnámi, úrkomu og ákomu og hinsvegar fráfærslu úr jarðvegi með uppskeru og tapi í formi lofttegunda eða með útskolun.

Hólmgeir Björnsson, Guðni Þorvaldsson og Þorsteinn Guðmundsson 2001. Efnajafnvægi í langtímatilraun með tegundir nituráburðar á Skriðuklaustri. Ráðunautafundur 2001, 292-295

Björn Þorsteinsson, Guðmundur Hrafn Jóhannesson og Þorsteinn Guðmundsson 2004. Athuganir á afrennslismagni og efnaútskolun af túnnum á Hvanneyri. Fræðapaþing landbúnaðarins 2004 s. 77-83

F. Pálmason 1995. Nitrogen mineralization in situ and in controlled environment. In Optimization of nutrient cycling and soil quality for sustainable grassland. Ed. Jarvis S.C., Murray P.J. And Roker R. A. Proceedings of satellite workshop of the XXth Grassland Congress. Oxford 2005.

Thorsteinn Guðmundsson, Hólmgæir Björnsson og Guðni Thorvaldsson 2005. Elemental composition, fractions and balance of nutrients in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland Icel. Agric. Sci. 18 (2005), 21–32

Friðrik Pálmason 2006. Nitrogen mineralization in situ and in laboratory in Icelandic Andosol. Icelandic Agricultural Sciences 19, 3-13

Þorsteinn Guðmundsson 2008. Kolefnisbinding í jarðvegi. Fræðaðing landbúnaðarins 5. árg. 290-298

Friðrik Pálmason, Halldór Sverrisson og Jón Guðmundsson 2009. Áhrif belgjurta á níturupptöku sambýlisplanta Fræðaðing landbúnaðarins 6. árg. bls 362

Friðrik Pálmason, Halldór Sverrisson og Jón Guðmundsson 2009. Áhrif smitunar með rótarbakteríum og áburðar á níturám úr lofti. Fræðaðing landbúnaðarins 6. árg. bls 366

Friðrik Pálmason, Jón Guðmundsson og Halldór Sverrisson 2009. Einær lúpína sem grænófóður eða grænáburður. Fræðaðing landbúnaðarins 6. árg. Bls 381

Friðrik Pálmason, Halldór Sverrisson og Jón Guðmundsson 2009. Níturám í hvítmára Fræðaðing landbúnaðarins 6. árg. Bls 454

Friðrik Pálmason, Halldór Sverrisson og Jón Guðmundsson 2009. Níturám úr lofti í belgjurtum og tveimur trjátegundum. Fræðaðing landbúnaðarins 6. árg. 213

Níturám úr lofti og níturlosun úr plöntuleifum og í jarðvegi.

Ólafur Jónsson (1939) skrifaði ítarlega grein um þýðingu og hagnýtingu belgjurta í íslenski jarðrækt. Ólafur greinir frá niðurstöðum tilrauna með belgjurtir í 9 ár.

Með vaxandi áburðarnotkun á 4. til 7. ártug tuttugust aldar dofnaði áhugi á ræktun belgjurta en eftir það hafa rannsóknir á níturámi og ræktun belgjurta og kynbótastarf verið vaxandi. Til marks um þennan áhuga var 1986 gefið út safn greina um belgjurtir (Nýting belgjurta á Íslandi, ritsstj. Áslaug Helgadóttir, Fjölrit Rala 11. Árg. Nr.121) auk þess sem fjöldi greina hefur birst síðan.

Fyrstu beinar mælingar á níturámi úr lofti hér á landi hófust 1983 með þáttöku í fjölþjóðaverkefni á vegum Samstarfsverkefnis Matvæla og Landbúnaðarstofnunar Sameinuðu þjóðanna og Kjarnorkustofnunarinnar Joint FAO/IAEA Programme. Viðfangsefnið voru rannsóknir á níturámi belgjurta til beitar og fóðuröflunar. Hér á landi var níturám einærrar blálúpínu mælt á árunum 1983-1986. Með áframhaldandi stuðningi FAO/IAEA, var níturám Alska lúpínu mælt í uppgræðsluspildu á Geitsandi og tilraunum þar og á Mýrdalssandi. Þá tóku við rannsóknir á níturámi hvítmára og rauðsmára á Korpu og í Gunnarsholti í samstarfi við Erik Steen Jensen á Landbúnaðardeild við Risø National Laboratory.

Í Gunnarsholti voru gerðar mælingar á níturámi rauðsmára eftir smitun með mismunandi stofnum níturámsbaktería í tilraun tengri norrænu samstarfsverkefni sem Halldór Sverrisson og Jón Guðmundson Rannsóknastofnun landbúnaðarins tóku þátt í. Þessum rannsóknum lauk 1998. Yfirlit um þessar rannsóknir eru í kaflanum um níturám úr lofti í þessu riti.

Fyrstu mælingar á níturlosun í jarðvegi hér á landi voru gerðar 1990 á jarðvegi úr gömlu móatúni í Gunnarsholti, sandjörð frá Geitasandi á Rangárvöllum og Mýrdalssandi austan Víkur. Mælingarnar voru gerðar við stofuhita, að meðaltali 20°C. Jarðvegur var vökvaður að vatnsrýmd jarðvegs, sem þá var mæld eftir vatnsmettun jarðveg og frítt afrennsli.

Árið 2000 var hafist handa á ný við mælingar við staðlaðar aðstæður (hitastig og vatnsspennu í jarðvegi) og hafði þá fengist betri aðstaða til rannsókna með styrkjum frá Framleiðnisjóði og Rannsóknasjóði. Nauðsynlegur tækjabúnaður var keyptur, jafnhitaskápur og tæki til mælinga á nitrati og ammóníum og koltvísýringi.

Rannsóknir á níturlosun í jarðvegi víða að, mismunandi bæði hvað varðar veðurfar, ræktunarsögu og jarðvegsgerð eru æskilegar til að auka þekkingu á níturferlum í jarðvegi og til að bæta þekkingargrunn áburðarleiddbeininga og sem gagnagrunnur að gerð líkana fyrir níturferli í jarðvegi. Einnig fást upplýsingar um áhrif ræktunaraðstæðna á níturlosun í jarðvegi með því að nota þessar mælingar í ræktunartilraunum af ýmsu tagi.

Heimildir um sögu rannsókna í plöntunæringar- jarðvegs og áburðarfræði á Íslandi

Árni Jónsson, 1951. *Skýrslur tilraunastöðvanna 1947–1950. Rit landbúnaðardeildar Atvinnudeildar Háskólans, A-flokkur nr. 4, 124 bls.*

Guðmundur Jónsson 1979. *Skrá um rannsóknir í landbúnaði : tilraunaniðurstöður 1900-1965.*

Reykjavík : Rannsóknastofnun landbúnaðarins, 428 bls. Atriðaskrá: s. 419-426

Guðmundur Jónsson 1996. *Skrá um rannsóknir í landbúnaði 1965 – 1985 - Fjölrit Rala 21. ár nr. 184, 135 bls. Rannsóknastofnun landbúnaðarins Keldnaholti*

Klemensar Kr. Kristjánson 1953. *Skýrsla tilraunastöðvarinnar á Sámsstöðum 1928-1950.*

Nýting belgjurta á Íslandi, ritstj. Áslaug Helgadóttir, Fjölrit Rala 11. Árg. Nr.121

Ólafur Jónsson 1939. Belgjurtir : þýðing þeirra og hagnýting í íslenskri jarðrækt

Ólafs Jónsson 1951. *Gróðurtilraunir. Reykjavík : Búnaðarfélag Íslands, 112 bls.*

Sigurður Eliásson 1947. *Ágrip íslenskra jarðræktartilrauna. Tilraunaráð jarðræktar*

Eðlis- og efnæiginleikar íslensks jarðvegs og jarðvegsefnagreiningar fyrir áburðarleiddbeiningar.

Ritið íslenskur jarðvegur eftir Björn Jóhannesson kom út 1960 og markar nýtt upphaf rannsókna á eiginleikum íslensks jarðvegs með tilliti til efna- og eðliseiginleika sem mikilvægir eru fyrir jarðrækt. Jafnframt er þar gott yfir eldra efnis sem snertir íslenskan jarðveg í inngangskafli. Margt af þessum rannsóknum tengist plöntunæringarefnum í jarðvegi og áburðarnotkun.

Í heimildaskrá eru 56 heimildir þar af 32 sem fjalla um íslenskan jarðveg eða jarðfræði. Elsta greinin er frá 1881 (P. Fejlberg. Bemærkningar om Jordbund og Klima på Island) og næst eru greinar eftir Ásgeir Torfason og Helga Jónsson í Búnaðarritinu 1906, 1909 og 1910, þar sem eru efnagreingar á íslenskum jarðvegi og nokkrar mælingar á eðliseiginleikum og síðan grein frá 1921 um kalkþörf íslensk jarðvegs eftir H.J. Hólmjárn. Hann notaði mælingar á vaxtarhraða azotobakter, níturbindandi gerla til þess meta kalkþörfina. Umfangsmestar voru á sínum tíma rannsóknir Fr. Weis (1933), en hann mældi kolefni, nítur, jónrýmd, og leysanlegt járn, alúmíníum og kísilsýrur í ammóníum oxalatlausn. Fram kemur mikill munur á

eiginleikum íslensks og dansks jarðvegs. Úr íslenskum jarðvegi leystist með ammóníumoxalat lausn miklu meira af kísilsýru, járn og alumíníum en í dönskum. Jafnframt leysti saltsýrulausn upp mun miklu stærri hluta íslenskum jarðvegi (75%) en úr dönskum (8 til 25%). Saltsýran leysti auk þess miklu meira af járn, alumíníum og kísilsýru en af kalsíum, magníum, kalíum og natríum.

Björn Jóhannesson (1960) telur niðurstöður Weis benda til þess að “bergfni íslensks jarðvegs veðrist auðveldlega og jurtanæringarefni, sem bundin eru í bergfnum leysist tiltölulega fljótt úr læðingi, þó hinn kemíski veðrunarhraði sé lítill vegna lágs jarðvegshita”.

Að loknum inngangi eru í bók Björns Jóhannessonar stuttir kaflar með (1) ágripi af almennri lýsingu á jarðfræði Íslands, (2) loftslagi og (3) gróðurfari, þá nokkuð ítalegri afli (4) um jarðvegsmýndun og meginkafla bókarinnar eru sniðlýsingar, sem flokkaðar eru eftir kortaeningum á meðfylgjandi jarðvegskorti. Skiptingin er í aðalatriðum í gróið og gróðurlaust land og megin flokkar gróins lands eru votlendi, mólendi og malarborin eða grýttur jarðvegur og undirflokkar, alls 23 flokkar jarðvegs. Misjafnlega ítarlegar efnagreiningar fylgja jarðvegsýnum úr sniðum helstu flokka jarðvegs.

Í viðauka er athyglisverðir kaflar um efni sem taldist á þeim tíma til nýjunga:

(1) um mineralógíska eiginleika íslensk móajarðvegs eftir Tshin Yuan Tu, byggt á rannsóknum hans í Soil Survey Laboratory í Beltsville í Bandaríkjunum. Rannsókuð voru þrjú sýnishorn úr tveimur jarðvegssniðum. Þar kemur fram að leiragnir jarðvegs (kornastærð minni en 0,002 mm í þvermál) eru myndlaus (amorph), við röntgenskoðun sáust engin kristallög. Fran kemur að leirinn sé af allophan gerð úr eldfjallaösku. Allophan einkennir ungan jarðveg og tilheyrir því jarðvegurinn flokki andosol jarðvegs.

(2) um rafhleðslu eiginleika svífefna (amfóterísk einkenni) í íslenskum jarðvegi. Neikvæð hleðsla er einkennandi fyrir lífræna hluta jarðvegsins en í minna mæli fyrir steinefnahlutann.

(3) um leysanleika fosfórs í jarðvegi byggt á rannsóknum Kristínar Kristjánsdóttur verkfræðings í framhaldsnámi í Macauley Institute í Aberdeen. Leysanleiki fosfórs var mældur í sýnishorni af móajarðavegi frá Núpum í Ölfusi með skolun jarvegs með vatnslausnum með breytilegu pH.

(4) um bindingu kalíum í leir sem talinn er kristallaður og finnst í jarðlögum á Ársskógsströnd og í Svarfaðardal.

Leysanleikinn var meiri við mikla þynningu (hlutfall jarðvegur:vatn 1:500) en við minni þynningu (jarðvegur: vatn 5:100). Við minni þynninguna leystist nær enginn fosfór við sýrustig á því bili sem kenur fyrir í jarðvegi (pH 3,8-7,2). En meira leysist upp við meiri þynningu jarðvegs og þá fer leysanleikinn vaxandi við pH > 4. Í báðum lausnum fór leysanleikinn hratt vaxandi með hækkandi pH yfir 7.

Björn skrifar um niðurstöðurnar:

“Það er einkennandi [fyrir niðurstöðurnar] hversu mjög fosfatið binzt jarðveginum á sýrustigsbilinu frá pH 2 til 6. Það er í fullu samræmi við þessar niðurstöður að veikt súrar upplausnir sem víðast hvar eru notaðar til að draga úr jarðvegi “nýtanlegan” fosfór, hafa reynst ónothæfar fyrir íslenskan jarðveg. Það er einnig í samræmi við niðurstöður Kristínar,

að 0,5 N bikarbónatupplausn með pH 8,5 gefur vonir um að verða notahæf við ákvarðanir á fosfórþörf jarðvegs.”

Eldri rannsóknir (Steenbjerg F. og Pétur Gunnarsson 1938) eru á sama veg að “mikið þynntar sýrur sem oft eru notaðar til ákvörðunar á nýtanlegum fosfór í jarðvegi, leystu mjög lítið fosfórmagn [í íslenskum jarðvegi], og raunar minna en eimað vatn, jafnvel þó að miklu af vatnsleysanlegum fosfór væri bætt í moldina áður en hún var skoluð með sýrulausninni” eins og segir í inngangskafli Íslensks jarðvegs Björns Jóhannessonar.

Björn bendir síðan á að þó ætla megi að sýrustig jarðvegs hafi veruleg áhrif á það hvað plöntur geti nýtt sér af fosfór í jarðvegi sýni niðurstöður tilrauna með áburðarkalk hér á landi að grös er vaxa í mýrarjarðvegi með pH nálægt 5 innihaldi ekki minna magn af fosfór en grös er vaxar í sams konar jarðvegi með sýrustig frá pH 6 til 7. Ennfremur að pottatilraun með geislavirkan fosfór bendi ekki til þess að fosfór bindist hraðar í mýrarjarðvegi með sýrustig um 5 en sýrustig frá 6-7. Orsakir þessa eru án vafa margar enda eru aðstæður í óröskuðum jarðvegi með gróðri aðrar en í jarðvegssýnishorni sem fosfór er leystur úr á rannsóknastofu. Í óröskuðum jarðvegi með gróðri er fosfór fjarlægur við upptöku í rætur og þannig helst ákveðið flæði fosfórs frá jarðvegi til róta ennfremur geta svonefnd klóbíndandi lífræn efni frá rótum plantna stuðlað að losun fosfórs og upptöku í rætur og loks geta svepparætur stuðlað aukinni fosfórupptöku plantna.

Bikarbónat- aðferðin fyrir mælingar á nýtanlegum fosfór í jarðvegi var síðan notuð við Búnaðardeild Atvinnudeildar Háskóla Íslands sem síðar varð hluti af Rannsóknastofnun landbúnaðarins. Síðar þegar jarðvegefna greiningar hófust á vegum Ræktunarfélags Norðurlands á Akureyri var þar tekin upp aðferð við fosfórmælingar sem byggist á skolumm með veiksúrri lausn af ammóníumlaktati (AL aðferð) og reyndist vel nothæf, sem í fljótu bragði kann að virðast í mótsögn við ofangreindar rannsóknir. Skýringin á því, að svo er ekki, kann að liggja í því að laktat hefur einmitt klóbíndandi eiginleika og stuðlar að upplausn fosfórssambanda í jarðvegi sem plöntur geta nýtt á sambærilegan hátt með klóbíndingu. AL aðferðin varð einnig fyrir valinu á Hvanneyri.

AL aðferðin hefur þann kost að að í sömu skolun er önnur steinefni mæld (Ca, Mg Og K), en með bikarbónat aðferðinni eru þessi steinefni mæld sér í acetatskoli.

Bikarbónat og AL aðferðirnar voru bornar saman eftir að báðar aðferðir höfðu verið notaðar hér á landi í um aldarfjórðung, (Friðrik Pálmason og Bjarni Helgason 1990) og kom í ljós að munur á leiðbeiningum var að meðaltali ekki mikil eftir þessum tveimur aðferðum, en í sumum tilvikum mjög mikill.

21. tafla. Fylgni aðferða fyrir mælingar á nýtanlegu fosfór í jarðvegi, bikarbóna- og Al-aðferð. Stærsti fylgnisstuðull fyrir eina af fjórum aðhvarfslíkingum (linulegri líkingu, lógrítma-, veldisvísis- og veldisfalli).

Sýrustig í jarðvegi, pH	Fjöldi sýna	Fylgni R ²
4,75-5,05	17	0,77
5,10-5,40	44	0,27
5,60-6,00	27	0,05

Ljóst er samkvæmt þessarri rannsókn að aðeins er samræmi milli aðferðanna í súrasta jarðveginum við pH undir 5. Erlendar heimildir sem vitnað til í greininni eru á sama veg og

sýna jafnframt að bikarbonataðferðin er betri en Al aðferðin til að meta nýtanlegan fosfór í jarðvegi (svonefnt L-gildi mælt með í blöndun geislavirks fosfórs í jarðveg og upptöku hans í rýgresi), og er jafnframt betri til að meta fosfórupptöku. Æskilegast væri því að nota bikarbonataðferðina eingöngu þar sem pH í jarðvegi er tiltölulega hátt.

Hér eru einkum raktir þær rannsóknir á eðli og eiginleikum jarðvegs sem tengjast beint plöntunæringarefnum í jarðvegi og áburðarleiddbeiningum en þessu riti er ekki ætlað að fjalla um jarðvegsrannsóknir að öðru leyti. Heimildir um rannsóknir á íslenskum jarðvegi birtar árin 1963-2008 eru í heimildaskránni hér á eftir án þess að þeim séu gerð skil hér.

Helgason B. 1963. Basaltic soils of South-West Iceland I. *Journal of Soil Science* 14, 64-72

Helgason B., 1963. Basaltic soils of South-West Iceland II. *Journal of Soil Science* 19, 127-134

[Johannes Sigvaldason 1964. Om phosphats binding i jorden, planternes phosphornæring, samt udbringningsmåder for phosphorgødning.](#) Licentiatritgerð. Den kgl .Veterinær og Landbohøjskole, Afdelingen for planternes ernæring, København.

Guðmundsson Th, 1978. Pedological studies of Icelandic peat soils. Doktorsritgerð. University of Aberdeen. (óbirt).

Guðmundsson Th., 1974. Soil survey and land use capability classification of Hestur and Mávahlíð, West-Iceland. B.Sc. ritgerð. University of Edinburgh.

Guðmundsson Th. and A. Dellé, 1986. Development of Andosols in the highlands of Iceland. XIII. Congress of the International Society of Soil Science, Transactions III, 1133-1134.

Arnalds, O., 1990. Characterization and erosion of Andisols in Iceland. *Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas.*

Þorsteinn Guðmundsson, 1998. Soil Characteristics and land use in Western Iceland. Í Cost 622: Soil resources of european volcanic systems. Iceland joint meeting 5.-10.7.98.

Arnalds, O., Kimble, J., 2001. Andisols of deserts in Iceland. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1778–1786.

Þorsteinn Guðmundsson, 2002. The formation of siderite lenses in Icelandic Histosols. Volcanic Soils: Properties, Processes and Land Use. International Workshop 18- 22 September, Budapest. Abstracts and Field Guide, 21-22.

Arnalds, O., 2004. Volcanic Soils of Iceland. In *Volcanic Soil Resources. Occurrence, Development, and Properties*; (ritstj. Arnalds, O., Stahr, K.). Catena Special Issue, Elsevier; Amsterdam.

[Þorsteinn Guðmundsson og E.A. FitzPatrick, 2004. Micromorphology of an Icelandic Histosol. In: Volcanic Soil Resources in Europe. RALA report no. 214 bls. 79-80.](#)

Þorsteinn Guðmundsson 2008. Kolefnisbinding í jarðvegi. Fræðaging landbúnaðarins 5. árg. 290-298

Ferli og nýtanleiki plöntunæringarefna í íslenskum jarðvegi.

Afrennsli og útskolun

Afrennsli og útskolun var mæld af 64 ha af ræktuðu landi á Hvanneyri árin 2001-2002. Afrennslissvæðið var að mestu tún, en einnig byggakrar, skjólbelti og beutiland. Áburðargjöf á túnin á Hvanneyri var að jafnaði 110 kg N, 24 kg P og 45 kg K, *Björn Þorsteinsson o.fl. 2004*.

Mest skolaðist út af magníum og natríum 117 og 112 kg/ha á ári. Það er rúmlega tvöfalt meira en mældist af auðleysanlegu Mg í efstu 10 sm jarðvegs og svarar til 20% af veðranlegum forða í sama jarðvegslagi. Samsvarandi tölur fyrir Natríum eru 140% af auðleysanlegu Na og 37% af veðranlegu.

Útskolun kalsíum er nokkru minni 96 kg/ha en miklu minni af kalíum 19 kg/ha og minnst af fosfór aðeins 0,3 kg/ha. Kalsíumútskolun svarar til helmingis af auðleystum forða í 10 sm laginu og 8% af veðranlegum forða, samsvarandi tölur fyrir kalíum eru 38% af auðleystum forða og 10% af veðranlegum forða.

Neðan við töfluna úr greininni er útskolunin borin saman við auðleyst og veðranleg næringarefni í efstu 10 sm jarðvegs. Taka ber fram að ekki er vitað hvað mikið skolast úr efstu 10 sm jarðvegs og hvað úr neðri lögum jarðvegs. Auk þess er á afrennslissvæðinu ekki eingöngu tún, þótt þau séu stærsti hlutinn. Samanburðurinn á útskolun og efnamagni í efsta hluta jarðvegs er því eingöngu til glöggvunar á stærðargráðu útskolunarinnar.

22. tafla. Magn veðranlegra og auðleysanlegra og skiptanlegra næringarefna kg ha⁻¹ í efstu 10 sm jarðvegs á mýrarjörð á Hvanneyri (Þorsteinn Guðmundsson 1998) borin saman við heildarútskolun (kg ha⁻¹ ár⁻¹) samkvæmt frennslismælingum gerðum á Hvanneyri í maí 2001 – júní 2002. *Björn Þorsteinsson, o.fl. 2004*

	Ca	Mg	K	Na	P
Veðranleg næringarefni tún á mýri kg ha ⁻¹	1200	600	200	300	800
Auðleysanleg næringarefni tún á mýri kg ha ⁻¹	190	50	50	80	40
Veðranleg næringarefni skjólbelti á mýri kg ha ⁻¹	7200	5600	100	1300	800
Auðleysanleg næringarefni skjólbelti á mýri kg ha ⁻¹	840	70	30	30	30
Útskolun á ári kg ha ⁻¹	96	117	19	112	0,26

Heildar útskolun % af af veðranlegum og auðleysanlegum næringarefnum í efstu 10 sm jarðvegs					
Útskolun % af veðranlegu næringarefni í túni á mýri	8	20	10	37	0,03
Útskolun % af auðleysanlegu næringarefni í túni á mýri	51	234	38	140	0,7

Höfundar greinarinnar draga þessar ályktanir af niðurstöðum:

“Séu allir mældir útskolunarþættirnir lagðir saman fást rúmlega 400 kg í efnaafrennsli á ári. Þetta magn er innan þess ramma sem vænta má í útskolun á steinefnum á Íslandi. Sigurður Reynir Gíslason og Stefán Arnórsson (1988) gera ráð fyrir að efnaveðrun af íslensku landi sé að meðaltali um 1 tonn ha⁻¹ ár⁻¹, en hafa ber í huga að í þeirri rannsókn sem hér er kynnt er

m.a. kísill ekki tekinn með en hann vegur allþungt í tölum yfir heildarveðrun. Á hinn bóginn er þessi athugun á mýrlendi og mikils kísils ekki að vænta.

.....

Samanburður rennslisgagnanna og við úrkomumagn sýna að um 89% af úrkomumagninu rennur af svæðinu sem er innan trúverðugra marka. Einnig má spyrja hve miklu máli skiptir jarðvegur neðan 10 sm lagsins fyrir útskolun? Sennilega skiptir sá jarðvegur máli fyrir allar katjónirnar en Arnheiður Þórðardóttir og Þorsteinn Guðmundsson (1994) sýndu að mun minna var af þeim í sniðum framræsts en óframræsts mýrarjarðvegs. Áborinn fosfór binst hinsvegar við efsta yfirborð jarðvegsins (Þorsteinn Guðmundsson ofl. 2000).

Útskolun fosfórs er helst að vænta sem afrennsli af yfirborði þegar búfjáraburður er borinn á við óheppilegar aðstæður (Hólmgeir Björnsson 2001), en mjög lítið ber á slíku í gögnunum hér. Topparnir að hausti og vetri benda frekar til þess að fosfór rík mold hafi skolast af yfirborði túnanna í mikilli úrkomu. Brennistein í jarðvegi nýta plöntur á formi sulfats. Sulfatið hripar hratt niður í jarðveg og skolast auðveldlega út (Bjarni Helgason 1994). Þessir eiginleikar skýra allmikla útskolun brennisteins af Hvanneyrartúnum. “

Áburðarnotkun, sýrustig og nýtanleiki plöntunæringarefna í jarðvegi

23. tafla. Niðurstöður efnagreininga á jarðvegi og þurrefni gróðurs í tilraun á túni nr. 5-45 á Akureyri. P og K í jarðvegi skolað úr jarðvegi með lausn af ammoníumlaktati, önnur efni með DTPA Bjarni Guðleifsson og Ewald Schnug 1990.

	Ca(NO ₃) ₂	NH ₄ NO ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄	Ca(NO ₃) ₂	NH ₄ NO ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄
	Jarðvegsefnagreining			Gróðurefnagreining		
Lífræn efni	38	36	44			
pH CaCl ₂	6,4	5,5	4,3			
	ppm (mg kg ⁻¹)			% í þurrefni		
S				0,16	0,18	0,28
P	88	68	113	0,25	0,25	0,26
K	234	195	663	2,16	2,39	2,40
Si				2,36	2,05	2,29
Ca	3810	2740	1900	0,44	0,36	0,24
Mg	535	330	161	0,17	0,18	0,14
				ppm (mg kg ⁻¹)		
Fe	324	578	1375	167	150	137
Mn	19	34	42	33	97	197
Al	53	170	338	97	60	53
Zn	10	10	10	19	20	22
Cu	14	15	17	6	4	4

24. tafla. Sýrustig í jarðvegi pH (í vatni), lífrænt kolefni og heildar nítur í jarðvegi (g kg⁻¹ þurrefni), rúmþyngd sýna, kg l⁻¹. Meðatal þriggja endurtekninga. Guðni Þorvaldsson o.fl. 2003.

Dýpt, cm		Enginn áburður	NH ₄ NO ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄	Ca(NO ₃) ₂
0 – 5	pH	6,3	5,8	3,8	6,9
5-10		6,8	7,0	4,4	7,2
10-20		7,0	7,3	6,2	7,2
0 – 5	C	120	146	229	151
5-10		42	61	85	66
10-20		37	40	52	48
0 – 5	N	9,3	11,2	15,2	12,8
5-10		3,5	5,0	6,3	5,3
10-20		2,8	3,2	4,3	4,0
0 – 5	C/N	12,9	13,0	14,9	11,8
5-10		12,0	12,3	13,5	12,5
10-20		13,0	12,6	12,2	12,1
0 – 5	Rúmþ.	0,55	0,48	0,30	0,54
5-10		0,77	0,70	0,60	0,69
10-20		0,78	0,78	0,69	0,70

Sýrandi áhrifa ammóníumsúlfats gætir niður í 20 sm dýpt miðað við tilraunalið án aburðar. Sýringin er svipuð niður í 10 sm dýpt en minni í neðsta laginu. Sýringar eftir ammóníumnítrat gætir að aðeins í efsta jarðvegslaginu. Kalsíumnítrat hækkar pH gildið um 0,6-0,2 pH stig minnkandi eftir því sem neðar dregur í jarðveginum. Magn lífrænna efna (C og N) er mest þar sem ammóníumsúlfat var borið á, jarðvegur er súrastur og uppskera minnst.

Um áhrif mismunandi tegunda níturáburðar á efnajöfnuð í jarðvegi segir í yfirliti Þorsteins Guðmudssonar o.fl. (2006):

“Að undanskildum kalksaltpétri hafði sá áburður, sem notaður var, sýrandi áhrif á jarðveginn og því skiptir sköpum hvaða N-áburður er notaður. Áburðurinn leiddi í öllum tilfellum til uppsöfnunar á lífrænu efni og þar með bæði kolefni og köfnunarefni. Í súru reitunum var uppsöfnun á kolefni mest en ammóníumsúlfat hafði að öðru leyti neikvæð áhrif á frjósemi jarðvegsins. Mikil uppsöfnun kolefnis og köfnunarefnis var í reitum með kalksaltpétri og hann hafði einnig önnur jákvæð áhrif á frjósemi jarðvegsins. Niðurstöðurnar benda til þess að frjósamt ræktunarland geti gegnt mikilvægu hlutverki í bindingu kolefnis.

Þegar áburður hefur sýrandi áhrif á jarðveg tapast bæði kalsíum og magnesíum. Sérstaklega hefur gengið á heildarforða Ca en hann er þó enn mjög mikill. Ca, sem safnast í jarðveginn þegar Ca-rikur áburður er borinn á, binst ekki fast heldur er það allt skiptanlegt.

Fosfór, sem er borinn á umfram það sem fjarlægt er með uppskeru, safnast í jarðveginn Auðleystur fosfór hefur aukist mikið og bendir það til þess uppsafnaður fosfór sé að minnsta kosti að hluta nýtanlegur fyrir gróður.

Minna kalí var borið á en upp var tekið. Heildarforði í jarðveginum er lítill og mikið hefur gengið á hann en ekki hafa að sama skapi komið áhrif á skiptanlegt kalí. Kalímagn í uppskeru hefur minnkað og það er ljóst að hér hefur verið gengið á frjósemi jarðvegsins. Nauðsynlegt er að gæta þess að ekki gangi um of á forðann ef minna er borið á en upp er skorið.”

Níturbúskapur í jarðvegi og plöntum

Í jarðvegi er N bundið í forða lífrænna efna í meira eða minna umsettum plöntuleifum og í moldarefnum (humus) sem líta má á sem síðustu myndefnin í umsetningu lífrænna leifa. Einnig er nítur¹⁵⁸ bundið í lífmassa jarðvegs, örverum og öðrum lífverum í jarðvegi. Af plöntuleifum brotna ferskar leifar af grænum plöntum hraðast niður en trénaðar hæggar. Moldarefni eru torleystari en plöntuleifar. Torleystasti hluti N forðans er annað hvort í mjög stöðugum efnasamböndum t.d. í moldarefnum eða lokuð inni í holrúmunum í steindum jarðvegs sem jónir eða örverur.

Níturlosun (e. mineralization) úr forða jarðvegs í plöntuleifum og moldarefnum verður fyrir starfsemi örvera og niðurbrot örveranna sjálfra. Laust N eða ólífrænt N (e. mineral N) samanstendur af ammóníum og nítratjónum í jarðvatni og rafbundnum á jarðvegsögnum. Samtímis níturlosun á sér stað annað ferli í jarðvegi, níturbinding í örverum (e. immobilization) Eftir því hvort hefur vinninginn heildarlosun (e. gross mineralization) eða heildarbinding (gross immobilization) er talað um mismuninn sem nettólosun og nettóbindingu (e. net mineralization, net immobilization).

Önnur ferli níturs í jarðvegi en losun N og binding í örverum og öðrum lífverum eru (1) níturnám örvera úr lofti bæði í jarðvegi, rótarhnýðum belgjurta og í sambýli við aðrar plöntutegundir svo sem elri, (2) upptaka N í plönturætur og (3) tap N úr jarðvegi. Tap verður við útskolun sérstaklega nítrats sem berst þá í grunnvatn eða tap í formi lofttegunda, níturoxíða t.d. N₂O sem er ein gróðurhúsalofttegundanna. Um níturnám er fjallað í sér kafla á eftir þessum.

Nítur og kolefnisforði í íslenskum jarðvegi.

Níturforði í jarðvegi hér á landi er mjög breytilegur eftir jarðvegsgerð, tafla. Í töflunni eru staðir þar sem rannsóknir voru gerðar á níturlosun í jarðvegi og/eða níturnámi úr lofti á árunum 1990-2003.

Kolefnisforði í jarðvegi mældist minnstur í sandinum austan Víkur í Mýrdal 2,6 tonn C/ha í efstu 30 sm jarðveg en mestur í kornakri á mýrarjörð á Hvanneyri í Borgarfirði 309 tonn/ha. Lífræn efni í jarðvegi eru oft reiknuð af kolefni í jarðvegi (heildarmagn lífrænna efna = 1,72 x kolefni í jarðvegi). Miðað við þennan umreikningsstuðul og kolefni í jarðvegi í 25. Tafla er heildarmagn lífrænna efna í jarðvegi 0,1-47,8 % í jarðvegi eða 4,5- 531 tonn/ha, minnst í sandinum við Vík og mest í mýrinni á Hvanneyri.

Rúmþyngd jarðvegs endurspeglar hlutfall lífrænna efna í jarðvegi rúmþyngd er minnst í mýrarjarðvegi 0,4 g cm⁻³ með 11-28 % kolefni í sýnum frá Korpu og Hvanneyri, næst er jörð á jaðri mýrar og mels á Korpu með rúmþyngd 0,6 g cm⁻³ og 5% kolefni, þá meljörð og móajörð á Korpu með rúmþyngd 0,7-0,8 og 2-3% kolefni, móajörð úr ævagömlu túni í Gunnarsholti og sandjörð frá Vindheimum eru með sömu rúmþyngd 0,9 g cm⁻³ en þó nokkur munur er á kolefnismagni 2,4% í gamla túninu í Gunnarsholti og 1,6% í sendnum jarðvegi á Vindheimum, rúmþyngdin er miklu meiri í sandi við sjávarsíðuna rétt austan Víkur 1,4 g cm⁻³

¹⁵⁸ Rithátturinn nítur í stað nítur byggir m.a. á því að af sama stofni og eldra í málinu er nítrat, og nítur (e. Nitrification umbreyting ammóníum í nítrat), sbr. Áurðarfræði Magnúsar Óskarssonar og Matthíasar Eggertssonar frá 1978, bls.15-16. Á þeim tíma var talað um köfnunarefni (e. Nitrogen), en ekki nítur eða nítur. Eldri heimild um sama rithátt í orðunum nítrít og nítrat er Gerlafræði Sigurðar Páturssonar (1956, bls 52).

með aðeins 0,06 % kolefni og mest er rúmþyngdin í örfoka sandjörð inn í landi á Geitasandi á Rangárvöllum 1,59 g cm⁻³ með 0,15% kolefni.

Mýrarjörðin á Hvanneyri með 28% kolefni fellur undir þann flokk jarðvegs sem samkvæmt nýjustu skilgreiningum á íslenskum jarðvegi er nefndur mójörð (histosol) með > 20 % C í þurrefni.¹⁵⁹ Í þessari jarðvegsgerð er áfok tiltölulega lítið.

Í mýrarjörðinni á Korpu með 11% C gætir meira áfoks og hún flokkast undir svartjörð (histic andosol 12-20% C), þó svo að kolefnishlutfall sé rétt neðan við mörkin. Þarna er álitamál hvort eigi ekki fremur að flokka þennan jarðveg eftir framræslu sem brúnjörð (brown andosol með 1-12% C) en sá flokkur telst þurrlandur jarðvegs.

Meljörð og jaðar móa og mels á Korpu, moajörð í Gunnarsholti og sendni jarðvegurinn á Vindheimum falla eftir kolefnimagni að dæma í flokk brúnjarða (brown andosol, 1-12% C).

Geitasandur og Mýrdalssandur með 0,1 % C teljast til frumjarðar (vitrisol með < 1% C).

C/N hlutfall fer hækkandi með kolefnishlutfalli 10,9-16,6 en er þó neðan þeirra marka þar sem búast má við að nettóbinding N í jarðvegi eigi sér stað.

25. Tafla. Nítur og kolefni í efstu 30 sm jarðvegs

Jarðvegur, staður, sýnitökuár	Rþ. < 2 mm ^a	C	N	C	N	C/N	Vr. ^b
	g/cm ³	tonn/ha		% í þurrefni			Vatn g /cm ³
Geitasandur 1990	1,59	7,0	0,64	0,146	0,0134	10,9	0,48
Mýrdalssandur við Vík 1990	1,44	2,6	0,28	0,06	0,0065	9,2	0,55
Sandjörð Vindheimum 2003	0,91	44,5	3,28	1,63	0,12	13,6	0,39
Móajörð Gunnarsholti 1990 ^c	0,91	65,0	5,73	2,38	0,21	11,3	0,69
Móajörð Korpu, 2003	0,81	74,6	6,32	3,07	0,26	11,8	0,31
Meljörð Korpu 2000	0,69	42,2	3,52	2,04	0,17	12,0	
Jaðar ^d Korpu, 2003	0,59	87,4	7,79	4,94	0,44	11,2	0,37
Mýrarjörð, Korpu 2000	0,37	124,3	10,10	11,2	0,91	12,3	
Mýrarjörð, Hvanneyri, 2003	0,37	308,6	18,54	27,8	1,67	16,6	0,78

a. Rþ.: rúmþyngd, g jarðvegur /cm³

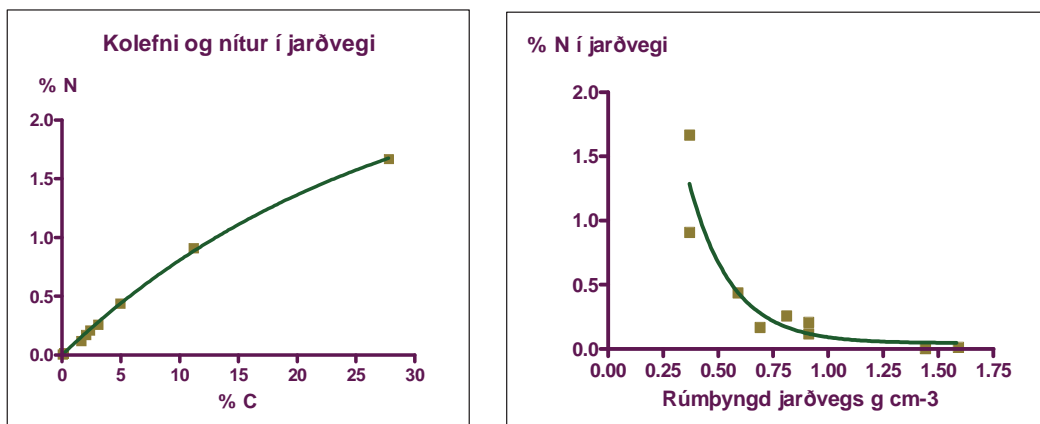
b. Vr. : vatnsrýmd, g vatn/cm³, vatnsmagn í jarðvegi við 10 kPa vatnsspennu

c. Gunnarholt Norðurtún eftir endurvinnslu, gamalt tún

d. Jaðar mýrar og móa

¹⁵⁹ Ólafur Arnalds og Grétar Einarsson 2003. Ýmir: Rannsóknaverkefni tileinkað íslenskum jarðvegi.

Hlutfall kolefnis og níturs C/N í jarðvegi segir nokkuð til um hvort níturlosun eða binding er ráðandi í jarðvegi. Það á einnig við um C/N hlutfall í plöntuleifum og öðrum lífrænum leifum í fyrstu eftir að þær falla til í jarðveg. Við C/N milli 20 og 30 er talið að jafnvægi sé milli losunar og bindingar N í jarðvegi, við lægra hlutfall eykst laust N (NH_4^+ og NO_3^-) í jarðvegi en minnkar við hærra hlutfall.¹⁶⁰



8. mynd. Kolefni og nítur í sýnum af íslenskum jarðvegi í 25. Tafla.

Náin fylgni er á milli kolefnis og níturs í jarðvegi:

$$\% N = 2,615 * (1 - \exp(-0,03681 * \% C)) \quad R^2 = 0,999, \quad S_{y.x} = 0,0194$$

Nokkru lakari fylgni er á milli rúmþyngdar og níturmagns í jarðvegi:

$$\% N = 8,499 * \exp(-5,198 * \text{rúmþyngd g/cm}^3) \quad R^2 = 0,86 \quad \text{og} \quad S_{y.x} = 0,231$$

Hlutfall C/N í lífrænum efnum er mjög breytilegt, lágt í örverum, jarðvegi og belgjurtum og grænum blöðum plantna, nokkru hærra í lífrænum hluta búfjáráburðar en hátt í hálm og sagi, 26. tafla.

26. tafla. Algengt hlutfall kolefnis/níturs í nokkrum lífrænum efnum. Heimildir¹⁶¹ nema um C/N í búfjáráburði¹⁶²

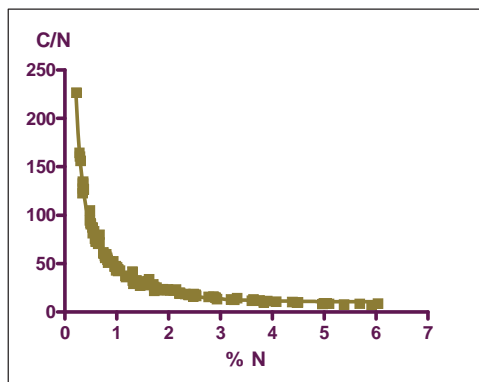
	C:N hlutfall
Örverur	6-12
Moldarefni humus	10-12
Belgjurtaleifar og grænáburður	10-25
Búfjáráburður	25-30
Kornhálmur	60-80
Sag	400

¹⁶⁰ Vefsíða um níturhringrás: http://filebox.vt.edu/users/chagedor/biol_4684/Cycles/Ncycle.html frá Virginia Polytechnic Institute and State University (<http://www.vt.edu/>).

¹⁶¹ http://filebox.vt.edu/users/chagedor/biol_4684/Cycles/Mineralization.html

¹⁶² Referat af forelæsingar over gödningslære 1950. De Studerenes Råd ved den kgl. Veterinær- og Landbohøjskole 1958.

Ítarlegri listi yfir %N, C/N, vatnsinnihald og rúmþyngd í fjölda sýna af ólíkum uppruna, plöntuleifum, úrgangi úr fisk- og kjötvinnslu, búfjáraburðartegundum, heimilis- og iðnaðarúrgangi, hálmi, þurr-og votheyi er á vefslóðinni neðanmál¹⁶³.



9. mynd. N í plöntuleifum og C/N hlutfall.

Aðhvarfslíking: $C/N = 128,2 * \exp(-1,266 * \%N) + 750,5 * \exp(-8,534 * \%N) + 10,56$

Jafna 3

$Y = C/N$ og $x = \% N$ í þurrefni í plöntusýni. Mátgæði (e. goodness of fit): Df (e. degrees of freedom) 105,

$R^2 = 0,994$, staðalfrávik frá línu (Sy.x): 3,15 C/N

Vöxtur lífmassa í jarðvegi og binding N í lífmassanum á sér stað við hátt C/N hlutfall (>30) þegar nóg er af kolefnissamböndum, t.d. úr kornhálmi eða sinu. Þegar lífmassinn hefur tekið til sín það nítur sem hann getur og hefur orku til (kolefnissambönd) verður níturskortur til þess frumur lífmassans rofna og nítur losnar sem ammóníum. Örverur hverfa þó ekki alveg og bakteríur ummynda ammóníum fyrst í nítít, NO_2^- , (nítrosomonas) og síðan í nítat, NO_3^- (nítrobacter).

Umsetning kolefnis og níturs úr plöntuleifum í jarðvegi ræðst af efnasamsetningu plöntuleifanna. Hlutfall C/N endurspeglar að vissu marki efnasamsetningu og þroska plantna. Hlutfallið fer hækkandi með vexti og þroska um leið og níturhlutfall í þurrefni (prótein hlutfall) fer lækkandi en kolefnis hlutfall tekur minni breytingum. Náin fylgni er á milli C/N hlutfalla og hlutfalls N í plöntum 9. mynd. Eins og kemur fram síðar reynist níturlosun úr plöntum fylgja heildar N % í þurrefni mun betur en C/N hlutfall, 28. tafla.

¹⁶³ <http://compost.css.cornell.edu/OnFarmHandbook/apa.tabal.html>

27. tafla. Hlutfall kolefni/níturs í plöntum. Úr gagnasafni í norrænu samstarfsverkefni¹⁶⁴ um rannsóknir á niður broti plöntuleifa. Sýni af plöntutegundum, sem hafa verið í ræktun og í tilraunum hér á landi.

Latnesk heiti	Íslensk heiti	Plöntuhluti	% C	% N	% prótein	C/N
A. Belgjurtir						
<i>Trifolium pratense</i>	Rauðsmári	Blöð, stönglar	43,9	2,90	18,2	15,1
<i>Trifolium repens</i>	Hvítsmári	Blöð, stönglar	43,5	4,47	27,9	9,7
“	“	Blöð, stönglar	45,0	4,49	28,0	10,0
<i>Lupinus angustifolius</i>	Alaska lúpína	Blöð, stönglar	45,4	1,97	12,3	23,1
Korn						
<i>Hordeum vulgare</i>	Tvíraða bygg	Græn blöð	53,4	6,03	37,71	8,9
<i>Hordeum vulgare</i>	“	Græn blöð	41,3	1,80	11,24	22,9
<i>Hordeum vulgare</i>	“	Hismi	42,4	1,83	11,41	23,2
<i>Hordeum vulgare</i>	“	Hismi	42,5	1,31	8,18	32,4
<i>Hordeum vulgare</i>	“ yrki Súla	Hálmur	43,0	0,59	3,68	72,9
<i>Hordeum vulgare</i>	“	Hálmur	45,0	0,49	3,05	91,8
B. Grastegundir						
<i>Dactylis glomerata</i>	Axhnoðapuntur	Græn blöð	47,7	3,32	20,78	14,4
<i>Lolium perenne</i>	Fjölært rýgresi	Græn blöð	42,9	2,38	14,88	18,0
<i>Dactylis glomerata</i>	Axhnoðapuntur	Gras	43,4	2,32	14,47	18,7
<i>Dactylis glomerata</i>	Axhnoðapuntur	Græn blöð	43,9	2,22	13,86	19,8
<i>Festuca pratensis</i>	Hávingull	Græn blöð	41,7	1,83	11,42	22,8
<i>Agrostis capillaris</i>	Hálingresi	Græn blöð	45,4	1,97	12,28	23,0
<i>Phleum pratense</i>	Vallarfoxgras	Gras	50,1	2,14	13,37	23,4
<i>Lolium perenne</i>	Fjölært rýgresi	Gras	42,4	1,44	9,02	29,4
<i>Lolium multiflorum</i>	Sumarrýgresi	Gras	42,0	1,36	8,52	30,9
<i>Poa pratensis</i>	Vallarsveifgras	Gras	43,8	1,39	8,71	31,5
<i>Poa pratensis</i>	Vallarsveifgras	Sina	42,6	1,18	7,37	36,1
<i>Festuca rubra</i>	Tínvingull	Sina	43,2	1,02	6,36	42,4
<i>Lolium multiflorum</i>	Sumarrýgresi	Gras	44,4	1,01	6,29	44,0
<i>Phleum pratense</i>	Vallarfoxgras	Gras	45,6	1,03	6,43	44,3
<i>Alopecurus pratensis</i>	Háliðagras	Sina	42,3	0,83	5,19	51,0
C. Aðrar nytjaplöntur						
<i>Linum usitatissimum</i>	Hör, spunalín	Græn blöð	46,3	2,10	13,1	22,0
“	“	Blöð, stönglar	50,8	1,59	9,9	31,9
“	“	Stönglar	54,4	1,30	8,1	41,8
“	“	Blöð, stönglar	46,2	1,00	6,2	46,2
“	“	Blöð, stönglar	48,7	0,93	5,8	52,4
“	“	Stönglar	45,2	0,61	3,8	74,1
“	“	Stönglar	46,0	0,35	2,2	131,4
<i>Raphanus sativus</i>	Ætihreðka	Græn blöð	38,9	3,83	23,9	10,2
<i>Raphanus sativus</i>	“	Blöð, stönglar	45,9	2,52	15,8	18,2

¹⁶⁴Stenberg B. o. fl. (2004), Jensen L.S. o. fl. (2005), Bruun S. o. fl. (2005), Henriksen T.M. o. fl.(2007)

Umsetning plöntuleifa í jarðvegi. Norræna NIR verkefnið

Umsetning kolefnis og níturs úr plöntuleifum í jarðvegi hefur verið viðfangsefni fjölda rannsókna um og eftir aldamótin 2000. Ástæður eru einkum umhverfissjónarmið (losun koltvísýrings og níturoxíða, útskolun nitrats) og áhersla á hagkvæma og umhverfisvæna notkun níturáburðar í samræmi við framboð N í jarðvegi.

Losun kolefnis og níturs úr plöntuleifum var viðfangsefni norræns samstarfsverkefnis og var í því skyni safnað 249 sýnum af nytjajurtum í Danmörku, Finlandi, Íslandi, Noregi og Svíþjóð. Sýnin spanna mikla breidd í C/N hlutfalli og heildarmagni C og N og dreifingu í trénishlutum og frymi samkvæmt þrepagreiningu (SCD, Stepwise Chemical Digestion eða van Soest aðferð) og nær innrauðri mælitækni (NIR near infrared reflectance).

Fyrirfram var kunnugt að með van Soest mælingum (greining trénis og frymis í efnaflokkum) má meta fyrirfram niðurbrotseiginleika C og N úr plöntuleifum, Stenberg o.fl. 2004. Jafnframt var kunnugt að nota má NIR aðferðina til að mæla van Soest efnaflokkum, prótein og meltanleika eins og hefur verið gert hérlendis um árabíl við efnagreiningu heysýna. Hins vegar eru mælingar með van Soest aðferð dýrar og því áhugavert að kanna hvort NIR mælingar geti komið að sömu notum við áætlanir á losun C og N úr plöntuleifum í jarðvegi.

Markmið verkefnisins var að kvarða NIR (nær innrauða) mælitækni til þess lýsa niðurbrotseiginleikum plöntuleifa í líkingum og líkani af umsetningu C og N í jarðvegi, Jensen o.fl. 2004 Stenberg o.fl. 2004. Annars vegar voru notaðar reynslulíkingar til þess að meta losun C og N úr plöntuleifum, Bruun o.fl. 2005. Hinsvegar var notað líkan af umsetningu C og N í jarðvegi, Henriksen o.fl. 2007. Í báðum tilvikum voru gerður samanburður á notkun NIR mælinga og C og N í efnaflokkum samkvæmt van Soest aðferð.

Losun kolefnis og níturs var mæld úr 76 plöntusýnum við staðlaðar aðstæður, 15°C og 10 kPa vatnsspennu í jarðvegi. NIR mælingar voru notaðar til að velja sýnin úr 249 sýnum, Stenberg o.fl. 2004, Jensen 2005.

Sýni voru 249 talsins og plöntutegundir voru 52, af grösum, korntegundum, belgjurtum, grænmeti, svonefndar trénis- og orkupleöntur og fangplöntur (catch crops). Sýni eru af plöntuhlutum, svo sem kornhálm, sinu grastegunda, ofanjarðarluta, grænum blöðum, axhluta, hismi og ofanjarðarluta. Sýni voru alls 249 og af þeim voru fyrst valin 114 samkvæmt NIR greiningu þar sem allt NIR litrófið var notað. Að því loknu niðurstaðan staðfest með því að N (prótein = 6,25 xN), tréni (neural detergent fiber) og meltanleiki allra sýna reiknaður af NIR mælingum með aðferðum sem notaðar eru á fóðursýni. Af sýnunum 114 voru loks valin 76 sýni eftir greiningu C og N í frymi (neutral detergent solubles), sellulósa, hemisellulósa og ligníni með afbrigði af van Soest aðferð, Stenberg o.fl.2004, Jensen L.S. o.fl.2005 og T.M Henriksen o.fl. 2007. Þessi sýnafjöldi (76 sýni) var hæfilegur í mælingar á losun kolefnis og níturs við staðalaðstæður í tveimur umferðum á 5 rannsóknastofum. Að meðaltali stóð hver umferð losunar mælinga í 212 daga.

Lífefni í plöntum og níturlosun.

Samfylgni (correlation) á milli níturlosunar og einstakra efnaflokka í plöntum er borin saman í 28.tafla. Níturlosun fylgir vel heildar N í þurrefni plantna og N leysanlegu í sápulausn (neutral detergent soluble N). Algeng viðmiðun C/N hlutfall í plöntum reyndist mun verr og sama á við um aðra efnaflokka (ekki sýndir í töflunni) sellulósa, hemisellulósa, holosellulósa og viðarefni (lignín).

Níturlosun úr plöntuleifum fylgir best heildarmagni níturs í þurrefni á seinni hluta losunartímans en vatnsleysanlegu N í byrjun. Fylgni níturlosunar við sápuleysanlegt N er nánast eins og við heildar N.

Á 10 og 11. mynd er fylgni níturlosunar við heildar N og sápuleysanlegt N í plöntuleifum. Ferlinu á 10. og 11. mynd er lýst með Boltzmann sigmoíð aðhvarfslínu en líking hennar er á forminu:

$$Y = \text{Botn} + (\text{Toppur} - \text{Botn}) / (1 + \exp((h - X)/b))$$

Botn í aðhvarfslíkingunni er minnsta N losun og toppurinn er mesta losun N (mg N/ g þurrefni í plöntu). Við helmingatöluna h (mg NDS-N/g þurrefni) er losunin mitt á milli mestu og minnstu losunar (mg N/g þurrefni). Því hærri sem hallatalan b er þeim mun flatari er aðhvarfslínan.

Aðhvarf fyrir mælingar eftir 42 og 80 daga við 15°C eða 630 og 1200 daggráður:

$$Y = -3,255 + (59,93 - 3,255) / (1 + \exp((46,28 - X) / 11,71)) \quad 42 \text{ dagar } R^2 = 0,85 \quad \text{Líking 1}$$

$$Y = -3,009 + (59,93 - 3,009) / (1 + \exp((46,28 - X) / 11,71)) \quad 80 \text{ dagar } R^2 = 0,84 \quad \text{Líking 2}$$

Y: Losun mg N g⁻¹ þurrefni í plöntu, X: NDS-N mg g⁻¹ þurrefni í plöntu

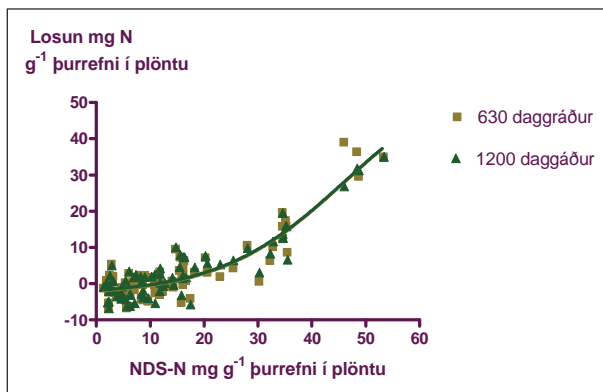
Fjöldi plöntusýna 76

Hámarkslosun: 59,9 mg N g⁻¹ þurrefni í plöntu

Staðalfrávik frá línu (S_{y.x}) = 3,57 mg N g⁻¹ þurrefni í plöntu

28. tafla. Samband níturlosunar úr plöntuleifum í jarðvegi við leysanlegt C og N (NDS neutral detergent soluble C og N), holosellulósa (holocellulose = cellulose + hemisellulose) og C/N hlutfall í plöntum). Allar mælistærðir í mg í g af plöntuþurrefni. Eftir Jensen L. S. o.fl. 2005.

Dagar frá byrjun losunarmælinga	4.	10	22.	42.	79.	133.	217.
Óháð mælistærð, x	Fylgnistuðlar (Pearsons correlation coefficients) r, n=76						
Heildar N	0,72	0,86	0,90	0,94	0,94	0,94	0,92
Vatnsleysanlegt N	0,76	0,87	0,91	0,92	0,90	0,87	0,82
Sápuleysanlegt N (NDS-N)	0,72	0,85	0,91	0,93	0,94	0,94	0,92
C/N hlutfall	-0,31	-0,45	-0,50	-0,56	-0,62	-0,61	-0,64



10. mynd. Áhrif sápuleysanlegs N (NDS-N, neutral detergent soluble N) í plöntum á níturlosun úr plöntuleifum í jarðvegi. Línuritíð sýnir losun eftir 42 daga og 80 daga við 15°C (sem samsvarar 620 og 1200 daggráðum) sem fall af leysanlegu N.

Fylgni losunar við heildar N í plöntu er litlu lakari en við NDS-N, en mæling heildar N er mun auðveldari en mæling NDS-N (van Soest aðferð):

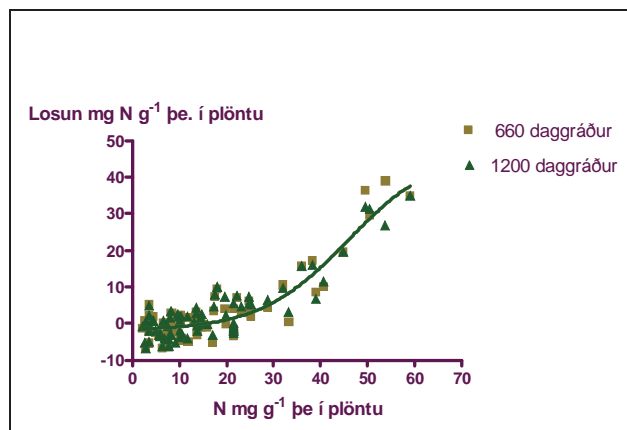
$$Y = -1,90 + (47,20 - 1,90) / (1 + \exp((45,76 - X) / 9,334)) \quad df=150, R^2=0,83$$

Jafna 3

Y: Losun mg N g⁻¹ þurrefni í plöntu, X: NDS-N mg g⁻¹ þurrefni í plöntu

Hámarkslosun: 47 mg N g⁻¹ þurrefni í plöntu

Staðalfrávik frá línu 3,62 mg N g⁻¹ þurrefni í plöntu



11. mynd. Áhrif heildar N í plöntum á níturlosun úr plöntuleifum í jarðvegi.

Verkefni: Hve mikið N gæti losnað í jarðvegi úr eftirtöldum plöntum miðað við 4. Líkingu (1) Úr hálmsýni með 0,6 % N í þurrefni, (2) úr rauðsmára með 2 % N, (3) úr einærri lúpínu með 3% N og (4) úr hvítsmára með 4,5% N.

Hve mikið N gæti losnað úr hálminum og úr lúpínunni? Umreiknið í kg/tonn plöntuleifar

Losun N úr plöntuleifum og nítursambönd í plöntum. Niðurstöður úr norræna níturverkefninu

Níturlosun úr plöntuleifum fylgir þremur mismunandi tímaferlum, Jensen, Lars Stoumann og fleiri (1995):

1. Stöðug og hröð losun níturs (net nitrogenmineralization).
2. Binding (net immobilization) N í skemmri eða lengri tíma með eftirfylgjandi oft hægri losun N.
3. Viðvarandi binding svo mörgum mánuðum skiptir.

Jensen o.fl. (2005) könnuðu hvaða efnaflokkar í plöntum skýra best níturlosun úr plöntuleifum á mismunandi stigum losunar (dagar frá byrjun losunarferlis til 217 daga frá byrjun). Könnuð var fylgni (Pearson correlation coefficient, r) níturlosunar og bindingar við kolefni og nítur, heildar magn C og N, atnsleysanlegan hluta, sápuleysanlegan (neutral detergent soluble, NDS-N og NDS-C), C og N í hemisellulósa, sellulósa, holosellulósa og ligníni. Einnig var fylgnin metin fyrir C/N hlutföll í öllum þessum þáttum.

Styrkur heildar N í plöntum, vatnsleysanlegt N og sápuleysanlegt N skýrðu losun og binding best. C/N hlutföll reyndust illa en af þeim hefur hlutfall heildamagns C og N verið algeng viðmiðun. Heildar N reyndist besta viðmiðið á seinni hluta losunartímans en á fyrri hluta losunartímans var NDS-N lítið eitt betra. Mæling á heildar N er algeng og einfaldari en van Soest efnagreining, sem mælingar trénis og sápuleysanlegs N byggjast á, eru fyrirhafnarmeiri og dýrari en mæling á heildar N.

Með þessar niðurstöður í huga er styrkur heildar N hafður til viðmiðunar við skýringar á mismunandi níturlosun og bindingu N, eins og lýst er að ofan í 1. til 3. lið. Einnig eru tímaferli níturlosunar sýnd í línuritum.

29. tafla. Ferli níturlosunar úr plöntum með mismunandi styrk níturs í ofanjarðarhluta plantna.

			Hvítsmári	Axhnoða-punktur	Alaska lúpína	Gulrófna-plöntur
			Blöð og stönglar			
Heildar N		mg N g ⁻¹ þe.	44,9	23,2	19,7	11,7
Nettóbinding	<i>Tímabil</i>	<i>Dagar</i>		<i>0-10</i>	<i>0-133</i>	<i>0-21</i>
	Binding	mg N g ⁻¹ þe		-0,8**	-4,9 ns	-5,2**
Nettólosun N	<i>Tímabil</i>	<i>Dagar</i>		<i>10-217</i>	<i>133-219</i>	<i>21-217</i>
	Losun	mg N g ⁻¹ þe		5,9**	17,6***	4,3 ns
Nettólosun/ nettóbinding	<i>Tímabil</i>	<i>Dagar</i>	<i>0-219</i>	<i>0-217</i>	<i>0-219</i>	<i>0-217</i>
	Alls	mg N g ⁻¹ þe	22,4**	5,1**	12,6**	-0,9 ns

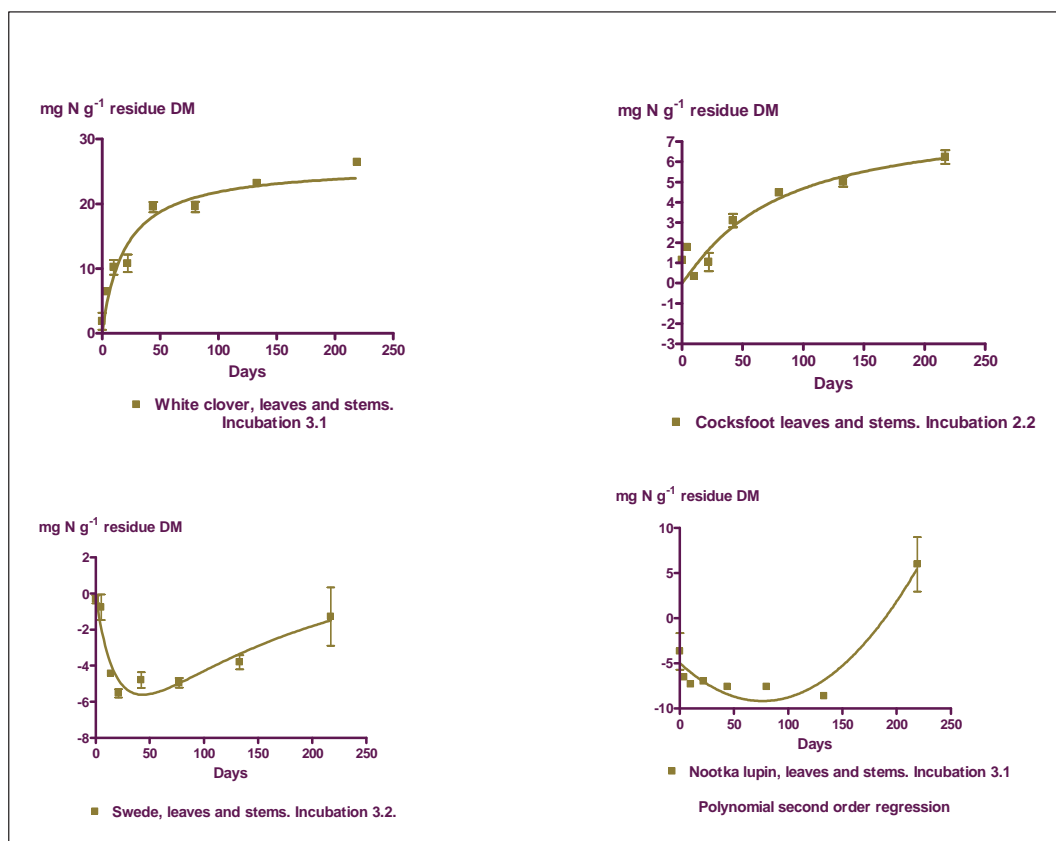
Ferli N umsetningar úr plöntuleifum í jarðvegi skipt í tvö tímabil eða áfanga: tímabil N nettó bindingar (net immobilization) og tímabil N nettó losunar (net mineralization), þar sem það á við. Athuglvert er að losunin úr Alaska lúpínu (tafla 32) verður mjög seint (eftir 133 daga) en er þá hröð og meiri en vænta má miðað við N styrk hennar og N styrk og losun úr axhnoðapunti. Sama var raunin með sýni af stönglum af gul lúpínu losunarferlið var með sama hætti og ferli N losunar Alaska lúpínunnar og lúpínutebundirnar skera sig úr öðrum plöntum með hraðri losun N eftir 133 daga langt tímabil níturbindingar.

30. tafla. Heildar N og hlutdeild bindingar og losunar í heildar N.

	Heildar N í plöntusýni	1. áfangi	2. áfangi
		Nettó binding	Nettó losun
	mg N g ⁻¹ þe.	% af heildar N	
Hvítsmari, blöð og stönglar	44,9	0	49,9
Axhnoðapuntur, blöð og stönglar	23,2	3,5	22,0
Alaska lúpína blöð og stönglar	19,7	24,9	64,1
Gulrófnaplöntur blöð og stönglar	11,7	44,4	-7,7

31. tafla. Hraði níturbindingar og losunar úr blöðum og stönglum 4 plöntutegunda.

	Heildar N	Nettóbinding N		Nettólosun N	
		Tímabil		Tímabil	
	mg N g ⁻¹ þurrefni	Dagar	mg N g ⁻¹ þe dag ⁻¹	Dagar	mg N g ⁻¹ þe dag ⁻¹
Hvítsmari, blöð og stönglar	44,9	0	0	0-219	0,112
Axhnoðapuntur, blöð og stönglar	23,2	0-10	-0,010	10-217	0,028
Alaska lúpína blöð og stönglar	19,7	0-133	-0,020	133-219	0,170
Gulrófnaplöntur blöð og stönglar	11,7	0-21	-0,248	21-217	0,022

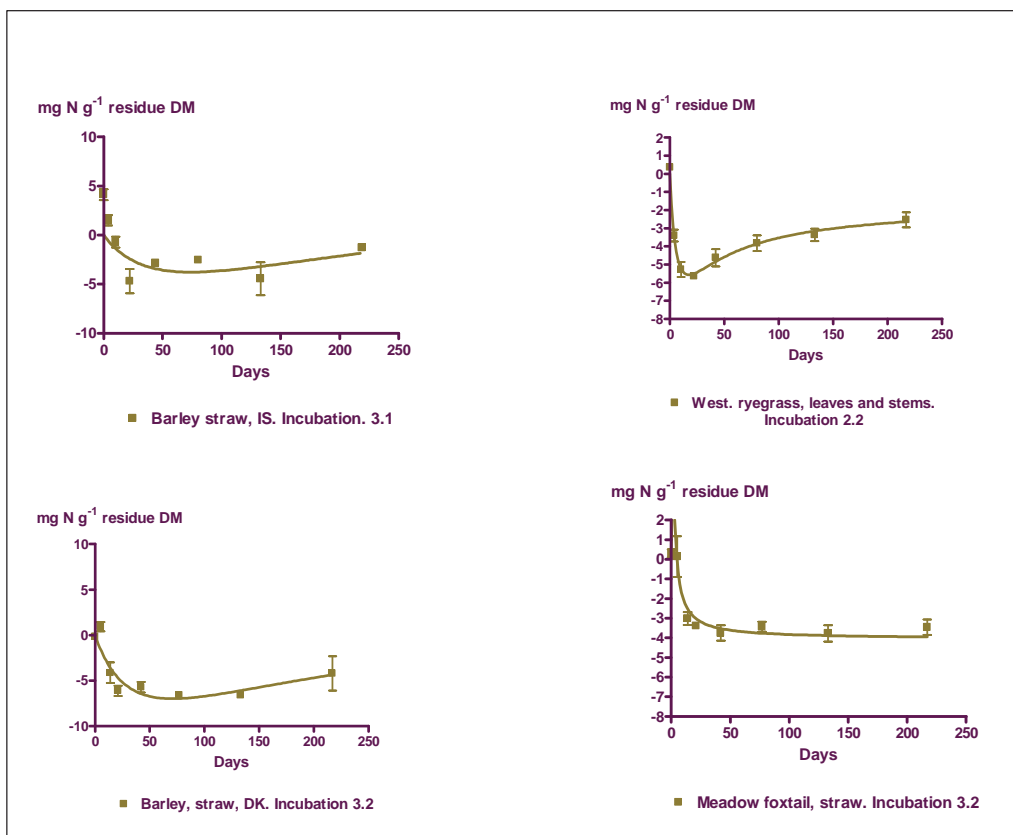
**12. mynd.** Dæmi um tímaferli níturlosunar úr plöntum 1.

Nettó níturlosun úr hvítsmáranum er hröð og svarar til 2,24% N í þurrefni eða 50% af heildarmagni N 4,49% í þurrefni. Losunin er samfelld í um sjö mánuði.

Losunarferli N úr axhnoðapunti hefst með því að nítur er bundið fyrstu 10 dagana en aðeins 0,08% af N í þurrefni þunstsins., eftir það tekur við fremur hæg losun sem nemur 22 % af heildar N í grasinu.

Losunarferli N úr Alska lúpínu einkennist af löngu tímabili bindingar (133 dagar) og hraðri losun eftir það. Alls losnaði um 64% af heildar N ofanjarðarhluta lúpínunnar.

Nettóbinding N úr blöðum og stönglum gulrófnaplantna er hröð og um 44% af heildar N í plöntunum binst í jarðvegi á 21 degi. En síðan verður hægfara nettó-losun N í um 7 mánuði og er þá að lokum aðeins um 8 % af heildar N í plöntunum bundið í jarðvegi



13. mynd. Tímaferli nettó losunar og bindingar níturs úr plöntum í jarðveg .

32. tafla. Lífefni í plöntusýnum.

Plöntutegund	Plöntu hluti	Heildar N	NDScvcs	Holo-cellcvcs	LIGNcvcs	Total C	C/N	Holocell-C/ total N	
		mg g ⁻¹ þurrefni í plöntusýni							
Hvítsmári	Blöð og stönglar	44,9	34,6	92	24,5	450	10,0	2,0	
Axhnoðapunktur	Gras	23,2	18,3	248	7,5	434	18,7	10,7	
Alaska lúpína	Blöð og stönglar	19,7	16,2	181	30,0	454	23,1	9,2	
Gulrófur	Blöð og stönglar	11,7	10,2	250	43,5	442	37,7	21,4	
Westerwold rýgresi	Gras	10,1	8,7	256	14,2	444	44,1	25,5	
Háliðagras	Sina	8,3	6,1	286	11,2	423	50,9	34,4	
Bygg, cv. Súla	Hálmur	5,9	4,6	283	20,7	430	73,0	48,1	
Bygg straw DK	Hálmur	2,9	1,9	363	35,2	473	160,9	123,4	

Losun kolefnis úr vallarfoxgrasi.

Bornar voru saman fjórar aðhvarfslíkingar fyrir ferli kolefnislosunar (losun C vs dagar) úr vallarfoxgrasi í jarðvegi við 15°C og vatnsspennu 10 kPa í jarðvegi. Vallarfoxgrasið var notað til samanburðar á losunarmælingum í 10 mælingaröðum, sem hver stóð í að meðtali 117 daga.

Líkingar eru einþættar og tvíþættar veldisvísislíkingar og hyperbólur. Aðhvörf voru reiknuð í Graph Pad tölfræðiforriti og skyldar líkingar (e. nested equations, þ.e. einþættar og tvíþættar líkingar sömu gerðar) voru bornar saman með F prófi, en óskyldar (nonnested) með Akaike prófi (Akaike's Information Criterion, AICc). Nánari grein er gerð fyrir samanburðinum í Viðauka 7. Niðurstaðan er að tvíþætt veldisvísilíking sé að besti kosturinn til að meta ferli kolefnislosunar fyrir vallarfoxgrasið.

$$y = 31,7 \cdot (1 - \exp(0,1683 \cdot x)) + 41,8 \cdot (1 - \exp(0,00148 \cdot x))$$

y = Losun kolefnis % af C í vallarfoxgrasi, x = dagar frá byrjun losunar

Samkvæmt tvíþættari veldisvísislíkingu er auðleystasti forði kolefnis í vallarfoxgrasinu 31,7% af heildar C og helmingur hans losnar á rétt rúmum 4 dögum. Þessi forði (B) tæmist á 8 vikum við þau skilyrði sem voru við mælingarnar 15 °C og vatnsspennu 10 kPa í jarðvegi. Eftir það tekur við losun úr torleystari forða (A).

Þótt forði A megi heita ómarktæk stærð (meðaltal ± staðalskekkja er 41,8 ± 97,4 % af heildar C í vallarfoxgrasi) er hann engu að síður hluti af heildarlosun kolefnis eins og sjá má í töflu og aðhvarfslínan fyrir heildarlosun fellur vel að mælingum.

Kolefni leysanlegt í sápulausn (neutral detergent soluble C, NDS-C) er 53,8% af heildar kolefni í vallarfoxgrasinu. Til samanburðar er losun kolefnis mæld á 217 dögum 43,2 % af heildar kolefni og hafi það komi úr NDS hlutanum, kolefnissamböndum í frymi, þá hefur ekkert af trénishlutanum brotnað niður á þessum tíma.

33. tafla Samanburður aðhvarfslíkinga fyrir osun kolefnis úr vallarfoxgrasi í jarðvegi.

	Hyperbola	Tvíþætt veldisvísislíking	
Stuðlar (parameters)		Forði A	Forði B
Ymax: Hámarksloun C kg/ha	40,3	41,8	31,7
k hraðafasti		0,00148	0,1683
Helmingatími losunar dagar	5,9	468	4,1
Staðalskekkja (standard error)			
Ymax: Hámarksloun C kg/ha	0,5	97,4	1,02
k hraðafasti		0,00442	0,0106
Helmingatími losunar dagar	0,3		
Vikmörk (95% Confidence Intervals)			
Ymax	39.3 to 41.3	-149 to 233	29.7 to 33.7
K		0.0 to 0.010	0.148 to 0.189
Helmingatími losunar dagar	5.2 til 6.5		

Aðhvarf metið. (Goodness of Fit)	Hyperbola	Tvíþætt veldisvísislíking
Degrees of Freedom	295	293
R ²	0,836	0,850
Kvaðratsumma	4958	4555
Sy.x	4,1	3,9

34. tafla. Losun kolefnis úr tveimur hlutum kolefnisforða í vallarfoxgrasi við niðurbrot í jarðvegi.

Dagar	Losun % af heildar C í vallarfoxgrasi		
	Alls	B	A
7	22,4	21,9	0,4
14	29,5	28,7	0,9
28	33,1	31,4	1,7
56	35,0	31,7	3,3
112	38,1	31,7	6,4
168	40,9	31,7	9,2
217	43,2	31,7	11,5

35. tafla. Flokkar lífrænna efna í vallarfoxgrasi

NDS-C	HEMI-C	CELL-C	LIGN-C	Alls
mg C g ⁻¹ þurrefni				
269	119	106	6	501
% af total C				
53,8	23,9	21,2	1,1	100,0

Lífræn efni í plöntuleifum og kolefnislosun

Fylgni var mest milli holosellulósa C (sellulósi og hemisellulósi) og kolefnislosunar úr plöntuleifum við miðað við fylgnisstuðla, en minni við við N og C í öðrum efnaflokkum, eins og dæmi eru sýnd um í 36. töflu, Fylgnisstuðlar kolefnislosunar við C og N í öllum efnaflokkum eru birtir í grein eftir Lars Stoumann Jensen og fleiri (2005).

36. tafla. Samband kolefnislosunar úr plöntuleifum í jarðvegi við heildar N í plöntusýni, leysanlegt C (NDS neutral detergent soluble C), heildarsellulósa (holocellulose = cellulose + hemisellulose), C í viðarefni (lignini) og heildar C í plöntusýni. Allar óháðar stærðir í mg í g af plöntuþurrefni og losun kolefni í % af heildar C í plöntum. Eftir Jensen L.S. o.fl. 2005

Dagur	4.	10.	22.	42.	79	133	217
Óháð mælistærð, x	Fylgnistuðlar (Pearsons correlation coefficients), n=76						
Heildar N í plöntusýni	0,73	0,77	0,74	0,69	0,69	0,63	0,54
Leysanlegt C (NDS-C)	0,67	0,73	0,76	0,77	0,77	0,76	0,73
Holosellulósa-C	-0,73	-0,79	-0,82	-0,82	-0,81	-0,79	-0,76
Viðarefnis-C (lignin-C)	-0,44	-0,46	-0,47	-0,48	-0,50	-0,51	-0,51
Heildar C	-0,50	-0,52	-0,51	-0,49	-0,48	-0,48	-0,47
C/N	-0,53	-0,60	-0,62	-0,62	-0,59	-0,55	-0,52

Fjölþætt línulegt aðhvarf

Kolefnislosun fer vaxandi með níturhlutfalli í þurrefni plantna en minnkar með kolefnishlutfalli, heildarsellulósa og ligníni.

$$y = 59,177 - 0,0539 C + 0,0980 N - 0,0584 \text{ Holocell-C} - 0,0521 \text{ Lignin-C} + 0,0856 \text{ Dagar}$$

Jafna 4

Fjöldi mælinga n = 3120 R = 0,63 R² = 0,40 Adj R² = 0,40
Staðalskekka fyrir y : 11,2

y: Kolefnislosun % af C alls í plöntusýni

C: Kolefni alls í plöntusýni C mg/g þurrefni

N: Nítur alls í plöntusýni Nmg/g þurrefni

Holocell-C: kolefni í holosellulósa (C í sellulósa og hemisellulósa) mg/g þurrefni

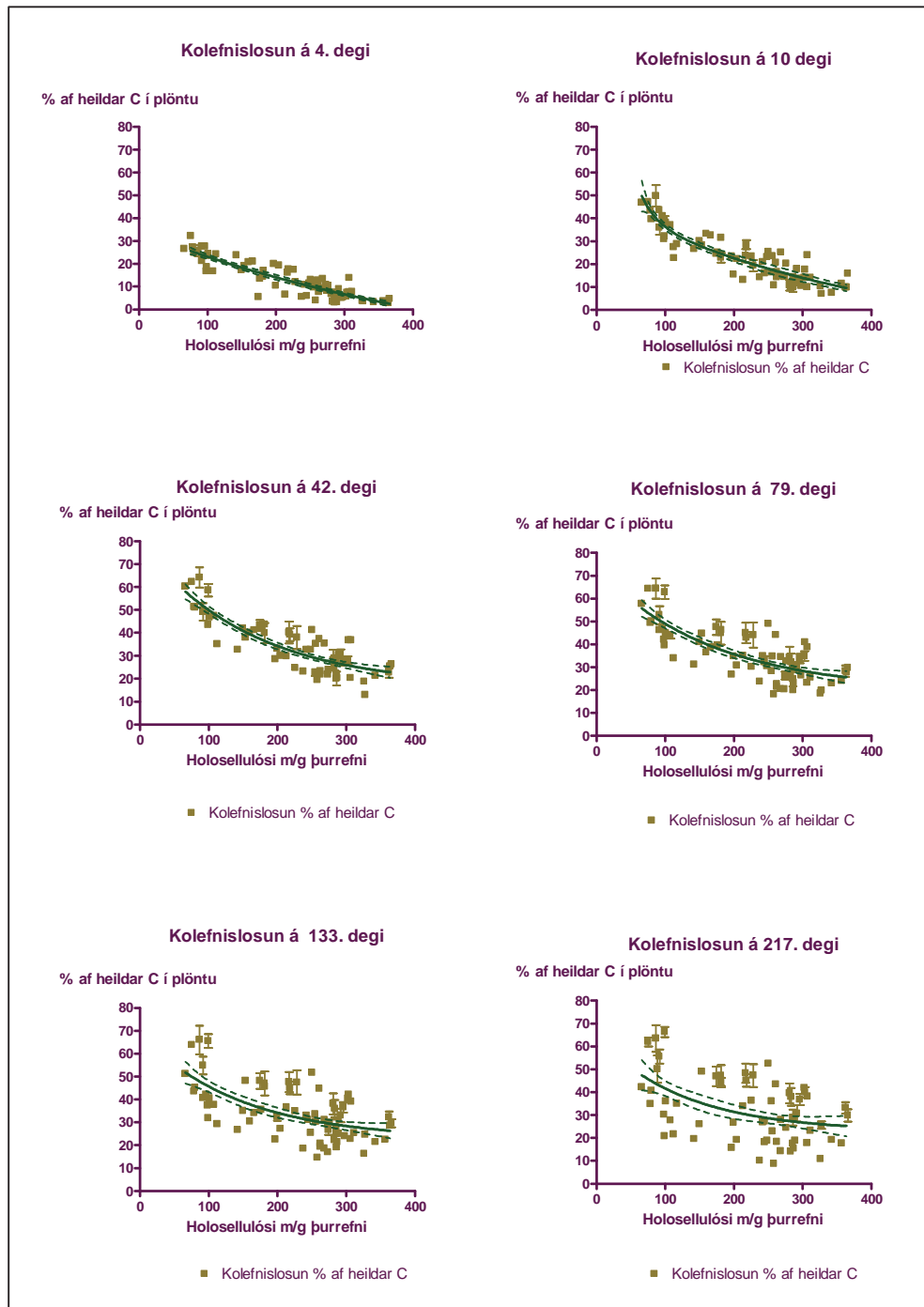
Lignin-C: Kolefni í viðarefni (lignin) mg/g þurrefni

Dagar: dagar frá byrjun losunarmælinga

Holocellulósa-C og lignin-C mæld með afbrigði af van Soest aðferð, Henrik og Breland 1999

Fjölþætt línulegt aðhvarf skýrir aðeins 40% af breytileika níturlosunar (Jafna 4) en aðhvarf holosellulósa og kolefnislosunar skýrir frá 4. degi losunartímans til 7. dags 71-81 % af breytileika en síðan minnkandi hluta og á lokadegi aðeins 21 % af heildarhlutanum, 37 tafla.

Kolefnislosunin er mjög breytileg eða frá 23-58 % af C í plöntu eftir hlutfalli holosellulósa á bilinu 366-66 mg holocellulósi í g af þurrefni miðað við 42. dag losunarmælinga.



14. mynd. Holosellulósi (sellulósi + hemisellulósi) og kolefnislosun úr plöntuleifum, mæld gildi og aðhvarfslínur. Fjöldi plöntusýna var að meðaltali 73 og endurtekningar 3.

37. tafla. Aðhvarfslíkingar niðurbrots plöntuleifa (e. one pool exponential decay function)

y = kolefnislosun % af C í plöntu, x = holosellulósi mg/ g þurrefni
 R^2 er hlutfall af breytileika (variance) mælinga sem skýrist af aðhvarfslíkingu
 $Sy.x$ er staðalfrávik fjarlægðar mældra gilda lóðrétt frá aðhvarfslínu

Dagur	Líkingar nr. 4	R^2	$Sy.x$
4	$y=61,93*(\exp(0,001955*x))-27,82$	0,77	3,60
7	$y=64,52*(\exp(0,003146*x))-15,07$	0,81	4,09
15	$y=66,34*\exp(-0,005762*x) + 5,51$	0,80	5,37
42	$y=62,99*\exp(-0,00633*x) + 16,52$	0,71	6,53
79	$y=53,65*\exp(-0,006024*x) + 19,62$	0,56	7,62
133	$y=45,89*\exp(-0,006872*x) + 22,57$	0,36	9,68
217	$y=41,29*\exp(-0,007883*x) + 22,87$	0,21	12,68

38. tafla. Kolefnislosun úr plöntuleifum sem fall af holosellulósa og dagafjölda frá byrjun losunarmælinga. Losunin er reiknuð af líkingum í 7. töflu.

Dagur	4	7	15	42	79	133	217
Holosellulósi	Kolefnislosun % af C í plöntu						
66	26,6	37,4	50,9	58,0	55,7	51,7	47,4
100	23,1	32,0	42,8	50,0	49,0	45,7	41,6
150	18,4	25,2	33,5	40,9	41,4	38,9	35,5
200	14,1	19,3	26,5	34,3	35,7	34,2	31,4
250	10,2	14,3	21,2	29,5	31,5	30,8	28,6
300	6,6	10,0	17,3	26,0	28,4	28,4	26,7
366	2,5	5,3	13,6	22,7	25,5	26,3	25,2
Frávik frá línu	± 1,43	± 1,82	± 6,77	± 3,24	± 3,65	± 4,77	± 6,61

Frávik frá línu: 95% líkindamörk fyrir bestu aðhvarfslínu (95% confidence band)

39. tafla. Nítur og holosellulósi í nokkrum sýnum úr norræna níturverkefninu

	Áborið N kg/ha	% N í þe.	Holosellulósi mg/ g þe.
Hafrar yrki Sanna	90	0,64	228,4
Sína af vallarsveifgrasi	0	1,18	281,4
Alaska lúpína	0	1,97	181,5
Hvítsmári	0	4,49	91,8
Bygghálmur yrki. Súla	90	0,59	283,3
Sumarrýgresi	100	1,36	218,7
Rauðsmári	0	1,76	153,8

Verkefni.

Hve mikið kolefni gæti mest losnað úr bygghálmi með 283 mg holosellulósa í g af þurrefni miðað við aðhvarfslíkingu á 42. degi í 37. töflu.

Losun níturs úr forða lífrænna efna í jarðvegi.

Þörf fyrir níturáburð ræðst m.a. af losun N úr níturforða jarðvegs. Hiti og vatn í jarðvegi hafa mikil áhrif á losun en einnig fer losunin að nokkru leyti eftir því hve mikill forðinn er. Gera má ráð fyrir að oft tvöfaldist losunarhraði fyrir hækkun hitastigs í jarðvegi um 10°C og að losun minnki, þegar jarðvegur þornar í réttu hlutfalli við vatn í jarðvegi (g/cm³) sem % af vatnsrýmd við kjörskilyrði (g vatn/cm³ við 10 kPa vatnsspennu).

Níturlosun mæld í jarðvegskjörnum á staðnum

Níturlosun var mæld í kornakri á móajörð á Korpu sumarið 2003. Mælingarnar voru gerðar í tveimur tilraunliðum með 4 samreitum. Tilraunaliðirnir voru (a) bygg og (b) bygg með vetrarrýgresi, sem sáð var 2002 á fyrsta ári tilraunarinnar. Reitum sem fengu 60 kg/ha N í áburði var skipt vorið 2003 og enginn N áburður borin á þar sem mælingarnar voru gerðar *Fridrik Pálmason 2006*.

Níturlosunarmælingar. Stutt lýsing

Níturlosun var mæld í jarðvegkjörnum á staðnum (in situ) eða við staðlaðar aðstæður á rannsóknastofu. Aðferðirnar voru bornar saman með því að umreikna mælingar við staðlaðar aðstæður að hitstigi og vatni í jarðvegi sem mælist á vaxtartímanum.

Níturlosunin var mæld á staðnum frá 13.maí til 29 september 2003 á tveggja vikna tímabilum þannig að laust N í jarðvegi (ammóníum- og nítrat-N) var mælt í byrjun hvers tímabils og um leið voru 30 sm stálhólkar settir 20 sm niður í jarðveg milli byggraðanna á hverjum tilraunareit og lokað með U- plaströri að ofan þannig að loft komst að en regn ekki. Hólkarnir voru teknir upp eftir tvær vikur og laust N mælt í jarðvegi úr hólkunum. Sýnin voru geymd kæld fram að skolun og efnagreiningu ekki seinna en 20 tímum eftir töku sýna.

Umreikningar á níturlosunar við staðlaðstæður að aðstæðum í felti.

Við umreikningana er gerður greinarmunur á nettólosun (e. net mineralization) og nettóbindingu (e. net immobilization):

Nettólosun fyrir hvert tímabil losunarmælinga:

$$LN(\text{Net } N_{\text{min}} \text{ at } x^{\circ}\text{C}) = LN(\text{NetminN at } 15^{\circ}\text{C} \& 10\text{kPa}) - (E_a/R) * [1/(273+x^{\circ}\text{C í akurjarðvegi}) - 1/(273+15)]$$

Jafna 5

Nettóbinding fyrir hvert tímabil:

$$LN(\text{Net } N_{\text{min}} \text{ at } x^{\circ}\text{C}) = LN(-\text{NetminN at } 15^{\circ}\text{C} 10\text{kPa}) - (E_a/R) * [1/(273+x^{\circ}\text{C í akurjarðvegi}) - 1/(273+15)]$$

Jafna 6

Munurinn á líkingunum er aðeins formerkið á NetminN (nettólosun N) í fyrsta lið líkingarinnar.

Við umreikninga frá staðlaðstæðum (hér 15°C og 10 kPa vatnsspenna) að hitastigi og vatnshlutfalli í jarðvegi (g vatn/cm³) í akri er líking Arrheniusar notuð og $Q_{10} = 2$ það er tvöföldun losunarhraða fyrir hitaaukningu um 10°C. Val á $Q_{10} = 2$ er byggt á rannsóknnum Stanfords o.fl. 1973.

Skýring á líkingunni fyrir nettólosun fyrir hvert tímabil losunarmælinga:

$$\text{LN}(\text{Net N}_{\text{min}} \text{ at } x^{\circ}\text{C}) = \text{LN}(\text{Net}_{\text{min}} \text{N við } 15^{\circ}\text{C} \ \& \ 10\text{kPa}) - (E_a/R) * [1/(273+x^{\circ}\text{C} \text{ í akurjarðvegi}) - 1/(273+15)]$$

Líking **Arrheniusar** um áhrif hitastigs á hraða efnabreytinga:

$$k = A * \exp^{(-E_a/R*T)}$$

k er hraðastuðull (e. rate coefficient), A er fasti, E_a er virkjunarorka, R er fasti (gas constant), og T er hitastig á Kelvin skala ($T = 273,1 + ^{\circ}\text{C}$)

$$R = 8.314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Leiðrétting fyrir vatnshlutfalli í jarðvegi gerir ráð fyrir að losunin sé í réttu hlutfalli við hlutfall vatnsmagns í jarðvegi af vatnsrýmd jarðvegs (e. field capacity).

Vatnsrýmd jarðvegs er vatnsmagn við 10 kPa vatnsspennu í jarðvegi.

Hlutfall vatnsmagns í jarðvegi af vatnsrýmd = g/cm³ í jarðvegi/ g vatn/cm³ við 10 kPa í sama jarðvegi.

Virkjunarorka E_a (e. activation energy) við $Q_{10} = 2$ og hitastig á bilinu 5-15°C.

E_a virkjunarorkan er reiknuð fyrir hitastig á bilinu 5-15°C

Við $Q_{10} = 2$ er $E_a = 46172.1 \text{ Joule} * \text{mole}^{-1}$

$$E_a = \text{LN}(Q_{10}) * 8,314 / (1/T_1 - 1/T_2)$$

$$T_1 = 273,15 + 5^{\circ}\text{C} = 278,15^{\circ}\text{ Kelvin}$$

$$T_2 = 273,15 + 15^{\circ}\text{C} = 288,15^{\circ}\text{ Kelvin}$$

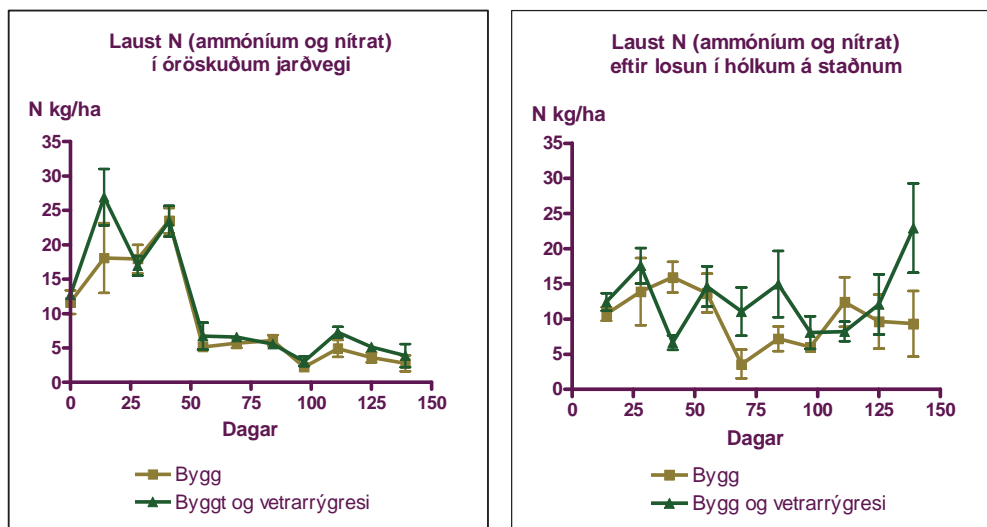
	5°C	15°C	J/mol
$Q_{10} = k_1/k_2$	T1	T2	E_a
2	278,15	288,15	46139,49

Eftir umreikning á níturlosun á hverju mæliskeiði (tvær vikur) níturlosunar frá 15°C að hitastig í jarðvegi tilraunar var níturlosun leiðrétt í réttu hlutfalli við vatn í jarðvegi tilraunareita g vatn/cm³ sem hlutfall af af kjörmagni vatns (g vatn/cm³ við 10 kPa vatnsspennu í jarðveg) . Vatn í jarðvegi var mælt í jarðvegsýnum sem tekin voru í byrjun hvers mæliskeiðs og jarðvegkjörnunum í lok hvers mæliskeiðs. Nánari umfjöllun er í Viðauka 1 úr greininni Nitrogen mineralization in situ and in laboratory in Icelandic andosol. (Icelandic Agricultural Sciences, 19 (2006) 3-13)

Laust N mælt í óröskuðum jarðvegi í byrjun losunar tímabila (á 15. mynd A) fer að á heildina litið lækkandi frá 14. til 55 dags (27. maí til 7. júlí) enda fer upptaka N í plönturætur fram á þeim tíma.

Ekki er munur á lausu N í byggreitum og reitum með byggi og vetrarrýgresi, nema á 14 degi en þá var 9 kg/ha meira N í jarðvegi þar sem rýgresi var sáð með bygginu. Áhrifin af rýgresinu árið eftir sáningu eru marktæk á 14. degi (Bonferroni próf við tvíþætta variansgreiningu). Fyrst var sáð í tilraunina 2002 og var því hugsanlegt að eftirverkun af rýgresinu kæmi fram á næsta ári sem aukið laust N. Laust N í jarðvegi segir þó

ekki alla söguna eins og fram kemur hér á eftir þegar lokaniðurstöður af losunarmælingum eru skoðaðar.



A.

B.

15. mynd. Mælingar á losun N í jarðvegi. Laust N er ammóníum- og nítrat-N mælt í 0-20 sm dýpt. Kornrækt á móajörð á Korpu 2003.

A. Laust N í byrjun losunartímabíla, þegar hólkar 20 sm að lengd eru settir niður í jarðveg

B. Laust N í lok tímabíls eftir losun/bindingu í hólkum

Laust N í óröskuðum jarðvegi er að það sem losnað hefur úr forða umfram fjarlægt N úr jarðvegi og bundið í jarðvegi (N tekið upp af plöntum, N tapað úr jarðvegi, annað hvort í formi lofttegunda eða við útskolun og N bundið í lífmassa jarðvegs eða í torleystu formi).

Laust N = N losun – N tekið upp af plöntum – N útskolun – N tap í formi lofttegunda – N bundið í jarðvegi. Laust N er ólífrænt N (N í ammóníum og nítrati) og er mælt eftir skolun úr jarðvegi með kalíum klóríðlausn. Lofttegundir eru t.d. (níturoxíð t.d. N_2O).

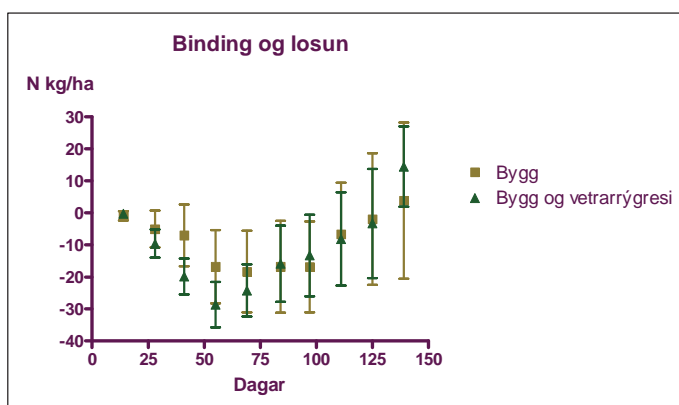
Þess má geta að níturoxíð er mjög öflug gróðurhúsalofttegund og útskolun útskolun nítrats (nítatrjónir NO_3^-) í grunnvatn er vandamál víða erlendis þar sem notkun nítrats er mikil, en um árábil hefur í löndum vestur Evrópu verið reynt að stemma stigu við óhóflegri notkun níturáburðar með reglugerðum og leiðbeiningum.

Fyrstu 14 daga mælinga í maí hefur losun N haft yfirhöndina yfir bindingu og tap N að meðtalinni upptöku N, en upptaka N hefur varla verið mikil og laust N fór vaxandi í báðum tilraunliðum, 15. mynd A og 40. tafla. Síðustu dagana í maí og þrjár vikur af júní er laust N á bilinu 18 til 27 kg/ha. Í lok júní og byrjun júlí lækkar laust N mikið og er líklegast að því valdi níturupptaka vaxandi byggplantna.

Breytingar á lausu N með tímanum eru afleiðing af breytingum á vægi losunar, taps úr jarðvegi, bindingar í jarðvegi og níturupptöku byggsins. Níturupptaka rýgresis tilraunaárið skiptir litlu máli enda var rýgresið sem sáð var 2002 að mestu horfið sumarið 2003. Áhrif rýgresisins eru eftirverkun af umsetningu leifanna af rýgresinu,

40. tafla Laust N kg/ha í öröskuðum jarðvegi í 0-20 sm dýpt í byrjun losunartímabila. Mælingar hófust 13. maí. Endurtekningar voru fjórar í blokktilraun. Korpa 2003.

Dagar frá byrjun mælinga	Dagur sýnitöku	Bygg		Byggt og vetrarrýgresi		Áhrif rýgresis	
		Meðaltal	Staðal-skekkja	Meðaltal	Staðal-skekkja	Meðaltal	Staðal-skekkja
0	13-maí	11,6	1,7	12,7	0,4	1,1	1,8
14	27-maí	18,1	5,1	26,9	4,1	8,9	6,5
28	10-jún	17,9	2,1	16,9	1,4	-1,0	2,5
41	23-jún	23,5	1,8	23,4	2,2	-0,1	2,9
55	7-júl	5,1	0,5	6,7	2,0	1,6	2,0
69	21-júl	5,7	0,7	6,6	0,6	0,9	0,9
84	5-ágú	6,1	0,8	5,5	0,3	-0,5	0,9
97	18-ágú	2,2	0,2	3,1	0,7	0,9	0,7
111	1-sep	4,9	1,2	7,3	0,8	2,4	1,5
125	15-sep	3,6	0,7	5,1	0,1	1,6	0,7
139	29-sep	2,8	1,2	3,9	1,7	1,1	2,0



16. mynd. Níturbinding og losun í jarðvegskjörnum. Laust N í lok losunartíma að frádrögnum lausu N í byrjun hvers tveggja vikna losunartímabils. Kornakur á móajörð. Korpa 2003

Í jarðvegkjörnunum á tap N við útskolun eða og upptaka N í plönturætur að vera útilokað og mismunur á ólifrænu N í kjörnunum í lok tímsbils að frádrögnum ólifrænu N í byrjun tímabils er því N losun eða binding í N forða að meðtöldum lífmassa 41. tafla.

Í jarðvegskjörnunum hefur nítur bundist í vaxandi lífmassa frá byrjun mælinga 13. maí til 7. Júlí, þar sem rýgresi var sáð með byggi ári áður en mælingar voru gerðar. Í reitum með byggi eingöngu varir bindingartíminn lengur eða til 21. júlí, 41. tafla og 16. mynd. Eftir það tók við losun sem varð alls 22 kg/ha N í byggreitum og 43 kg í byggi með rýgresi. Eftirverkun af

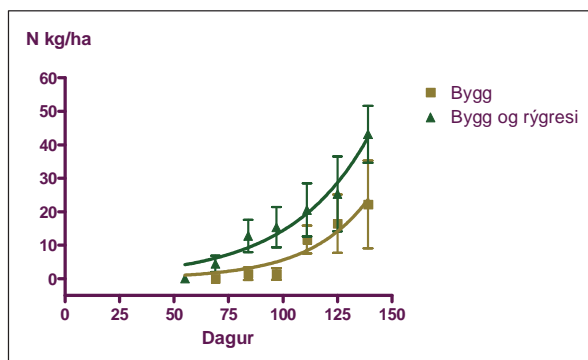
vetrarrýgresi sem sáð var 2002 varð því 21 kg/ha af N sumarið 2003 í jarðvegskjörnum þar sem upptaka og útskolun N var útilokuð. Þessi munur er þó ekki tölfræðilega marktækur.

41. tafla. Losun og binding N í jarðvegi mæld í jarðvegskjörnum á staðnum, N kg/ha. Upptaka N í plöntur og tap við útskolun útilokuð. Mælingar hófust 13. maí

Dagar		Bygg		Bygg og rýgresi		Áhrif rýgresis	
		Meðaltal	Staðal-skekkja	Meðaltal	Staðal-skekkja	Meðaltal	Staðal-skekkja
Tímabil níturbindingar							
0-14	13.05-27.05	-0,9	1,5	-0,3	1,2	0,6	1,9
14-28	27.05-10.06	-5,1	5,8	-9,6	4,4	-4,6	7,3
28-41	10.06-23.06	-7,0	9,6	-19,9	5,6	-12,9	11,1
41-55	23.06-07.07	-16,8	11,4	-28,6	7,1	-11,8	13,4
55-69	07.07-21.07	-18,3	12,7				
Tímabil níturlosunar							
55-69	07.07-21.07			4,4	2,4		
69-84	21.07-05.08	1,5	1,8	12,8	4,8	11,3	5,2
84-97	05.08-18.08	1,4	1,7	15,3	6,0	13,9	6,3
97-111	18.08-01.09	11,7	4,1	20,5	7,9	8,8	8,9
111-125	01.09-15.09	16,4	8,7	25,3	11,2	8,9	14,1
125-139	15.09-29.09	22,2	13,0	43,1	8,5	20,9	15,6

42. tafla. Áhrif rýgresis á losun N í jarðvegi í byggakri á öðru ári eftir sáningu vetrarrýgresis

Dagur	Áhrif rýgresis Losun N kg/ha	t	P gildi
84	11,3	1,04	P > 0.05
97	13,9	1,28	P > 0.05
111	8,8	0,82	P > 0.05
125	8,9	0,82	P > 0.05
139	20,9	1,93	P > 0.05



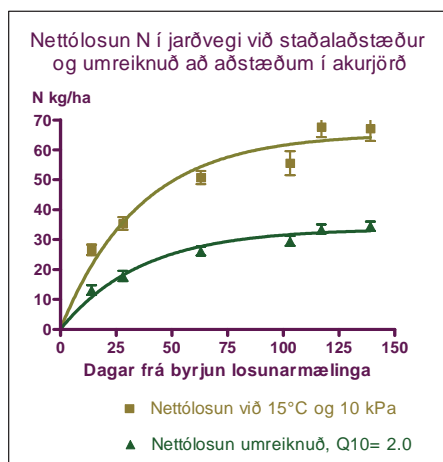
17. mynd. Uppsöfnuð níturlosun í jarðvegskjörnum á staðnum frá 7.eða 21. júlí til 29. september. Losunin byrjar fyrir þar sem vetrarýgresi var með bygginu

Þegar kemur fram í júlí og lítið er orðið eftir af lausu N í jarðvegskjörnunum, skilar N sér aftur úr lífmassanum. Þetta ferli á við það sem gerist í jarðvegskjörnunum í hólkunum, þar sem ætlað er að rætur plantna taki ekki upp N. Niðurstaðan er að þar sem bygg var eingöngu hafi 22 kg/ha N verið nýtanleg sumarið 2003 en fyrir bygg þar sem rýgresi var sáð með byggi árið áður 43 kg/ha N. Mismunurinn 20,9 kg/ha N er losun vegna rýgresis-ins sem sáð var ári áður en mælingar voru gerðar, 42. tafla. Þótt munurinn sé ekki marktækur á einstökum mælingadögum er þó líklegt að á heildina lítið auki rýgresi sem sáð er með byggi losunina sumarið eftir sáninguna.

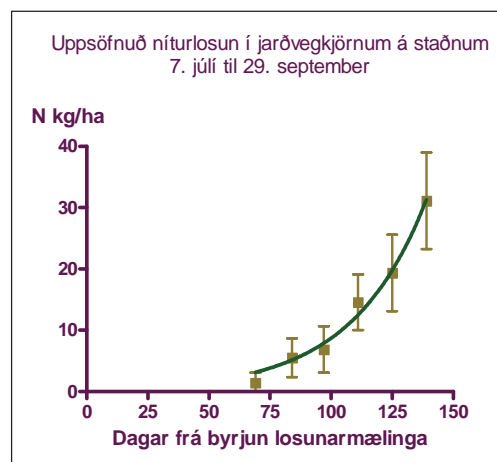
Losunarferlið verður væntanlega með öðru móti þar sem plönturnar taka upp N úr jarðvegi í samkeppni um nýtanleg næringarefni við aðrar lífverur í jarðvegi, þannig að nítur binst síður í örverum en gerist í jarðvegskjörnunum. Gera má ráð fyrir að við níturlosun í jarðvegskjörnunum, sem verður að loknum þeim tíma sem nítur binst í örverum, eigi sér stað endurlosun á því N sem örverurnar bundu í byrjun. Jafnframt er gert ráð fyrir að heildarlosunin sé sá hluti forðans sem nýtanlegur er við þann hita og það vatn í jarðvegi sem var til staðar á vaxtartímanum. Í jarðvegskjörnunum var heildarlosunin á mælingatímanum eins og áður segir 22 kg/ha N á öðru ári byggærktunar í móajarðvegi sem nær inn á mörk mels og móa en þar sem rýgresi var sáð með bygginu á fyrra árinu var losunin 43 kg/ha N.

Ekki er marktækur munur er á aðhvarfslínum fyrir níturlosun annars vegar í byggærktun með eftirverkun af rýgresi sem sáð var með byggi árið fyrir mælingarnar og hins vegar bygg í hreinrækt bæði árin 17. mynd, 42. tafla.

Níturlosun við staðlaðar aðstæður og í jarðvegskjörnum á staðnum



A.



B.

18. mynd. Nettólosun N í jarðvegi átta tilraunreita á móajörð. Byggakur á Korpu 2003.

A. Nettólosun við staðlaðar aðstæður, 15°C og 10 kPa vatnsspennu og umreiknuð að aðstæðum í jarðvegi á vaxtartíma.

B. Níturlosun mæld í jarðvegskjörnum á staðnum¹.

Mikilvægt er að fá úr því skorið hvort nota megi mælingar á níturlosun í jarðvegsýnum við ákveðið hitastig og vatnshlutfall í jarðvegi (staðlaðar aðstæður á rannsóknastofu) til þess að meta nýtanlegt N í jarðvegi með umreikningi að hita og vatnsmagni í jarðvegi á vatartímanum og fá sambærilegar niðurstöður og fást við mælingar á staðnum. Til þess þarf að umreikna losun við staðalaðstæður að breytilegu hitastigi og vatni í jarðvegi yfir vaxtartímann. Gerð verður grein fyrir þeim umreikningum síðar, en hér verður greint frá niðurstöðum af samanburði mælinga á sama jarðvegi við staðlaðar aðstæður og í jarðvegskjörnum á staðnum.

A1. Nettólosun N við 15°C and 10 kPa: $y = 65.4(1 - \exp(-0.0283x))$.

A2. Nettólosun N umreiknuð að hita og vatni mældu í akurjörð: $y = 33.7(1 - \exp(0.275x))^{165}$

C. Nettólosun mæld í tilraunareitum í byggakri : $y = 0.3266(\exp(0.03283x))$.

Byrjunargildi 0.3266 (staðalskekkja 0.3688) og hraðastuðull 0.03283 (s.e. 0.00864)

$Y =$ nettólosun N kg/ha, $x =$ dagar frá byrjun níturlosunar

Æfing: Hve mikill er nýtanlegur níturforði samkvæmt líkingum A1 og A2 Setjið líkingarnar A2 og B í Exel og og reiknið út losun á 139. degi lokadegi losunarmælinga og berið saman við nýtanlegan níturforða samkvæmt líkingu í A2.

Á 18. mynd eru niðurstöður úr tilraun á Korpu 2003 þar sem níturlosun var mæld í tveimur tilraunaliðum, (a) byggj eingöngu og (b) bygg þar sem vetrarrýgresi var sáð á byrjunarári tilraunar 2002. Lítið var eftir af rýgresinu árið 2003 og því verið að meta eftirverkun af

¹⁶⁵ Losunarhraði tvöfaldast fyrir hitaaukningu um 10°C (Q10=2) og minnkar í hlutfalli minnkum vatns í jarðvegi (g vatn/cm³ jarðvegs) frá kjörmagni vatns (g vatn/cm³ við 10 kPa vatnsspennu)

rýgresið frá árinu áður á nítur í jarðvegi. Annars vegar var níturlosun mæld í jarðvegskjörnum á staðnum¹⁶⁶ (e. nitrogen mineralization in situ) og hins vegar var losun N mæld við staðlaðar aðstæður (15 °C og vatnsspennu 10 kPa) í jafnhitaskáp (e. incubation) í jarðvegssýni teknu við tilraunreitina.

Sambærilegar niðurstöður fyrir losun N úr níturforða jarðveg fengust við staðlaðar aðstæður í rannsóknastofu og með mælingum í jarðvegskjörnum á staðnum með því með því að umreikna mælingar við staðlaðar aðstæður að hita og vatnsmagni í jarðvegi á staðnum og bera saman við heildarlosun, sem mældist í jarðvegskjörnum á staðnum við endurlosun N eftir tímabil bindingar í lífmassa jarðvegs.

¹⁶⁶ Stálhólkar voru reknir niður í 20 sm dýpt í tilraunareitunum og jarðvegskjarnar þannig afmarkaðir á staðnum. Reynt er að tryggja sama vatnsmagn í jarðvegskjörnunum og utan þeirra með því að göt voru boruð á hliðar hólkana og þeir auk þess opnir að neðan. Hins vegar er komið í veg fyrir útskolun og loftun tryggð með því að loka hólkunum með U-plaströri ofan á og opið látið snúa niður

Níturám úr lofti.

Meðal þeirra tilrauna sem Lawes og Gilbert hófu í Rothamstead 1843-1856 er þekktust tilraun í Broadbalk Field. Megintilgangur var að meta áhrif N, P, K, Na og Mg í ólífrænum efna-samböndum á uppskeru og bera saman við áhrif búfjáraburðar. Uppskeyra og jarðvegur voru efnagreind. Jarðvegsefnagreiningar gefa til kynna hvort plöntunæringarefni hafa safnast fyrir eða gengið hafi á forða þeirra í jarðvegi. Jafnframt var settur upp jöfnuður næringarefna það er mismunur næringarefna sem bætast í jarðveg og þeirra sem flytjast úr jarðvegi. Úskolun næringarefna í frárennsli var mæld, Day o.fl. 1975.

43. tafla. Nítur í jarðvegi, Broadbalk Field, 0-23 sm. Day o.fl. 1975.

Áburður	Ár		
	1865	1944	1966
	% N í jarðvegi		
Enginn	0,105	0,106	0,099
P, K, Na, Mg	0,107	0,105	0,107
N ₂ *, P,K,Na, Mg	0,117	0,121	0,115
Búfjáraburður	0,175	0,236	0,251

Níturám „frjálsra“ örvera¹⁶⁷ í óræktuðu landi (Broadbalk Wilderness) var metið með níturjöfnuði og reyndist 49 kg í skóglendi með rýrum undirgróðri og 39 kg á hektara árlega í graslendi með fjörutíu tegundum tvíkímblöðunga. Virkni nítrogenasa var einni gmetið með acetylen afoxunaraðferð. Níturámið úr lofti var að mestu leyti við rætur tvíkímblöðunganna, Day o.fl. 1975.

Um mat á níturámi örvera í jarðvegi með níturjöfnuði segir í grein Unkovich og Baldock (2011):

“ Nitrogen balance calculations, based on long-term changes in total soil N of systems and crop N removal, have been used to infer asymbiotic N₂ fixation, but do not measure it directly. Such N balance studies can thus only give an indication of potential asymbiotic N₂ fixation over long periods of time, but cannot confirm it ”.

Hólmgeir Björnsson o.fl (2001) könnuðu níturmagn í jarðvegi í langtímatilraun með níturáburð á Skriðuklaustri. Greinarhöfundar færa rök fyrir því að N í uppskeru af öðrum uppruna en úr áburði geti að mestu komið frá níturámi frjálsra örvera í jarðvegi úr andrúmslofti 44. tafla. Tilgátan byggir á þeirri ályktun að níturforði í jarðvegi hafi ekki minnkað á þeim 43 árum sem um ræðir.

¹⁶⁷ Asymbiotic: ekki í samlífi við plöntur, eru svo nefndar frjálsar níturbindandi örverur eða óháðar samlífi við plöntur. Það eru 20 ættkvíslir (genera) af tegundum sem ekki tillífa CO₂ með ljósorku (non-photosynthetic), sumar háðar súrefni (aerobic) þeirra á meðal *Azotobacter*, *Beijerinckia*, og aðrar loftfælnar (anaerobic) svo sem *Clostridium* bakteríur og um 15 ættkvíslir af ljóstillífandi (photosynthetic) blágrænþörungum (cyanobacteria) til dæmis *Anabaena* og *Nostoc*, Hubbell og Kidder 2003.

Um forsendur ályktanna segir í grein Hólmgeirs 2001:

Með því að gera ráð fyrir að jafngildi tveggja þriðju áborins niturs sé fjarlæggt með uppskeru grass hverju sinni hefur verið áætlað að framlag niturnáms smára úr andrúmslofti hafi verið 14 kg/ha á ári í a-lið (Hólmgeir Björnsson 2000). Þetta mat er fremur óvísst, en sú upptaka niturs, sem samkvæmt (töflu 37að ofan) er eftir að gera grein fyrir, er um 90 kg/ha á ári eða 3,9 t/ha alls í 43 ár. Þessi mikla upptaka verður varla skýrð með því að gengið hafi á nitur í jarðvegi. Umtalsvert magn niturs losnar árlega í jarðvegi við umsetningu lífræns efnis, en jafnframt verður til nýtt lífrænt efni og því meira sem jarðvegur er frjósamari. Samanburður við mælingar á jarðvegssýnum frá 1973 (Bjarni Helgason 1975) bendir til þess að lífrænt efni í jarðvegi hafi aukist en ekki minnkað frá 1973 til 1996. Til hins sama bendir tilhneiging til aukins niturs í jarðvegi með auknum áburði (1. tafla). Vætanlega hefur hlutfall niturs af lífrænu efni lítið eða ekkert breyst. Í tilrauninni virðist því nýmyndun hafa verið meiri en niðurbrot á lífrænu efni og nitur í jarðvegi aukist. Einungis lítið brot þess niturs, sem aðgengilegt er gróðri, kemur bundið í ammóníaki eða nitrati úr andrúmslofti. Gera verður ráð fyrir að niturnám frjálsra gerla í jarðvegi úr andrúmslofti sé helsta uppspretta niturs önnur en áburður (Hólmgeir Björnsson 2001).

44. tafla. Níturjafnvægi að meðaltali kg ha⁻¹ á ári. Hólmgeir Björnsson 2001 og H.B. o.fl. 2001. Nítur tonn N ha⁻¹ á þeim 43 árum sem rannsóknin tekur til er til samanburðar í tveimur neðstu línunum töflunnar.

Tilraunaliðir	A	E	B	C	D
Áburðartegund		NH ₄ NO ₃	NH ₄ NO ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄	Ca(NO ₃) ₂
Borið á N kg/ha	0	75	120	120	120
Í uppskeru	102	140	172	160	168
Niturnám smára	14				
2/3 af áburði	0	50	80	80	80
Annar uppruni N	88	90	92	80	88

Matið á breytingum á níturforða byggir á kolefnismælingum frá 1973 og 1996 og óbreyttu C/N hlutfalli í jarðvegi. Í fyrra skiptið var kolefni mælt með aðferð kenndri við Walkley og Black en í lokin voru lífræn efni fjarlægð við brennslu og kolefni mælt sem koltvísýringur (CO₂). Um aðferð Walkley og Black skrifa Schulte og Hoskins 1995:

“A temperature of approximately 120°C is obtained in the heat-of-dilution reaction of concentrated H₂SO₄ (Allison, 1965). This is sufficient to oxidize the active forms of organic C but not the more inert forms. Walkley and Black (1934) recovered 60 to 86% of the organic C in the soils they studied. As a result of this and other work, a recovery factor of 77% is commonly used to convert "easily oxidizable" organic C to total organic C. Later work (Allison, 1960), however, showed that the recovery factor varied from 59 to 94%. The application of external heat, such as is done in the Schollenberger method (Schollenberger, 1927; Schollenberger, 1945), gives a higher recovery of organic C and less variation in percent recovery among different groups of samples. When external heat is applied, temperature control is extremely important. The actual temperature selected is not too critical so long as the procedure is standardized for that temperature. As temperature increases, reaction time required should decrease and precision increase.”

Endurheimtur af heildar kolefni í jarðvegi með Walkley Blake aðferðinni eru háðar hlutfalli torleystra lífrænna efna, sem ekki mælast með þeirri aðferð, af heildarforða lífrænna efna eins og fram kemur í upphafi tilvitnunarinnar hér á undan. Hins vegar hafa í rannsóknun mælst endurheimtur á bilinu á bilinu 59-94% af heildar kolefni, Allison, L.E. 1960. Algengt er að miða við 77% endurheimtur við umreikning lífræns kolefnis, sem oxun með Walkley Black aðferðinni nær til, yfir í heildar kolefni. *Schulte og Hoskins 1995.*

Matið á því hvort níturforði jarðvegs hafi minnkað eða ekki er talsverðri óvissu háð vegna mimunandi aðferða við mælingar kolefnis í jarðvegi úr tilrauninni á Skriðuklaustri 1973 og 1996. Það á við hvort sem kolefnismælingarnar 1973 eru umreiknaðar eða ekki. Auk þess er gert ráð fyrir að hlutfall N af lífrænu efni hafi ekki breyst. Heildarmagn níturs í jarðvegi var hins vegar aðeins mælt 1996 í lok 43 ára tímabilsins.

Beinar mælingar á níturnámi í sambærilegum jarðvegi eru því verðugt rannsóknarefni til samanburðar við þær niðurstöðurnar sem hér um ræðir. Nýlega hefur ný aðferð við mælingar á níturnámi verið kynnt, Cassar o.fl. (2012), sem gerir kleift að mæla nítur nám samfelld með acetylen/ethylen aðferðinni, án röskunar á jarðvegi. Cassar og meðhöfundar skrifa:

*“This paper describes the new approach and its benefits compared to the conventional detection of ethylene by flame ionization detector gas chromatography. First, the detection of acetylene reduction to ethylene is non-intrusive and chemically non-destructive, allowing for real-time measurements of nitrogenase activity. Second, the measurements are made instantaneously and continuously at ppb levels, allowing for observation of real-time kinetics on time intervals as short as a few seconds. Third, the instrument can be automated for long time periods of measurement. Finally, the technique will be widely accessible by the research community as it can be readily adapted to most existing acetylene reduction protocols and is based on a modestly priced, commercially available instrument. We illustrate its use for measuring N₂ fixation using two species, the diazotrophic bacterium *Azotobacter vinelandii* and the lichen *Peltigera praetextata*. We also discuss potential limitations of the approach, primarily the implications of leaks in the analyzer, as well as future improvements.”*

Cassar Nicolas o. fl. 2012.

Aðrar heimildir greina frá mun minna nítunámi frjálstra örvera í jarðvegi en matið á niðurstöðum tilraunarinnar á Skriðuklaustri bendir til:

Áður var getið um mat á níturnámi í graslendi Broadbalk tilrauninnar, þar sem áætlað var að nítur nám örvera í jarðvegi væri 39 kgN á hektara.

Hámarkshraði níturnáms í jarðvegi úr hveitiakri nærri Uppsölum í Svíþjóð mældist frá 15 til 51 kg á hektara af N eða af sömu stærðargráðu og nítur nám metið með níturjöfnuði í Broadbalk graslendinu, Elisabeth Henrikssen o. fl 1975. Hámarkshraði níturnáms var mældur með acetylen aðferð við staðlaðar aðstæður, 1 g af jarðvegi og 0,5 ml eimað vatn við 20 og 25°C. Mælingarnar voru gerðar tíunda hvern dag á 18 vikna tímabili, eins og nánar er lýst í grein Henrikssen o.fl.¹⁶⁸:

„The nitrogen fixing capacity of the wheat fields in the surroundings of Uppsala are of the same order as has been measured for virgin soils at Bergsbrunna near Uppsala (Henriksson, Enckell og

¹⁶⁸ http://books.google.is/books?id=w-w8AAAIAAJ&printsec=frontcover&hl=is&redir_esc=y

Henrikson 1972). This value is approximately 1.5 – 5.1 g N/m²/yr (Henriksson, 1971; Henriksson, Englund, Hédin & Was, 1972). If the effect of mechanical effect on the soil is ignored, the biological aerobic nitrogen fixation of the wheat field in the neighbourhood of Uppsala is about the same order, that is about 15-51 g N/m²/yr. These results contrast with the results of Jahnke (1967), who studied the occurrence of potential nitrogen fixing algae in a cornfield in Mecklenburg (GDR), where 30% of the soil surface could be covered by these algae. She conclude from laboratory experiment and analysis that the algae were of little importance in the nitrogen economy of that soil, because combined nitrogen in the soil inhibited the nitrogen fixation. She estimated that the maximum levels of nitrogen fixation were 2 kg N/ha/yr and at the average were much lower (0.5 kg N/ha/yr). Paul, Myers & Rice (1971) and Vlassak, Paul & Harris (1973) likewise studied non-symbiotic nitrogen fixation in some cultivated and virgin soils in Saskatchewan (Canada) and their data agreed with the results of Jahnke in that nitrogen fertilization of the soils inhibited nitrogen fixation. In Australian rice fields, Bunt (1971) that potential nitrogen fixing algae were a minor part of the algal flora, possibly because of heavy dressings of ammonium sulphate applied to the soils. On the contrary Bortels (1940) found that nitrogen fixing algae increased with the fertility of the soils, and Shtina (1969 a,b) studying cultivated soils in the Soviet Union, showed that an increase in soil fertility by addition of nitrogen alone, or in combination with phosphate and potassium, resulted in a development of these algae.“

Sumar heimildir nefna mun lægri tölur:

„The amounts of nitrogen fixed by free-living non-photosynthetic bacteria in the soil may achieve an approximate maximum of 15 kilograms per hectare per year. This relatively low estimated contribution is the result of limited availability of suitable organic substrates (energy sources) and low bacterial populations in the soil environment. Nitrogen fixation is characteristically higher in environments such as tropical soils, where such factors as substrate availability, temperature and moisture are more favorable to the maintenance and activity of a high bacterial population. Amendment of soil with a readily used organic substrate generally results in some increase in nitrogen fixation. Attempts to increase fixation in unamended soil by addition of high populations of bacteria (soil inoculation) are generally unsuccessful. The increased population of N-fixing bacteria resulting from inoculation is temporary and will rapidly die back to the original number found in an unamended soil, where no provision has been made to create environmental changes which will favor a higher microbial population.“

Hubbell og Kidder 2003.

Rannsóknunum með acetylene aðferð og N¹⁵ samsætuaðferð ber saman um að samanlagt níturám blágrænþörungum og clostridium kerfa í náttúrulegu, óráktuðu graslendi sé sjaldan meiri en 1-3 kg/ha, Paul 1975:

„The acetylene-ethylene technique has confirmed earlier results with ¹⁵N (Delwiche & Wijler, 1956; Porter & Grable 1969; Fehr, Pang, Hedin & Cho, 1972) that the total annual fixation by the blue-green algae, clostridial systems and the native legumes in native grasslands seldom exceeds 0.1 to 0.3 g/m² (Vlassak, Paul & Harris 1973; Steyn & Delwiche 1970). Copley & Reuss (1972) found an acetylene-reduction rate equivalent to less than 0.1 mg N/m²/day. Under field moisture levels in the USA Pawnee Grassland site. Saturation of the soil without further amendment resulted in acetylene reduction equivalent to 1 mg N/m²/day. Consideration of the occurrence of native legumes plus asymbiotic fixation for a hundred day period activity resulted in an overall maximum estimate of 0.1 g N/m²/year.“

Rannsóknir í náttúrulegu graslendi í Kanada, sem Paul (1975) greinir frá sýndu að hitaaukning að minnsta kosti að 15°C hafði jákvæð áhrif á níturám en fylgni (correlation) níturáms við hita var á heildina lítið neikvæð vegna hækkandi hita í jarðvegi sem varð samfara þurrkum að sumrinu. Aðhvarfsgreining gaf til kynna að 64% af breytileika í níturáminu stafaði breytingum á raka í jarðvegi, en áhrif hitabreytinga voru ekki greinanleg.

Hvort sem það skýrir hinn mikla mun sem er á niðurstöðum í graslendinu í Broadbalk annars vegar og hinsvegar í Pawnee graslendinu í Bandaríkjunum og í svipuðu kanadíska graslendi að einhverju leyti eða ekki, er ljóst að vatnsmagn í jarðvegi er mikilvægt fyrir níturám í jarðvegi og þurrkar að sumarlagi hafa dregið úr níturámi úr lofti í kanadíska graslendinu. Þess má geta, þótt um níturám í rótarhnýðum sé að ræða, að þurrkur á vaxtartíma dró mjög úr níturámi (kg N á hektara) í einærri lúpínu í tilraun á Korpu, sbr.19. mynd hér á eftir. Níturámið var mælt með N^{15} aðferð.

Mælingar á níturámi örvera sem eru óháðar plöntum (freeliving) og þeim sem lifa í nábýli við rætur (associative bacteria) hafa að mati Unkovich og Baldock (2011) reynst vandkvæðum bundnar vegna þess hve hægfara ferlið er miða við níturám í sambylí örvera og plantna (belgjurtir o.fl. plöntur t.d. elri og fléttur)

Tilvitun í yfirlitsgrein frá 2011 Unkovich og Baldock:

“A wide range of bacteria capable of nitrogen fixation (free-living and associative) can be found in all agricultural soils across Australia, however measurement of their effectiveness in N_2 fixation has proved to be problematic because rates are low compared to symbiotic systems and quantitative methodologies barely adequate. It is generally believed that associative N_2 fixation rates may be greater than free-living N_2 fixation rates in ecosystems where grasses (including cereals) dominate, although this has not been unequivocally proven. Conditions promoting asymbiotic N_2 fixation are reduced availability of oxygen, high temperature and soil water, and large amounts of microbially available C in the soil. The most direct measure of N_2 fixation, incorporation of $^{15}N_2$, has rarely been used in undisturbed systems, and we can find no examples of its field application in Australia. Nitrogen balance calculations, based on long-term changes in total soil N of systems and crop N removal, have been used to infer asymbiotic N_2 fixation, but do not measure it directly. Such N balance studies can thus only give an indication of potential asymbiotic N_2 fixation over long periods of time, but cannot confirm it. There are no robust N balances published for Australian ecosystems. The acetylene reduction assay for nitrogenase activity has been used in Australia to study responses of both free-living and associative N_2 fixation systems to regulating factors. These studies have highlighted the importance of C supply, high soil water content and temperature in increasing asymbiotic N_2 fixation in soils. However significant methodological limitations do not allow field scale quantification using this assay. On balance we would concur with the authors of several earlier global reviews of this topic and conclude that (in Australia) contributions of nitrogen to crop growth from asymbiotic N_2 fixation are likely to be <10 kg N ha⁻¹ y⁻¹ and generally not of agronomic significance under low rainfall conditions. In tropical environments where higher rainfall and temperatures coincide, rates are likely to be greater if soil mineral N is low and carbon substrates are available for N_2 fixing microorganisms. If asymbiotic N_2 fixation is to be encouraged or profitably managed, there is a need for more reliable field measurement and a combination of methodologies including ^{15}N might provide more definitive quantitative indications”.

Framleiðslugeta smáratúna, nítur nám og flutningur N frá smára í grös.

Áslaug Helgadóttir, Sigríður Dalmannsdóttir, Þórdís Kristjánsdóttir og Þórey Ólöf Gylfadóttir 2009. Meiri belgurtir: meira og betra fóður – minni áburður? Fræðaðing landbúnaðarins 6. árg. 197-204

Í kafla um framleiðslugetu smáratúna og nítur nám segir:

”Niturbinding hefur einungis verið mæld með beinum hætti (með ^{15}N aðferð) í tilraun nr. 753-83 (COST 853) og þar kom í ljós að 90–99% af heildar N í smára var komið frá niturbindingu og að heildarbindingin var háð hlutfalli smárans í hefyngnum (Sigríður Dalmannsdóttir o.fl., 2007). Er þetta nokkru hærra hlutfall en gengur og gerist erlendis (Carlson & Huss-Danell, 2003) en þó í samræmi við þær niðurstöður sem fundust í Ölpunum að niturbinding heldur hlut sínum eftir því sem ofar dregur og loftslag verður kaldara (Jacot et al., 2000).

Nýlegar rannsóknir hafa einnig sýnt fram á að umtalsvert nitur flyst frá smára yfir í gras yfir vaxtartímann. Í lok júní var um fjórðungur niturs í grasinu kominn frá smára en rúmlega helmingur þegar komið var vel fram á sumar (Þórey Gylfadóttir o.fl., 2007). Með þessar nýju upplýsingar í handraðanum má endurmeta niturbindingu hvítmára úr tilraun nr. 649-86 (Áslaug Helgadóttir & Þórdís Kristjánsdóttir, 1993). Gert er ráð fyrir að 95% af N í smáranum sé komið úr loftinu og 25% af N í grasi sé komið úr smáranum. Jafnframt er gengið út frá að hlutfall milli N í hvítmára og vallarsveifgrasi sé að jafnaði 1,8 (Jóhannes Sveinbjörnsson o.fl., 2008). Í þessa tilraun hafði verið sáð Undrom hvítmára með vallarsveifgrasi og sveiflaðist hlutdeild smárans og þar með heildaruppskera verulega mikið milli ára. Að sama skapi er áætlað að heildarniturnámið hafi verið á bilinu 12–123 kg N ha¹“

”Ekki eru til sambærilegar mælingar fyrir rauðsmára en með því að beita frádráttaraðferð hefur verið áætlað að rauðsmári hafi skilað á bilinu 62–88 kg N ha⁻¹ á ári í tilraun nr. 678-89 á Korpu. Erfitt er að bera saman mat á niturnámi smárattegundanna tveggja þar sem mismunandi aðferðir eru notaðar við matið og gögn eru nýtt úr tveimur aðskildum tilraunum. Rauðsmári hefur reynst próteinsnauðari en hvítmári (Jóhannes Sveinbjörnsson o.fl., 2008) og getur það að hluta til endurspeglad lakara niturnám hans.”

Nítur nám belgurtu mælt með N15 aðferð 193-1986 og 1997-1998.

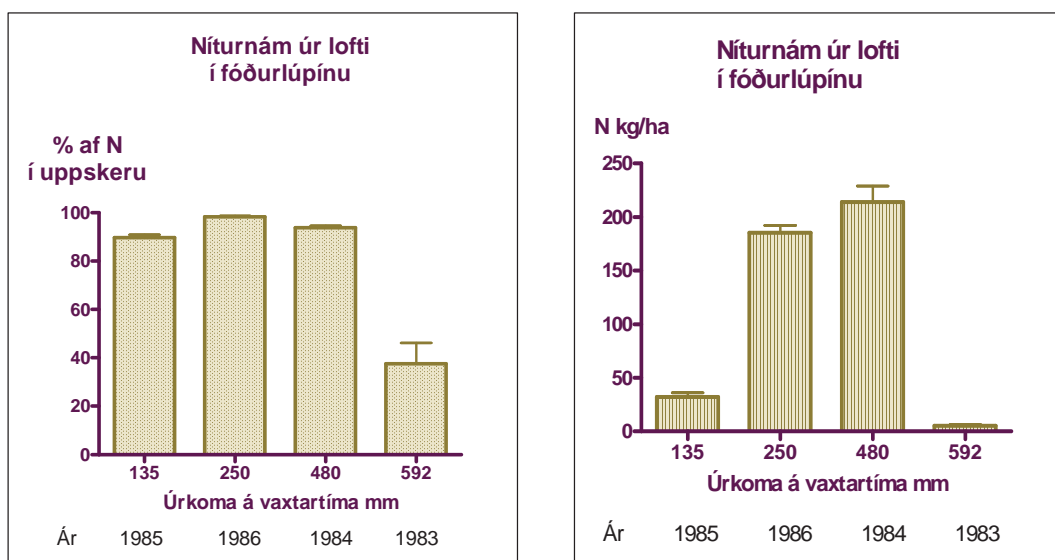
Friðrik Pálmason, Halldór Sverrisson og Jón Guðmundsson 2009.

Nítur nám úr lofti í belgurtum og tveimur trjátegundum. Fræðaðing landbúnaðarins 6. árg. 213-220

Veðurfar og nítur nám

Nítur nám fõðurlúpínu nánar tiltekið blálúpínu (*Lupinus angustifolius*, yrki Uniharvest) var kannað á árunum 1983-1986 sem hluti af fjölþjóðlegum rannsóknum á nítur námi belgurtu til beitar. Hér á landi voru rannsóknirnar á móajörð hjá Landgræðslu ríkisins í Gunnarsholti á Rangárvöllum árið 1983 og á meljörð á tilraunstöðinni Korpu í útjæðri Reykjavíkur 1984-1986.

Tilraunirnar voru með 6 endutekningum með blokkskipulagi. Nítur námið var mælt með N¹⁵ þynningar aðferð og í þeim rannsóknum, sem hér er greint frá, var vetrarrýgresi notað sem viðmiðun fyrir útreikninga á nítur námi. N¹⁵ þynningar aðferðin var notuð við mælingar á nítur námi í öllum þeim rannsóknum sem fjallað er um í þessari grein.



19. mynd. Níturám úr lofti í fódurlúpínu og úrkoma á vaxtartíma sjá nánar í 45. Töflu.

45. tafla. Úrkoma, meðalhiti, uppskera og níturám úr lofti í fódurlúpínu í tilraunum á Korpu og Gunnarsholti 1983-1986^{169, 170, 171}

A. Lengd vaxtartíma, úrkoma og meðalhiti, uppskera og níturám á tilraunastöðum 1983-1986.

Staður, ár	Vaxtartími	Úrkoma	Meðalhiti	Uppskera	Níturám úr lofti	
	Dagar				Mm	°C
Gunnarsholt 1983	97	592	7,6	7,5 ± 1,3	37,6 ± 5,3	5,3 ± 1,2
Korpa 1984	116	480	8,9	77,4 ± 4,5	93,9 ± 0,7	214,1 ± 15,0
Korpa 1985	115	135	8,8	9,1 ± 1,0	89,7 ± 1,3	32,2 ± 3,9
Korpa 1986	127	250	8,3	49,5 ± 2,0	98,4 ± 0,4	185,4 ± 6,9
Meðaltöl				35,9 ± 1,3	79,9 ± 2,2	109,2 ± 4,2

B. Samburður úrkomu og meðalhita á tilraunstöðum og á Helli og Reykjavík.

	Meðalhiti	Heildarúrkoma	Meðalhiti	Heildarúrkoma
	Gunnarsholt		Hella	
Mái- ágúst 1983	7,6	592	8,2	590
	Korpa		Reykjavík	
Mái-sept. 1984	8,9	480	8,7	428
Mái-sept. 1985	8,8	135	8,7	157
Mái-sept. 1986	8,3	250	8,4	229

¹⁶⁹ Tegund fódurlúpínu var einær blálúpína *Lupinus angustifolius*, yrki Unharvest. Áburður við sáningu 20 kg/ha N, 50 kg P og 90 kg K 1983 og 30 kg/ha N, 60 kg P og 100 kg K 1984-1986. Úrkoma og meðalhiti fyrir maí-ágúst 1983 og maí-september 1984-1986.

¹⁷⁰ Meðaltöl ± staðalskekka (6 endurtekningar í blokktilraunum) fyrir uppskeru og níturám.

¹⁷¹ Úrkoma og meðalhiti frá 1961-2006 samkvæmt vefsíðu Veðurstofu Íslands <http://www.vedur.is/vedur/vedurfar/medaltalstoflur/>

C. Reykjavík 1. maí- 30. september og Hella 1. maí -31. ágúst.

	Reykjavík 1961-2006		Hella 1961-2004	
	Meðalhiti °C	Úrkoma mm	Meðalhiti °C	Úrkoma mm
Fjöldi ára	46	46	42	42
Meðaltal	8,9	280	9,4	354
Minnst	7,1	157	7,7	160
Mest	10,2	428	10,6	613
Lægri vikiörk 95%	8,7	262	9,2	325
Hærrí vikiörk 95%	9,1	299	9,6	383

Níturám á árunum 1983-1986 í fóðurlúpínu (yrki Uniharvest af blálúpínu) var 38, 94, 90 og 98% af N í lúpínunni. Níturám var sömu ár 5, 214, 32 og 185 í kg/ha N í uppskeru og að meðaltali 109 kg/ha við 20-30 kg/ha N áborið, 19. mynd.

Sprettuskilyrði voru mjög misjöfn árin 1983-1986, 45. tafla og 19. mynd. Árið 1983 var óvenju óhagstætt, bæði úrkomusamt og kalt, uppskera eftir því lítil. Árin 1984 og 1986 var uppskera góð en mun lakari 1985 vegna þurrka. Á þessum árum fékkst því prófun á vaxargetu lúpínunnar við mjög mismunandi aðstæður. Meðalhiti og úrkoma á vaxtartímanum frá maíbyrjun til septemberloka 1984 á Korpu gefa vísbendingu um veðurfarslega hagstæð skilyrði fyrir fóðurlúpínu til vaxtar og níturáms á meljörð.

Uppskera var svipuð í rigningar- og kuldatíðinni 1983 og þurrkasumrinu 1985, en munur á níturámi var hins vegar mikill, 45. tafla A. Þrátt fyrir þurrkinn 1985 voru 32 kg/ha N sem svarar til 90 % af níturupptökunni numin úr lofti en í rigningar- og kuldasumrinu aðeins 5 kg/ha og 38% af N í lúpínunni

Meðalhiti og úrkoma í Gunnarsholti og á Korpu 1983-1986 eru í 45. töflu B og til samanburðar eru meðaltöl mælinga á nálægum veðurstöðvum á Hellu á Rangárvöllum og Reykjavík, þar sem veðurmælingar fyrir langt árabíl eru aðgengilegar¹⁷² (45. tafla C).

Árið 1983 er með köldustu og úrkomumestu árum í 42 ár miðað við mælingar á Hellu og meðalhitinn og úrkomu frá maíbyrjun til ágústloka var utan 95% vikmarka. Hins vegar var þurrkur mestur í 46 ár í Reykjavík á vaxtartímanum 1985 og á Korpu var uppskera og níturám á hektara með minnsta móti.

Í Reykjavík var tímabilið frá maíbyrjun til septemberloka 1984 það úrkomumesta í 46 ár frá 1961 til 2006 en hitinn var nálægt meðallagi. Á meljörðinni á Korpu var þessi mikla úrkoma einungis til góðs, uppskera lúpínunnar var mikil og níturámið það mesta sem mældist. Síðasta tilraunárið 1986 var bæði meðalhiti og úrkoma á vaxtartímanum neðan við lægri 95% vikiörk.

Því má búast við að uppskera og níturám sé oftast á bilinu milli þess sem mældist 1984 og 1986 að óbreyttu veðurfari, það er 5 til 8 tonn/ha af þurrefni og um 200 kg/ha N unnið úr lofti

Áhrif smitunar með rótarbakteríum og áburðar á níturám úr lofti

Sumarið 1984 var níturám úr lofti mælt í einærri bláblóma lúpínu (*Lupinus angustifolius*, yrki Uniharvest) í hreinrækt og þremur mismunandi sáðblöndum. Með lúpínunni voru tvö

¹⁷² <http://www.vedur.is/vedur/vedurfar/medaltalstoflur/>

yrki af einæru rýgresi (*Lolium multiflorum* Lam.) annað snemmsprottið, sumaryrki, (*var. westerwoldicum*, *Billion*) hitt síðsprottið, vetraryrki (*var. italicum*, *Tetila*) og auk þess hafrar, (*Avena sativa* L., *Sol II*), sem eru snemmsprottir. Sáningar- og áburðardagur var 30. maí. Uppskerudagur var 23. september.

Lúpína í hreinrækt var í þremur tilraunaliðum;

1. Lúpína smituð með hnýðisbakteríum, níturáburður 30 kg/ha N
2. Lúpína ósmituð, níturáburður 30 kg/ha N
3. Lúpína ósmituð, níturáburður 60 kg/ha N

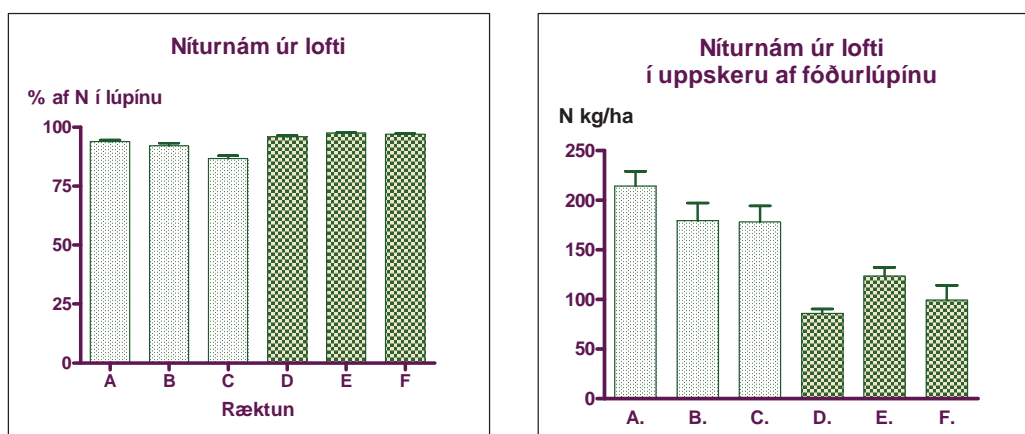
Smitun lúpínu við 30 kg/ha N í áburði hefur ekki aukið níturnám svo marktækt teljist miðað við 5 % líkindamörk en aukning fyrir smitun í kg/ha N var engu að síður 35 kg/ha N að meðaltali, 46. tafla, 20. mynd. Hugsanlegt er að níturnámsbakteríur frá nálægum sáningum af Alaska lúpínu hafi verið til staðar í jarðvegi og valdi því að ekki mældist marktækur munur á níturnámi í smitaðri og ósmitaðri fódurlúpínu.

Aukning áburðar úr 30 í 60 kg/ha N hefur ekki dregið úr níturnámi (kg/ha N). Reyndar mældist níturnám að meðaltali 1,4 kg/ha N meira við 60 N, en aukningin er ekki marktækt ($t=0,1$ og $P>0,05$, 46. tafla neðsta lína).

Hins vegar hefur hlutdeild níturnáms úr lofti í níturupptöku lúpínunnar minnkað um 5,5% með auknum N áburði. Breytingin var 5,5 prósentustig og er marktæk ($t=5,2$ og $P=0,001$, 46. tafla neðsta lína).

Í pottatíraunum með ertur fengust sambærilegar niðurstöður Erik Steen Jensen (1986). Níturnám g N /pott minnkaði ekki við lægstu skammta 0,3 og 0,6 g/pott N frá því sem mældist án níturáburðar, en minnkaði við 1,2 g/pott og 2,4 g/pott. Hins vegar minnkaði hlutur níturnáms í N upptöku strax við minnsta slammtinn af N áburði og fór stöðugt minnkandi við vaxandi skamta. Níturnámið var 82,1 % án N-áburðar 76,9 % við minnsta skammtinn og 7,6 % við stærsta skammtinn.

Níturnám í hreinrækt af smitaðri fódurlúpínu við 30 kg/ha N í áburði sumarið 1984 var 214 kg/ha (45 töflu) en var um helmingi minna í smitaðri lúpínu í blöndum við sömu áburðargjöf (sbr. mismun á hreinrækt og blöndum í 46. töflu á bilinu 90-128 kg/ha N) og munurinn er marktækur. Í blöndunum var sáð helmingi minna af lúpínufræi en í hreinrækt.



20. mynd. Áhrif smitunar, N-áburðar og sambýlisplantna á níturnám fódurlúpínu, 1984.

A-C. Lúpína í hreinækt

A. Lúpína smituð, áborið N 30 kg/ha B. Lúpína ósmituð, 30 N C. Lúpína ósmituð, 60 N

D-F. Lúpína í blöndum, smituð, áborið N 30 kg/ha

D. Lúpína með sumarrýgresi E. Lúpína með vetrarrýgresi F. Lúpína með sumarhöfrum

Athyglisvert er að yrki að minnsta kosti sumra tegunda belgjurta þola misvel níturáburð með tilliti til áhrifa áburðarins á níturám úr lofti. Níturþolin yrki af belgjurtum henta vel í blöndum með plöntum sem ekki vinna N úr lofti. Það kann að breyta verulega ræktunarmöguleikum á blöndum af belgjurtum með öðrum fóðurjurtum sem gera meiri kröfur til níturáburðar, en eru sveltar við lítinn eða engan níturáburð sem hentar belgjurtinni oftast betur.

46. tafla. Áhrif smitunar, N-áburðar og sambýlisplantna á níturám fóðurlúpínu, 1984. Bonferroni eftirpróf við einþátta variansgreinngu.

Samanburður tilraunliða	Níturám % af N í lúpínu			Níturám kg/ha		
	Mismunur	t	P gildi	Mismunur	t	P gildi
Smituð lúpína 30 N vs ósmituð 30 N	1,7	1,6	P > 0.05	34,7	1,8	P > 0.05
Smituð lúpína 30 N vs ósmituð 60 N	7,2	6,8	P < 0.001	36,1	1,9	P > 0.05
Lúpína hreinrækt vs lúpína + sumarrýgresi	-2,1	2,0	P > 0.05	128,4	6,6	P < 0.001
Lúpína hreinrækt vs lúpína + vetrarrýgresi	-3,7	3,5	P < 0.01	90,4	4,7	P < 0.001
Lúpína hreinrækt vs lúpína + sumarhafrar	-3,1	2,9	P < 0.05	114,7	5,9	P < 0.001
Lúpína ósmituð 30 N vs lúpína ósmituð 60 N	5,5	5,2	P < 0.001	1,4	0,1	P > 0.05

Rannsóknir benda til þess að mismunandi sé hve mikinn níturáburð einstök yrki belgjurta þoli án þess að dragi úr níturámi úr lofti eins og eftirfarandi heimildir eru dæmi um:

1.

1. Í einu yrki soyabauna af átta var níturám úr lofti jafn mikið við 100 kg/ha N í áburði og við 20 kg/ha en níturámið var marktækt minna í 7 yrkjum við stærri N skammtinn, Guðni Harðarson, Felipe Zapata og Seth K.A. Danso, 1984. Niðurstöðurnar voru ótvíræðar þar sem þær voru í fyrsta lagi á sama veg með tvenns konar óháðum mælingaaðferðum (N^{15} þynningaraðferð, sem byggir á notkun áburðar sem er merktur með auknu hlutfalli af N^{15} samsætu umfram náttúrulegt magn og acetylen aðferð sem mælir virkni níturáms í rótarhnyðum) og í öðru lagi staðfestar í endurtekinni tilraun árið eftir fyrstu mælingar.

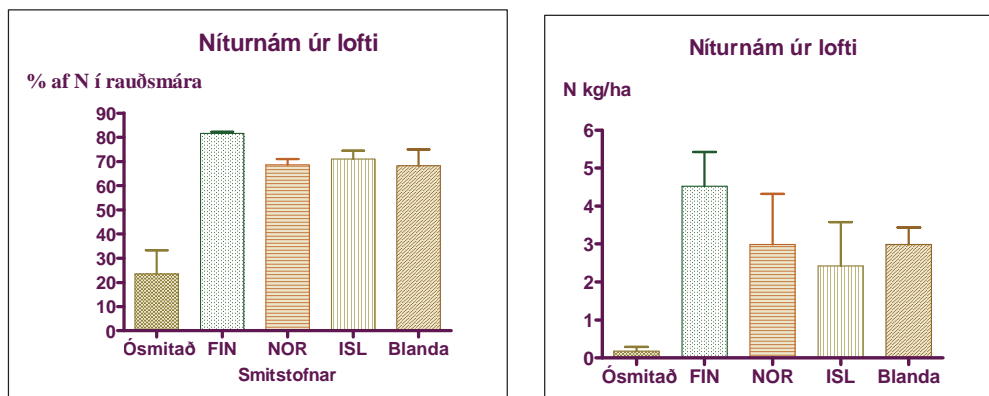
2. Rannsóknir á 29 yrkjum af kúaertum (*Vigna unguiculate* L. Walp) leiddi í ljós að 120 kg/ha af N í áburði truflaði ekki níturám í þremur yrkjanna, Buhpinter og Kalidindi 2003.

Hvað fóðurlúpínuna varðar er alltaf sá möguleiki fyrir hendi að rækta hana eina sér til beitar með aðgangi á öðrum grænfóðurplöntum sé það hentugra hvað fóðursamsetningu varðar. Þá er hægt að nota kjöráburð á hvora ræktun fyrir sig.

Smitstofnar og níturnám

Mælingar á níturnámi rauðsmára með þremur mismunandi stofnum af rótarhnýðis-bakteríum voru gerðar í reitatilraun með 4 endurtekningum á móajarðvegi í Gunnarsholti á Rangárvöllum árið 1998.

Stofnarnir voru frá Finlandi, Noregi og Íslandi auk þess var blanda af stofnunum þremur notuð. Fræjum af rauðsmára og vallarfoxgrasi var sáð í 4 endurtekningum í tilraun með blokkaskipan. Rauðsmárin var í blöndum með vallarfoxgrasi en vallarfoxgras í hreinrækt var notað sem viðmiðun í mati á níturnámi með N^{15} -þynningaraðferð.



21. mynd. Áhrif mismunandi stofna af níturnámsbakteríum á níturnám úr lofti í rauðsmára 1998 FIN: stofn PL Finlandi, NOR: stofn M Noregi og ÍSL er stofn nr. 3 frá Íslandi. .

Í ósmítuðum smára var níturnámið að meðaltali 24% af heildar N í smáranum, í smára smítuðum með íslenska stofninum 71% og með norska stofninum 69%, með smitblöndu af stofnunum þremur var níturnám úr lofti 68% og með finnska stofninum 82% af heildar N í rauðsmáranum 21. mynd.

Uppskeyra var lítil eins og vænta má á sáningarárinu og þar af leiðandi var níturnám úr lofti einnig lítið í kg/ha. Finnski stofninn er að meðaltali bestur og betri en blanda stofnanna einkum hvað varðar hludeild níturnáms í heildar N í uppskeru af smáranum. Einnig er vik frá meðaltali minnst í finnska stofninum.

Tilraunin sýnir að máli skiptir að velja góða smitstofna með tilliti til níturnáms úr lofti.

Níturnám rauðsmára á mismunandi jarðvegi.

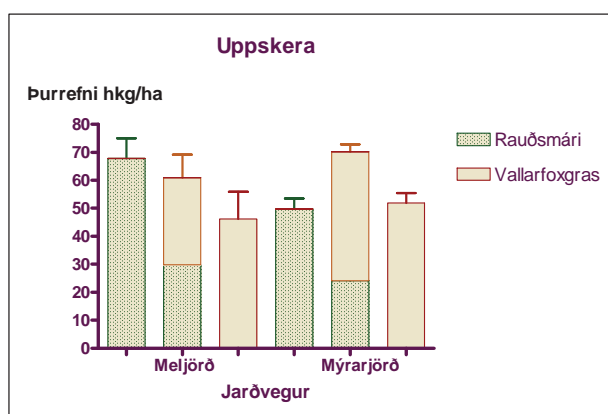
Sumarið 1997 var níturnám rauðsmára, yrki Bjursele, mælt í tveimur blokktilraunum hvorri með 5 endurtekningum. Tilraunirnar voru á móa- og mýrarjörð innan sömu spildu á Korpu. Tilraunliðir voru (1) rauðsmári í hreinrækt, (2) í blöndu með vallarfoxgrasi og (3) vallarfoxgras í hreinrækt.

Uppskeyra af rauðsmára í hreinrækt í tveimur sláttum var 68 hkg/ha af þurrefni á meljörðinni en 50 hkg á mýrarjörð 22. mynd. Blanda af vallarfoxgrasi og rauðsmára gaf 61 hkg á meljörðinni og 70 hkg á mýrarjörð. Munurinn á uppskeru blöndu á mel og mýrarjörð 9,4 hkg þurrefni er ekki marktækur eins og sést á staðalskekku í töflu með mynd 22. Mismunur á uppskeru vallarfoxgrass eftir jarðvegsgerð er heldur ekki marktækur Uppskeyra af vallarfoxgrasi í hreinrækt var 52 hkg/ha á mýrarjörðinni en 46 hkg á melnum.

Rauðsmárinn þrífst verr á mýrarjarðvegi en mel, uppskeran var 18 hkg meiri á meljörð en á mýrarjörð. Hins vegar reyndist sáðblanda af vallarfoxgrasi og rauðsmára vel á mýrinni, gaf góða uppskeru 70 hkg/ha í tveimur sláttum með 17% próteini í þurrefni í seinni slætti, 3. tafla. Í fyrri slætti var prótein ekki mælt.

Á melnum var munur á uppskeru af blöndu og rauðsmára í hreinrækt ekki marktækur. Blandan gaf þar 61 hkg/ha af þurrefni með 19% prótein í seinni slætti, en uppskera af rauðsmára var 69 hkg/ha með 22% prótein í þurrefni.

Uppskera af vallarfoxgrasinu takmarkaðist af skorti á N, þar sem aðeins voru borin á 30 kg/ha af N. Vallarfoxgrasið í hreinrækt er fyrst og fremst ætlað til viðmiðunar í útreikningum á níturnámi úr lofti og fær því sama magn af N-áburði og rauðsmárinn og blandan af rauðsmára og vallarfoxgrasi.



Jarðvegur	Rauðsmári hreinrækt	Blanda	Vallarfoxgras hreinrækt
Meljörð	67,8 ± 7,3	60,9 ± 8,9	46,2 ± 9,7
Mýrarjörð	49,8 ± 3,7	70,3 ± 1,6	51,9 ± 3,5
Mismunur	18,0 ± 6,0	-9,4 ± 7,4	-5,7 ± 6,6

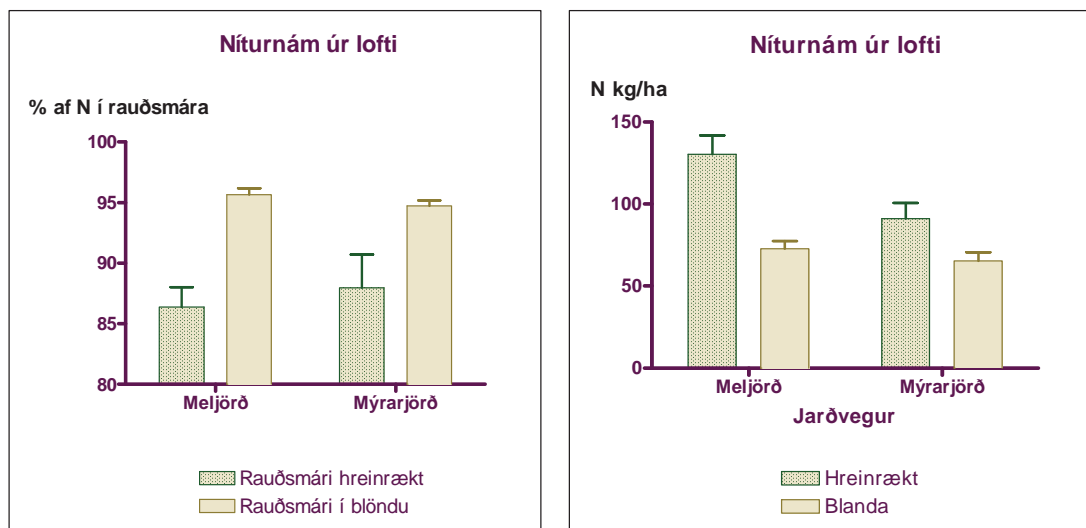
22. mynd. Uppskera af rauðsmára og vallarfoxgrasi í hreinrækt og blöndu í tveimur sláttum, þurrefni hkg/ha. Korpa 1997

47. tafla. Prótein í uppskeru af rauðsmára og vallarfoxgrasi í hreinrækt og í blöndu. Korpa 1997.

	Meljörð	Mýrarjörð
Rauðsmári hreinrækt	22,0 ± 0,5	20,6 ± 1,1
Rauðsmári í blöndu	22,9 ± 0,4	22,5 ± 0,2
Blanda	19,3 ± 0,9	17,1 ± 0,5
Vallarfoxgras í blöndu	12,1 ± 0,6	12,1 ± 0,2
Vallarfoxgras hreinrækt	10,3 ± 0,3	10,3 ± 0,2

Nítur nám úr lofti var 86-88% af N í uppskeru rauðsmárans í hreinrækt og 95-96 % í sáðblöndu, 23. mynd. Munur á hlut níturnáms úr lofti af N í uppskeru milli hreinræktar og blöndu er hér á sama veg og í öllum þeim rannsóknum sem hér er greint frá í einærri fôðurlúpínu, fjölærri Alaska lúpínu og í hvítsmára.

Nítur unnið úr lofti var mjög mikið, þegar lítið er til þess að einungis er um einn slátt að ræða, 130 kg/ha N í uppskeru rauðsmára í hreinrækt á mel og 73 kg/ha í blöndu, 23. mynd. Munurinn 57 kg/ha er marktækur enda sáðmagn smárans helmingi minna í blöndunni. Á mýrajörðinni voru uppskerutölurnar 91 kg/ha N í hreinrækt og 65 kg í blöndu, munurinn ekki marktækur.



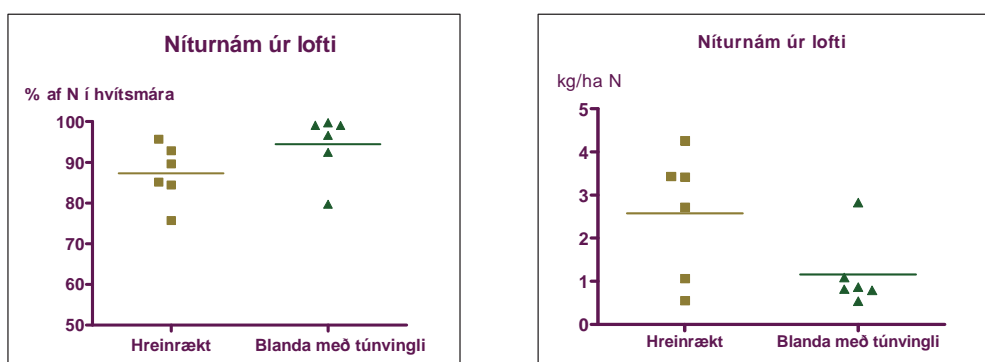
23. mynd Níturnám rauðsmára í öðrum slætti á sáningarári

Níturnám hvítmára

Níturnám í hvítmára á sáningarári

Tilraun á Korpu 1986.

Nítur unnið úr lofti var mælt í blokktilraun með 6 endurtekningum nýrækt á meljörð á Korpu 1986. Tilraumaliðir voru (1) hvítmári í hreinrækt, (2) hvítmári í blöndu með túnvingli OG (3) túnvingull í hreinrækt notaður sem viðmiðun fyrir útreikninga á níturnámi.



24. mynd. Níturnám hvítmára á sáningarári, Korpu 1986.

Á Korpu var níturnámið $87,3 \pm 2,9$ % af N í hvítmára í hreinrækt (meðaltal \pm staðalskekkja) og í blöndu með túnvingli var níturnámið $94,5 \pm 3,1$, 24. mynd.

Nítur nám hvítmára í blöndunni með túnvingli er sambærilegt við rannsóknir Sigríðar Dalmannsdóttur o.fl. 2007 þar sem nítur nám hvítmára og rauðsmára í blöndum með vallarfoxgrasi og vallarsveifgrasi var á bilinu 90-99%.

Munur á nítur námi úr lofti í hvítmára á hektara í hreinrækt annars vegar og í blöndu með túnvingli hins vegar var ekki marktækur (t-próf, $P=0,20$). Nítur námið í hreinrækt var aðeins $2,6 \pm 0,6$ kg/ha í hreinrækt og $1,2 \pm 0,3$ kg/ha í blöndu. Mælingarnar eru gerðar á sáningarári og uppskera og nítur nám á hektarara því lítið. Þó svo að munur á meðaltölum sé ekki marktækur þá er hlutfallið ($2,6/1,2 = 2,2$) í takt við helmingi minna sáðmagn í blöndunni.

Mælingar í nýræktarspildu í Gunnarsholti 1993.

Nítur nám úr lofti var mælt á sáningarári á spildu með vallarsveifgrasi og hvítmára í Gunnarsholti 1993. Uppskeyra var mæld og sýni tekin af sex smáreitum á víð og dreif um spilduna. Gróður var enn gisinn og uppskeyra lítil á þeim blettum sem sýni voru tekin af. Til viðmiðunar við útreikninga á nítur námi var vallarsveifgras notað sem ekki var nálægt hvítmáraplöntum en á sama svæði innan spildunnar og hvítmárareitirnir.

48. tafla. Nítur nám hvítmára í nýrækt með vallarsveifgrasi. Gunnarsholt 1993.

Sláttur	% af N í uppskeru af hvítmára		kg/ha N	
	Meðaltal	Staðal-skekkja	Meðaltal	Staðal-skekkja
1. sl.29.06.93	24,3	5,77	2,5	0,62
2. sl. 24.09.93	82,8	2,37	14,0	2,44

Nítur nám úr lofti í nýræktinni í landi Gunnarsholts var aðeins 24% af heildar N í hvítmáranum í fyrri slætti í júnílok, 48.tafla. Í nýræktinni má gera ráð fyrir að myndun fullvirkra rótarhnyða hafi verið skammt á veg komin og smárinn sé því háður N úr jarðvegi og áburði. Í samræmi við það er gjarnan gefinn lítill startskammtur af N í áburði við sáningu belgjurta.

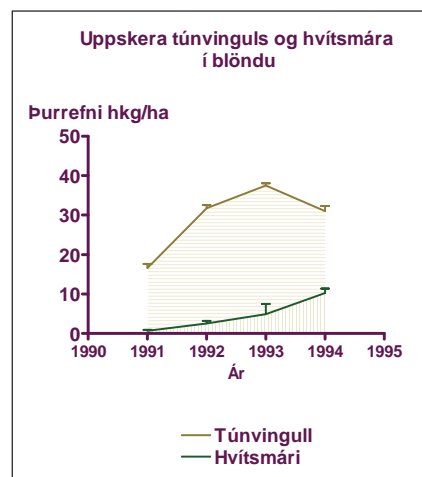
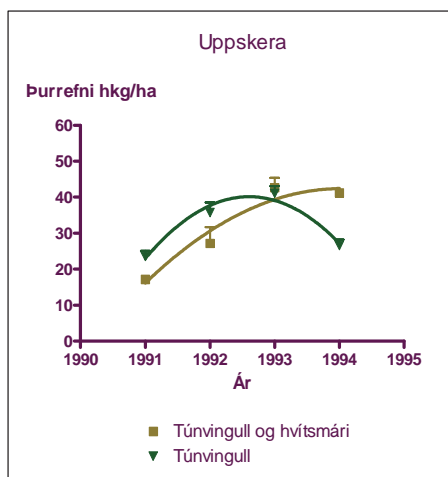
Í seinni slætti var nítur námið 83% af heildar N í hvítmáranum og hefur nálgast þá hlutdeild sem mældist í tilrauninni á Korpu 1986 (87% í hreinrækt og 95 % í blöndu). Í Korputilrauninni var sáð 21. maí og slegið 25. september. Þriggja ára gömul ræktun með blöndu túnvingli og hvítmára í Gunnarsholti var slegin á sama tíma og reitirnir á vallarsveifgras/hvítmára spildunni. Þar var nítur nám úr lofti var 85-88% af N í uppskeru hvítmárans.

Nítur námið mældist $2,5 \pm 0,6$ (meðaltal \pm staðalskekkja) kg/ha N í fyrri slætti og $14,0 \pm 2,4$ kg/ha í seinni slætti.

Uppskeyra og nítur nám í hvítmára- og túnvingulstúni

Tilraun með blöndu af hvítmára (yrki Lena) og túnvinguli í hreinrækt var gerð í Gunnarsholti 1990-1994. Endurtekningar voru í fjórum blokkum. Sáð var í tilraunina vorið 1990 eftir endurvinnslu á gömlu túni á móajörð og borið á sama ár en ekki eftir það.

Uppskeyra á smára/túnvinguls reitum fór fram úr uppskeru á túnvingulsreitum á fjórða ári eftir sáningu, 25. mynd. Hlutdeild smárans fór vaxandi fyrstu fjögur árin eftir sáningu og hafði aukist úr 4% af uppskeru þurrefnis í 25%, 49. tafla.



25. mynd. Uppskeyra túnvinguls og blöndu af hvítmára og túnvingli í Gunnarsholti 1991-1994. Ekki var borið á þessi ár.

49. tafla. Hluttur hvítmára í blöndu með túnvingli. Gunnarsholt 1991-1994.

	Hvítmári % í uppskeru	
	Meðaltal	Staðalskekkja
1991	3,9	1,2
1992	7,5	1,2
1993	11,4	1,6
1994	25,2	2,1

50. tafla. Níturám úr lofti í hvítmára, yrki Lena, þriggja ára gamalt tún Gunnarsholt 1993.

Sláttur	% af N í uppskeru		N úr lofti í uppskeru kg/ha	
	Meðaltal	Staðalskekkja	Meðaltal	Staðalskekkja
1. sl. 29.06	84,7	2,2	7,1	2,1
2. sl. 24.9	89,2	3,4	13,3	4,8

51. tafla. Níturám úr lofti í hvítmára mælt 1986 og 1993. Yfirlit.

Staður og ár	Ræktun	Aldur ræktunar	Sláttur	Níturám, meðaltal ± staðalskekkja
Korpa 1986	Hreinrækt	Nýrækt.	1. sl. 25. sept	87,3 ± 2,9
	Blanda með túnvingli			94,5 ± 3,1
Gunnarsholt 1993	Blanda með vallarsveifgrasi	Nýrækt	1. sl. 29.júní	24,3 ± 5,8
			2. sl. 24.sept	82,9 ± 2,4
Gunnarsholt 1993	Blanda með túnvingli	3. ára tún	1. sl. 29.júní	84,7 ± 2,2
			2. sl. 24.sept	89,2 ± 3,4
Meðaltal				87,7 ± 1,3

Á heildina litið var níturám hvítmárans $87,7 \pm 1,3$ % af N í hvítmáranum í þeim rannsóknum sem hér er greint frá að undanskilinni mælingu á níturámi stuttu eftir sáningu

1993 áður en nítur nám var orðið virkt, en þá mældist nítur námið aðeins $24,3 \pm 5,8$ % af N í hvítmáranum.

Einær lúpína sem grænfóður eða grænábúrdur

Einær lúpína getur sem grænfóður sparað mikinn áburð en auk þess má nota hana sem grænábúrd til að auka níturforða jarðvegs.

52. tafla. Níturupptaka einærrar lúpínu úr lofti og jarðvegi. 1983-1996.

Gunnarsholt 1983	Nítur úr lofti	Nítur úr jarðvegi	Alls
	N kg/ha		
Ofanjarðar	5-13	11	16-24
Í rótum	1-2	2	3-4
Alls	6-15	13	19-28

Korpa 1984	Nítur úr lofti	Nítur úr jarðvegi	Alls
	Kg/ha N		
Ofanjarðar	214	14	228
Í rótum	28	9	36
Alls	242	23	264

Korpa 1985	Nítur úr lofti	Nítur úr jarðvegi	Alls
Ofanjarðar	32	3,6	36
Í rótum	4,2	1,6	5,8
Alls	36	5,2	42

Korpa 1986	Nítur úr lofti	Nítur úr jarðvegi	Alls
Ofanjarðar	185	3,0	188
Í rótum	24	6,4	30
Alls	209	9,4	219

Einær lúpína sem grænábúrdur (rætur og ofanjarðarluti) hefði skilaði 242 kg/ha N úr lofti í jarðveg á ári samkvæmt tilraun 1984, 52. tafla.

Að meðaltali á fjórum árum hefði lúpínan skilað 123 kg/ha í jarðveg, en þess ber að geta að í meðaltalinu eru tvö einstaklega léleg sumur, rigningarsumarið 1983 og þurrkasumarið 1985 þar sem nítur nám úr lofti var aðeins 6 og 32 kg/ha N. Síðasta tilraunaárið 1986 var nítur námið 209 kg/ha. Miðað við meðalhita og úrkomur sumarmánaða annars vegar á tilraunaárunum og hins vegar á rúmlega fjórum áratugum frá 1961 er líklegt að einær lúpína hefði að jafnaði yfir lengri tíma unnið um og yfir 200 kg/ha N úr lofti árlega.

Eins og fram kom í kaflanum um áhrif veðurfars á nítur nám fôðurlúpínu er líklegast að árin 1984 og 1986 gefi hugmynd um hvað lúpína gefur að jafnaði miðað við veðurfar á árunum 1961- 2006. Því er lögð áhersla að niðurstöður tilraunanna árin 1984 og 1986 séu hafðar til viðmiðunar um hvort sem haft er í huga, hversu mikinn níturábúrd má spara ef lúpínan er notuð sem grænfóður eða sem grænábúrdur.

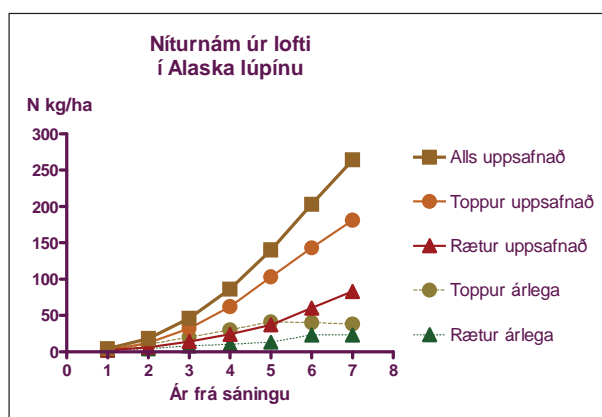
Lúpínan skilaði 242 kg/ha árið 1984 og 209 kg N 1986 úr lofti í jarðveg miðað við að hún væri plægð niður að meðtöldu N í rótum.

Hefði ofanjarðarhluti einæru lúpínunnar verið fjarlægður með uppskeru eða beit hefði hún skilið eftir 12 kg/ha árið 1984 og 21 kg árið 1986 af N í jarðvegi umfram það sem fjarlægt var úr jarðvegi með uppskeru. Jafnframt hefði mest allur níturáburður sparast sem hefði verið notaður á hefðbundið grænfóður svo sem rýgresi, hafra eða fóðurkál að svo miklu leyti sem fôðurlúpína hefði komið í þeirra stað.

Megnið af því sem fjarlægt var með uppskeru kom úr lofti 214 kg N af 228 (1984) og 185 af 188 kg/ha N 1986.

Uppsöfnun níturforða í jarðvegi við landgræðslu með Alaska lúpínu.

Af mælingum í lúpínuspildu á Geitasandi á Rangárvöllum fimm og sjö árum eftir sáningu, 1991 og 1993 og í reitatilraun á sama stað 1993 tveimur árum eftir sáningu hefur uppsöfnun N í lúpínunni verið áætluð.



26. mynd. Áætlað níturnám úr lofti í Alaska lúpínu á 7 ára tímabili landgræðslu á Geitasandi Byggt á mælingum 2, 5 og 7 árum eftir sáningu

Á sjö árum hafa bundist í lúpínunni um 264 kg N úr lofti og af þeim hafa um 83 kg/ha N safnast í rætur og mismunurinn 181 kg hafi skilað sér í jarðveg með ofanjarðarhluta lúpínunnar 26. mynd. Síðasta árið var árleg söfnun 61 kg/ha.

Til samanburðar við nítursöfnun lúpínu er ekki úr vegi að skoða heildarforða N í jarðvegi á mismunandi þróunarstigi á sama svæði í landi Gunnarsholts á Rangárvöllum, 53. tafla.

53. tafla. Níturforði í efstu 30 sm af sandjörð (Geitasandur) og móajörð (Asparspilda og Norðurtún) í landi Gunnarsholts á Rangárvöllum.

	Heildar-N Tonn/ha
1. Geitasandur ¹⁷³	0,6
2. Asparspilda ¹⁷⁴ Tún ≤45 ára	3,8
3. Norðurtún ⁶ Gamalt móatún	5,6

¹⁷³ Friðrik Pálmason o.fl. 1996

¹⁷⁴ Óbirtar niðurstöður mælinga í jarðvegi í Asparskógi í Gunnarsholti á Rangárvöllum

Í jarðvegi á Geitasandi reyndist N forði aðeins 0,6 tonn/ha, í móajarðvegi í 6 ára gamalli asparræktun sem áður hafði verið tún í nokkra áratugi var forðinn 3,8 tonn og elsta túni á staðnum var forðinn 5,6 tonn/ha N í öllum tilvikum í efstu 30 sm jarðvegs.

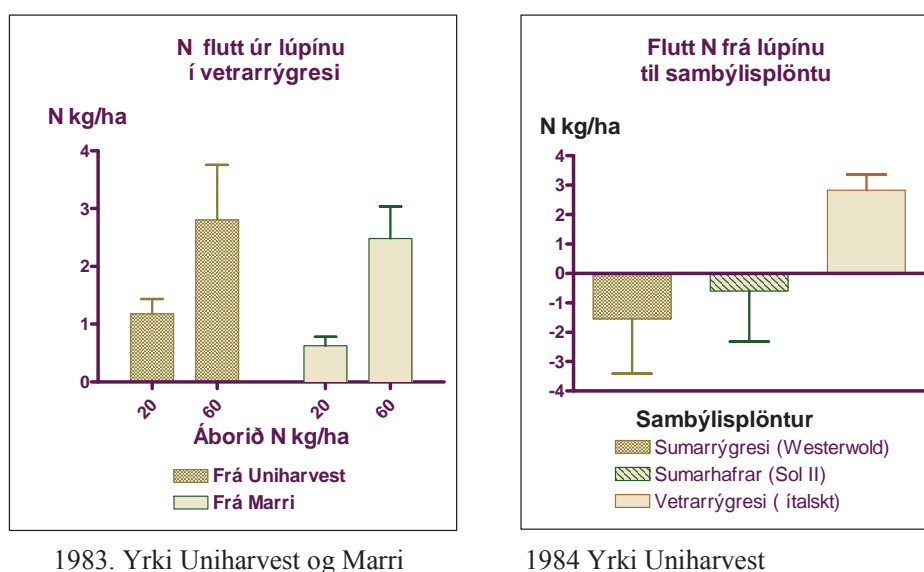
Þar sem ekki er vitað nákvæmlega um aldur og forsögu ræktunar á Asparspildunni og Norðurtúni eða myndun (uppsöfnun á staðnum, áfok) jarðvegslagsins, sem um ræðir (efstu 30 sm) er ekki vert að draga miklar ályktanir af þessum samanburði á uppsöfnun N í ræktuðu landi og í landgræðslu með lúpínu. Auk þessa ná mælingarnar á níturnámi lúpínunnar aðeins til 7 ára tímabils og N forði jarðvegs var ekki mældur á tímabilinu. Séu þessar mælingar framlengdar miðað við árlega uppsöfnun sem nemur 60 kg/ha N tæki um 50 ár að breyta sandi með forða sem telur 0,6 tonn/ha N í sandatún með 3,8 tonn/ha N og 80 ár í frjóm tún eins og elsta túnið í Gunnarsholti er. Enn lengri tíma tækju þessar breytingar ef lúpínan hyrfi og þróunin byggðist eingöngu á níturnáms gerlum sem lifa í jarðvegi en ekki í rótarhnyðum belgjurta.

Sjálfsáð sambýlisgrös lúpínunnar fengu um það bil helming af N í grasinu frá lúpínu 1991 árið og 40-79 % af N frá lúpínunni 1993 og mest prótein var í grasinu næst elstu lúpínuplöntunum og minnst í grasi utan við lúpínuspilduna.

Áhrif belgjurta á níturupptöku sambýlisplanta

Fóðurlúpína

Áhrif belgjurtar á níturupptöku sambýlisplöntu geta verið tvenns konar, annars vegar flutningur N frá belgjurt til sambýlisplöntu hins vegar getur hver sambýlisplanta tekið meira N úr nýtanlegum N forða í jarðvegi í blöndu en í hreinrækt.



27. mynd. Flutningur N frá lúpínu til vetrarrýgresis. Enginn flutningur mældist til sumarrýgresis og sumarhafra 1984.

Sambýlisáhrif í heild eru samanlagður flutningur N frá belgjurt og svonefndur N sparnaður í jarðvegi. Í sáðblöndunum kemur belgjurtinn í staðinn fyrir hluta af sambýlisplöntunum í hreinrækt. Belgjurtin tekur lítið N til sín úr jarðvegi og hver sambýlisplanta hefur því aðgang

að meira N í jarðvegi en hún hefur í hreinrækt. Í þessu eru nítursparandi áhrif belgjurtar fölgín¹⁷⁵

Marktækur flutningur N frá lúpínu mældist til vetrarrýgresis árið 1983 og 1984, 27. mynd. Árið 1984 voru einnig sumaryrki af höfrum og rýgresi í blöndu með lúpínu en enginn flutningur mældist til þeirra (44 og 74% líkur á að tilviljun ráði neikvæðum mæligildum).

54.tafla. Níturflutningur frá fóðurlúpínu til vetrarrýgresis í tilraun á móajörð í Gunnarsholti 1983.

Áburið N kg/ha	Frá Uniharvest		Frá Marri	
	Meðaltal	Staðal-frávik	Meðaltal	Staðal-frávik
	% af N í vetrarrýgresi			
20	32,8	7,3	18,6	3,4
60	58,5	5,6	30,5	8,3
	kg/ha N			
20	1,18	0,26	0,63	0,15
60	2,81	0,95	2,48	0,56

Árið 1983 var að meðaltali 19% af N í vetrarrýgresi í blöndu með lúpínuyrkinu Marri komið frá lúpínunni en í blöndu með yrkinu Uniharvest nam flutningurinn 33% af N í rýgresi, hvort tveggja þar sem 20 kg/ha N var borið á, 54. tafla. Flutningur frá Marri til rýgresis var aðeins 0,6 kg/ha N og frá Uniharvest 1,2 kg/ha enda uppskera mjög lítil á sáningarári. Úrkoma var mikil og sumarið kalt og hvort tveggja hefur dregið úr vexti og níturnámi.

Við 60 kg/ha N í áburði voru 59% af N í rýgresi flutt frá Uniharvest eða 2,8 kg/ha N en frá Marri kom 31% af N í rýgresi eða 2,5 kg/ha. Áhrif sambýlis með lúpínu á níturupptöku rýgresis mældust hins vegar ekki með mismunadæferð.

¹⁷⁵ Nítursparandi áhrif (Danso og fl. 1993) lúpínu að meðtöldum flutningi N frá lúpínu til sambýlisplöntu að teknu tilliti til sáðmagns í hreinrækt og blöndu eru hér reiknuð á eftirfarandi hátt:

Sambýlisáhrif = Nítursparandi áhrif + N flutningur =

N upptaka sambýlisplöntunnar í blöndu - 0,5 x N upptaka sambýlisplöntu í hreinrækt,
þar sem sáðmagn í blöndu er helmingur af sáðmagni í hreinrækt

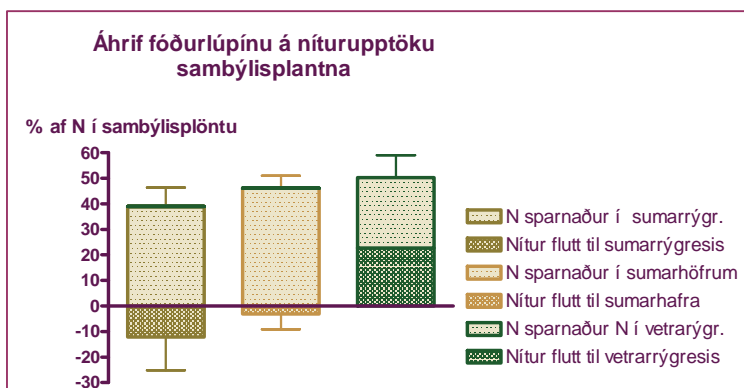
55. tafla. Flutningur N frá fõðurlúpínu, yrki Uniharvest og heildaráhrif lúpínu á N upptöku sambýlisplantna.

	1983	1984	1985 24.10	1986
Flutningur N frá lúpínu til sambýlisplöntu kg/ha N				
Vetrarepja 1985			e.m.	
Vetrarrýgresi 1983, 1984, 1985	1,2-2,8	2,8	e.m.	
Sumarrýgresi 1984		e.m.		
Sumarhafrar 1984, 1985, 1986		e.m.	e.m.	e.m.
Sambýlisáhrif, N sparnaður + flutningur kg/ha N				
Vetrarepja 1985			6,4	
Vetrarrýgresi 1983, 1984, 1985	e.m.	6,3	e.m.	
Sumarrýgresi 1984		6,9		
Sumarhafrar 1984, 1985, 1986		14,5	e.m.	e.m.

e.m. = ekki marktækt ($P > 0,05$). P gildi úr t prófun fyrir fráviki frá 0

Flutningur N til vetrarrýgresis frá lúpínu var árið 1984 var 2,8 kg, en heildaraukning N í rýgresinu vegna sambýlis var 6,3 kg/ha N, 55. tafla. Sambýlisáhrif eða heildaraukning N í rýgresi vegna sambýlis er mæld sem mismunur á N í rýgresi í blöndu og í hreinrækt að teknu tilliti til mismunandi sáðmagns í hreinrækt og blöndum.

Mismunurinn á sambýlisáhrifum í heild og fluttu N til vetrarrýgresis 1984 var 3,5 kg/ha N og telst vera vegna nítursparandi áhrifa lúpínunnar. Sambýlisáhrifin í heild (6,3 kg/ha N) eru í þessu tilviki tvíþætt, flutningur frá lúpínu og N-sparandi áhrif. Flutningurinn var 23% af heildarmagni N í rýgresi en sambýlisáhrifin voru alls 50% af N í rýgresinu.



28. mynd. Áhrif belgjurtar á níturupptöku sambýlisplantna. Tilraun á Korpu 1984.

Þurrkasumarið 1985 mældist enginn flutningur N til rýgresis, en sambýlisáhrif vegna N sparandi áhrifa lúpínunnar voru 6,4 kg/ha N í vetrarepju.

Árið 1983 var úrloma mikil og marktækur flutningur mældist frá báðum lúpínuyrkjunum við báða áburðarskammta af N.

Niðurstöður tilraunanna 1984-86 benda til þess að áhrif einærrar lúpínunnar á níturupptöku sambýlisplöntu úr jarðvegi séu háð tegund sambýlisplöntu og vaxtarskilyrðum (árum), 55. og 56. tafla, 28. mynd.

56. tafla. Áhrif belgjurtar á níturupptöku sambýlisplantna. Tilraun á Korpu 1984

	N sparnaður		Nítur flutt til sambýlisplöntu	
	Meðaltal	Staðal-skekkja	Meðaltal	Staðal-skekkja
% af N í sumarrýgresi	39,0	7,4	-12,1	13,0
% af N í sumarhöfrum	46,1	4,8	-3,1	6,1
% af N í vetrarrýgresi	27,6	8,8	22,7	3,4

Samkvæmt niðurstöðum 1984 á flutningur N frá lúpínu sér helst stað til yrkja með svipaðan vaxtarferil og lúpínan, fremur til vetraryrkja en sumaryrkja. Flutningur mældist til vetrarrýgresis 1983 og 1984. Enginn flutningur mældist til sumaryrkja af rýgresi og höfrum. Sumaryrkin nutu engu að síður sambýlisins og upptaka þeirra á N úr jarðvegi var meiri á plöntu en í hreinrækt en einungis í besta sprettuárinu 1984. Þurrkur virðist draga úr líkum á flutningi N frá belgjurtinni til sambýlisplöntu miðað við niðurstöður 1985.

Sambýlisáhrif mælast 1984 í vetrarrýgresi, sumarrýgresi og sumarhöfrum, 55 og 56. tafla. Sambýlisáhrif mældust einnig í vetrarrepju 1985, en ekki til vetrarrýgresis eða sumarhafra. Af þessum þremur tegundum er vetrarrepjan síðsprötnust. Af fjórum sláttutímum voru sambýlisáhrif lúpínu á N upptöku vetrarrepju 1985 marktæk í tveimur síðustu sláttutímum 4. október 3 kg/ha ($P=0,05$) og 24. október 6 kg/ha ($P=0,01$). Annars voru hvorki N flutningur eða sambýlisáhrif marktæk.

Á heildina litið var flutningur N frá lúpínu til sambýlisplantna lítill enda var vöxtur sambýlisplantnanna lítill á sáningarári. Flutningur mældist eingöngu til vetrarrýgresis í tveimur árum af þremur sem vetrarrýgresið var með í tilraun. Þurrkur árið 1985 virðist kom í veg fyrir flutning til vetraryrkja af rýgresi og repju.

Að öllu athuguðu eru jákvæð áhrif fódurlúpínu á níturflutning til sambýlisplöntu háðar árferði og yrki. Auk þess nýtur sambýlisplanta þess hvað lúpínan tekur lítið N úr jarðvegi og kemur það fram í auknu próteininnihaldi í sambýlisplöntum lúpínu miðað við prótein í sömu tegund í hreinrækt eins fram kemur í næsta kafla.

Hvítsmári

Áhrif hvítsmára á níturupptöku túnvinguls voru könnuð á sáningarári í tilraun á Korpu 1986. Heildaráhrif hvítsmára (N flutningur + N sparnaður) á N upptöku túnvinguls voru 65 % af N í túnvingli og eru marktæk ($P=0,002$), 57. tafla. Flutningur N frá smára (N^{15} þynningaraðferð) mældist 17 % af N í hvítsmáranum en er langt frá því að vera marktækur ($P = 0,42$).

57. tafla. Sambýlisáhrif hvítmára og N flutningur til túnvinguls í einum slætti á sáningarári, Korpa 1986.

A Prósent af N í túnvingli

	Sambýlis-áhrif alls	N flutt frá Hvítsmára	N sparnaður
Meðaltal	65,0	17,0	48,0
Staðalskekkja	10,9	19,3	21,1
t próf fyrir fráviki frá 0			
t	t=5.98	t=0.88	t=2.28
P gildi <i>P value</i>	0,0019	0,42	0,0718

B. N kg/ha

	Sambýlis- áhrif alls	N flutt frá Hvítsmára	N sparnaður
Meðaltal	1,05	0,24	0,80
Staðalskekkja	0,28	0,29	0,35
t próf fyrir fráviki frá 0			
t	3.7	0.83	2.3
P gildi <i>P value</i>	0,014	0,45	0,069

Sambýlisáhrifin eru því að mestu vegna N sparandi áhrifa lúpínu. Sambýlisáhrifin eru aðeins 1 kg/ha N en marktæk. ($t=3,7$ og $P=0,014$) en flutningur N frá hvítsmára til túnvinguls (N^{15} þynningaradferð) 0,2 kg/ha var hins vegar ekki marktækur ($t=0,83$ og $P=0,45$).

Rauðsmári

Í tilraunum samtímis á meljörð og mýrarjörð á sömu spildu á Korpu 1997 mældust sambýlisáhrif aðeins á mýrarjörðinni, 58. tafla. Flutningur N frá rauðsmára í vallarfoxgras átti sér ekki stað. Sambýlisáhrifin voru því alfarið N sparandi áhrif. Mælingarnar voru gerðar í seinni slætti af tveimur.

Sambýlisáhrif rauðsmára á upptöku N í vallarfoxgras voru 47 % af N í vallarfoxgrasi og 19,4 \pm 4,0 kg/ha N (meðaltal \pm staðalskekkja).

58. tafla Sambýlisáhrif rauðsmára á á níturupptöku í vallarfoxgras.

	Sambýlisáhrif alls		N flutt frá rauðsmára		N sparnaður	
	Mýrarjörð	Meljörð	Mýrarjörð	Meljörð	Mýrarjörð	Meljörð
	% af N í vallarfoxgrasi					
Meðaltal	46,6	-25,7	-1,8	-16,4	46,6	em
Staðalskekkja	6,4	53,2	8,4	11,5	6,4	
t próf fyrir fráviki frá 0						
T	7,3	0.5	0,22	1,43	7,3	
P gildi <i>P value</i>	0,0018	0,65	0,84	0,23	0,0018	

em: N sparnaður á meljörð ekki metanlegur, þar sem bæði sambýlisáhrif og flutningur N voru ekki marktæk.

Áhrif belgjurta á prótein í sambýlisplöntum

Föðurlúpína

Prótein er hærra í lúpínu og vetrarrýgresi í blöndu, en í sömu tegundum í hreinrækt, 59. tafla.

Munur milli ára á hlut próteins í þurrefni skýrist af áhrifum veðráttu á annars vegar þurrefnismyndun (tillífun) og hins vegar á níturupptöku úr jarðvegi og á níturnám úr lofti.

59. tafla. Prótein í föðurlúpínu yrki Uniharvest og sambýlisplöntum í tilraunum 1983-1986. Nítur í áburði 1983 20 kg/ha N og 1984-1986 30 kg/ha.

A. Lúpína Uniharvest og vetrarrýgresi

Ár	Hreinrækt	Blanda		Hreinrækt
	Lúpína	Lúpína	Vetrar- rýgresi	Vetrar- Rýgresi
	Meðaltal ± Staðalskekkja			
1983	13,8 ± 1,2	14,3 ± 1,1	8,8 ± 0,5	7,7 ± 0,5
1984	18,3 ± 0,2	19,1 ± 0,4	6,3 ± 0,2	4,4 ± 0,1
1985	24,4 ± 0,2	24,7 ± 0,3	17,9 ± 1,1	18,2 ± 1,4

B Lúpína yrki Uniharvest og hafrar

Ár	Hreinrækt	Blanda		Hreinrækt
	Lúpína	Lúpína	Sumar- Hafrar	Sumar- Hafrar
	Meðaltal ± Staðalskekkja			
1984	18,3 ± 0,2	18,3 ± 0,5	3,8 ± 0,1	3,6 ± 0,05
1985	24,4 ± 0,2	24,4 ± 0,3	7,8 ± 0,7	6,8 ± 0,3
1986	23,8 ± 0,2	24,1 ± 0,2	3,6 ± 0,1	3,4 ± 0,1

Prótein í lúpínu í hreinrækt var árin 1983-1986 að meðaltali 14-24 % í þurrefni, 59. tafla. Prótein í þurrefni lúpínu í hreinrækt var minnst 14% rigningarsumarið 1983 en þá var níturnám úr lofti óvenju lágt hlutfall af N í lúpínunni og uppskera aðeins 8 hkg/ha. Þurrkasumarið 1985 var prótein í lúpínunni 24% og uppskera í hreinrækt 9 hkg/ha en árin 1984 var próteinið 18% og uppskera 77 hkg/ha og 1986 var prótein 24% og uppskera 50 hkg/ha.

Úrkoman og kuldinn 1983 hafa takmarkað uppskeru mjög en níturupptöku enn meir og níturnám úr lofti hvað mest. Þurrkurinn 1985 hefur hinsvegar takmarkað uppskeru meira en níturnámið.

Skýringar á mismun milli ára er margbrotið samspil tillífunarskilyrða og níturupptöku. Árið 1983 var uppskera mjög lítil, níturupptaka úr jarðvegi einnig, líklegast vegna útskolunar og skilyrði til níturnáms úr lofti slæm.

Þurrkar takmörkuðu uppskeru 1985 í meira mæli en níturupptöku. Þurrkarnir höfðu fremur lítil áhrif á hlut níturnáms úr lofti í N upptöku. Árin 1984 og 1986 voru skilyrði til vaxtar (tillífunar) og níturnáms góð, uppskera mikil og prótein hátt.

Prótein var lægra í rýgresi og höfrum en í lúpínunni eins og búast má við þegar belgjurttir eru bornar saman við tegundir sem eingöngu taka N úr jarðvegi, sérstaklega við lítinn níturáburð

eins og hér var (30 kg/ha N) á nítursnauðri meljörð, þar sem nýtanlegt N var aðeins 45 kg/ha N (A-gildi, jafnnýtanlegt og N í tilbúnum áburði). Eins og í lúpínunni var próteins í þurrefni nokkru hærri í þurrkasumrinu 1985 en árin á undan og eftir.

Hvítsmári

60. tafla. Prótein í blöndu af túnvingli og hvítsmára og í túnvingli, % í þurrefni.

Korpa 1986, meljörð. Sáning 21. maí og slegið 14. ágúst. Áborið N 30 kg/ha.

Sláttutími	Hreinrækt	Blanda			Hreinrækt
	Túnvingull	Túnvingull	Hvítsmári	Túnvingull og hvítsmári	Hvítsmári
	Meðaltal ± staðalskekkja				
14. 08 1986	8,3 ± 0,1	8,9 ± 0,6	17,0 ± 0,7	11,3 ± 0,7	17,4 ± 0,4

61. tafla. Prótein í blöndu af túnvingli og hvítsmára og í túnvingli, % í þurrefni, Gunnarsholti 1993, móajörð. Sáð 1990 eftir endurvinnslu á gömlu móatúni. Áborið N 30 kg/ha

Sláttutími	Hreinrækt	Blanda		Túnv. og hvítsm.
	Túnvingull	Túnvingull	Hvítsmári	
	Meðaltal ± staðalskekkja			
1. sl. 29.06.1993	9,0 ± 0,08	10,0 ± 0,6	23,4 ± 1,2	10,9 ± 0,4
2. sl. 24.09.1993	9,1 ± 0,4	11,2 ± 0,7	19,3 ± 0,9	12,9 ± 1,2

Níturáburður í báðum tilraunum á Korpu og í Gunnarsholti var aðeins 30 kg/ha N og því var prótein í túnvingli aðeins 8-11 %, hærra í túnvingli í blöndu en í hreinrækt, 60. og 61. tafla. Prótein í hvítsmáranum 17-23 % í þurrefni. Prótein í blöndu var 11-13 % í þurrefni enda túnvingull ráðandi í blöndunum

Rauðsmári

Próteinhlutfall í rauðsmára í hreinrækt er um það bil helmingi hærra en í vallarfoxgrasi í hreinrækt., 62. tafla. Á báðum jarðvegsgerðum var prótein í smáranum og grasinu í blöndu hærra en í sömu tegundum í hreinrækt.

62. tafla Prótein í uppskeru af rauðsmára og vallarfoxgrasi í hreinrækt og í blöndu, % í þurrefni. Korpa 1997.

	Meljörð	Mýrarjörð
	meðaltal ± staðalskekkja	
Rauðsmári hreinrækt	22,0 ± 0,5	20,6 ± 1,1
Rauðsmári í blöndu	22,9 ± 0,4	22,5 ± 0,2
Blanda	19,3 ± 0,9	17,1 ± 0,5
Vallarfoxgras í blöndu	12,1 ± 0,6	12,1 ± 0,2
Vallarfoxgras hreinrækt	10,3 ± 0,3	10,3 ± 0,2

Próteinprósenta í rauðsmára var aðeins hærri á meljörðinni en í mýrarjörð. Ekki var munur á próteininnihaldi í vallarfoxgrasi eftir jarðvegsgerðum

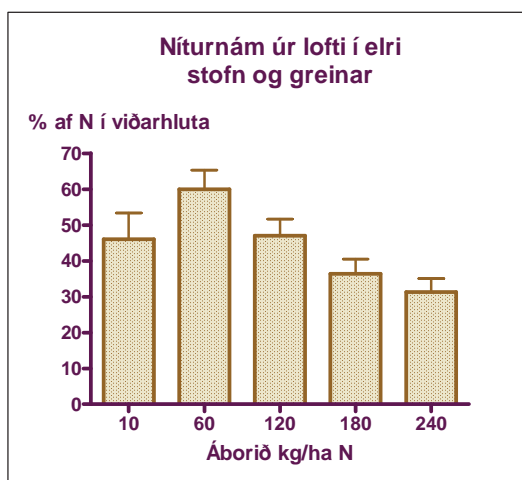
Sameiginlegt með tilrauninum með lúpínu, hvítsmára og rauðsmára er að prótein er nokkru hærra í sambýlisplöntunum í blöndunni en í sömu tegundum í hreinrækt.

Nítur nám í gráelri (*Alnus incana* L. Moench) og síberíulerki (*Larix siberica*)

Elritegundir (*Alnus spp.*) eru meðal þeirra tvíkímblöðunga sem binda nítur úr andrúmslofti í rótarhnýðum, sem mynduð eru af Frankia geislabakterium, Domenach o.fl. 1989, Erkblad og Huss Danell 1995 og Yamanaka o.fl. 2005. Af öðrum ættkvíslum sem mynda rótarhnýði með Frankia má nefna Dryas, Yamanaka o.fl. 2005. Holtasóley (*Dryas octopetala* L.) tilheyrir þeirri ættkvísl.

63. tafla. Nítur nám % af N í viðarhluta og rótum elris.

Áburið N kg/ha <i>Applied N kg/ha</i>	10	60	120	180	240
	% af N í plöntuhluta úr lofti				
	Stofn og greinar				
Meðaltal ± staðalskekkja	46,1 ± 7,3	60,0 ± 5,3	47,1 ± 4,7	36,4 ± 4,2	31,4 ± 3,7
	Rætur				
Meðaltal ± staðalskekkja	49,6 ± 9,3	47,6 ± 4,6	34,3 ± 4,3	23,5 ± 3,0	24,1 ± 2,4



29. mynd. Nítur nám úr lofti í elriplöntum.

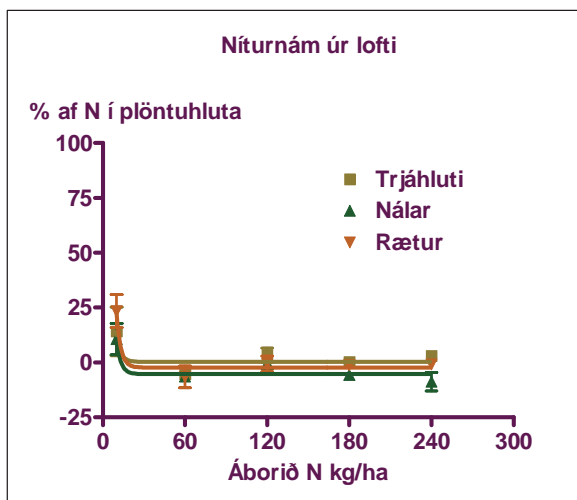
Lerki þrífst á mjög rýrum jarðvegi eins og kunnugt er af ræktun lerkis héraendis. Svepprætur tengjast lerki rótum og geta bætt næringarupptöku úr jarðvegi. Einnig hefur verið sýnt fram á að frumuklumpar úr lerki stækkuðu í ræktun með Frankia geislabakterium F. alni subsp. pommerii og geislabakteríurnar stækkuðu og þræðir mynduðust á yfirborði frumuklumpanna, í millifrumurými, miðjuhimnum (lamellae) og sjaldnar í veggjum plöntufrumanna, Laliberté og Lalonde 1989.

Í tilraun á Mógilsá 1991 var nítur nám úr lofti mælt ári eftir sáningu í gráelri og kannað var hvort nítur nám úr lofti væri mælanlegt í Síberíulerki.

Nítur nám úr lofti er svipað í rótum og viðarhluta elris við níturáburð sem svarar til 10-60 kg/ha N. Um helmingur af N í hvorum plöntuhluta fyrir sig er unnið úr lofti við minnstu skammtana af N-áburði en lækkar í 31 % af N í viðarhlutanum og í 24% í rótum við stærsta N skammtinn., 63. tafla, 29. mynd. Nítur nám úr lofti í elriplöntum.

64. tafla. Níturnám úr lofti í lerki, % af N í plöntuhluta. t-próf fyrir fráviki meðaltalna frá 0,00.

Áborið N kg/ha	10	60	120	180	240
% af N í plöntuhluta úr lofti					
Stofn og greinar					
Meðaltal ± staðalskekkja	14,2 ± 11,0	-5,3 ± 1,5	3,4 ± 3,3	0,3 ± 1,5	3,0 ± 0,8
t, df=4	1,29	3,54	1,03	0,23	3,94
P gildi	0,27	0,024	0,36	0,83	0,017
Nálar					
Meðaltal ± staðalskekkja	10,7 ± 7,2	-6,4 ± 1,2	-0,2 ± 2,4	-5,6 ± 0,9	-8,7 ± 4,1
t, df=4	1,5	5,3	0,08	6,4	2,1
P value	0,21	0,006	0,94	0,003	0,10
Rætur					
Meðaltal ± staðalskekkja	23,4 ± 7,5	-6,5 ± 5,0	-0,6 ± 3,6	-1,1 ± 1,1	-0,8 ± 0,9
t, df=4	3,13	1,31	0,16	0,96	0,86
P gildi	0,035	0,26	0,88	0,40	0,44



30. mynd. Níturnám úr lofti í lerkiplöntum í uppeldi.

Níturnám úr lofti var marktækt ($P=0,035$) í rótum lerkis við minnsta N skammtinn 23% af N í rótum,

64. tafla, 30. mynd. Við minnsta N skammtinn var í öðrum plöntuhlutum að meðaltali um helmingi minna N unnið úr lofti, í trjáhluta 14% og í nálum 11%. Breytileiki endurtekninga var mjög mikill í viðarhluta og nálum lerkis og níturám við minnsta N skammtinn telst ekki marktækt ($P=0,27$ og $0,21$ í viðarhluta og nálum, það er 27 og 21% líkur á að um tilviljun sé að ræða).

Áhrif fosfóraburðar á níturám úr lofti.

Fosfóraburður á fosfórsnaudan sand jók níturám einærrar lúpínu verulega úr 72 kg/ha N í 176 kg í ofanjarðarhluta og úr 8 kg/ha í 22 kg í rótum. Tilraunin var gerð í gróðurhúsi við kjörraka.

Níturámið var 93% af heildar N í blöðum og stönglum án fosfóraburðar en var 98-99% með fosfóraburði. Í rótum voru samsvarandi tölur 80% án fosfóraburðar, 82 % við minnsta fosfórskammtinn (7,5 kg/ha P), en fór síðan minnkandi í 77% af heildar N í rótum vegna vaxandi hlutdeildar N úr jarðvegi við stærri skammta af fosfóraburði.

Áhrif níturaburðar á níturám úr lofti.

Níturám jókst úr 38 í 53% af heildar N í lúpínu (yrki Uniharvest) við aukningu níturaburðar úr 30 í 60 kg/ha N í tilraun í Gunnarsholti 1983. Níturám lúpínu Uniharvest í blöndu jókst úr 44 í 72% af heildar N. Í yrkinu Marri voru samsvarandi breytingar frá 44 í 50% í hreinrækt og frá 41 í 62% í blöndu. Á heildina litið voru þessar breytingar marktækar, aðeins 0,02% líkur á að aukningin sé tilviljun ($P=0,0002$) og 26% af breytileika í níturáminu má rekja til áhrifa aukins N áburðar.

Aukning níturáms úr lofti með auknum N áburði í hreinrækt af Uniharvest yrkinu var frá 5 í 11 kg/ha og í blöndu frá 6 í 11 kg/ha N. Samsvarandi breytingar í Marri voru í hreinrækt frá 8 í 13 kg/ha og í blöndu frá 6 í 8 kg/ha N Þessar breytingar við aukinn N áburð skýra 21% af breytileikanum í níturáminu og líkur á þær sé tilviljun eru 0,1% ($P=0,001$). Skýringin á jákvæðum áhrifum af auknum N áburði á níturámið er takmörkun uppskeru vegna níturskorts sem fylgdi mikilli úrkomu og kulda á vaxtartímanum. Þessu er öfugt varið árið í hagstæðu árferði 1984.

Sumarið 1984 voru vaxtarskilyrði miklu betri og kjörmagn N áburðar var mun minna en 1983. Með aukningu N áburðar 1984 úr 30 í 60 kg/ha á ósmitaða lúpínu minnkaði hlutur níturáms úr lofti úr 92% af heildar N í 87% yrki Uniharvest. Þá voru vaxtarskilyrði mjög hagstæð. Níturámið í kg/ha N var nánast eins við 30 og 60 kg/ha N í áburði $179,4 \pm 17,8$ og $178,0 \pm 16,1$ kg/ha (meðaltal \pm staðalskekking). Í smitaðri lúpínu var níturámið við 30 kg/ha N í áburði 94% af heildar N og 214 kg/ha.

Flutningur á níttri milli hvítmára og vallarsveifgrass

Þórey Gylfadóttir¹, Áslaug Helgadóttir¹ og Henning Høgh-Jensen² 2007. Flutningur á níttri milli hvítmára og vallarsveifgrass. Fræðaging landbúnaðarins 4, 470-474

“Ágrip

Fóðurbelgjurtir gegna lykilhlutverki í sjálfbærum landbúnaði vegna samlífis við níturbindandi örverur. Sýnt hefur verið fram á níturflutning milli belgjurta og grasa en slíkur flutningur er einkar mikilvægur þegar horft er til heildarníturbúskapar í vistkerfinu. Nýlega hefur athyglinni einnig verið beint að gagnkvæmum flutningi á níttri milli þessara tveggja tegundahópa, þ.e. frá belgjurt yfir í gras og öfugt. Gagnkvæmur flutningur á níttri neðanjarðar milli hvítmára og vallarsveifgrass í smáratúni var mældur með merkingu

einstakra plantna með 15N. Reitir voru klipptir fjórum sinnum yfir sumarið með tveggja vikna millibili og sýni þurrkuð, möluð og efnagreind fyrir 15N og heildar N. Flutningur mældist í báðar áttir þó svo að flutningur frá smára yfir í gras hafi verið mun meiri en í gagnstæða átt. Ljóst er að gagnkvæmur flutningur á nitri milli belgjurta og annarra plantna er mjög mikilvægur þegar horft er til niturbúskapar og niturferla bæði í ræktuðum og óræktuðum vistkerfum.”

Fosfór í jarðvegi.

Fosfórforði í jarðvegi, lífrænn og umskiptanlegur fosfór.

Í ítarlegri grein um lífrænan fosfór í íslenskum jarðvegi bendir Bjarni Helgason (2002) á mikilvægi losunar fosfórs úr lífrænum samböndum, fyrir plöntur, enda er fosfór í lífrænum samböndum jarðvegs iðulega mjög stór hluti af heildarfosfór jarðvegs:

„Mikilvægi fosfórs í lífrænum samböndum og niðurbrot þeirra til að losa um fosfórinn yfir í aðgengilegra form fyrir plönturnar er því vel þekkt (Chater og Mattingly, 1980; Sharpley og Smith, 1983, 1985). Varðandi ræktað land á norðlægari breiddargráðum er samt tilhneiging til að horfa fram hjá hugsanlegu hlutverki hins lífræna fosfórs, vegna þess hve hlutdeild hans er yfirleitt talin lítil þegar steinefnajarðvegur er annars vegar (Russell, 1973). Af þessum sökum beinast flestar aðferðir, sem notaðar hafa verið til að áætla fosfór-ástand jarðvegs með tilliti til áburðarþarfar, eingöngu að hinum ólífrænu samböndum hans, þótt eitthvað lítilsháttar af lífrænum efnum kunni að leysast upp um leið. Engu að síður eru dæmi um tún á steinefnajarðvegi þar sem allt að 84% af fosfórforðanum reyndust bundin í lífrænum samböndum (Carter, 1958, sjá Dalal, 1977).“

65. tafla. Lífrænn fosfór í jarðvegi, sýruleysanlegur (H_2SO_4 -P), umskiptanlegur (NaOH-P) og í $NaHCO_3$ -skoli, auk kolefnis (%C) og sýrustigs (pH) í jarðvegi. Bjarni Helgason (2002)

Staður	Ræktunarár	Fjöldi	%C	Lífrænt P	H_2SO_4 -P	NaOH-P	$NaHCO_3$ -P	
				mg/100g	mg/100g	mg/100g	mg/100g	pH
Suðurland	1960-69	15	6,17	57,2	122,4	61,9	2,1	5,80
	1950-59	9	5,14	46,9	132,0	64,6	2,8	5,85
	fyrir 1950	7	4,87	63,5	138,8	80,4	3,0	5,85
Vesturland	1960-69	11	23,17	95	116,3	70,9	3,3	5,10
	1950-59							
	fyrir 1950	4	17,68	193,7	139,2	110,6	2,5	5,05

Heildarmagn lífræns og sýruleysanlegs P var mest í elstu túnunum frá því fyrir 1950 á Suðurlandi, 202,3 mg P/100g jarðveg en var 179,6 mg P í túnunum frá 1960-69 og 178,9 mg P/100g á tímabilinu 1950-59. Umskiptanlegur fosfór (NaOH-P), sýruleysanlegur (H_2SO_4 -P) og fosfór í $NaHCO_3$ -skoli fór vaxandi með aldri túnanna. Lífrænt P er líka mest í elstu túnunum, en er hinsvegar minna í túnunum frá 1950-59 en í yngstu túnunum frá 1960-69. En á heildina litið sýna þessar niðurstöður uppsöfnun lífræns og ólífræns fosfórs í jarðvegi, umskiptanlegs fosfórs og fosfórforða eftir ártuga ræktun.

Náin tengsl eru milli innihalds lífræns fosfórs og C, N og S í jarðvegi. C og N berst í jarðveg með plöntuleifum og S með ákomu úr andrúmslofti eða með úrkomu. Rannsóknir á jarðvegsþróun benda til þess að fosfórmagn í upprunalegum berggrunni ráði uppsöfnun lífrænna efna, N og S í jarðvegi McGill og Cole 1981:

„The importance of P to pedogenesis and the close relationship of organic P (P_o) content to C, N and S contents of soil was recognized early (Walker, 1964). Because C and N are added biologically and S can be absorbed from the atmosphere or enter in precipitation, Walker and Adams (1958, 1959) suggested that the P content of the parent material ultimately controlled the organic matter, N and S contents of soil. By controlling N_2 fixation, P availability to organisms could ultimately control the organic matter content of soil (Walker and Syers, 1976), as is demonstrated in data reported by Adams and Walker (1975) and Adams et al. (1975) for a very old chrono-sequence in New Zealand. Organic matter and P_o accumulated and then declined as P was lost from the system by leaching. Examinations of the contents of inorganic P fractions in several chrono-, topo-, and climo-sequences of soils have helped improve understanding of soil genesis with respect to changes in soil P distribution with time, weathering intensity or stage of soil development (Smeck, 1973; Walker and Syers, 1976).“

Hins vegar eru lítil tengsl milli losunar C og N úr lífrænum forða í jarvegi og fosfórlosunar. Megnið af fosfór í jarðvegi er í fosfat-estersamböndum (með C-O-P tengjum). Fosfór losnar úr þessum samböndum fyrir áhrif lífhvata (fosfatasana). Fosfatasarnir koma frá plönturótum, örverum og svepprótum (mycorrhiza). Fosfór upptaka plantna örvar virkni eða myndun fosfatasana með því að draga úr styrk fosfórs í jarðvegi. Aukinn fosfór í jarðvegi hamlar hins vegar myndun eða virkni fosfatasana. Leysanlegur lífrænn fosfór minnkar meira í jarðvegi þar sem plöntur eru til staðar en í losunarmælingum (incubation) í jarðvegi án plantna, og þar með örva plönturnar losun úr fosfórforða jarðvegs, McGill og Cole 1981:

„Barrow (1961) points out the rather poor relationship between C and N mineralization on one hand and P mineralization on the other. Williams et al. (1960) observed: "The correlations of organic phosphorus with carbon and nitrogen are much lower than for sulphur, and it appears to be a less integral part of the organic matter." Sekhon and Black (1969) suggest that P differs from N in that soluble P_o declines in cropped soil and cropping causes a greater decline in extractable P_o than does incubation in the absence of a plant.“

„Mobilization of P from phosphate esters by phosphohydrolases is subject to both end product inhibition and repression (Feder, 1973). The addition of glucose and $(NH_4)_2SO_4$ increased soil acid phosphatase activity up to six-fold in the absence of added P (Spiers and McGill, 1979), but in the presence of added P, phosphatase production was completely repressed. Those authors concluded that the effects of phosphate on phosphatase operated more through its effect on enzyme synthesis than on activity of pre-existing stabilized enzyme.“

Á Sámstöðum í Fljótshlíð voru árið 1950 hafnar tilraunir með fosfóraburð á tún á framræstri mýrarjörð. Jarðvegssýni voru tekin þar árið 2004 og greint er frá niðurstöðum mælinga á fosfór í jarðvegi í grein Sigurðar Þórs Guðmundssonar og Þorsteins Guðmundssonar 2007

66. tafla. Fosfór í jarðvegi eftir 55 ára mismunandi fosförgjöf. Grunnáburður með 0-39 kg/ha P var 70 kgN og 75 kg ha⁻¹ K. Tekið saman eftir línuritum í grein Sigurðar Þórs Guðmundssonar og Þorsteins Guðmundssonar 2007

Jarðvegs- dýpt		Óáborið	O P	13,1 P	21,9 P	30,6 P	39,3 P	Aukning P við aukið P í áburði frá 0 til 39 P
sm		mg P g ⁻¹ jarðveg						
0-5	Heildar-P	3,2	1,9	3,1	5,1	7,0	7,4	5,5
	Ólífrænt-P	1,8	0,8	1,4	3,0	3,8	5,3	4,5
	Lífrænt P	1,4	1,1	1,7	2,1	3,2	2,1	1,0
	Oxalat skolun	2,6	1,1	1,8	3,3	4,2	5,0	3,9
5-10	Heildar-P	2,0	2,0	3,5	2,5	2,8	3,4	1,4
	Ólífrænt-P	1,1	1,0	1,3	1,5	1,7	2,0	1,0
	Lífrænt P	0,9	1,0	2,2	1,0	1,1	1,4	0,4
	Oxalat skolun	1,5	1,9	1,6	1,2	1,7	2,0	0,1
10-20	Heildar-P	1,2	1,9	1,9	2,4	2,6	2,6	0,7
	Ólífrænt-P	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	0,2
	Lífrænt P	0,3	1,0	0,9	1,4	1,5	1,5	0,5
	Oxalat skolun	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	0,2
		% af heildar P						
0-5	Lífrænt P	44	58	55	41	46	28	-30
5-10	Lífrænt P	45	50	63	40	39	41	-9
10-20	Lífrænt P	25	53	47	58	58	58	5

Aukning fosfórs með fofóráburði í efsta laginu (0-5 sm) er mest í ólífrænum fosfór. Aukningin er marktæk bæði í heildar fosfór og ólífrænum, Sigurður Þór Guðmundsson og Þorsteinn Guðmundsson 2007. Í jarðvegslagi frá 5-10 er einungis marktækur munur á stærsta fosfórskammtinum og reitum án fosfóráburðar. Áhrif fosfóráburðar á fosfór í jarðvegi eru mest í efstu 5 sm jarðvegs.

Meginhluti af heildarfosfór leysist upp í oxalatlausn¹⁷⁶ og bendir það til þess að meginhluti fosfórsins sé bundinn í nýmyndunum en ekki í frumsteindum, Sigurður Þór Guðmundsson og Þorsteinn Guðmundsson 2007.

Notkun N- P-K áburðar eykur hlutfall lífræns fosfór af heildarmagni fosfórs í efstu 10 sm jarðvegs jarðvegi eins og sést af samanburði óborins tilraunliðs við þá liði sem fengu 13 og 22 kg/ha P. Hlutfall lífræns fosfórs í efstu 10 sm við 22 og 31 kg/ha P er 39-46%, svipað og á óáborna liðnum, 44-45%. . Við stærsta fosfórskammtinn er lífrænn fosfór aðeins 28% af heild í efstu 5 sm jarðvegs.

Nýtanlegur fosfór (AL-P) samkvæmt AL- aðferð fór vaxandi með fosfóráburði í efstu 5 sm jarðvegs en aukningin var ekki marktæk neðar í jarðvegi, 67. tafla. AL-P var innan við 1 % af

¹⁷⁶ Skolun jarðveg,s með lausn af ammóníumoxalati og oxalsýru, pH 3

heildar P í 5-20 sm jarðvegsdýpt en jókst úr 0,7 í 3% af fosfórforðanum í efstu 5 sm og P-AL tölurnar úr 1,4 í 22 mg P/100 g jarðveg.

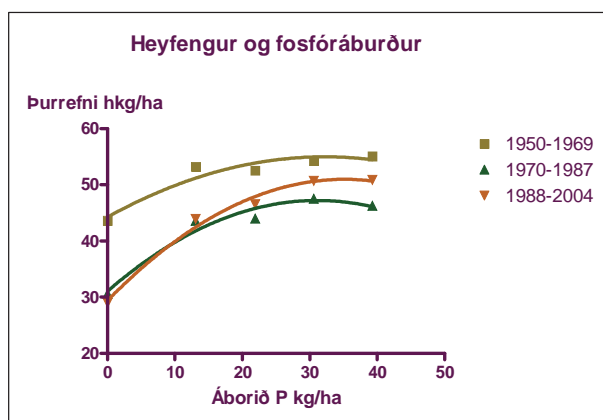
67. tafla. Fosfór í jarðvegi leysanlegur í ammóníumlaktatlausn (P-AL) við vaxandi skammta af fosfóráburði. Mælingar eftir 55 ára mismunandi fosförgjöf. Tekið saman eftir línuritum í grein Sigurðar Þórs Guðmundssonar og Þorsteins Guðmundssonar 2007.

	P kg/ha	Jarðvegsdýpt sm					
		0-5	5-10	10-20	0-5	5-10	10-20
		mg P/100g			% af heildar P		
Enginn áb.	0	0,1	2,0	0,4	0,02	1,0	0,3
Grunnáburður	0	1,4	0,8	1,2	0,7	0,4	0,6
"	13	2,9	2,5	1,2	0,9	0,7	0,6
"	22	5,9	1,2	1,2	1,2	0,5	0,5
"	31	15,1	2,2	1,2	2,2	0,8	0,5
"	39	22,2	3,1	1,2	3,0	0,9	0,5

Tilraunir með fosfóráburð.

Tilraun á Sámsstöðum í Fljótshlíð

Áhrif fosfóráburðar á uppskeru á túni á framræstum mýrarjarðvegi á Sámsstöðum í Fljótshlíð má sjá á 31. mynd. Vaxtarauki fyrir fosfóráburð hefur að jafnaði verið að 31 kg P á ha og var mestur á síðasta tímabilinu 1988-2004. Aukinn vaxtarauki frá fyrsta tímabili til seinni tímabilanna er tilkominn vegna að uppskera hefur minnkað þeim mun meira með tímanum sem fofórskammturinn er minni. Fosfór í heyi % í þe. fer einnig vaxandi að 31 kg/ha P í áburði. Hagkvæmasti áburðarskammtur er alltaf nokkru lægri en sá sem gefur mesta uppskeru og miðað við verð á fosfóráburði (haustið 2009) miklu lægri en svarar til hámarksuppskeru.



31. mynd. Áhrif fosfóráburðar á heyfeng í tilraun 9-50 á Sámsstöðum. Grunnáburður 70 N og 75 K. Uppskeyra 1950 til 1969 leiðrétt vegna breytinga á þurrkun sýna árið 1967. Myndin sýnir aðhvarfslínur fyrir 2. gráðu líkingar. Byggt á gögnum úr grein Hólmgeirs Björnssonar o.fl. 2007.

68. tafla. Hvarf vaxtarauka að fosfóraburði. $y=a + b*x + c*x^2$ y = uppskera hkg/ha og x = P kg/ha áborið. Byggt á meðaltölun þriggja tímabila.

Tímabil	1950-1969	1970-1987	1988-2004
Best-fit values			
a	44,25	31,06	29,37
b	0,6667	1,04	1,23
c	-0,01034	-0,01671	-0,01751
Std. Error			
a	1,837	1,793	1,363
b	0,2085	0,2036	0,1547
c	0,005095	0,004974	0,003781
Goodness of Fit			
Degrees of Freedom	2	2	2
R ²	0,917	0,9631	0,9879
Absolute Sum of Squares	7,145	6,811	3,934
Sy.x	1,89	1,845	1,403
Data			
Number of X values	5	5	5
Number of Y replicates	1	1	1
Total number of values	5	5	5
Number of missing values	0	0	0

Verkefni.

Hve mikil uppskera fæst án fosfóraburðar miðað við tilraunina með fosfóraburð á Sámstaðatúninu og við 10, 15, 20, 25, 30, 35 og 40 kg/ha P. Notið líkingarnar í 68. töflu.

Reiknið uppskeruauka á kg af P í áburði fyrir hverja aukningu áburðar um 5 kg P og því næst kostnað við fosfóraburð á kg hey.

Verð á fosfór má reikna út frá verði þeim fosfóraburði sem fánlegur er, en að frádregnu verði á öðrum plöntunæringarefnum í áburðinum. Dæmi:

Verð á fosfór reiknað:	Verð m. Vsk 2009	kr/kg	
1. Verð á kalsíum í Mg-kalk - 0.2 - 2mm	34.287	97,41	kr / kg Ca
2 Verð á N í kalkammonsaltþétri (Magna 1)	74.239	246,10	Kr/ kg N
3. Verð á fosfór í NP áburði Fjölmóði 1a	82.308	220,30	kr / kg P

1. Í kalkáburðinum Mg-kalk - 0.2 - 2mm er 23,2 % Ca og 12 % Mg
Gert er ráð fyrir sama verði á Ca og Mg og sömu virkni Ca og Mg
2. Magni 1 er með 27% N og 8% Ca
3. Fjölmóði 1a er með 27 % N og 7,2 % P

Verð á fosfór er samkvæmt gefnum forsendum 220,30 kr/kg P.

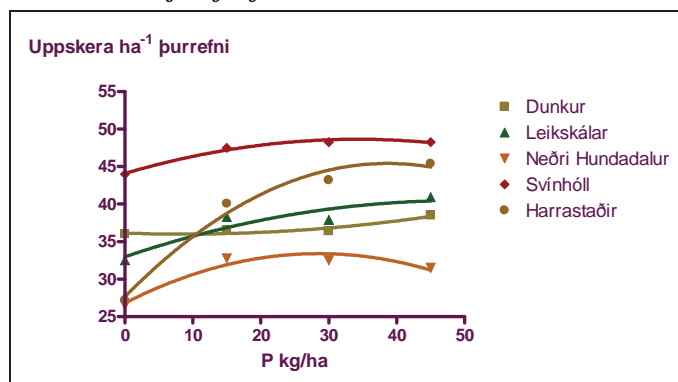
69. tafla. Vaxtarauki fyrir fosfóraburð og áburðarkostnaður á verðlagi 2009. Byggt á tilraun á mýrartúni á Sámstöðum.

	1950- 1969	1970- 1987	1988- 2004	1950- 1969	1970- 1987	1988- 2004
P kg/ha	Vaxtarauki kg þurrefni á kg P			Aburðarkostnaður kr á kg vaxtarauka		
5	61,5	95,6	114,2	17,91	11,52	9,64
10	51,2	78,9	96,7	21,53	13,95	11,39
15	40,8	62,2	79,2	26,98	17,70	13,90
20	30,5	45,5	61,7	36,14	24,20	17,85
25	20,1	28,8	44,2	54,69	38,24	24,92
30	9,8	12,1	26,7	112,40	91,07	41,26
35	-0,5	-4,6	9,2			
40	-10,9	-21,3	-8,3			

Miðað við áætlað heyverð 30 kr/kg þurrefni og að áburðarkostnaður fari ekki fram yfir það væri ekki hagkvæmt að nota meir en 15-25 kg/ha P mismunandi á þremur tímabilum í 68. töflu.

Tilraunir í Dalasýslu.

Vaxtarauki eftir fosfóraburð.



32. mynd. Uppskera við vaxandi skammta af fosfóraburði á í tilraunum 1985-1988 á fimm bæjum í Hörðudal, Miðdölum og Haukadal. Ríkhald Brynjólfsson 1990.

Vaxtarauki fyrir fosfóraburð var „marktækur eða nær marktækur“ á fjórum stöðum. Á Harrastöðum var svörun við fosfóraburði marktæk að 30 kg/ha af fosfór (P). Vaxtarauki er „hámarktækur“ á Neðri Hundadal, en þar er ekki þörf fyrir meir en 15 kg/ha af P. Samanburður liða er einnig marktækur á Dunki að 15 kg/ha P og nær marktækur á Svínhóli. Á Leikskálum er ekki marktæk svörun við fosfóraburði. Þar sem vaxtarauki er marktækur er vallarfoxgras ráðandi grastegund, frá 70-90% og allráðandi á Harrastöðum þar sem vaxtaraukinn er mestur. Á Leikskálum þar sem ekki er marktækur vaxtarauki eftir fosfóraburð snarrót ríkjandi 60 % af gróðurþekjunni. Fosfóraburður sem gefur marktækan vaxtarauka er jafnframt hagkvæmastur miðað við verðmæti vaxaraukans og verð þess viðbótarskammts af fosfór sem gefur vaxtaraukann.

70. tafla. Uppskeyra hkg þurrefni á hektara við vaxandi skammta af fosfór í tilraunum í Dalasýslu 1985-1988. **Feitletrað: uppskeyra við hagvæmustu skammta skv. verðmæti vaxtarauka og viðbótarskammts af áburði**

Fosfór áburður	Haukadalur	Hörðudalur	Miðdalir		
			Neðri Hundadalur	Svínhóll	Harrastaðir
P kg/ha	Leikskálar	Dunkur			
0	36,0	32,5	26,5	44,0	27,2
15	36,5	38,3	32,8	47,5	40,1
30	36,4	37,9	32,5	48,3	43,2
45	38,5	40,9	31,5	48,3	45,4

71. tafla. Meðaltöl ammoniumlaktat leysanlegs fosfórs (P-AL) í jarðvegi ,mg P/ 100 g jarðveg 1985 við vaxandi skammta af fosfór áburði og breyting P-Al gilda á tilraunatímanum 1985-1988.

Feitletrað: P-AL við hagvæmustu skammta skv. verðmæti vaxtarauka og viðbótarskammts af áburði.

Fosfór	Leikskálar		Dunkur		N-Hundadalur		Svínhóll		Harrastaðir	
	P Kg/ha	Mt. 1985	Breyt. 1985-1988	Mt. 1985	Breyt. 1985-1988	Mt. 1985	Breyt. 1985-1988	Mt. 1985	Breyt. 1985-1988	Mt. 1985
0	6,3	3,1	5,6	-2,3	1,0	0,3	3,6	0,3	2,8	-1
15	7,8	7,4	5,9	-2,1	1,4	0,0	3,1	0,3	4,2	-0,8
30	8,8	5,4	6,9	0,0	1,1	0,8	3,8	0,7	4,6	0,6
45	8,3	16,1	7,7	0,9	1,6	1,1	5,2	0,8	6,4	2,5

72. Tafla. Fosfór í grasi við vaxandi fosfór áburð.

Feitletrað: fosfórprósenta við hagvæmustu skammta skv. verðmæti vaxtarauka og viðbótarskammts af áburði.

Fosfór	Leikskálar		Dunkur		Neðri Hundadalur		Svínhóli		Harrastaðir	
	P kg/ha	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
0	0,26	9	0,24	8	0,17	5	0,20	9	0,16	7
15	0,32	12	0,28	11	0,23	8	0,26	12	0,23	9
30	0,35	13	0,33	12	0,26	8	0,29	14	0,26	11
45	0,38	15	0,34	14	0,29	9	0,33	16	0,26	13

Gott samræmi milli fosfórþarfar samkvæmt jarðvegs-, grasefnagreininga og hagkvæmustu skammta af fosfór áburði er aðeins á einum af bæjunum fimm, Harrastaðum. Tiltölulega lítil frávik (0-5 kg/ha P) er á milli lægri skammtar skv, grasefnagreiningu og fosfórþörf byggðri á tilrauninni á þremur bæjum. Munurinn á Leikskálum milli fosfórþarfar eftir efnagreiningum og vaxtarauka stafar af því að við túlkun efnagreininganna er gert ráð fyrir ákveðinni lágmarksþörf til viðhalds fosfórs í jarðvegi en ekki í túlkun tilraunanna.

Nánari skoðun efnagreininga við hagkvæmustu áburðarskammta bendir til þess að við hagkvæmustu skammta séengið á fosfórförða jarðvegs.

73. tafla. Áætluð fosfórför eftir efnagreiningum og uppskeru.

Staður	Fosfórförf. kg/ha		
	Jarðvegur	Gras ^a	Uppskera
Leikskálar	25	15-20	0
Dunkur	25	15-20	15
Neðri-Hundadalur	45	20-35	15
Svínhóll	35	20-30	15
Harrastaðir	35	20-40	30

Við hagkvæmustu skammta eftir uppskerumælingum urðu litlar breytingar frá 1985-1988 á nýtanlegum fosfór í jarðvegi (P-AL) á þremur bæjanna. Á tveimur þeirra eru fosfórtölur við þessa fosfórskammta neðan við æskileg mörk. Hins vegar hækkuðu fosfórtölurnar á Leikskálum jafnvel þar sem enginn fosfór var borinn á og voru þó háar í byrjun. Á Dunki lækkaði fosfórtalan mikið við ráðlagða skammtinn eða um 2,1 mg P-AL/100 g jarðveg.

Fosfór í grasi (%) er er í lægra lagi miðað við hagkvæmustu skammta eftir verðmæti vaxarauka og viðbótaráburðar.

Ljóst er að hagkvæmstu skammtar af fosfóráburði eftir niðurstöðum uppskerumælinga í tilraununum eru lægri en leiðbeiningar eftir jarðvegsefnagreiningunum og einnig lægri en stærstu skammtar eftir grasefnagreiningum. Eins og þegar er nefnt eru grasefnagreiningarnar breytilegar eftir árum.

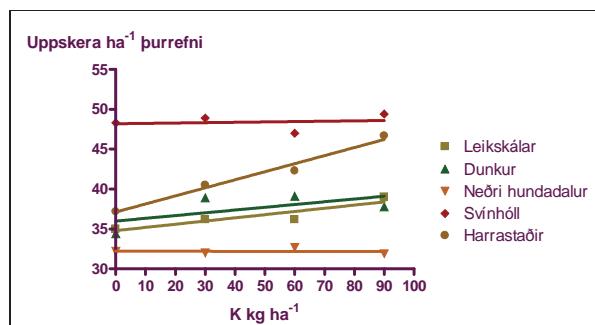
Nýtanlegur fosfór í jarðvegi á þremur bæjanna er mjög lítill að liðnum þremur árum við hagkvæmustu skammtana með tilliti til uppskeru og á einum þeirra hefur fosfórtalan (P-AL) lækkað niður fyrir æskileg gildi úr 5,9 í 3,8 mg/100 g.

Þær tilraunir sem hér eru ræddar gefa tilefni til ályktana og skýringa á mismunandi mati á fosfórför eftir uppskerumælingum, jarðvegs- og grasefnagreiningum með eðlilegum fyrirvara vegna breytilegra aðstæðna, svo sem mismunandi gróðurfari og jarðvegi. Þannig má segja að hver tilraun sé einstök og þörf sé á framhaldi rannsókna til að styrkja grunninn að ábuðarleiðbeiningum. Að þessu sögðu eru helstu ályktanir af af tilraununum í Dalasýslu í stuttu máli þessar:

Ráðlegir skammtar af fosfóráburði eftir jarðvegsefnagreiningunum viðhalda eða auka nýtanlegan fosfórförða, en hagkvæmstu skammtar miðað við uppskeru ganga frekar á nýtanlegan förða. Fosfórskammtar eftir grasefnagreiningum fara milliveg og eru breytilegar eftir árum.

Tilraunir með kalíáburð

Vaxarauki eftir kalíáburð.



33. mynd. Uppskera við vaxandi skammta af kalíáburði á í tilraunum 1985-1988 á fimm bæjum í Hörðudal, Miðdölum og Haukadál. Ríkharrð Brynjólfsson 1990.

Marktækur vaxarauki fyrir kalí var aðeins í tilrauninni á Harrastöðum og var marktækur allt að stærsta kalískammti 90 kg/ha K í áburði. Á Leikskálum og Dunkur var að meðaltali mest uppskera við 90 og 60 kg/ha K, en vaxaraukinn er ekki marktækur. Á Svínhól og Neðri Hundadal mældist ekki marktæk svörun við kalíáburði.

74. tafla. Uppskera hkg þurrefni á hektara við vaxandi skammta af kalí í tilraunum í Dalasýslu 1985-1988. **Feitiletrað:** uppskera við hagvæmustu skammta skv. verðmæti vaxtarauka og viðbótarskammts af áburði

Kalíáburður	Haukadalur	Hörðudalur	Miðdalir		
			Neðri Hundadalur	Svínhóll	Harrastaðir
K kg/ha	Leikskálar	Dunkur	Neðri Hundadalur	Svínhóll	Harrastaðir
0	35,0	34,4	32,2	48,3	37,2
30	36,2	38,9	32,0	48,9	40,5
60	36,2	39,1	32,7	47,0	42,3
90	39,0	37,8	31,9	49,4	46,7

75. tafla. Meðaltöl ammoniumlaktat leysanlegs kalí (K-AL) í jarðvegi, mg K/100 g jarðveg 1985 við vaxandi skammta af kalíáburði og breyting K-Al gilda á tilraunatímanum 1985-1988. **Feitiletrað:** K-AL við hagvæmustu skammta skv. verðmæti vaxtarauka og viðbótarskammts af áburði

Kalí	Leikskálar		Dunkur		N-Hundadalur		Svínhóll		Harrastadir	
	K kg/ha	Mt.	Breyting 1985-1988	Mt.	Breyting 1985-1988	Mt.	Breyting 1985-1988	Mt.	Breyting 1985-1988	Mt.
0	0,52	0,00	0,55	0,22	0,52	-0,07	0,52	-0,05	0,59	0,05
30	0,60	-0,01	0,59	-0,07	0,77	-0,12	0,55	0,07	0,68	-0,12
60	0,53	0,14	0,60	-0,04	0,79	0,17	0,60	0,08	0,68	-0,04
90	0,53	0,27	0,54	-0,05	1,08	0,22	0,59	0,18	0,64	0,24

76. tafla Kalí í grasi við vaxandi kalíáburð.

Feitletrað: kalíprósenta við hagvæmustu skammta skv. verðmæti vaxtarauka og verði viðbótarskammts af áburði

	Leikskálar		Dunkur		N-Hundadalur		Svínhóll		Harrastadir	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
K0	1,42	51	1,53	54	2,33	75	1,33	64	1,75	65
K30	1,70	61	2,18	85	2,52	80	1,63	79	2,13	86
K60	1,99	72	2,24	87	2,60	84	1,87	88	2,38	100
K90	2,39	93	2,38	90	2,65	84	2,13	105	2,65	123

Aðferðir við mat á kalí- og fosfórpörf í túnnum. Yfirlit.

Samanburðurinn á aðferðum við mat á kalí og fosfórpörf byggir eingöngu á niðurstöðum úr tilraununum fimm í Dalasýslu 1985-1988, sem fjallað var um hér að framan.

77. tafla. Ráðlagðir skammtar af P og K eftir efnamagni jarðvegs, áætluðu þörf til hámarksuppskeru eftir grasefnagreiningu og hagkvæmustu skammtar metnir eftir verðhlutfalli áburðar og uppskeru.

Staður	Fosfórpörf. kg/ha			Kalí þörf, kg/ha		
	Jarðvegur	Gras ^a	Uppskeyra	Jarðvegur	Gras ^a	Uppskeyra
Leikskálar	25	15-20	0	40-60	25-60	0
Dunkur	25	15-20	15	40-60	25-40	30
Nedri-Hundadalur	45	20-35	15	40-60	25	0
Svínhóll	35	20-30	15	40-60	25-60	0
Harrastadir	35	20-40	30	40-60	25	90

^a Sveiflur milli ára

Á heildina litið er mikill munur á matinu á kalí- og fosfórpörf eftir þessum þremur aðferðum. Fosfór og kalíþörf eftir uppskeru gerir ekki ráð fyrir ákveðinni lágmarksþörf til viðhalds á nýtanlegum forða af P og K í jarðvegi. Sé gert fyrir viðhaldsþörf sem svarar 15 kg/ha P og 25 kg/ha K í þeim tilvikum þar sem enginn vaxtarauki fyrir P eða K mælist, batnar samanburðurinn til muna, einkum hvað varðar grasefnagreiningarnar. Eftir sem áður er ósamræmi milli aðferða einkum fyrir jarðvegsefnagreiningarnar og hvað kalí snertir einnig fyrir stærri skammtana eftir grasefnagreiningunni (25 kg/ha K).

Kalítölur (K-AL) í jarðvegi á bilinu 0,4- 0,8 eru taldar í meðalagi og kalíþörf við þessar kalítölur er metin 18 kg/ha K fyrir hver 10 hkg/ha af þurrefni. Þorsteinn Guðmundsson og Jóhannes Sigvaldason 2000. Kalíþörf eftir þessarri aðferð miðuð við melda uppskeru (við hagkvæmustu kalískammta sbr. **74.** töflu) yrði á bilinu 58-84 kg/ha K eða talsvert meiri en matið á kalíþörf eftir jarðvegsefnagreiningunni án tillits til uppskeru (40-60 kg/ha K).

Brennisteinspörf í jarðrækt.

Í grein Bjarna Helgasonar 1994 er ítarlegt yfirlit um ástæður fyrir þeim brennisteinsskortum sem kom fram víað um lönd á seinni hluta 20 aldar og varð ljós hér á landi upp úr 1960. Hér verður efni þessarrar greinar rífað upp með beinum tilvitnunum.

Bjarni lýsir þeirri þróun sem varð í framboði á áburðartegundum upp úr miðri 20. öld og vegna aðgerða til að draga úr loftmengun á níunda áratugnum með þeim afleiðingum að brennisteinsskorts varð vart víða um lönd þar sem skorts á brennsteinum í ræktun nytja jurta hafði ekki orðið vart áður:

“Brennistein í áburði var fyrst og fremst að fá í ammóníum sulfati, öðru nafni brennisteinssúru ammóníaki, og í venjulegu súperfosfati. Á síðustu áratugum hefur ammóníum nítrat að mestu leyti komið í stað brennisteinssúrs ammóníaks og þrífosfats, sem inniheldur aðeins um 1,5% brennistein (S) í stað súperfosfats, sem inniheldur 17-18% brennistein (S). Og síðastar eru svo áburðarblöndurnar, sem byggja að verulegu leyti á ammóníumfosfati um leið og þær eru enn hreinni hvað aukaefni snertir.”

“Breytingar á viðhorfum til loftmengunar á seinustu árum hafa leitt til þess, að langtum minna magn af brennisteini berst nú út í andrúmsloftið en t.d. kringum 1970. Sem dæmi má nefna, að bara á síðasta áratug minnkaði brennisteinmagn í úrkomu í Noregi um 33-43% (Singh 1993) og í Mið-Svíþjóð um fimmtung (Simán 1993).

Þessar viðhorfsbreytingar eiga m.a. verulegan þátt í því, að brennisteinsskortur í ræktun er nú að finna um allan heim, meira að segja í námunda við þau iðnaðarsvæði Evrópu, sem til skamms tíma spúðu hvað mestri mengun út í andrúmsloftið. Gott dæmi í því sambandi er Slésvík-Holstein svæðið í Þýskalandi, þar sem hreinn brennisteinn í úrkomunni hefur minnkað úr 80 kg S/ha á árunum 1955-56 niður í 20 kg S/ha þrjátíu árum síðar (Schnug 1991). Að sjálfsögðu koma hér líka til sögunnar uppskerumeiri plöntur og um leið áburðarfrekari en áður var.”

Í grein Bjarna er jafnframt greint frá tilraunum og rannsóknum sem leiddu til þess að brennisteinsskortur í túnrækt var staðfestur hér á landi og við honum brugðist með því að auka brennsteins magn í áburðarblöndum sem hér voru framleiddar í Áburðarveksmiðjunni á sínum tíma:

Hér á landi kann brennisteinsskortur fyrst að hafa komið í ljós á árunum 1959 og 1960 í venjulegum grasræktartilraunum á Hólum í Hjaltadal og að Sámsstöðum (Árni Jónsson og Hólmgeir Björnsson 1964). Á þeim tíma var fyrirbærið óþekkt í ræktun nema á fáum stöðum vestan hafs og þessar tilraunaniðurstöður hér voru afgreiddar á þessum tíma sem einhvers konar tilraunaskekkja. Þá datt engum í hug, að brennistein gæti skortur í landi hvera og brennisteinsfyllu og erlendum vísindamönnum finnst það jafnvel ótrúlegt enn í dag. Það er svo ekki fyrr en með víðtæku tilraunauppgjöri árið 1977 (Áslaug Helgadóttir, Hólmgeir Björnsson og Friðrik Pálmason 1977), að þessar niðurstöður fá viðurkenningu sem marktækar. Í millitiðinni, þ.e. á árunum 1965 og 1966, hafði Jóhannes Sigvaldason staðfest (1966 og 1967) fyrst fyrir hálfgerða tilviljun brennisteinsskortur í túnnum í Mývatnssveit. Á árunum þarna á undan höfðu bændur á svæðinu mjög kvartað yfir, að illa sprytti undan Kjarnanum. Gekk það jafnvel svo langt, að mönnum fannst eitthvað vanta á græna litinn í grasinu. Meintum eitúrhreifum Kjarnans var svo kennt um ósköpin. Eftir þetta voru gerðar ýmsar tilraunir og athuganir um land allt, sem staðfestu, að víða mætti búast við brennisteinsskortum. Þær leiddu síðan m.a. til fyrrgreinds tilraunauppgjörs þeirra Áslaugar, Hólmgeirs og Friðriks (I. mynd).”

Vel má vera að það sem mönnum fannst “vanta á græna litinn í grasinu” hafi í raun verið afleiðing af brennisteinsskortri en sameiginlegt einkenni brennisteinsskorts er einmitt blaðgrænskortur (chlorosis), sem er þó ekki sérkenni þar sem ljós eða fögur litur fylgir til dæmis einnig níturskortri. Tilraunir Jóhannesar Sigvaldasonar staðfestu brennisteinsskortinn og urðu til þess að að farið var að kanna brennsteins þörfina víðar, en tilraunirnar á Hólum og Sámsstöðum höfðu ekki vakið sömu eftirtekt.

Um þær breytingar sem voru gerðar á framleiðslu áburðar efir að þörfin fyrir brennistein var orðin ljós segir í grein Bjarna Helgasonar 1994:

„Árið 1972 var farið að framleiða blandaðan áburð hér á landi. Árið 1974, þegar hluti af þessum tilraunaniðurstöðum lá fyrir, ákvað Áburðarverksmiðjan því að koma til móts við þessa nýju þörf, sem fram að þessu hafði eingöngu verið staðfest með vissu í tünnum norðanlands. Þetta var áburðarblandan Græðir 4+2 en talan 2 í þessu sambandi táknaði 2% brennisteinsinnihald blöndunnar. En þegar svo staðfestum tilfellum um brennisteinsskort fjölgaði, var ákveðið, að frá og með 1985 skyldu allar venjulegar tünblöndur Áburðarverksmiðjunnar innihalda 2% af brennisteini (S). Í fyrstu var notað brennisteinssúrt kalí (kalíum súlfat) til að koma brennisteini í blöndurnar en á seinni árum brennisteinssúrt ammóníak (ammóníum súlfat).

En hvers vegna var ákveðið að halda sig við 2% en ekki t.d. 1% eða 3%? Samkvæmt tilraunaniðurstöðunum virtust 8-10 kg/ha af brennisteini í áburðinum vera í flestum tilfellum fullnægjandi (Áslaug, Hólmgæir og Friðrik 1977) og áburðarleiðbeiningarnar voru almennt miðaðar við 400-500 kg af áburðarblöndu á hektara. Miðað við þessar áburðarleiðbeiningar var því víðast hvar vel séð fyrir hugsanlegri brennisteinsþörf í túnræktinni.

Hins vegar er það svo, að uppskeruauki fyrir brennistein í áburði og brennisteinsskortur er ekki árvisst fyrirbæri og mun veðurfarsþátturinn trúlega valda þar mestu um. Brennisteinninn í áburðarblöndunum er því fyrirbyggjandi aðgerð sem fyrst og fremst er hugsuð til að koma í veg fyrir uppskerutap. En um leið verða menn að hafa það í huga, að brennisteinn sýrir jarðveginn með tímanum þótt árleg notkun hans sé lítil.“

Um aðferðir til að kanna þörf fyrir brennistein í áburði segir í grein Bjarna

Rannsóknir hafa sýnt, að jarðvegsefnagreiningar til að sjá fyrir brennisteinsskort hafa enn mjög takmarkað gildi. Það er m.a. vegna þess, að þær gefa ekki mat á hina óútreiknanlegu veðurfarsþætti eða hve mikið muni berast með úrkomunni. En fyrst og fremst er það, að súlfatið í jarðveginum er einkar óstöðugt - brennisteinninn, sem plönturnar taka úr jarðveginum er í formi súlfats - og hripar hratt niður gagnstætt t.d. fosfórnium. Breytingar á súlfat-innihaldinu yfir vaxtartímann geta því í senn verið miklar og óútreiknanlegar. Öruggasta leiðin í þessu sambandi eru blaðefnagreiningar í lok vaxtartímans og þá skiptir máli, að teknir sé yngstu þroskuðu vaxtarsprotarnir (Withers 1993).

Undir lokin skal bent á að við blað- eða heyefnagreiningarnar er annars vegar skoðað brennisteinsinnihaldið í heyinu og hins vegar hlutfallið milli köfnunarefnis (N) og brennisteins (S). Í grein þeirra Áslaugar, Hólmgæirs og Friðriks, sem áður er vitnað til, kemur fram, að í nokkrum tilraunanna reyndist þetta N/S hlutfall vera milli 10 og 20 og í kringum 16 við hámarksuppskeru. Eins og þau bentu á var þessi síðastnefnda tala í góðu samræmi við erlendar niðurstöður.

Nú 25 árum seinna, þegar brennisteinsskortur í grasrækt er orðinn jafn algengur og raun ber vitni, gera Bretar t.d. ráð fyrir að þetta N/S hlutfall eigi að vera 15,5. Búast má við

uppskeruauka fyrir brennisteinsáburð, ef þetta hlutfall verður hærra en sé hlutfallið lægra á hins vegar allt að vera í lagi (Chaney 1993). Finnar, sem hafa skoðað vallarfoxgras sérstaklega og eru með mjög svipaða þurrefnisuppskeru og við, telja N/S hlutfallið 13-14 fullnægjandi. Hins vegar er markgildi fyrir brennisteininn breytilegt eftir því, hve mikið köfnunarefni hefur verið borið á (Saarela 1993) en þessi markgildi eru ekki óáþekk þeim sem voru reiknuð út fyrir tilraunirnar okkar á sínum tíma“.

Eins og bent er á í grein Bjarna Helgasonar 1994 er með 2% brennsteini í áburði með um 20% N brennisteinsþörfinni yfirleitt fullnægt. Hins vegar er þörfin helst fyrir hendi á sendnum jarðvegi og þar sem úrkoma er lítil. Brennistein sem berst í jarðveg með úrkomu minnkað þó til muna á síðustu áratugum tuttugust aldar vegna bættra mengunarvarna.

Um tilraunir með brennsiteinsáburð og rannsóknir sem tengjast þörf nytjajurta fyrir brennistein er nánar fjallað í eftir töldum heimildum:

Áslaug Helgadóttir, Friðrik Pálmason og Hólmgeir Björnsson 1977. Áhrif brennisteinsáburðar á heyfeng og brennistein í grasi. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir (J. AGR. RES. ICEL), 9,2: 3-21

Bjarni Helgason 1994. Brennisteinn í áburði og jarðvegi. Ráðunautafundur 1994, 186-192. Útgefandi Rannsóknastofnun landbúnaðarins og Búnaðarfélag Íslands

Jóhannes Sigvaldason (1966). Rannsóknir á brennisteinsskorti í íslenskum túnum. I. Ársrit Ræktunarfélags Norðurlands 63: 49-64.

Jóhannes Sigvaldason (1967). Rannsóknir á brennisteinsskorti í íslenskum túnum. II. Ársrit Ræktunarfélags Norðurlands 64: 65-77.

Snefilefni í jarðvegi, plöntum og næringu búfjár.

Kölkun, sýrustig í jarðvegi og snefilefni

Nýtanlegt magn í jarðvegi af járn, mangan, kopar og síni fer minnkandi með hækkandi pH í jarðvegi, en nýtanleiki molybdens vaxandi. Nýtanleiki bórs og fosfórs er mestur við pH 6-7. Nýtanleiki meginefna annarra en fosfórs, það er N, K, Ca, Mg og S vex með hækkandi pH, sbr. til dæmis Finck 1969 og aðrar kennslubækur í plöntunæringu, áburðar og jarðvegsfræði.

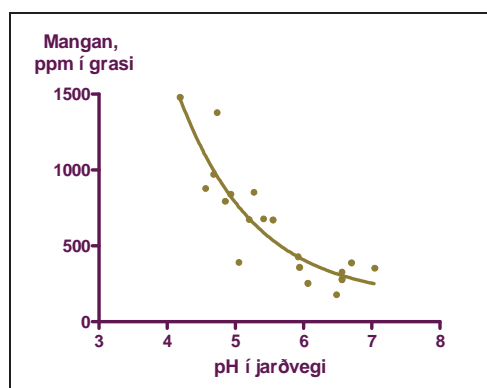
Hér á landi hafa áhrif kölkunar á mýrarjarðvegi á mangan og síni upptöku verið könnuð. Umfangsmiklar rannsóknir hafa verið gerðar á snefilefnum í heyi úr öllum landshlutum hafa farið fram með tiliti til heilbrigði búfjár ekki síst riðu í sauðfé. Yfirlit um niðurstöður og ályktanir höfunda fer hér á eftir ásamt upplýsingum um kjörmagn snefilefni í túngrösum við 10-15% prótein í byrjun blómgunar.

78 tafla. Áhrif kölkunar á mangan og síni í grasi á mýrarjarðvegi. Tilraun 20-56 Reykhólum. Friðrik Pálmason 1972.

1956	1968	1965	1968	1970	Mt.	1965	1968	1970	Mt.
Kalk tonn/ha		Mangan ppm í þurrefni				Síni ppm í þurrefni			
0	0	789	870	1375	1011	34	50	44	43
4	0	677	657	829	721	32	46	41	40
8	0	377	356	390	374	32	47	35	38
12	0	355	321	298	325	28	44	36	36
0	4		971	1455	1213		49	41	45
4	4		849	657	753		45	37	41
8	8		424	242	333		44	31	38
12	12		285	175	230		42	30	36

Um niðurstöður segir (Friðrik Pálmason 1972):

„Kölkun dregur úr mangan og zinkmagni í grasinu. Kjörmagn af mangan í nytjajurtum fyrir vöxt jurtanna er talið vera 40–200 ppm (mg í kg af þurrefni), og eitrunarmörk hafa verið sett við 1000 ppm fyrir hafra og 500 ppm fyrir lúsernu, bygg og fleiri nytjaplöntur Finck (1968). Í Bandaríkjunum hefur manganeitrun komið fram í mjög og súrum jarðvegi, Tisdale og Nelson (1966), bls. 334....”



34. mynd. Sýrustig í jarðvegi og mangan í grasi. Tilraun 20-56 Reykhólum, mælingar 1965, 1968 og 1970.

„Kjörmagn af zinki í ungum hafrablöðum er talið vera 20–90 ppm miðað við þurrefni, skortsmörk 15 ppm og eitrunarmörk 300 ppm, Finck (1968). Nýtanleiki zinks er talinn meiri í súrum jarðvegi en í

lútkennendum jarðvegi, Tisdale og Nelson (1966), en þó taka sömu höfundar fram, að oft finnist ekki samhengi milli pH í jarðvegi og zinkupptöku plantna. Þannig var í 53 jarðvegsgerðum með pH 4.0 — 8.3 ekkert samhengi milli pH og svörunar við zinkgjöf. Þó að kölkunin dragi úr hlutfallsmagni af zinki og mangan í grasinu, er ekki þar með sagt, að kölkunin hafi raunverulega dregið úr upptöku þessara efna, miðað við hektara. Manganupptaka minnkar við kölkun, en zinkupptaka ekki.”

Við kölkun jarðvegs fellur styrkur mangan í grasi um helming með hækkandi pH í jarðvegi sem nemur um 0,77 pH einingum miðað við niðurstöður tilraunarinnar á Reykhólum..

79. tafla. Snefilefni í heyi og grasi og kalk í jarðvegi, Björn Guðmundsson og Þorsteinn Þorsteinsson 1980

	Meðaltal	Mest	Minnst	Meðal- frv.	Fjöldi sýna	Seinni sláttur
Kóbalt í grasi ppm						
270-70 Hvanneyri., liður A, 0 kalk	0,24	0,27	0,19	0,04	3	0,59
270-70 Hvanneyri, kalkaðir reitir	0,20	0,28	0,15	0,04	12	0,46
Stakkhamrar, ókalkað	0,24	0,26	0,22	0,03	2	
Stakkhamrar, kalkað	0,28	0,34	0,24	0,04	6	
Skeljasands jarðvegur	0,12	0,41	0,02	0,10	16	
Beitartilraunir o.fl.	0,42	0,73	0,09	0,22	25	
Kopar í grasi, ppm						
270-70 Hvanneyri., liður A, 0 kalk	3,97	5,9	2,2	1,85	3	4,8
270-70 Hvanneyri, kalkaðir reitir	3,81	3,8	2,3	1,12	12	4,0
Stakkhamrar, ókalkað	4,65	4,7	4,6	0,07	2	
Stakkhamrar, kalkað	4,17	4,7	3,7	0,43	6	
Skeljasands jarðvegur	3,79	5,0	1,5	1,07	16	
Beitartilraunir o.fl.	3,7	8,5	1,3	2,10	25	
Járn í grasi, ppm						
270-70 Hvanneyri., liður A, 0 kalk	203	305	79	115	3	895
270-70 Hvanneyri, kalkaðir reitir	201	370	95	100	12	844
Stakkhamrar, ókalkað	97	125	69	40	2	
Stakkhamrar, kalkað	104	134	69	25	6	
Skeljasands jarðvegur	170	325	70	72	16	
Beitartilraunir o.fl.	864	2893	138	691	25	
Mangan í grasi, ppm						
270-70 Hvanneyri., liður A, 0 kalk	178	250	64	100	3	436
270-70 Hvanneyri, kalkaðir reitir	133	205	68	47	12	225
Stakkhamrar, ókalkað	259	288	230	41	2	
Stakkhamrar, kalkað	194	230	173	22	6	
Skeljasands jarðvegur	51	134	15	33	16	
Beitartilraunir o.fl.	238	740	44	179	25	

Símk í grasi, ppm						
270-70 Hvanneyri., liður A, 0 kalk	28,3	41	15	13	3	29
270-70 Hvanneyri, kalkaðir reitir	21,9	30	14	5,9	12	27
Stakkhamrar, ókalkað	33	42	23	13	2	
Stakkhamrar, kalkað	29	50	16	12,8	6	
Skeljasands jarðvegur	22,5	29	13	5,7	16	
Beitartilraunir o.fl.	39	112	19	26	25	
Nikkel í grasi, ppm						
270-70 Hvanneyri., liður A, 0 kalk	1,53	1,8	1,1	0,38	3	1,9
270-70 Hvanneyri, kalkaðir reitir	1,28	1,6	1,1	0,16	12	1,53
Stakkhamrar, ókalkað	2,95	3,1	2,8	0,21	2	
Stakkhamrar, kalkað	3,23	7,1	2,2	1,91	6	
Skeljasands jarðvegur	0,7	1,7	0,4	0,31	16	
Beitartilraunir o.fl.	2,1	6,0	0,6	1,1	25	
Steinefni í sýnum af skeljasandstúnum, % í þurrefni						
Kalsíum	0,87	1,80	0,66	0,28	15	
Fosfór	0,32	0,42	0,19	0,06	15	
Magníum	0,18	0,23	0,11	0,03	15	
Kalíum	1,49	2,40	0,90	0,47	15	
Natríum	0,23	0,31	0,16	0,06	15	
Kalsíum	0,87	1,80	0,66	0,28	15	

Kjörmörk, skortsmörk og eitrunarmörk snefilefna í plöntum.

Samanburður við styrk snefilefna í heyi og grasi.

Gras og heysýni.

Tafla 80. Snefilefni í heysýnum, Guðmundsdóttir K.B. o.fl. 2006, Torkell Jóhannesson o.fl. 2007, kjörmörk og eitrunarmörk fyrir vöxt plantna Finck 1969.

Snefilefni	Minnst- mest	Meðaltöl	Fjöldi sýna	Sýnitökuár	Kjörmagn	Eitrunar- mörk	Plöntu- tegund ¹⁷⁷
Guðmundsdóttir K.B. o.fl. 2006, Torkell Jóhannesson o.fl. 2007,					Finck 1969		
	mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹		
Járn	57-1379	193-343 ¹⁷⁸	170	2001-2003	40-80		Grastegundir
Mangan	40-550	125-190 ¹⁵²	170	2001-2003	40-200		Grastegundir
"						>1000	Hafrar ^a
"						>500	Refasmári
Kopar	4-16	8-9 ¹⁵²	170	2001-2003	5-15		Grastegundir
Sínk	14-85	35,3	170	2003	30-90	>300	Hafrar, blöð ^b
Molýbden	0,0043-2,37	0,23	115	2003	0,4-4		Grastegundir
Bór					5-20		
	µg kg ⁻¹						
Kóbalt	41-2010	317	115	2003	¹⁷⁹		
Selen	6-96	21,1	88	2002-2003	¹⁸⁰		

^a Ofanjarðarhluti, hæð 15-30 sm

^b Blöð af ungum hafraplöntum

Lægri kjörmörk: mörk mestu uppskeru og hulins skorts, það er án skortseinkenna og mælanlega, en ekki sjánlega takmörkun uppskeru. Kjörmagn fyrir grasvöxt er miðað við byrjun blómgunar eða gras með 10-15% hráprótein.

Eitrunarmörk fyrir mangan eru talin vera við um 500 mg kg⁻¹ fyrir refasmára (lúsernu, alfalfa) og 1000 ppm fyrir ungar hafra plöntur (15-30 sm á hæð), Finck 1969. Eitrunarmörk fyrir gras eru ekki tilgreind.

Mangan og sínk var mælt í grasi úr tilraun með kölkun á tún á Reykhólum, 78. Tafla. Mangan í grasi af ókölkuðum túnreitum var 1375 ppm í þurrefni 1970 og 829 ppm í grasi af reitum, sem fengu 4 tonn á hektara. Þar sem 8 tonn voru borin á hektara var mangan 391 ppm og talsvert neðan við eitrunarmörk, fjórtán árum eftir dreifingu kalks á reitina.

Árið 1965, 9 árum eftir kölkun var sínk nálægt neðri kjörmörkum á 34 ppm í þurrefni á ókölkuðum reitum, 32 ppm á reitum sem fengu 4 eða 8 tonn af kalki á hektara og 28 ppm þar sem 12 tonn voru borin á. Árin 1968 og 1970 er sínk hins vegar innan kjörmarka 35-50 ppm lægst í grasi af kalkreitum.

¹⁷⁷ Plöntutegundir sem markgildin (kjörmörk og eitrunarmörk) miðast við.

¹⁷⁸ Meðaltöl fyrir fjóra flokka bæja með tilliti til riðu í sauðfé (riðulausir bæir, fjárskiptabæir og riðubæir, auk þess skiptast riðulausir bæir í tvo flokka: bæi á riðulausum svæðum og riðulausa bæi á riðusvæðum.

¹⁷⁹ Kóbalt er nauðsynlegt fyrir blágrænþörungum og fleiri örverum, m.a. rótarbakteríur belgjuta og þar með fyrir níturám úr lofti.

¹⁸⁰ Selen telst ekki nauðsynlegt plöntum.

Mangan og sínk var einnig mælt í grasi af reitum úr kalktilraunum á túnum Bændaskólans á Hvanneyri og á Stakkhamri í Miklaholtshreppi, túnum í Vestur Barðastrandasýslu, þar sem jarðvegur er víða blandaður skeljasandi og í gróðursýnum úr beitartilraunum, 79.tafla. Kölkun túnreita dróg að meðaltali úr mangan styrk í grasi, einkum lækkuðu hæstu mæligildin, úr 288 í 230 ppm Mn á Stakkhamri. Lægstu mæligildi mangans eru nánast þau sömu 64 og 68 ppm á ókölkuðum reitum og kölkuðum á Hvanneyri.

Á Hvanneyri lækkað styrkur sínks í grasi einnig við kölkun að meðaltali úr 28,3 í 21,9 ppm í þurrefni, hæstu mæligildi lækkuðu úr 41 í 30 ppm en þau lægstu voru nánast óbreytt 15 og 14 ppm. Á Stakkhömrum er breyting á sínki við kölkun lítil, meðaltalið lækkar úr 33 í 29 ppm og hæsta mæligildið er á einum kölkuðu reitanna 50 ppm en mest voru 42 ppm í grasi af ókölkuðum reitum.

Meðaltöl koparmælinga voru öll undir kjörmörkum fyrir grasvöxt í grassýnum af ókölkuðum og kölkuðum reitum á Hvanneyri og Stakkhamri, skeljasands túnunum úr Vestur Barðastrandarsýslu og í sýnum af gróðri í beitartilraunum, sbr. **Tafla 80**. töflu.n kölkuninhefur að jafnaði dregið úr kalímagni í grasi.

Meðaltöl járnsmælinga í grasi eru öll yfir kjörmörkum, langmest er magnið í gróðursýnum úr beitartilraunum 864 ppm að meðaltali, frá 138 til 2893 ppm.

Blaðsýni.

Kóbaltskortur hefur kom fram í blálúpínu (*Lupinus angustifolius*) á sendnum jarðvegi, Robson o.fl. 1979, bls.104- 105. Miðað við 3. og 4. laufblað voru skortsmörkin milli 13-24 $\mu\text{g kg}^{-1}$ tveimur vikum eftir sáningu, 16-59 $\mu\text{g kg}^{-1}$ fjórum vikum og 25-67 $\mu\text{g kg}^{-1}$ 6 vikum efir sáningu. Athyglivert er að aldur plöntu frá sáningu, þótt í öll skiptin sé tekin 3. Og 4. blað plöntunar hverju sinni.

Þau atriði sem máli skipta við töku sýna af laufblöðum plantna koma skýrt fram í rannsókn Robson o.fl. 1979 á þörf blálúpínunnar fyrir kóbalt. Skortsmörk í rannsókninni fyrir kobalts í laufblöðum voru breytileg eftir aldri plantna og einnig eftir því í hvaða laufblöðum plöntunnar kobalt var mælt 20. Tafla, bls.105

Snefilefni í heysýnum og þarfir búfjár og plantna fyrir snefilefni

Mangan og kopar var mælt í heyjum frá bæjum þar sem riða í sauðfé var til staðar eða hafði komið upp og á riðulausum bæjum, Torkell Jóhannesson o.fl. 2004b. Efnagreind voru 172 heysýni frá 47 bæjum sunnan, norðan og vestanlands á árunum 2001-2003. Mangan var á bilinu 40-550 og kopar 4-16 mg kg^{-1} þurrefni. Höfundar álykta, að mikið mangan eða hátt Mn/Cu hlutfall gæti varnað því að fram komi einkenni riðu. Einnig er þess getið að áður hafði því þvert á móti verið haldið fram að riða gæti tengst lágu koparmagni og miklu mangan í fóðri:

“Although causes of sporadic recurrence of scrapie on farms in Iceland remain unknown, recent data indicate that high concentration of manganese in forage, or a high manganese/copper ratio in forage, may have a preventive effect on the recurrence of scrapie (Jóhannesson et al. 2004a). Purdey (2000) on the other hand, has postulated that the occurrence of scrapie in Iceland could be related to low amounts of copper and/or high amounts of manganese in herbage.”

Um nánari skýringar á þessum ólíku niðurstöðum vegna mismunandi sýnatöku vísast til greinarinnar (Torkell Jóhannesson o.fl. 2004b).

Auk þess er í yfirlit greinarinnar bent á mögulega skýringu á áhrifum mangans í þá veru að hamla á móti sjúkdómseinkennum riðu:

Í „Ályktað var, að mikil þéttni mangans í heyi, eða hátt Mn/Cu hlutfall, gæti haft varnandi verkun gegn uppkomu klínískra einkenna um riðu. Bent var á þá hugsanlegu staðreynd, að mangan gæti seinkað innferð prionpróteina í frumur í slímhúð í meltingarvegi, en þar á riðusýking að margra áliti einkum upphafsitt, og kopar gæti haft gagnstæða verkun.“

Molýbden, kopar og brennisteinn var mælt í 110 heysýnum frá árinu 2003 á 36 bæjum, Torkell Jóhannesson o.fl 2005b. Kannað var hvort molyben og brennisteinn í heyi væri mismunandi í heyi bæja með og án riðu í sauðfé Talið hefur verið molybden ásamt miklu af brennisteini í fóðri gæti dregið úr nýtingu kopars í fóðri með klóbindingu kopars í samböndum af brennisteini og molybden (thiomolybdöt). Höfundar draga tvær meginályktanir af niðurstöðum:

„1) ekki virðast vera bein tengsl milli magns mólýbdens eða brennisteins í heysýnum og uppkomu riðu, og 2) há Cu/Mo í heyi hlutföll benda til þess að mólýbden hafi ekki ekki skaðleg áhrif á koparbúskap í fénu“

Molybden styrkur í heyi var frá 0-1,37 mg kg⁻¹ Til samanburðar er kjörmagn með tilliti til grasvaxtar við bytjun blómgunar eða 10-15% hráprótein talið vera 0,4-4 mg kg⁻¹ Mo og skortsmörk fyrir kýr 0,05 mg kg⁻¹ Mo (hætt við skortseinkennum við mynni styrk Mo). Kjörmagn brennisteins fyrir kýr er 2-4 g S kg⁻¹ þurrefni, Finck 1969.

81. tafla. Molybden, brennisteinn og hlutfall kopars/molýbdens í heysýnum frá 2003. Thorkell Jóhannesson o.fl. 2005b. Styrkur efna í þurrefni.

	Molýbden mg Mo kg ⁻¹	Brennisteinn g S kg ⁻¹	Cu/Mo Mt. Miðgildi Minnst-mest
Riðulausir bæir (scrapie free farms)	0,24	2,34	116,3 58,1 8,8-1020
Fjárskiptabæir (scrapie prone farms)	0,13	2,36	110,8 80,3 14,5-274,8
Riðubæir (scrapie afflicted farms)	0,23	2,29	73,2 71,2 5,9-160,2

Selen var mælt í 88 heysýnum úr rúlluböggum frá árunum 2002 og 2003, Thorkell Jóhannesson o.fl. 2004a.

„Býlum var skipt í þrjá flokka: riðulaus býli („scrapie-free“; riða annaðhvort aldrei komið upp eða fyrir 1960 og þá skipt um fé), fjárskiptabýli („scrapie-prone“; riða komið upp eftir 1980, en síðar skipt um fé) og riðusýkt býli („scrapie-afflicted“; riða í gangi í hlu-taðeigandi hjörðum á tímabilinu). Býli þessi eru öll staðsett í fjórum sýslum, þar sem riðu hefur orðið vart. Þéttni selens (Se) var lítil eða mjög lítil í nær öllum heysýnum og var staðtölulega hin sama í sýnum frábylum í öllum flokkum.“

Ekki kom fram marktækur munur á selen í heyi milli mismunandi riðuflokka:

„The mean selenium concentration in hay samples from farms in all three categories was in the range 15-25 µg kg⁻¹ and the difference between categories was not statistically significant (P > 0.05). Singularly high values (60-90 µg kg⁻¹) were found in a few samples from farms in all categories but especially from scrapie-afflicted farms (Figure 2).“

Selenmagn í heysýnunum var almennt minna en talið er nauðsynlegt fyrir búfé:

„It is generally considered that a selenium concentration in hay lower than $100 \mu\text{g kg}^{-1}$ may indicate that animals feeding on it can suffer from selenium deficiency (Adriano 2001). The selenium concentration in hay samples collected from the 2002 and 2003 harvests on the 18 scrapie-free, scrapie-prone and scrapie-afflicted farms that were studied was almost uniformly low or on an average $15\text{--}25 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Figure 2). Selenium was only in a few instances found in the hay samples in amounts that were near to “normal levels” (above $60 \mu\text{g kg}^{-1}$)“

Tryggvi Eiríksson o.fl. (2006) gefa yfirlit um sjö snefilefni í íslensku heyi, gildi þeirra fyrir heilbrigði búfjár og tengsl við riðu í sauðfé. Hlutfall milli járn/mangan í heyi er mun hærra á bæjum með riðu í sauðfé en þar sem riða er ekki. Mangan í heyi er þó yfirleitt talið viðunandi hér á landi, samkvæmt grein Tryggva og féлага. Ekki fannst munur á magni kóbalts, síns, molybdens og selens milli bæja þar sem riða fannst og bæja án riðu í sauðfé.

82. tafla. Hlutfall járn/mangan í heyi. Tryggvi Eiríksson o.fl. (2006)

1. Riðusvæði	Járn/mangan meðaltöl
Riðusvæði	
Riðulausir bæir	1,5
Fjárskiptabæir	1,7
Riðubæir	2,7
Riðulaus svæði	
Bæir án riðu	1,1

Mangan í heyi var minnst þar sem járn magn var mest í heyi. Mangan er sem tvígild eða eingild jón í jarðvegi í jarðvegi. Járn finnst þar sem tvígild eða þrígild jón. Tvigildar járnjónir geta því hamlað upptöku jafngilda manganjóna.

83. tafla. Yfirlit um sjö snefilefni í sýnum af heyi frá árunum 2001–2003 tekið saman eftir greininni *Overview: Seven trace elements on Icelandic forage. Their value in animal health and with special reference to scrapie*, Thorkell Jóhannesson o.fl. 2007.

Snefilefni	Minnst	Mest	
Mangan Mn, mg kg^{-1}	40	550	Marktækt meira í heyi frá riðulausum bæjum, en frá riðubæjum eða fjárskiptabæjum.
Kopar Cu, mg kg^{-1}	4	16	Ekki marktækur munur á Cu í heyi frá bæjum eftir riðusvæðum, Mn/Cu hærra í heyi frá riðulausum bæjum.
Molybden Mo, mg kg^{-1}	0,0043	2,37	Mo í heyi sauðfjár í minna lagi, skortur kann að vera við ræktun sumra plantna. Ekki marktækur munur á Mo í heyi milli bæja í mismunandi riðuflokkum.
Selen, $\mu\text{g kg}^{-1}$	6	96	Einkenni selenskorts (hvitvöðvaveiki) vel þekkt í lömbum og að einhverju marki kvígum og folöldum.
Kóbalt, $\mu\text{g kg}^{-1}$	41	2010	Um 12 % sýna undir $100 \mu\text{g kg}^{-1}$. Ekki marktækur munur á Co magni milli bæja í mismunandi riðuflokkum.
Sínk, mg kg^{-1}	14	85	Fá sýni (7%) > 50mg kg^{-1} . Einkenni sínskorts haf asést í nautgripum og sauðfé á Íslandi. Meira sínk í heyi frá riðulausum bæjum á riðulausum svæðum en á bæjum í öðrum riðuflokkum
Járn, mg kg^{-1}	57	1379	Að meðaltali var marktækt minna járn í heyi frá riðulausum bæjum og fjárskiptabæjum, en í sýnum frá riðubæjum, þar sem járn var meira en 300mg kg^{-1} eða á mörkum eitrunar fyrir plöntur.

Grétar Hrafn Harðarson o.fl. 2006 mældu snefilefni í 200 heysýnum teknum árið 2003 í öllum landshlutum. Höfundar gera grein fyrir snefilefnum með tilliti til hlutverks í efnaskiptum og búfjárjúkdóma, greina frá skortsmörkum og eitrunarmörkum miðað við þarfir nautgripa og flokkun heysýna miðað við þessi mörk, marktækur munur er á snefilefnum í heyi eftir landshlutum,

84. tafla um það segir í grein Grétars Hrafns og meðhöfunda (2006) :

„Hámarktækur munur á landshlutum ($P < 0,001$) var á kopar, brennisteini, mangani og selen og einnig var marktækur munur ($P < 0,05$) á sinki og járni. Munur var á sýslum innan landshluta fyrir kopar ($P < 0,01$, lægst í Snæfellssýslu og hæst í Borgarfjarðarsýslu), sink og brennistein ($P < 0,05$), en ekki var prófað hvort munur væri á mangani og seleni milli sýslna innan landshluta. Athyglisvert er hve Suðaustur- og Suðurland er lágt í mörgum snefilefnum. Kopar, brennisteinn og selen eru öll lægst á þessum svæðum, þá er mangan lægst um miðbik landsins þ.e. Suðurlandi og Norðausturlandi. Lægstu gildi fyrir járn eru á Vestfjarðakjálkanum og lægsta meðaltal sinks var á Vesturlandi.“

Í greininni eru sýnin einnig flokkuð eftir sýslum:

“Kopar er hæstur í Borgarfjarðarsýslu og lægstur Snæfellsnessýslu og lág gildi eru einnig á Suðurlandi. Járn er hæst í S-Múlasýslu og lægst í A-Skaftafellssýslu. Í S-Múlasýslu er einnig hæsta meðaltal mangans en lægst í Eyjafirði og meðaltölin eru lág um miðbik landsins. Brennisteinn er hæstur í A-Húnavatnssýslu en lægstur í A-Skaftafellssýslu og lágur á Suðurlandi. Selen er afskaplega lágt alls staðar, en lægst í Rangárvallasýslu og hæst á Ströndum. Í S-Múlasýslu er hæsta meðaltal sinks og lægst í Snæfellsnessýslu.“

84. tafla. Purrefni, meltaleiki, prótein og steinefni í heysýnum úr fyrsta slætti árið 2003. Grétar Hrafn Harðarson o.fl. 2006

	N	V-land	Vfjkj	NV-land	NA-land	A-land	SA-land	S-land	P-gildi
N		25	20	35	40	24	15	41	
Purrefni %	200	50	60,9	55,6	67,1	49	51,1	54,6	< 0,001
Meltanleiki %	200	70,2	69,9	69,8	69,9	68,5	68,3	70,9	0,048
Prótein %	200	16,3	15,8	17,1	17,8	17,8	12,8	15,51	< 0,001
Ca %	194	0,37	0,37	0,37	0,37	0,31	0,26	0,33	< 0,001
P %	194	0,34	0,35	0,38	0,36	0,38	0,31	0,32	< 0,001
Mg %	194	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,18	0,20	< 0,001
K %	194	1,77	1,94	2,03	2,00	2,24	1,87	1,99	0,013
Na %	194	0,15	0,18	0,09	0,06	0,09	0,07	0,08	< 0,001
Cu mg/kg þe	194	7,78	7,07	8,36	8,50 ¹⁾	8,2	5,95	6,55	< 0,001
Cu mg/kg þe4)	194	7,83	7,27	8,17	8,08 ¹⁾	7,78	7,09	6,84	< 0,001
Fe mg/kg þe	194	237,9	130,0	188,4	216,5 ¹⁾	259,6	191,4	179,3	0,034
Mn mg/kg þe	194	168,4	169,9	116,0	94,7 ¹⁾	165,8	109,8	82,2	< 0,001
S %	194	0,23	0,23	0,26	0,24 ¹⁾	0,23	0,20	0,21	< 0,001
Se mg/kg þe	195	0,013	0,019	0,012	0,028 ²⁾	0,019	0,01	0,010 ³⁾	< 0,001
Zn mg/kg þe	194	29,6	31,7	34,9	31,1 ¹⁾	33,1	32	32,2	0,024

¹⁾n = 34; ²⁾ n = 36; ³⁾ n = 40.

Vesturland: Borgarfjörður, Mýrar, Snæfellsnes og Dalir.

Vestfjarðakjálki: Barðastrandasýsla, Ísafjarðarsýslur og Strandir.

NV-land: Vestur- og Austur Húnavatnssýsla og Skagafjörður.

NA-land: Eyjafjörður og Norður- og Suður-Pingeyjarsýsla.

Austurland: Norður- og Suður-Múlasýsla

SA-land: Austur- og Vestur-Skaftafellssýsla. Suðurland: Rangárvallasýsla og Árnessýsla.

Hérlendis eru bæði koparskortur (fjöruskjögur) og selenskortur þekktir sjúkdómar, nánar í grein Grétars Hrafn Harðarsonar o.fl. 2006. Fjöruskjögrið var ekki rakið til beins koparskorts í fjörugróðri, en kopar í blóði og lifur var lágt (tilvitnun GHH o.fl 2006: Páll A. Pálson og Halldór Grímsson 1954) og því ályktað að um afleiddan koparskort væri að ræða. Grétar Hrafn og meðhöfundar (2006) geta þess að koparskortur hafi verið staðfestur í sauðfé sem ekki gengur í fjöru.

85. tafla. Hlutverk snefilefna og sjúkdómar tengdir snefilefnaskorti. Grétar Hrafn Harðarson o.fl. 2006.

	Hlutverk	Sjúkdómar tengdir skorti
Co – kóbalt	Hluti af B12 vítamíni	Röskun á orkuefnaskiptum, vanþrif.
Cu – kopar	Hluti a.m.k. 4 ensímkerfa	Aflitun hárs, niðurgangur, blóðleysi, vanþrif og fjöruskjögur.
Fe – járn	Hluti af haemoglobíni	Blóðleysi
I – jóð	Hluti af skjaldkirtilhormóni	Skjaldkirtilsstækkun og skertur lífsþróttur í ungviði, ófrjósemi og fastar hildir.
Mn – mangan	Ensím tengd brjósmyndun, andoxun, blóðstorknun og kólesterol framleiðsla.	Röskun á vexti beina, ófrjósemi, ónæmisbæling og truflun á starfsemi miðtaugakerfisins.
Mo – molybden	Cofactor í nokkrum oxunarensímum.	Ofgnótt truflar nýtingu á kopar.
S – brennisteinn	Hluti methionine, cysteine, brjósks, thiamín og bítíns.	Skortur veldur almennum vanþrifum. Bráð eitrun veldur garnabólgu og truflun á starfsemi miðtaugakerfisins. Langvinn ofgnótt truflar nýtingu kopars og selens.
Se – selen	Hluti a.m.k. 30 ensíma einkum tengdum andoxun og virkni skjaldkirtilhormóns.	Hvítvöðvaveiki, fösturlát, kálfadauði, fastar hildir, ófrjósemi og ónæmisbæling.
Zn – sink	Hluti a.m.k. 200 ensímkerfa með mjög víðtæka virkni í efnaskiptum líkamans.	Lystarleysi og vanþrif. Lélegt efni í hófum og klaufum. Parakeratosis á húð.

86. tafla. Flokkun heysýna eftir styrk snefilefna (mg/kg þe.) og þörfum nautgripa. Grétar Hrafn Harðarson o.fl. 2006 (aðlagð eftir Mortimer o.fl. 1999 og Rogers og Murphy 2000).

	Skortur	Á mörkum	Viðunandi	Eitrunarmörk MTC ¹⁸¹
Co – Kóbalt		< 0,1	0,1 – 1,0	10
Cu – Kopar	< 4,0	4,0 – 9,9	> 10	100
Fe – Járn	< 50	50 – 200	> 200	1000
I – Jóð	< 0,2	0,2 – 0,8	> 0,8	50
Mn – Mangan	< 20	20 – 39,9	> 40	1000
Mo – Molybden	-	-	< 1	5
S – Brennisteinn (%)	< 0,1		0,15 – 0,20	0,40
Se – Selen	< 0,1	0,1 – 0,3	> 0,3	2
Zn – Zink	< 20	20 – 29,9	> 30	500
Cu / Mo hlutfall	< 4	4,0 – 4,5	> 4,5	-

¹⁸¹ Maximum tolerable concentration.

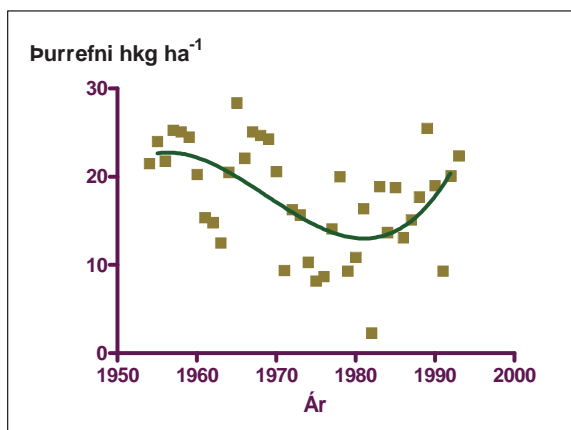
87. tafla. Skipting heysýna í prósentum eftir styrk snefilefna (mg/kg þe.) og þörfum nautgripa. Kóbalt, Joð og Molybden voru ekki mæld.

	Skortur	Á mörkum	Viðunandi	Eitrunarmörk MTC ¹⁸²
Co – Kóbalt	-	-	-	-
Cu – Kopar	1,0	87,2	11,8	0
Fe – Járn	0	-	74,9	1,5
I – Joð	-	-	-	-
Mn – Mangan	0	1,5	98,5	0
Mo – Molybden	-	-	-	-
S – Brennisteinn (%)	0	1,5	21,0	0,5
Se – Selen	99	1	0	0
Zn – Zink	1	37,4	0	0
Cu / Mo hlutfall	-	-	-	-

¹⁸² Maximum tolerable concentration.

Tilbúinn áburður og áburðarnotkun.

Vaxtarauki eftir áburð og árferði



35. mynd. Uppskeruauki fyrir N í kjarna og kalksaltpétri (75 N og 120 N) umfram 0 N kg ha⁻¹. Þriðju gráðu fjölliða aðhvarfslína byggð á þriggja ára samfelldum meðaltölum. Unnið úr gögnum á mynd 2 bls. í grein *Hólmgeirs Björnssonar 2003*.

Um áhrif árferðis á uppskeruauka eftir níturáburð skrifar Hólmgeir:

“Uppskeruauki af N-áburði var oft mikill fram á kalárin, en hefur oftast verið minni eftir það. Sameiginlegt mat á áhrifum hita á uppskerusvörun við N-áburði á fjórum tilraunastöðvum 1951- 83, Akureyri, Reykhólum, Sámsstöðum og Skriðuklaustri, er að hún aukist um 171 ± 55 kg/ha á hverja °C sem meðalhiti sept.-júni næst á undan hækkar, en um 111 ± 42 ef miða er við hitann okt. - apríl.”

Vaxtarauki eftir N-áburð á 35. mynd fer minnkandi á tímabili kalára um það bil frá 1970 - 1980, en eykst eftir það í byrjun tíunda áratugarins.

Dreifingartími áburðar

Árið 1990 var hafin tilraun á gömlu túni með dreifingartíma áburðar jafnframt því sem áhrif veðurþátta á sprettu voru rannsakaðir, Guðni Þorvaldsson 1998. Ríkjandi grastegund var túnvingull með 40% þekju auk vallarsveifgrass (20%), hálingresis (20%), snarrótarpuntur (10%) og hvítmári (10%).

- Borið á að hausti (meðaldagsetning 29. september).
- Borið á áður en reitirnir byrjuðu að grænka á vorin (meðaldagsetning 21. apríl).
- Borið á þegar reitirnir voru byrjaðir að grænka (meðaldagsetning 13. maí).
- Enginn áburður.

Borin voru á 90 kg N/ha í Græði 6 (20% N, 4,4% P, 8,3% K, 3,5% Ca, 2% S).

Fyrst grænkaði á reitum þar sem borið var á að hausti og síðast þar sem ekkert var borið á, 69. tafla.

88. tafla. Dagsetning þegar reitir náðu 1 (byrjaðir að grænka) og 4 (algrænir) í litareinkunn á einstökum liðum, meðaltal 7 ára. Guðni Þorvaldsson 1998

Áburðartími	Litareinkunn	
	≥ 1	= 4
Haustáburður	25. apríl	28. maí
Borið á fyrir byrjun gróanda	7. maí	30. maí
Borið á eftir byrjun gróanda	13. maí	6. júní
Enginn áburður	16. maí	21. júní

89. tafla. Uppskera (þe. hkg/ha) við mismunandi áburðar- og sláttutíma, meðaltal 7 ára, Guðni Þorvaldsson 1998.

Áburðartími	Sláttutímar (meðaltöl)					
	21.5.	28.5.	4.6	11.6.	18.6.	6.8.
Haustáburður	2,2	5,7	9,0	13,8	17,9	42,7
Borið á fyrir byrjun gróanda	1,8	5,7	10,1	14,9	19,5	47,1
Borið á eftir byrjun gróanda	0,5	3,4	7,9	12,9	17,7	45,5
Enginn áburður	0,2	1,0	2,3	4,1	6,0	16,0

Athygli vekur að betur hefur að meðaltali reynst að bera á fyrir byrjun gróanda en eftir, 42 tafla. Frá því eru þó undantekningar eins og segir í grein Guðna:

“Árið 1996 var hins vegar haustáburðarliðurinn með mesta uppskeru (48,7 hkg/ha), seinni voráburðartíminn í öðru sæti (47,9 hkg) en sá fyrri í þriðja sæti (42,4 hkg/ha). Árið 1997 var seinni voráburðartíminn með mesta uppskeru (35,7 hkg/ha), sá fyrri í öðru sæti (34,1 hkg/ha) og haustáburður í því þriðja (29,7 hkg/ha). Bæði þessi ár, og reyndar árið 1995 einnig, leið venju fremur langur tími frá fyrri áburðartíma að vori þar til viðkomandi reitir byrjuðu að grænka (3 vikur). Þetta virtist þó ekki koma að sök árið 1995, en þá voru ekki nema 5–10 sm niður á klaka við fyrri áburðartímann. Óvenju mikill klaki var í jörðu þetta ár, um 70 sm. Árið 1997 var einnig grunnt á klaka við fyrri áburðartímann að vori (8 sm) og 20 sm árið 1996. Önnur ár var ýmist dýpra á klaka við þennan áburðartíma eða klakalaust.”

Einnig er athyglisvert hve vel haustáburðurinn reynist. Tilraunin stóð alls í 13 ár og eftirverkun var mæld í 4 ár og niðurstöðum lýst í grein Guðna Þorvaldssonar 2007 í yfirliti:

“Næringarástand grasa hefur mikil áhrif á það hvenær byrjar að grænka á vorin. Haustáburðarreitirnir byrjuðu fyrst að grænka, því næst fyrri áburðartíminn að vori, en óábornu reitirnir langsíðast.

Uppskera var meiri á haustáburðarreitunum fram eftir vori en voráburðarreitirnir náðu þeim þegar líða tók á vorið eða í byrjun sumars.

Við síðasta sláttutímann í byrjun ágúst var uppskera haustáburðarreita 90% af uppskeru reitanna sem fengu áburð að vori, hvort heldur miðað var við þurrefnisuppskeru eða niturupptöku. “

Í inngangsorðum sömu greinar er greint frá helstu niðurstöðum eldri tilrauna með dreifingartíma áburðar og heimilda um þær:

“Margar tilraunir hafa verið gerðar með mismunandi áburðartíma og hefur Hólmgeir Björnsson (1998a; 1998b) tekið saman gott yfirlit yfir niðurstöður þeirra tilrauna. Margar tilraunir með mismunandi áburðartíma að vori sýna meiri sprettu eftir því sem fyrr er borið á, að því tilskildu að grös séu byrjuð að lifna. Ýmis dæmi eru þó einnig til úr tilraunum um að áburður nýtist illa ef borið er á snemma, t.d. í köldu árferði þegar jörð er blaut. Einnig hafa verið gerðar nokkrar tilraunir með dreifingu áburðar að sumri og hausti. Þessar tilraunir hafa sýnt að áburður sem er borinn á að hausti getur að verulegu leyti nýst til sprettu árið eftir”.

Búfjáráburður

Nýting áburðarefna búfjáráburðar hefur verið metin í tilraunum sem voru um árbil og á nokkrum stöðum samtímis (tilraunraðir) bæði með dreifingu á tún (yfirbreiðslu) og niðurfellingu í nýrækt (ídreifing).

Nýting búfjáráburðar

Nýjasta heimild um efnasamsetningu búfjáráburðar sýnir mikla aukningu á magni plöntunæringarefna í þurrefni miðað við eldri heimildir, Þóroddur Sveinsson 2009. Breytileiki milli bæja er þó verulegur. Þá er hlutur þurrefnis í mykju mjög breytilegur og fram kemur í grein Þórodds að við dreifingu geti munað meiru en helmingi í þurrefni (3 til 8 % þurrefni) milli tankfyllinga.

90. tafla. Efnainnihald og sýrustig (pH) í kúamykju frá 9 kúabúum. Samtals 24 sýni. Þóroddur Sveinsson 2009.

	Meðaltal	Staðalfrávik	Frávikshlutfall %
Þurrefni, %	6,31	1,2	19
pH	7,5	0,2	3
	% í þurrefni		
N alls	5,8	0,9	15
lífrænt N	2,6	0,4	14
NH ₄ ⁺ N	3,1	0,6	18
P	1,1	0,3	24
K	4,3	0,9	20
Ca	1,4	0,4	30
Mg	0,9	0,1	16
Na	0,5	0,2	37

Athugun á áburðarnotkun á tilraunbúinu á Möðruvöllum var gerð 2006 þar sem þörf fyrir tilbúinn áburð var annars vegar metin eftir efnagreiningum á mykju og hins vegar á eldri efnamagni í mykju samkvæmt stöðlum sem hafa verið notaðir um áratuga skeið. Meða því að styðjast við efnagreiningarnar hefðu sparast 3 tonn af tilbúnum áburði, Þóroddur Sveinsson 2009.

Önnur leið en sýnataka og efnagreiningar til þess að meta efnamagn í mykju er sú sem notuð hefur verið í næringarefnahaldi fyrir kúabú, Þóroddur Sveinsson 1998. Efnamagn í mykju er í bókhaldinu reiknað út frá efnamagni og meltaleika í fóðri.

Yfirbreiðsla búfjáraburðar

Yfirbreiðsla árlegra skammta (10 og 20 tonn/ha) af grindataði var prófuð á tilraunastöðvunum á Reykhólum og Skriðuklaustri, en af mykju á Akureyri og Hvanneyri, Sigfús Ólafsson 1979. Helstu niðurstöður yfirbreiðslu tilraunanna var að 20 tonn af mykju skiluðu jafngildis af um 40 kg af N/ha í tilbúnum áburði en sama magn af sauðataði um 60 kg/ha N. Nýting á fosfór og kalí var svipuð og í tilbúnum áburði við sambærilega N skammta.

Niðurfelling búfjáraburðar

Tilraunir voru gerðar með notkun mykju og taðs í nýræktir í samanburði við tilbúinn áburð á fjórum tilraunstöðum. Búfjáraburður var felldur niður í nýræktir á Geitasandi og Hvanneyri 1974, á Reykhólum 1975 og á Skriðuklaustri 1976. Kúamykja var notuð á Hvanneyri og Geitasandi en grindatað á Reykhólum og Skriðuklaustri, Hólmgeir Björnsson 2009.

Á nýrættarárinu voru vaxandi skammtar af búfjáraburði voru felldir niður og til samanburðar voru tveir liðir annar með lágmarksáburði og hinn með því sem talið var að væru hæfilegir nýrættarskammtar. Alls 6 liðir með fjórum endurtekningum á stórreitum.

91. tafla. Áburðarskammtar í tilraunaliðum A til F.

Tilbúinn áburður

Tilraunaliðir	A. Viðmiðun			B. Nýrættarskammtur		
	N kg/ha	P kg/ha	K kg/ha	N kg/ha	P kg/ha	K kg/ha
Reykhólar	Áburðarlaust			100	59	75
Skriðuklaustur				55	57	111
Hvanneyri	0	50	0	80	50	80
Geitasandur	60	26	50	120	52	100

Búfjáraburður

Tilraunaliðir	C	D	E	F
	Búfjáraburður tonn /ha			
Geitas. Reykh.Skriðukl.	25	50	100	150
Hvanneyri	28	55	105	154

Hverjum þessarra stóreita var skipt í 3-4 minni, sem fengu árlega þessa áburðargjöf (kg/ha):

- 100 N, 20P og 50K
- 0 N 20 P og 50 K
- 100 N 0 P og 0 K

Á Skriðuklaustri var auk þess

- 50 N 0 P og 0K

Fyrsta uppskera var árið eftir ídreifingu búfjáraburðarins. Um uppskeru eftir nýrættarskammtinn segir í grein Hólmgeirs:

“Á Reykhólum og Geitasandi hefur nýrættar-skammturinn gefið svipaða sprettu og 50 tonn/ha af búfjáraburði en á Hvanneyri heldur meiri. Á Skriðuklaustri hefur tilbúni áburðurinn gefið uppskeru til jafns á við 100-150 tonn af grindataði, en þar lá búfjáraburðurinn lengi á jörðinni áður en fullvinnsla fór fram.”

Mikil uppskera er talin sýna að nægilega hafi verið borið á, en jafnframt sé þess að gæta að seint var slegið (21. ágúst) og gróðurinn var vallarfoxgras.

Í öllum tilraununum var uppskeruauki fyrir 100-150 tonn um fram 50 tonn/ha að meðaltali 9,2 hkg/ha. Til samanburðar er þess getið að uppskeruauki hefur í langtímatilraunum að jafnaði verið 9,0 hkg/ha eftir aukningu níturáburðar úr 70-130 kg/ha N.

Uppskeruauki varð ekki við aukningu úr 100 tonnum í 150 tonn á ha af búfjáraburði á tveimur tilraunastöðum og var ekki marktækur á hinum tveimur.

Fleiri athygliverðar niðurstöður koma fram í heimildargreininni um þessar tilraunir einnig úr tilraun með mismikinn áburð á vallarfoxgras, vallarsveifgras og snarrót í nýrækt og eldri tilraunum með ídreifingu áburðar.

Langtímaáhrif búfjáraburðar

Tilraunin með ídreifingu búfjáraburðar á Hvanneyri sem lýst er í grein Hólmgeirs Björnssonar (1979) og fjallar um niðurstöður fyrstu ára var einnig umfjöllunarefni Ríkharðs Brynjólfssonar (1992) en þá hafði hún staðið í 17 ár. Mikil eftirverkun kemur fram í uppskeru eftir 100-150 tonn/ha af búfjarburði niðurfellt á sáningarári sérstaklega ef litið er á reiti sem fengu árlega eingöngu P og K áburð.

Eftirverkun er nánast engin eftir niðurfellingu 25 tonna/ha af mykju við jarðvinnslu 1974 og lítil eftir 50 tonn/ha og er lokið eftir um það bil 6 ár, eftir 100 tonn er eftirverkun fyrstu sex árin um 10 hkg/ha og fer síðan minnandi og eftir 150 tonn er eftiráhrifin um 20 hkg/ha fyrstu árin og síðan minnkandi. Á sautjándra ári eftir niðurfellinguna eru áhrifin engin.

Stærsti skammtur af búfjáraburðinum skilaði 300 kg/ha N, 45 kg/ha P og 240 kg/ha K í uppskeru á 17 árum eða hefur um 40% af N, P og K í búfjáraburðinum verið endurheimt í uppskeru.

92. tafla. Eftirverkun eftir niðurfellingu kúamykju í nýrækt. Árlegur áburður 20 kg/ha P og 50 kg/ha K. Uppskeru tölur lesnar af línuritum í heimildargrein (Ríkharð Brynjólfsson 1992) og gefa einungis grófa mynd af breytingum eftirverkunar með tíma og með vaxandi skömmtum af mykju á fyrsta ári.

Mykja tonn/ha	Tímabil			
	1975-1980	1980-1985	1986-1990	1991
	Eftirverkun búfjáraburðar hkg/ha þurrefni			
25	-5 til 5	0	0	-1
50	6 til 1	1 til -1	0	-3
100	10	2 til 9	5 til -1	-5
150	20	9 til 18	9 til -1	-4

Þá er komið að tilraun á Hvanneyri með árlega yfirbreiðslu sauðataðs á tún, tilraun sem var gerð til þess að prófa hvort jafna mætti árferðissveiflur heyfengs með breytilegri áburðargjöf eins og Páll Berþórsson hafði fært rök fyrir.

Annað atriði, sem hefur vakið mikla athygli, var það sem kom fram í grein Ríkharðs að uppskera af sauðataðsreitunum var í byrjun minni en af sambærilegum reitum sem fengu samsvarandi tilbúinn áburð en eftir 5- 8 ár hverfur þessi munur og næstu sex árin fer uppskera af taðreitum í vaxandi mæli fram úr reitum með tilbúnum áburði. Ljóst er að vaxtarskilyrði hafa farið batnandi í jarðvegi taðreitanna og er þá spurningin hvort um sé að ræða aukna

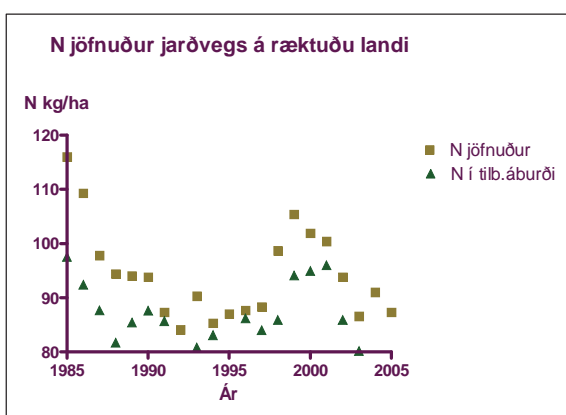
upptöku næringarefna og þá hverra eða jarðvegsbætandi áhrif t.d. betri loftun og vatnsmiðlun í jarðvegi. Í greininni er bent á að upptaka N, P og K hafi ekki aukist í sama mæli og uppskera og því sé ekki eingöngu um að ræða áhrif þessarra efna.

Efnajöfnuður búskapar

Níturjöfnuður jarðvegs á Íslandi á öllu ræktuðu landi árin 1985-2005 var metinn með aðferðum sem Efnahagsstofnun Evrópu (OECD) hefur þróað með þeim breytingum að matið náði einungis til ræktað lands og búfjáráburður sem tekinn var með í matið var aðeins kúamykja og sauðatað. Jöfnuðurinn er mismunur þess sem berst í jarðveg, og það sem berst úr lofti. Að mestu leyti er um að ræða annars vegar það sem berst með áburði tilbúnum, búfjáráburði og með úrkonu og hinsvegar það sem fjarlæggt er með uppskeru.

Jöfnuðurinn var á bilinu 84 til 116 kg/ha mismunandi eftir árum, miklu hærri en var samkvæmt útreikningum á N-jöfnuði ræktunar á kúabúum í Eyjafirði, 39 kg/ha. Munurinn liggur í lægri tölum fyrir hefynd fyrir landið allt samkvæmt forðagæslumati. Auk þess er kartöfluræktun og kornrækt með í matinu fyrir ræktað land.

Það sem er hins vegar athyglisvert í niðurstöðunum fyrir allt ræktað land eru breytingar með árunum sem má rekja til breytinga á áburðarnotkun, 36. mynd



36. mynd. Níturjöfnuður jarðvegs á öllu ræktuðu land árin 1985-2005. Úr gögnum sem tekin voru saman fyrir Efnahagsstofnun Evrópu OECD.

Níturjöfnuður kúabúa og sauðfjárbúa það er mismunur á níttri í aðföngum ásamt N í úr lofti og í afurðum hefur verið metinn og svarar að magni til 85% af tilbúnum áburði á kúabúum (Ólöf Björg Einarsdóttir og Magnús Óskarsson 1995) og 95-100% á sauðfjárbúum (Jón Guðmundsson o.fl. 2004).

Fyrir 22 kúa bú er jöfnuðurinn talinn 102 kg/ha N Björg Einarsdóttir og Magnús Óskarsson 1995) en fyrir sauðfjárbúið er jöfnuðurinn 5,7-6 kg á vetrarfóðraða kind.

Jöfnuðurinn skiptist milli aukningar í jarðvegi og taps við útskolun eða í formi lofttegunda. Talið er að mest tapist frá búfjáraburði og að mestu í búfjárhaldinu minna í ræktun, Jón Guðmundsson o.fl. 2004:

“Miðað við [gefna] forsendur eru 15% af tapinu í ræktuninni og 85% í búfjárhaldinu. Tap í ræktuninni getur verið sem útskolun (NO_3^- , NH_4^+ eða sem lífrænt bundið N) eða sem tap í andrúmsloftið (NH_3 , N_2O , N_2) í þriðja lagi getur það safnast fyrir í jarðvegi. Tap í búfjárhaldinu verður væntanlega að stærstum hluta úr skitnum bæði með útskolun og sem tap í andrúmsloftið. Nauðsynlegt er að rannsaka betur hvernig N-tapið deilist niður á einstaka þætti búrekstrarins, s.s. geymslu á búfjáraburði og heyi, dreifingu, ræktun og vinnslu.”

Á kúabúinu er talið að 40% af samanlögðu tapi frá búinu og uppsöfnun í jarðvegi séu vegna uppgufun ammoníaks úr búfjáraburði. *Ólöf Björg Einarsdóttir og Magnús Óskarsson 1995: "...má segja að „tap“ köfnunarefnis við uppgufun ammóníaks úr búfjáraburði skýri riflega 40% af þeim mismun sem er á köfnunarefnisflæði inn í búð annars vegar og út úr því hins vegar."*

Kúabú

Efnajöfnuður á hefðbundnu kúabú er meðal efnis í grein um lífrænan landbúnað og lífrænan áburð, *Ólöf Björg Einarsdóttir og Magnús Óskarsson 1995*. Miðað er við bú með 22 mjólkurkúr, 6 kvígur, 7 geldneyti og 13 kálfa (bú af verðlagsgrundvallarstærð). Aðföng og afurðir eru metin samkvæmt reiknilíkani Hagþjónustu landbúnaðarins (María G. Líndal 1995). Tún til heyöflunar og beitar eru talin 35 ha, grænfóður 1,4 ha.

93. tafla Árlegt flæði N, P og K inn í og út úr hefðbundnu bú, *Ólöf Björg Einarsdóttir og Magnús Óskarsson 1995*

Efnajafnvægi kúabús	N kg/ha	P kg/ha	K kg/ha
<i>Inn í búð</i>			
Með tilbúnum áburði	101	21	26
Með aðkeyptu fóðri	16	5	2
Með regni	1		
N binding belgjurta	0		
<i>Samtals inn</i>	118	26	28
<i>Út úr búinu</i>			
Með mjólk	13	2	4
Með kjöti	3	1	0
<i>Samtals út</i>	16	3	4
Mismunur	102	23	24

Næringarefnabókhald tólf kúabúa í Eyjafirði og tilraunastöðvarinnar á Möðruvöllum í Hörgárdal er það ítarlegasta sem birst hefur, Þóroddur Sveinsson 1998.

Um er að ræða hrein kúabú og byggt var á skýrsluhaldi nautgriparæktar, heyefnagreiningum, bókhaldi, forðagæsluskýrslum og nýlegum túnkortum. Hér verður lögð áhersla um þann hluta sem snýr að jarðræktinni með tilliti til áburðarotkunar.

Efnamagn í mykju er í bókhaldinu reiknað út frá efnamagni og meltaleika í fóðri.

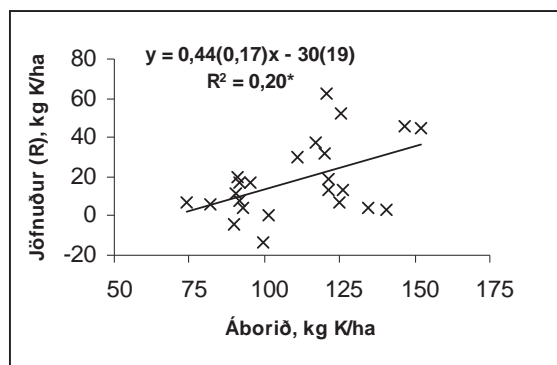
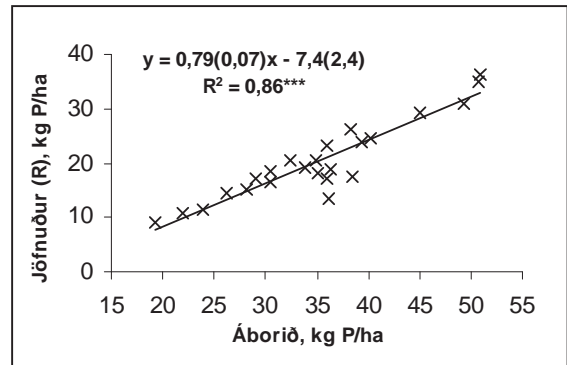
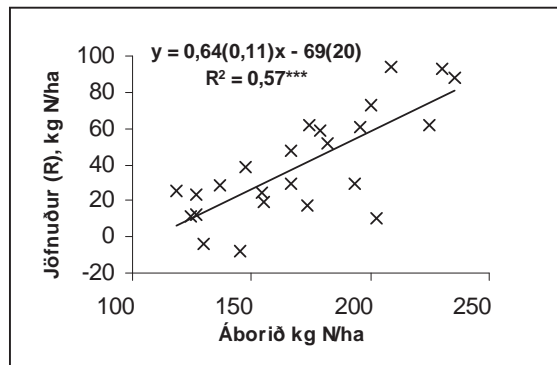
Samræmi er gott á milli þeirra heimilda sem hér er vitnað til um efnajöfnuð meðalstórs kúabús samkvæmt verðlagsgrundvelli og kúabúa í Eyjafirði. Jöfnuður er meðaltali 102 N, 23 P og 24 K kg/ha fyrir meðabúð og 107 N, 22 P og 27 K kg/ha fyrir eyfirsku búin. Efnajöfnuður á Möðruvallabúinu er nokkru lægra eða 77 N, 17 P og 13 K.

Jöfnuðurinn kemur fram sem mismunur innstreymis og útstreymis og nær yfir uppsöfnun efna í jarðvegi og tap úr jarðvegi. Tap úr jarðvegi skiptist í tap í formi lofttegunda og útskolun. Mjög takmarkaðar upplýsingar eru til um tap úr ræktuðum jarðvegi. Óhætt er þó að segja að eftir því sem efnajöfnuðurinn er minni því minni sé hætta á tapi úr jarðvegi og jafnframt minna bætist í efnaforða jarðvegs.

94. tafla. Efnajöfnuður jarðræktar og búsinns í heild á 12 kúabúum í Eyjafirði og tilraunastöðinni á Möðruvöllum. Staðalfrávik lýsa breytileika milli búa nema á Möðruvöllum, þar lýsir staðalfrávik breytileika milli tímabila. *Þóroddur Sveinsson 1998*

	Kg/ha					
	N	P	K	N	P	K
Ræktunarjöfnuður (R)						
<i>Innstreymi (Ir)</i>						
Tilbúinn áburður	108	19	22	25	5	9
Búfjáráburður	62	16	89	16	5	20
Alls	170	35	111	41	10	29
<i>Útstreymi (Úr)</i>						
Uppskeyra í hlöðu	114	13	81	22	3	18
Uppskeyra af beit	17	2	12	4	<1	3
Alls	131	15	93	26	3	21
<i>Jöfnuður R</i>	39	20	18	27	7	18
<i>Möðruvellir</i>	36	16	6	18	4	24

Búsjöfnuður (B)						
<i>Innstreymi (Ib)</i>						
Tilbúinn áburður	108	19	22	25	5	9
Kjarnfóður	16	5	2	5	2	1
Alls	124	24	24	30	7	10
<i>Útstreymi (Úb)</i>						
Mjólk	18	3	5	4	1	1
Kjöt	4	1	<1	1	<1	<1
Hreyfingar -áburður (m)	-1	-1	-5	8	2	12
-fóður (b)	-4	0	-2	10	1	6
-bústofn (v)	2	0	0	2	<1	<1
-mjólkurtankur (f)	-1	<1	<1	<1	<1	<1
Alls	17	3	-3	25	4	19
<i>Jöfnuður B=R+S</i>	107	22	27	31	7	17
<i>Möðruvellir</i>	77	17	13	18	4	24



37. mynd. Ræktunarjöfnuður N, P og K sem fall af ábornum næringarefnum á 12 kúabúum í Eyjafirði. Tölur innan sviga eru staðalskekkjur hallastuðla og skurðpunkta. Þóroddur Sveinsson 1998

Áburðarnotkun á kúabúunum var frá 110–240 kg á ha, 17–50 kg í P og 75–150 kg í K, 95.tafla.

95. tafla. Jöfnuður N, P og K við vaxandi áburðarskammta á 12 kúabúum í Eyjafirði skv. aðhvarfslíknungum í grein Þórodds Sveinssonar 1998.

N áburður	N jöfnuður	P áburður	P jöfnuður	K áburður	K jöfnuður
kg/ha					
110	1	17	6	75	3
120	8	20	8	80	5
150	27	30	16	100	14
200	59	40	24	125	25
240	85	50	32	150	36

Miðað við að lágmarka tap og uppsöfnun í jarðvegi má ætla að á þessum búum væri hæfileg áburðarnotkun samanlagt í búfjáraður og tilbúnum 100-120 kg/ha N, 15-20 kg P og 75-90 kg K. En fleira kemur til athugunar svo sem heypörf og hagkvæmni áburðarnotkunar með tilliti til kostnaðar og verðmæti uppskeru. Einnig skiptir máli að stór hluti af níturtapi tengist geymslu og meðferð níturáburðar og loks skiptir máli annars vegar hve mikið tapast í raun af því sem borið er á við uppgufun og útskolun og hins vegar hve mikið safnast fyrir í jarðvegi.

Áherslu þarf því að leggja á rannsóknir á tapi næringarefna úr jarðvegi og uppsöfnun við breytilega áburðarotkun á ræktað land og uppgjör áburðartilrauna með tilliti til hagkvæmni áburðarotkunar.

Sauðfjábú

96. tafla. N jöfnuður sauðfjábúskapar. Tölur fyrir meðalsauðfjábú og allt landið eru byggðar á upplýsingum frá Hagþjónustu landbúnaðarins. Tölur fyrir vatnasvið Miðfjarðarár eru byggðar á upplýsingum frá Landgræðslu ríkisins, Jón Guðmundsson o.fl. 2004.

Einingar	Afurðir	Áburður	Kjarnfóður	Beit	N jöfnuður
	N kg / vetrarfóðraða kind				
Valin hrein sauðfjábú	1,4	6,0	0,2	0,9	5,7
Meðal sauðfjábú búreikninga	1,1	6,0	0,2	0,9	6,0
	Tonn				
Vatnasvið Miðfjararár	7,5	49,4	0,7	6,2	48,8
Allt landið	568	2 841	95	358	2 726

Níturjöfnuður er hér reiknað sem N í áburði, kjarnfóðri og beit að frádrögnum N í afurðum.

Höfundar draga eftirfarandi alyktanir af efnajöfnuði sauðfjábúsins:

“Það er því brýnt verkefni að reyna að halda sem mestu af köfnunarefni inni í hringrás búnsins þannig að sem minnstu þurfi að bæta við. Bætt áburðarnýting og leiðir til að draga úr virkni þeirra ferla, sem N tap verður um, eru leiðir sem koma þar sterklega til álita. Nýting búfjáraþurðar í úthaga kann einnig að vera vænlegur kostur.

Það köfnunarefni sem fjarlæggt er með beit á óábörnu landi virðist ekki bætt með búrekstri og byggist því annars vegar á þeim forða sem fyrir er í jarðvegi og hins vegar á N-ákomu og N-bindingu. Mikilvægt er að kanna hvað verður um það N sem hverfur út úr kerfinu, hvort eitthvað af því N tapi, sem virðist vera, nýtist á beitarlöndum eða sé hægt að nýta. Einnig er mikilvægt að kanna umhverfisáhrif þessa köfnunarefnistaps og hvort og hvernig hægt væri að draga úr neikvæðum áhrifum.”

Áburðarleiddbeiningar

Almennar leiðbeiningar og áburðaráætlanir

Á vefsíðu bændasamtakanna www.bondi.is (*Ingvar Björnsson* 2009) er mælt með eftirfarandi túnskömmtum.

Köfnunarefni -N 90-150 kg/ha

Fosfór -P 10-30 kg/ha

Kalí -K 40-80 kg/ha

Skammtarnir sem mælt er með spanna það magn sem talið er koma til greina. Fosfóraburður má þó vera talsvert meiri á nýrækt á fyrstu árin í áður óábornu landi. Jafnframt er gerð grein fyrir þeim þáttum sem taka þarf tillit við til við nákvæmari ákvörðun á áburðarþörf :

- mikil fosfórþörf fyrstu árin á nýrækum,
- hámarksþörf á tünum í góðri rækt,
- jarðvegsgerð, sendin tún eru áburðarfrekari en tún á framræstri mýrarjörð
- plöntunæringarefni í búfjáraurði einkum nítur og kalí
- magn N, P og K á hektara í hefyng. hefyngnagreiningar, og uppskera á tünum
- Leiðbeiningar hafa miðast við að ekki sé meira borið á en fjarlægt er með uppskeru.

Við mat á þörf fyrir N, P og K í áburði má hafa til hliðsjónar hve mikið er fjarlægt af þessum efnum með uppskeru *Ingvar Björnsson 2004*. Aðferðin felst í að áætla hve mikið er fjarlægt með uppskeru og til fellur og nýtist í búfjáraurði. Mismunur á því sem fer með uppskeru (heildarþörf fyrir áburðarefni N, P og K) að frádregnu því sem til fellur af N, P og K í búfjáraurði er þá þörf fyrir N, P og K í tilbúnum áburði. Bent er á taka þurfi tillit til þess sem fæst úr nýtanlegum forða jarðvegs, en einnig þarf að gæta þess að þar á móti kemur að plöntur taka ekki upp allt sem borið er á hvort sem er í búfjáraurði eða tilbúnum áburði.

Áður hefur verið bent á á leið til að meta hve vel er séð fyrir N, P og K þörf túnagrasa með mati á uppskeru og hefyngnagreiningu af einstökum spildum. Þá þarf að velja spildur sem saman ná til breytileika í jarðvegsgerð og ræktun á hverri jörð. Aðferðin byggð á niðurstöðum áburðartilrauna í öllum landshlutum á löngu árabili (*Friðrik Pálmason 2000*).

Á vefsíðunni er ennfremur fjallað um dreifingartíma áburðar að vori og hausdreifingu áburðar og útreikninga á magni N, P og K sem fjarlægt er með uppskeru.

Í Handbók bænda eru greinar um þörf fyrir einstök plöntunæringarefni, þætti sem áhrif hafa á þörfina og gagnasöfnun fyrir áburðaráætlanir *Árni Snæbjörnsson, 1994, Óttar Geirsson, 1999, 2000*. Mikilvægt er að taka tillit til nýjustu upplýsinga um magn plöntunæringarefna í búfjáraurði og best að notaðar séu upplýsingar annað hvort úr næringarefnabókhalda (efnagreining heysýna og meltanleiki í fóðri) eða stuðst sé við efnagreiningar, *Þóroddur Sveinsson 1998 og 2009*.

Tölvuforrit fyrir áburðarleiddbeiningar

Tvö tölvuforrit til notkunar við ákvörðun á áburðarþörf hafa verið þróuð hér á landi.

Brúskur (http://fritt.is/news/aburdarforritid_bruskur/)

NPK (<http://www.landbunadur.is/landbunadur/wgbi.nsf/key2/bosn56ucha.html>)

Jarðvegsefnagreiningar

Túlkun jarðvegsefnagreininga hefur verið endurskoðuð (*Þorsteinn Guðmundsson, Jóhannes Sigvaldason 2000*) miðað við aðstæður eftir áratuga áburðarnotkun í þeim mæli sem hún náði upp úr miðri 20. öldinni. Endurskoðunin var ekki síst tímabær eftir umræðu um þá uppsöfnun fosfórs í jarðvegi sem orðið hafði þeim tünnum sem lengi höfðu verið í ræktun og eru meiri hluta túna. Nýræktun á áður óræktuðu landi snauðu af nýtanlegum fosfór er hins vegar orðin fátíð.

Við jarðvegsefnagreiningar hér á landi er nú notuð svonefnd ammóníumlaktat aðferð (AL aðferð). Þar í einu og sama jarðvegskolinu mælt kalíum, fosfór, kalsíum, magníum og natríum. Galli við þessa aðferð er að hún er ekki besti mælikvarðinn fyrir nýtanlegan fosfór (Friðrik Pálmason og Bjarni Helgason 1990). Skolun með bikarbónatlausn (bikarbónat fosfór eða Olsen-P) hefur reynst betur einkum í lítt súrum eða ósúrum jarðvegi. Rannsóknir á jarðvegi úr langtímatilraunum í Svíþjóð benda til þess að með viðunandi nákvæmni megi umreikna fosfórtölur mældar með ammóníumlaktatskolun (P_{AL}) í bikarbónat fosfór (P_{Ols}) sé tekið tillit til sýrustig (pH) og leimagns í jarðvegi, Otabbong o.fl. 2009:

$$P_{AL} = (-19,767 + 1,546 \sqrt{P_{Ols}} - 0,467 \sqrt{\text{leir}\%} + 3,276 \text{ pH})^2$$

$$P_{Ols} = (12,678 + 0,599 \sqrt{P_{AL}} + 0,232 \sqrt{\text{leir}\%} - 1,985 \text{ pH})^2$$

Tæplega er þó hægt að nota við þessa umreikninga hér nema að undagengnum rannsóknum á íslenskum jarðvegi. Nægir að nefna ólíkar jarðvegsgerðir hér á landi og í Svíþjóð sem gilda ástæðu til að kanna þetta samhengi hérlendis.

Þróun áburðarleiddbeininga í túnrækt og kornrækt

Kaflarnir um forsendur áburðarleiddbeininga, áburðarleiddbeiningar í kornrækt og um notkun hey- og grasefnagreininga í túnrækt eru úr grein um þróun áburðarleiddbeininga í kornrækt og túnrækt, *Friðrik Pálmason 2001*. Ítarleg umfjöllun um plöntuefnagreiningar er í grein sem birtist árið áður (*Friðrik Pálmason 2000*)

Forsendur áburðarleiddbeininga Spáð fyrir um áburðarþörf eftir vetrarhita.

Fram til þessa hafa leiðbeiningar um notkun níturáburðar verið byggðar á niðurstöðum tilrauna með níturáburð og þá tekið tillit til jarðvegsgerðar og ræktunar, samanber leiðbeiningar í *Áburðarfræði* (Magnús Óskarsson og Matthías Eggertsson, 1978), *Handbók bænda* (Óttar Geirsson, 2000 og Ingvar Björnsson 2004).

Páll Bergþórsson (1982, 1987 og 1996) hefur sagt fyrir um þörf fyrir N-, P- og K-áburð eftir vetrarhita samkvæmt reynslulíkingum byggðum á tilraunum með N-áburð og hvarfi vetrarhita að hefynd. Áburðartilraunir eru í öllum tilvikum grundvöllur leiðbeininganna, hvort sem markmiðið er að jafna hefyndinn frá ári til árs eða ná innan hagkvæmismarkna sem mestri uppskeru með áburði með þeim takmörkunum sem ráðast af vorkomu og sláttutíma. Fyrirnefnda leiðin miðar að því að spara áburð eftir milda vetur, eins og kemur fram í greinum Páls Bergþórssonar.

Skýringar á því að minni áburð þurfi eftir mildan vetur til að ná ákveðinni uppskeru geta verið að minnsta kosti tvær:

1) annars vegar að meira sé af nýtanlegu N í jarðvegi og öðrum plöntunæringarefnum í upphafi vaxtartímans eftir hlýjan vetur en eftir kaldan og

2) að jarðvegur þiðni fyrr en ella og vaxtartíminn lengist þar með.

Hvor leið um sig er byggð á fullgildum rökum en tilgangurinn er misjafn, annars vegar jöfnun heyfengs en hins vegar hagkvæm notkun áburðar í samræmi vaxtarskilyrði (atriði 1-5 að ofan) hverju sinni og á hverjum stað. Þótt síðarnefnda leiðin hafi ekki í för með sér jöfnun heyfengs, eru nokkrar líkur á að heygæði (% prótein) verði jafnari frá ári til árs með því móti og sprettumöguleikar séu jafnan nýttir til fulls (fyrningabúskapur).

Áburðarleiðbeiningar í konrækt eftir mælingum á lausu N í jarðvegi

Í greininni um þróun áburðarleiðbeininga er sagt frá aðferðum til að meta þörf fyrir níturáburð í kornrækt sambærilegum við þær sem hafa verið notaðar m.a. í Danmörku og Noregi. Mikið vantar á að þessar aðferðir séu nægilega mótaðar fyrir íslenskar aðstæður. Rannsóknir á losun N úr fleiri jarðvegsvegsgerðum en hingað til vantar og losun N eftir mismunandi foræktun og notkun búfjáráburðar.

Nmin aðferð.

Laust N er notað um ólífrænt N (ammóníum og níturat) í jarðvegi. Laust N að vori er mælt og er ásamt upplýsingum um nýtanlegt N úr jarðvegi (losun og nýting) grundvöllur leiðbeininga.

Aðferðin hefur ekki verið rannsökuð nægilega hér á landi til þess að hægt sé mæla með notkun hennar en hér er í stuttu máli greint frá þeim takmörkuðu rannsóknum sem gerðar hafa verið.

Árið 2000 var mæld N losun og ólífrænt N í kornræktarjarðvegi. Mælingarnar voru gerðar á jarðvegi úr tilraunum með N-áburð, sem voru sama sumar á tilraunastöðinni Korpu. Um niðurstöður þessarra rannsókna var fjallað í prófritgerð við Landbúnaðarháskólann á Hvanneyri, Unnsteinn Snorri Snorrason (2001).

Nýting N úr áburði var samkvæmt niðurstöðum tilraunarinnar á Korpu 75% (nýtingarstuðull 0,745). Gert er ráð fyrir sömu nýtingu á ólífrænu N (Nmin og mælist í jarðvegi fyrir áburðargjöf. Með öðrum orðum um 75% af ólífrænu N í jarðvegi (Nmin) og N í áburði mældist í uppskerunni (korni og hálmi).

Nýtingarstuðullinn fyrir N, sem losnar úr lífrænum efnum í jarðvegi, er 1,58. Kornplantan nýtti því 58% meira N heldur en losnaði úr lífrænum efnum í efstu 30 sm af jarðvegi. Því má reikna með að minnsta kosti þriðjungur af því N sem byggði tók upp hafi komið úr jarðvegi neðan við 30 sm dýpt.

Tilraunin, sem stuðst var við, var á mýrarjarðvegi og kornyrkið var íslenska yrkið Súla. Niðurstöðurnar eiga því eingöngu við sambærilegan mýrarjarðveg og við yrkið Súlu. Auk þess er um mjög takmörkuð gögn að ræða, aðeins eina tilraun og eitt ár

$0,75 \cdot (N_{\text{áb}} + N_{\text{min}} \text{ að vori}) + 1,58 \cdot N_{\text{losun í 30 sm dýpt}} = N \text{ í korni og hálmi}$

$(N_{áb} + N_{min} \text{ að vori}) = (N \text{ í korni og hálmi} - 1,58 \cdot N_{\text{losun í 30 sm dýpt}}) / 0,75$

$N_{áb} = (N \text{ í korni og hálmi} - 1,58 \cdot N_{\text{losun í 30 sm dýpt}}) / 0,75 - N_{min} \text{ að vori}$

Áburðarþörf í kornrækt, meljörð á Korpu, yrki af byggi Súla

$N_{áb} = 1,333 \cdot N \text{ í korni og hálmi} - 2,107 \cdot N_{\text{losun í 0-30 sm dýpt}} - N_{min}$

Niðurstöður mælinga vorið 2001 benda til þess að nota megi þessa aðferð með nokkrum árangri í jarðvegi þar sem losun N úr forða moldarefna í jarðvegi er jöfn frá ári til árs. Er þá gert ráð fyrir að áhrif forræktunar og búfjáraburðar séu metin, þ.e. N losun úr plöntuleifum frá árinu á undan og losun úr búfjáraburði frá 2 –4 undangengum árum.

Frávik N_{min} frá meðalári

Önnur leið, en sú að nota einfalt reiknilíkan eins og lýst er hér að framan, er mæling á N_{min} að vori og áburðarleiðbeining byggð á frávikum frá meðaltali mælinga fleiri ára.

Gert er ráð fyrir að áburðarþörf og N_{min} í meðalári sé þekkt. Mælist N_{min} t.d. 20 kg/ha hærra en í meðalári á ákveðnu veðursvæði má nota 20 kg/ha minna af nítri en í meðalári.

Þessi aðferð krefst tilrauna og mælinga á N_{min} um árbil á hverju svæði til þess að meta áburðarþörf og N_{min} í meðalári. Þar sem tilraunir eru dýrar í framkvæmd má styðjast við þá tilraunareynslu sem þegar er fyrir hendi og safna árlega jarðvegsýnum úr öllum landshlutum, helstu jarðvegsgerðum og úr túnnum, kornrækt, kartöflurækt og grænfóðurrækt.

Hey-eða grasefnagreininga til hliðsjónar við áburðarleiðbeiningar í túnrækt

Skortsmörk og kjörmörk fyrir fosfór og kalí fyrsta nálgun.

Skortsmörk og kjörmörk fyrir fosfór og kalí í túngrösum voru ákvörðuð samkvæmt niðurstöðum áburðartilrauna á tilraunastöðvum jarðræktar á Akureyri, Sámstöðum, Skriðuklaustri og Reykhólum, árin 1961-1969 (Friðrik Pálmason 1972). Skortsmörk miðuð við 80 % af hámarksþrengni við vaxandi skammta af fofóraburði annars vegar og vaxandi skammta af kalí hinsvegar voru að meðaltali:

0,22% P og 1,1 % K í þurrefni.

Fosfór og kalí í grasi (% í þurrefni) er ekki mjög breytilegt við þetta hlutfall af hámarksþrengni (80%) og skortsmörkin má því nota fyrir sýni tekin á venjulegum tíma fyrri sláttar.

Kjörmagn var að meðaltali 0,30-0,31 % P og 2,5-2,7 % K í þurrefni.

Nota má vel verkuð heysýni (meltanleikamæling) til þess að meta, hve vel hefur verið séð fyrir fosfór og kalíþörf túngrasa.

Skortsmörk og kjörmörk fyrir nútur, fosfór og kalí tengd uppskerumælingum.

Eftir að algengt er orðið að hirða hey í rúlluböggum eru af ýmsum ástæðum betri færi en áður á að nýta heyefnagreiningu til áburðarleiðbeininga (Friðrik Pálmason 2000):

1. Þar sem heyefnagreiningar eru gerðar vegna mats á heygæðum er hægt að nýta þær til áburðarleiðbeininga án aukalegs kostnaðar við sýnatöku og efnagreiningar.

Heyefnagreiningu fylgir mæling á þurrefni í heyinu, sem er nauðsynleg til þess að meta þyngd bagganna og þar með uppskeru af hverri spildu. Með mati á uppskeru verður fært að taka tillit til mismunar á efnamagni (%N, %P eða %K) í heyi sem stafar af tegunda- og þroskamun eða vaxtarskilyrðum eftir stöðum og árum en ekki af mismunandi framboði efnanna í jarðvegi

2. Með uppskerumælingu eða mati á uppskeru jafnhliða hrápróteinmælingu má meta hvort nægilega vel hafi verið séð fyrir níturþörf. Með eldri aðferð leiðréttingu á %P og %K eftir hrápróteini var hins vegar gert ráð fyrir að níturáburður væri innan kjörmarka.

3. Önnur plöntunæringarefni en venjulega eru greind með heyefnagreiningu eða jarðvegsefnagreiningu má einnig mæla í heyinu í þeim tilgangi að meta hvort nægilega vel hafi verið séð fyrir þörf fyrir þau:

- Til dæmis brennistein, sem ekki er mældur í jarðvegsefnagreiningum.
- Ofgnótt af mangan í plöntum getur bent til þess að ástæða sé til kölkunar jarðvegs.

4. Útskolunartap og ornun gætu verið skekkjuvaldar við notkun heyefnagreininga í þeim tilgangi sem hér um ræðir. Þar sem þurrkunartími á velli er stuttur með hirðingu í rúllubagga er minni hættu en áður á að hey hrekist, kalí skolist út eða lífræn efni tapist við ornun. Auk þess má nota meltanleikamælingu til þess að útloka illa verkuð heysýni úr mati á áburðarþörf.

97. tafla. Kjörmagn og skortsmörk fyrir nítur í grasi við mismunandi vaxtarskilyrði.

Niðurstöður byggðar á 15 vallartilraunum með níturáburð.

Enginn N áburður		Vaxandi N áburður					
		Uppskeruhlutfall					
		80		90		100	
Þurrefni hkg/ha	% N í þe.	Þurrefni hkg/ha	% N í þe.	Þurrefni hkg/ha	% N í þe.	Þurrefni hkg/ha	% N í þe.
41	1,84	48	1,98	54	2,13	60	2,40
29	1,90	41	2,06	46	2,22	51	2,48
20	2,02	37	2,38	41	2,50	46	2,59
14	1,94	32	2,40	36	2,56	40	2,75

Tilraunir með N, P og K-áburð voru flokkaðar eftir uppskeru án N, P eða K-áburðar (fyrsti dálkur í 97., 98. og 99. töflu). Fyrir hvern uppskeruflokk var uppskera við 90 og 80% af hámarksuppskeru metin í tilraunum með vaxandi skammta af N, P eða K. Magn N, P eða K (% í þurrefni) við þessi uppskerumörk var ákvarðað. Niðurstöðunar eru í töflum 97, 98 og 99.

Með því að meta uppskeru í tonnum af þurrefni á hektara og með niðurstöðum heyefnagreininga (%N, P og K í þurrefni) má því greina hvort um mikinn skort hafi verið ræða (uppskera minni en 80% af hámarki), skort (uppskera 10-20% undir hámarki) eða viðunandi frávik frá hámarksuppskeru (<10%undir hámarki).

98. tafla. Kjörmagn og skortsmörk fyrir fosfór í grasi við mismunadi vaxtarskilyrði. Niðurstöður byggðar á 25 vallartilraunum með fosfóráburið.

Enginn P-áburður		Vaxandi P áburður					
		Hlutfall uppskeru					
		80		90		100	
Þurrefni hkg/ha	% P í þurrefni	Þurrefni hkg/ha	% P í þurrefni	Þurrefni hkg/ha	% P í þurrefni	Þurrefni hkg/ha	% P í þurrefni.
56	0,21	52	0,20	58	0,22	65	0,22
48	0,23	44	0,21	49	0,24	55	0,35
39	0,18	43	0,21	48	0,24	53	0,33
32	0,20	31	0,18	35	0,22	39	0,31
23	0,19	28	0,25	32	0,28	35	0,31
13	0,17	22	0,25	25	0,30	28	0,34
7	0,14	20	0,22	22	0,24	25	0,29

99. tafla. Kjörmagn og skortsmörk fyrir kalíum í grasi við mismunadi vaxtarskilyrði. Niðurstöður byggðar á 25 vallartilraunum með kalíáburið.

Enginn K-áburður		Uppskeyra % af hámarki					
		80		90		100	
Þurrefni hkg/ha	% K í þurrefni	Þurrefni hkg/ha	% K í þurrefni	Þurrefni hkg/ha	% K í þurrefni	Þurrefni hkg/ha	% K í þurrefni.
71	1,16	66	1,1	74	1,3	82	1,8
47	1,04	45	1,0	51	1,4	57	2,3
38	0,84	41	1,0	46	1,4	51	2,3
31	0,97	32	1,1	36	1,6	41	2,4
22	0,93	24	1,2	27	1,5	30	2,5
16	0,76	23	1,3	26	1,7	29	2,5

Heimildir

Agulthon H. 1910. Emploi de bore comme engrais catalytique. Comptes Rendus Acad. Sci. 159, 288-291.

Ainsworth GC. 1981. Introduction to the history of plant pathology. Cambridge University press, bls. 100-101.

Allison, L.E. 1960. Wet combustion apparatus and procedure for organic and inorganic carbon in soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 24:36-40.

Arnon DI, Stout PR. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiology 14:371-375 (1939).

[Aulie RP. 1970. Boussingault and the nitrogen cycle. Proceedings of the American Philosophical Society of America, 114 \(6\) 435-479. <http://books.google.com/> leita þar eftir Boussingault 1891.](#)

Árni Snæbjörnsson, 1994. Um tilbúinn áburð. Handbók bænda 1994, bls. 19.

Barak Phillip 1999. Essential Elements for Plant Growth. Dept. of Soil Science, University of Wisconsin-Madison <http://www.soils.wisc.edu/~barak/soilscience326/essentl.htm>.

[Barak, Phillip 2009. Essential Elements for Plant Growth. Hydroponics. <http://www.soils.wisc.edu/~barak/soilscience326/hydropon.htm>.](#)

Barker Allen V, Philbeam Davis J. 2006. Introduction í Handbook of Plant Nutrition.

Biswas TD, Mukharjee SK. 1995. Textbook of Soil Science. 2. útgáfa 1995. Mac Graw Hill.

Bjarni Guðleifsson og Ewald Scnug 1990. The effect of soil pH on element availability and element- uptake by grasses grown on Icelandic peat soils. Búvísindi Icel. Agr. Sci. 4 1990, 11-18.

Björn Guðmundsson og Þorsteinn Þorsteinsson 1980. Þungmálmur í íslensku grasi. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir, 12,1: 3-10.

Björn Jóhannesson 1960. Íslenskur jarðvegur. 134 bls. Bókaútgáfa Menningarsjóðs. Endurútgefin 1988 af Rannsóknastofnun landbúnaðarins með viðauka um ritgerðir um íslenskan jarðveg eftir 1960. Bókin er einnig til í enskri útgáfu The soils of Iceland.

Björn Þorsteinsson, Guðmundur Hrafn Jóhannesson og Þorsteinn Guðmundsson 2004. Athuganir á afrennslismagni og efnaútskolun af túnum á Hvanneyri. Fræðaping landbúnaðarins 2004 s. 77-83.

Boken, Else 1966. Studies on methods for determining varietal utilization of nutrients exemplified by variations in oats and manganese yields at different times of sampling. Disputats. DSR forlag. Kgl Veterinær og Landbohøjskole, København.

Boussingault, JB. Sjá <http://www.answers.com/topic/jean-baptiste-boussingault>.

Boussingault, JB. 1836. Researches sur la quantité d'azote contenue dans le fourages et sur leur équivalens. *Annales de Chimie et Physique* 63 ser 2, 225-244.

Boussingault, JB. 1838a. Researches sur la quantité d'azote contenue dans le fourages et sur leur équivalens. *Annales de Chimie et Physique* 67, ser.2, 408-421.

Boussingault, JB. 1838b. Researches chimiques sur la végétation, entreprises dans le but d'examiner si les plantes prennent d'azote á l'atmosphère. *Annales de Chimie et de Physique. Series 2*, 69:353-367.

Boussingault, JB. 1841. De la discussion de la valeur relative des assolements par les resultats de l'analyse elementaire," *Annales de Chimie et Physique (III.)* i 208-246 Tilvitnun hjá Russell, 1915.

Boussingault, JB. 1854. Researches sur la Vegetation. Dans le but d'examiner si les plantes fixent dans leur organisme l'azote qui est à l'état gazeux dans l'atmosphère. *Premiere Memoire. Annales des Sciences Naturelles (Botanique)* 1, Ser. 4, 241-291. *Annales de Chimie et Physique* 41, Ser. 3, 5-60 og *Comptes Rendus hebdomadaires des Séances de l'Academie des Sciences*, 31, 573-580. Tilvitnun hjá Aulie 1970.

Boussingault, JB. 1855. Researches sur la Vegetation. *Annales de Chimie et Physique* 43, Ser. 3, 149-223. Tilvitnun hjá Aulie 1970.

Brock, William H. 1997. *Justus von Liebig: The Chemical Gatekeeper*. Cambridge: Cambridge University Press.

Brown PH, Welch RM, Cary EE. 1987a. Nickel. A micronutrient for higher plants. *Plant Physiol.* 85, 801-803.

Brown Patrick H, Welch Ross M, Cary Earle E, Checkai Ron T. 1987b. Beneficial effects of nickel on plant growth. *Journal of Plant Nutrition*, 10, 2125 – 2135.

Brown Patrick H. 2006. Nickel. Í *Handbook for Plant Nutrition*, ritstj. Allen V. Barker og David J. Pilbeam. Útgefandi CRC.

Browne CA. 1944. A source book of agricultural chemistry. Í *Chronica Botanica* ritstj. F. Verdoorn. The *Chronica Botanica Co.*, Waltham MA.

Browne, Charles Albert 1944 A source book of agricultural chemistry. Endurprentun 1977.

Broyer TC, Carlton AB, Johnson CM, Stout PR. 1954. Chlorine - a micronutrient element for higher plants. *Plant Physiology* 29, 526-532.

Bruun, S., Stenberg, B., Breland, T.A., Gudmundsson, J., Henriksen, T.M., Jensen, L.S., Korsæth, A., Luxhøi, J., Pálmason, F., Pedersen, A., Salo, T., 2005. Empirical predictions of plant material C and N mineralization patterns from near infrared spectroscopy, stepwise chemical digestion and C/N ratios. *Soil Biology and Biochemistry* 37, 2283-2296.

Burris, Robert H. 2000. Introduction to nitrogenases. Í *Prokaryotic nitrogen fixation. Model system for the analysis of a biological system*. Ritstj Eric W. Triplett. Horizon Scientific Press Wymondham, Norfolk England.

Carnegie, Douglas (1894) *Law and Theory in Chemistry: A Companion Book for Students*, 232 síður. Útgefandi Kessinger Publishing, LLC, 2008.

Carpenter, Kenneth J. 2003. A Short History of Nutritional Science: Part 1 (1785-1885). *J Nutr.* 133, 638-645. The American Society of Nutritional Sciences.

Cassar Nicolas, Jean-Philippe Bellenger, Robert B. Jackson, Jonathan Karr og Bruce A. Barnett 2012. N₂ fixation estimates in real-time by cavity ring-down laser absorption spectroscopy. *Oecologia* (2012) 168:335–342.

Cohen, S. Marc. Focuses on the relation of Anaximander's thought to that of Thales. <http://faculty.washington.edu/smcohen/320/anaximan.htm>.

[Cowgill George R. 1964. Jean Baptiste Boussingault: — A Biographical Sketch • \(February 2, 1802 – May 11, 1887\). J. Nutr. 1964 84: 1-9. http://jn.nutrition.org/cgi/reprint/84/1/1.pdf](http://www.jn.nutrition.org/cgi/reprint/84/1/1.pdf).

Dahlgren RA, Saigusa M, Ugtolini FC. 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy Vol. 82* ritstýrt af Nyle C. Brady, Donald L. Sparks, bls 113-182.

Datnoff Lawrence E. 2005. Silicon in the Life and Performance of Turfgrass. *Plant Management Network*. <http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/ats/review/2005/silicon/>.

Davy, Sir Humphry (1813). *Elements Of Agricultural Chemistry In A Course Of Lectures*. London: Longman.

Dixon NE, Gazzola C, Blakeley RL, Zerner B. 1975. Jack bean urease. A metalloenzym. A simple biological role for nickel. *J. Amer. Chem. Soc.* 97, 4131-4133.

Ducheyne, Steffen 2005. J.B. Van Helmont and the Question of Experimental Modernism, *Physis: Rivista Internazionale di Storia della Scienza*, vol. XLII, 2005, pp. 305-332. [kom út 2007].

Egerton, F. N. 2004a. A History of the Ecological Sciences, Part 13: Broadening Science in Italy and England, 1600–1650. *Bulletin of the Ecological Society of America* July 2004, 110-119.

Egerton, F. N. 2004b. A history of the ecological sciences, part 14: plant growth studies in the 1600s. *Bulletin of the Ecological Society of America* 85:208–213.

Egerton, Frank N. 2008. A History of the Ecological Sciences, Part 28: Plant Growth Studies During the 1700s. *Bulletin of the Ecological Society of America: Vol. 89, No. 2*, pp. 159-175.

Epstein E (1972) *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. John Wiley and Sons, New York.

Epstein, Emanuel 1994. The anomaly of silicon in plant biology (Review). *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 91, 11-17.

Epstein, Emanuel 1999. Silicon. *Plant Physiol. Mol. Biol.* 50, 641-664.

- Epstein, Emanuel 2000. The discovery of essential elements. Í Discoveries in Plant Biology Vol. 3, Ritstjórn Shain-Dow kung og Shang-Fa Yang.
- Epstein Emanuel 2005. Silicon in agriculture.: a historical review. III. Silicon in Agriculture conference. Uberlândia, Brazil. 22-26 October 2005.
- Eskew DL, Welch RM, Cary EE. 1983. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. Science 222: 621-623.
- Eskew DL, Welch RM, Nowell WA. 1984. Nickel in higher Plants. Further evidence for an essential role. Plant Physiol. 76, 691-693.
- Essential trace elements for plants, animals and humans. NJF Seminar no. 370 Rit LBHÍ nr. 3. 2005. Ritstj. Gudni Thorvaldsson og Rósa S. Jónsdóttir.
- Feller Christian L., Laurent J.-M. Thuries, Raphael J. Manlay, Paul Robin, and Emmanuel Frossard, 2003. " The principles of rational agriculture" by Albrecht Daniel Thaer (1752-1828). An approach to the sustainability of cropping systems at the beginning of the 19th century. J. Plant Nutr. Soil Sci. 166, 687-698.
- Finck, A. (1968). Grenzwerte der Nährelementgehalte in Pflanzen und ihre Auswertung zur Ermittlung des Düngerbedarfs. Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde, 119, 197—208.
- Finck Arnold 1969. Pflanzenernährung in Stichworten. Útgefandi: Verlag Ferdinand Hirst, Kiel.
- Finck Arnold 1982. Fertilizers and Fertilization: Introduction and Practical Guide to Crop Fertilization. Útgefandi: John Wiley & Sons Inc.
- Friðrik Pálmason 1972. Fosfór og kalí í túngrösum og grassprettu. Íslenskar landbúnaðar-rannsóknir, 4 (2), 15-31.
- Friðrik Pálmason 2000. Heyefnagreiningar og áburðarleiðbeiningar. Ráðunautafundur 2000, 123-131.
- Friðrik Pálmason 2001. Þróun áburðarleiðbeininga í kornrækt og túnrækt. Freyr 97 (11. tbl.) 31-36.
- Friðrik Pálmason 2006. Nitrogen mineralization in situ and in laboratory in Icelandic Andosol Icel. Agric. Sci. 19 (2006), 3-13.
- Friðrik Pálmason og Bjarni Helgason 1990. Samanburður á aðferðum við greiningar á nýtanlegum fosfór og kalí í jarðvegi. Búvísindi 3, 3-11.
- Friðrik Pálmason; Halldór Þorgeirsson, Hólmfríður Sigurðardóttir, Hólmgeir Björnsson og Ólafur Arnalds 1996. Níturlosun í jarðvegi. Búvísindi, 10 185-208.
- Friðrik Pálmason, Halldór Sverrisson og Jón Guðmundsson 2009. Nítur nám úr lofti í belgjurtum og tveimur trjátegundum. Fræðaping landbúnaðarins 6. árg. 213-220.

Friðrik Pálmason og Jón Guðmundsson 2012. Nitrogen mineralization and litter biochemical quality. Óbirt grein.

[Gascoigne, Bamber. "History of Chemistry HistoryWorld. From 2001, ongoing. http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?groupid=2461&HistoryID=ac20>rack=pthc.](http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?groupid=2461&HistoryID=ac20>rack=pthc)

Gibeaut, David M., John Hulett, Grant R. Cramer, Jeffrey R. Seemann. Maximal biomass of *Arabidopsis thaliana* using a simple, low maintenance hydroponic method and favorable environmental conditions. Modified from the original article in *Plant Physiology* (1997) 115:317-319). <http://www.ag.unr.edu/Cramer/hydroponic.html>.

Gibson, R.J. Harvey 1999. *Outlines of Botany*. Discovery Publishing House.

Glass DM. 1989. *Plant nutrition. An introduction to current concepts*. Jones and Barlett Publisher Boston.

Govindjee og David Krogmann 2004. Discoveries in Oxygenic Photosynthesis (1727–2003): A Perspective. *Photosynthesis Research* 80, 1-3, 2004 15-57.

[Graham, Daniel W., "Heraclitus", The Stanford Encyclopedia of Philosophy \(Fall 2008 Edition\), Edward N. Zalta \(ed.\), http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/heraclitus/.](http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/heraclitus/)

[Green Joseph Reynolds 1909. A history of botany, 1860-1900; being a continuation of Sachs "History of botany, 1530-1860". Oxford Clarendon Press 1909.](#)

Grétar Hrafn Harðarson, Arngrímur Thorlacius, Bragi Líndal Ólafsson, Hólmgeir Björnsson og Tryggvi Eiríksson 2006. Styrkur snefilefna í heyi. *Fræðaðing landbúnaðarins* 2006, 179-189.

Guðmundsdóttir KB, S. Sigurdarson, J. Kristinsson, T Eiríksson and T. Jóhannesson 2006. Iron and iron/manganese ratio in forage from Icelandic sheep farms: relation to scrapie. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 48:1, 16-20

Guðni Þorvaldsson 1998. Áhrif veðurþátta og áburðartíma á byrjun gróanda og sprettu. *Ráðunautafundur* 1998, 164-17.

Guðni Þorvaldsson 2007. Nýting haustáburðar til sprettu *Fræðaðing landbúnaðarins* 4, 295-300.

Guðni Þorvaldsson, Hólmgeir Björnsson, Þorsteinn Guðmundsson 2003. Langtímaáhrif mismunandi níturáburðar á uppskeru og jarðveg. *Tilraun 19-54 á Skriðuklaustri - Fjölrit Rala* 212, 80 bls.

Gupta Umesh C. 1997. Copper in crop and plant nutrition. Í *Handbook of Copper Compounds and applications*. Ritsjtj. Richardson, Wayne. Marcel Dekker New York 1997.

Hafðis Sturlaugsdóttir, Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 2005 Árangur af niðurfellingu mykju með DGI tækni - kynning á verkefni. *Fræðaðing landbúnaðarins* 2005 369-371.

- Hafðis Sturlaugsdóttir, og Þóroddur Sveinsson 2006. Áburðaráhrif mykju og árangur ísáningar með DGI niðurfellingabúnaði. II. Árangur ísáningar. Fræðaging landbúnaðarins 2006, 164-169.
- Henriksen T. M. and Breland T. A. 1999. Evaluation of criteria for describing crop residue degradability in a model of carbon and nitrogen turnover in soil. *Soil Biol. Biochem.* 31. 1135–1149.
- Henriksen T.M., A. Korsaaeth, T.A. Breland, B. Stenberg, L.S. Jensen, S. Bruun, J. Gudmundsson, F. Palmason, A. Pedersen, T.J. Salo 2007. Stepwise chemical digestion, near-infrared spectroscopy or total N measurement to take account of decomposability of plant C and N in a mechanistic model. *Soil biology & biochemistry* 39 (12), 3115-3126.
- Henrikssen, Elisabeth, L.E. Henriksson & E. J. Da Silva 1975. A comparison of nitrogen fixation by algae of temperate and tropical soils. Í: Nitrogen fixation by free-living microorganisms, Stewart WDP (ritstj.), International Biological Programme 6, Cambridge, Cambridge University Press 1975, 199-206.
- Hershey David 2003. Misconceptions about Helmont's Willow Experiment. *Plant Science Bulletin* 49, (3) 78-84. Útgefandi the Botanical Society of America, Inc.
- [Hirsh Ann M. 2000. Brief history of the discovery of nitrogen fixing organism. University of California, Los Angeles. The Department of Molecular Cell and Developmental Biology. http://www.mcdb.ucla.edu/Research/Hirsch/imagesb/HistoryDiscoveryN2fixingOrganisms.pdf.](http://www.mcdb.ucla.edu/Research/Hirsch/imagesb/HistoryDiscoveryN2fixingOrganisms.pdf)
- [Hoagland DR, Arnon DI. 1950. The waterculture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station. Circular 347. Univeristy of California. Berkeley. The water-culture method for growing plants without soil.](#)
- Hoagland, DR. 1920. Optimum nutrient solution for plants. *Science* 52 (1354), 562-564.
- Hólmgeir Björnsson 1979. Ídreifing búfjáraburðar. Ráðunautafundur 1979, 189-192.
- Hólmgeir Björnsson, 1998a. Dreifing áburðar síðsumars og að hausti. Ráðunautafundur 1998, 141-154.
- Hólmgeir Björnsson, 1998b. Dreifingartími áburðar. *Freyr* 94 (6), 18-25.
- Hólmgeir Björnsson 2003. Uppskerumælingar og uppgjör þeirra. Viðauki við grein um langtímaáhrif mismunandi níturaburðar á uppskeru og jarðveg eftir Guðna Þorvaldsson o.fl.
- Hólmgeir Björnsson 2008. Tilraunir með áburð á kartöflur 2004 og yfirlit yfir niðurstöður tilrauna 1950 – 2004 Fertilizer experiments with potatos 2004 and compilation of results 1950 – 2004. *Rit LbhÍ* nr. 17.
- Hólmgeir Björnsson og Áslaug Helgadóttir 1988. The effect of temperature variation on grass yield in Iceland, and the implication for dairy farming. In: *Impact of Climatic Variations on Agriculture. Vol. I. Assessments in Cool Temperature and Cold Regions* (eds M.L. Parry, T.R. Carter & N.T. Konijn). Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, 445-474.

Hólmgæir Björnsson, Guðni Þorvaldsson og Þorsteinn Guðmundsson 2001. Efnajafnvægi í langtímatilraun með tegundir nituráburðar á Skriðuklaustri. Ráðunautafundur 2001, 292-295.

Hólmgæir Björnsson, Guðni Þorvaldsson og Þorsteinn Guðmundsson 2007. Áhrif P- og K-áburðar á reitum sem fengu mismikinn áburð í 55 ár. Fræðaging landbúnaðarins 4, 394-398.

Hubbell D.H. og Gerald Kidder 2003. Biological Nitrogen Fixation. SL-16 series of fact sheets of the Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

Ingvar Björnsson 2004. Áburðaráætlanir. Handbók bænda 54, 26-29.

[Ingvar Björnsson 2008. Tilbúinn áburður á tún. http://www.bondi.is/Pages/467 .](http://www.bondi.is/Pages/467)

Jensen, L.S., Salo, T., Pálmason, F., Breland, T.A., Henriksen, T.M., Stenberg, B., Pedersen A., Lundström C., Esala, M., 2005. Influence of biochemical quality on C and N mineralization from a broad variety of plant materials in soil. Plant and Soil 273, 307-326.

[Johannes Sigvaldason 1964. Om phosphats binding i jorden, planternes phosphornæring, samt udbringningsmåder for phosphorgødning.](#) Licentiatritgerð. Den kgl .Veterinær og Landbohøjskole, Afdelingen for planternes ernæring, København.

Jóhannes Sigvaldason 1992. Samanburður á efnamagni í rækt og órækt. Freyr 88, 15-17.

Johnson CM, Stout PR, Broyer TC, Carlton AB. 1957. Comparative chlorine requirements of different plant species. Plant and Soil 8 (4), 337-353.

Jones J.B . 2004. Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower, Second Edition. CRC Press.

Jón Guðmundsson, Þóroddur Sveinsson, Einar Grétarsson, og Björn Barkarson 2004. Köfnunarefni sjöfnuður sauðfjárbúskapar. Fræðaging landbúnaðarins 2004 s. 322-325.

Knierim Thomas: Greek Philosophy, <http://www.thebigview.com/download/greek-philosophy.pdf>.

Knierim Thomas: Greek Philosophy, <http://www.thebigview.com/greeks/democritus.html>.

Krikorian AD, and Steward FC. (1968). Water and solutes in plant nutrition: With special reference to van Helmont and Nicolaus of Cusa. BioScience, 18, 286-292.

Manfred Köhne 2002. Albrecht Thaer – Gründer einer wissenschaftlich fundierten Agrarproduction. <http://www.albrecht-thaer-gesellschaft.de/Albrecht-Thaer-Vortrag.pdf>

Liebig Justus 1840. Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie. Ensk þýðing 1847: Chemistry in its application to agriculture and physiology. Philadelphia 1847.

Lipman CB. Mackinney G. 1931. Proof of the essential nature of copper for higher green plants. Plant Physiol. 6: 593-599.

Ma Jian Feng (2009). Silicon uptake and translocation in plants. UC Davis: The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI. Retrieved from: <http://escholarship.org/uc/item/3pq8p5p0>.

Ma Jian Feng, Yamaji Naoki (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trend in Plant Science* 11 (8), 392-397.

Magnus Óskarson og Matthías Eggertsson 1978. Áburðarfræði. Útgefandi Búnaðarfélag Íslands.

Mali Manju, Aery Naresh C. 2008. Silicon effects on nodule growth, dry-matter production, and mineral nutrition of cowpea (*Vigna unguiculata*) *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171 (6) 835 – 840.

Malthus, Robert 1798. An Essay on the Principle of Population As it affects the future improvement of society with remarks on the speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and other writers . <http://www.esp.org/books/malthus/population/malthus.pdf>.

Maze P. 1919. Mineral nutrient solution for maize. *Annl. Inst. Pasteur* 139-173.

Mc Cosh FWJ. 1984. Boussingault, chemist and agriculturalist. D.Reidel Publishing Company.

McCollum EV. 1957 A History of Nutrition. Houghton Mifflin Company, Boston.

McHargue, JS. 1922. *Journal of the American Society of Chemistry*, 44 (7), 1592-1598.

Miller, Edwin C. 1931. *Plant physiology*. First edition.

Ministry of the Environment programs and initiatives, 2001. Cobalt in the environment. Ontario <http://www.ene.gov.on.ca/cons/3793e.pdf>.

Mitani Namiki, Ma Jian Feng 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany* 56 (414), 1255-1261.

Mitscherlich Eilhard A. 1909. Das Gesetz des Minimum und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtschaftliche Jahrbücher* 38, 537-552.

Motulsky H. and Christopoulos A. 2003. *Fitting Models to biological data using linear and nonlinear regressions. A practical guide to curve fitting*. Graph Pad Software Inc. 2003. San Diego. California CA. www.graphpad.com.

Motulsky H.J, 2003. Prism 4 Statistics guide –Statistical analysis for laboratory and clinical researchers. Graph Pad Software INC. San Diego Cal, www.graphpad.com.

Nielsen Forrest H. 1984. Ultratrace elements in nutrition. Nickel. *Annual Review of Nutrition*. 4, 21-41.

Nýting búfjáraburðar. Rit Búvísindadeildar nr.1, ritstjóri Ríkharrð Brynjólfsson. Bændaskólinn á Hvanneyri.

O'Connor J J and E F Robertson 2000. Empedocles of Acragas <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Empedocles.html>.

Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dep. of Agric. Circ.

Otabbong E., P. Leinweber, A. Schlichting, R. Meissner, M. Shenker, I. Litaor, A. Sapek, S. Robinson, A. Niedermeier, H. Hacin, JR Otabbong 2004. Comparison of ammonium lactate, sodium bicarbonate and double calcium lactate methods for extraction of phosphorus from wetland peat soils. *Acta Agriculturae Scandinavica* 54 (1), 2004, pp. 9-13(5).

Otabbong Erasmus, Katarina Börling, Thomas Kätterer, Lennart Mattsson 2009. Compatibility of the ammonium lactate (AL) and sodium bicarbonate (Olsen) methods for determining available phosphorus in Swedish soils. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Plant Soil Science* 59 (4), 373-378.

Ólafur Arnalds 2004. Hin íslenska jarðvegsauðlind. Fræðaðing landbúnaðarins 2004 s. 94-102.

Ólafur Arnalds, Bergrún Arna Ólafsdóttir og Rannveig Guichernaud, 2005. Aðferðir við að lýsa jarðvegssniðum. *Rit LbhÍ nr. 5*, 53 bls.

Ólafur Jónsson 1939. Belgjurtir – þýðing þeirra og hagnýting í íslenskri jarðrækt. *Ársrit Ræktunarfélags Norðurlands* 35, 19-143.

Ólöf Björg Einarsdóttir og Magnús Óskarsson 1995. Lífrænn landbúnaður - lífrænn áburður. Ráðunautafundur 1995.

Ólöf Björg Einarsdóttir 1996. Lífrænn áburður samantekt íslenskra rannsókna 1900-1995. *Rir Búvísindadeildar Bændaskólans á Hvanneyri nr. 16*, 147 bls.

Óttar Geirsson, 1999. Áburður á tún. *Handbók bænda 1999*, bls 75-78.

Óttar Geirsson, 2000. Áburðarnotkun. *Handbók bænda 2000*, 50. Árgangur 19-21. Ritstjóri Matthías Eggertsson, útgefandi Bændasamtök Íslands.

Páll Bergþórsson 1982. Borið á eftir vetrarhita og fyrningum. Ráðunautafundur 1982, 15-22.

Páll Bergþórsson 1987. Áhrif loftlags á landbúnað á Íslandi, Ráðunautafundur 1987, 1-12.

Páll Bergþórsson, 1996. Hitafar og gróður, *Búvísindi* 10, 141–164.

Pálmason F. (2005) Nitrogen mineralization in situ and in controlled environment. In Optimization of nutrient cycling and soil quality for sustainable grasslands. Proceedings of a satellite workshop of the XXth International Grassland Congress, July 2005 Oxford, England. Ritstj. S.C. Jarvis S., P.J. Murray og J.A Roker. Bls. 84.

Ploeg RR, Böhm W, Kirkham MB. 1999. On the Origin of the Theory of Mineral Nutrition of Plants and the Law of the Minimum. *Soil Sci Soc Am J* 63: 1055-1062.

Polacco JC. 1977. Nitrogen metabolism in soybean tissue: II Urea utilization and urease synthesis requires Ni^{2+} . *Plant Physiol.* 59, 827-830.

- Rabinowitch Eugene I. 1945. Photosynthesis and Related Processes. Interscience Publ. New York.
- Raleigh G.J. 1939. Evidence for the Essentiality of Silicon for Growth of the Beet Plant *Plant Physiology*, 14 (4), 823-828.
- Raleigh G.J. 1948, Effects of the sodium and of the chloride ion in the nutrition of table beet in culture solutions. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 51, 433-436.
- Resh H.M. (1995) *Hydroponic Food Production: a Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. 5th ed Woodbridge Press Publishing Co, Santa Barbara CA.
- Resh H.M.. 2001. *Hydroponic Food Production: A definitive guide of soilless food-growing methods*. 6th Ed. Woodbridge Press Publ. Co., Beaverton.
- Richmond Kathryn E, Sussman Michael 2003. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient *Current Opinion in Plant Biology* 6 (3), 268-272.
- Ríkharð Brynjólfsson 1990. Áburðartilraunir í Dalasýslu. *Búvísindi*, 4, 72-85
- Ríkharð Brynjólfsson 1992. Tvær tilraunir með búfjáraburð á Hvanneyri. *Rit Búvísindadeildar nr.1 Nýting búfjáraburðar Ritstj. Ríkharð Brynjólfsson*, 103-112.
- Ríkharð Brynjólfsson, 1996. Áhrif áburðartíma, áburðarmagns og sláttutíma á uppskeru og efnainnihald túngrasa. *Rit Ráðunautafundar 1996*, bls. 113.
- Robson A.D., Dilworth M.J. og Chatel D.L. 1979. Cobalt and nitrogen fixation in *Lupinus angustifolius* L. I. Growth, nitrogen concentrations and cobalt distribution. *New Phytol.* 83, 53-62.
- Rodrigues Fabricio A, Datnoff Lawrence E. 2005. Silicon and rice disease management. *Fitopatologia brasileira* 30 (5), 457-469.
- Rosen Carl og Foord Karl 2009. Birch Abnormal Growth Syndrome (BAGS) aka. Mouse Ear Disorder. University of Minnesota Extension.
<http://blog.lib.umn.edu/efans/ygnews/2009/10/>.
- Rubio G, Zhu J, Lynch JP. 2003. A critical test of the two prevailing theories of plant response to nutrient availability. *American journal of Botany.* 90 (1), 143-152.
- [Russell Edward J. 1915. Soil Conditions and Plant Growth, 2. útgáfa 1915. Longmans, Green and Co. London \(http://www.archive.org/details/plantgrowth00russrich\).](http://www.archive.org/details/plantgrowth00russrich)
- Salo, T., Stenberg, B., Lundström, C., Jensen, L.S., Bruun, S., Pedersen, A., Breland, T.A., Henriksen, T., Korsæth, A., Palmason, H. and Gudmundsson, J. 2006. Characterisation of plant residue quality for prediction of decomposition and nitrogen release in agricultural soils. *Acta Hort.(ISHS)* 700:57-62.
- Schulte E.E. og Bruce Hoskins 1995. Recommended Soil Organic Matter Tests. Í Recommended soil testing procedures for the Northeastern United States, 3rd Edition, Northeastern Regional Publication No. 493. Agricultural Experiment Stations of Connecticut,

Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New Jersey, New York, Pennsylvania, Rhode Island, Vermont, and West Virginia.

Seilnacht Thomas: Theophrastus von Hohenheim (Paracelsus).

<http://www.seilnacht.com/chemiker/chepara.html>.

Sengbusch Peter v. - 2003 Botany online: Ions and Small Molecules - Mineral Nutrients

<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e16/16a.htm>.

Sigfús Ólafsson 1979. Nýting búfjáraburðar á tún. Ráðunautafundur 1979, 193-1979.

Sigfús A. Ólafsson 1974. Fysiske og fysisk-kemiske studier af islandske jordtyper. Licentiatritgerð. Den kgl .Veterinær og Landbohøjskole, Hydroteknisk laboratorium, København.

Sivertsen T. og Plassen C. 2004. Hepatic cobalt and copper levels in lambs in Norway. Acta Veterinaria Scandinavica 45, 69-77.

Snyder George H, Matichenko Vladimir V, Datnoff Lawrence E. 2006. Silicon. Í Handbook of plant nutrition Vol 117, 551-568.

Sommer AL, Lipman CB. 1926. Evidence on the indispensable nature of zinc and boron for higher green plants. Plant Physiol. 1: 231-249.

Sommer AL. 1931. Copper as an essential for plant growth. Plant Physiol. 6: 339-345.

Sommer Anna L. 1945. Copper and plant growth. Soil Science 60 (1), 71-80.

Sparks DL. 2006. The origins of agricultural chemistry: the forerunner of soil chemistry. Í Footprints in the soil. People and ideas in soil history. Ritstj. Benno P. Warkentin. Elsevier.

Sprengel C. 1826. Ueber Pflanzenhumus, Humussäure und humussaure Salze (About plant humus, humic acids and salts of humic acids). Archiv für die Gesamte Naturlehre 8:145–220.

Steenbjerg F. 1965. Lærebog i planternes ernæring med særligt henblik på landbrugets kulturplanter. Almindelig del, Bd 1-3. København DSR forlag.

Stenberg B., Jensen L.S., Nordkvist E., Breland T.A., Pedersen A., Gudmundsson J., Bruun S., Salo T., Pálmason F., Henriksen T.M., Korsæth A. 2004. Near infrared reflectance spectroscopy for quantification of crop residue, green manure and catch crop C and N fractions governing decomposition dynamics in soil. Journal of Near Infrared Spectroscopy 12. 331-346.

Thorsteinn Gudmundsson, Hólmgeir Björnsson and Gudni Thorvaldsson 2005. Elemental composition, fractions and balance of nutrients in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 18, 21–32.

Torkell Jóhannesson, Kristín Björg Gudmundsdóttir, Tryggvi Eiríksson, Jed Barash, Jakob Kristinsson og Sigurdur Sigurdarson 2004a. Selenium and GPX activity in blood samples

from pregnant and non-pregnant ewes and selenium in hay on scrapie-free, scrapie-prone and scrapie-afflicted farms in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 16-17, 3-13.

Torkell Jóhannesson, Kristín Björg Guðmundsdóttir; Tryggvi Eiríksson Jakob Kristinsson og Sigurdur Sigurdarson 2004b. Copper and manganese in hay samples from scrapie-free, scrapie-prone and scrapie-afflicted farms in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 16-17, 45-52.

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

Torkell Jóhannesson, Tryggvi Eiríksson, Kristín Björg Guðmundsdóttir, Sigurdur Sigurdarson og Jakob Kristinsson 2007. Overview: Seven trace elements in Icelandic forage. Their value in animal health and with special relation to scrapie. *Icel. Agric. Sci.* 20, 3-24.

[Trochim William M.K 2006. Deduction and induction. Deductive and inductive thinking. Research methods. Knowledgebase. http://www.socialresearchmethods.net/kb/dedind.php.](http://www.socialresearchmethods.net/kb/dedind.php)

Tryggvi Eiríksson, Kristín Björg Guðmundsdóttir, Sigurður Sigurðarson, Þorkell Jóhannesson og Jakob Kristinsson 2006. Sjö snefilefni í íslensku heyi. *Freyr* 102 (3), 28-31.

van der Ploeg RR, Böhm W, Kirkham MB. 1999. On the Origin of the Theory of Mineral Nutrition of Plants and the Law of the Minimum. *Soil Sci Soc Am J* 63: 1055-1062.

[Vetsweb.com informing and connecting veterinarians worldwide. http://www.vetsweb.com/diseases/cobalt-vitamin-b12-deficiency-d263.html.](http://www.vetsweb.com/diseases/cobalt-vitamin-b12-deficiency-d263.html)

von Liebig Justus 1840. Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie. Ensk þýðing 1847: Chemistry in its application to agriculture and physiology. Philadelphia 1847.

Warrington K. 1923 The effect of boric acid and Borax on the broad bean and certain other plants. *Ann. Bot.* 3:623-672.

Warrington, Katherine 1957. The influence of the pH of the nutrient solution and the form of iron supply on the counteraction of iron deficiency in peas, soybean and flax by high concentrations of molybdenum. *Annals of Applied Biology* 45 (3), 428 – 447.

Williams E D. and J. Vlamis 1957. The effect of silicon on yield and manganese-54 uptake and distribution in the leaves of barley plants grown in culture solutions. *Plant Physiology* 32, 404-409.

Wooley JT. 1957. Sodium and silicon as nutrients for the tomato plant. *Plant Physiol.* 32, 317-321.

Zarei, M., U. Scheibe, Th. Guðmundsson und K. Stahr, 1995. Mineralneubildungen und Entwicklungen in isländischen Andosolen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 76, 1485-1488.

Þorsteinn Guðmundsson 1998. Næringarefni í jarðvegi- I Binding ferli og forði. *Freyr* 9/98:20-23.

Þorsteinn Guðmundsson, Jóhannes Sigvaldason 2000. Tülkun og hagnýting jarðvegsefnagrein-inga. Ráðunautafundur 2000, 132-137.

Þorsteinn Guðmundsson, Hólmgeir Björnsson og Guðni Þorvaldsson, 2007. Langtímatilraunir í jarðrækt, hlutverk og dæmi um áhrif N-áburðar á auðleyst næringarefni. Fræðaðing landbúnað-arins 4, 287-294 2007.

Þóroddur Sveinsson 1998. Næringarefnabókhald fyrir kúabú. Ráðunautafundur 1998, 124-140.

Þóroddur Sveinsson 2009. Leið til að lækka áburðarkostnað á kúabúum - bætt nýting búfjáráburð-ar. Fræðaðing landbúnarins 6, 234- 242.

Þóroddur Sveinsson og Hafðís Sturlaugsdóttir 2006. Áburðaráhrif mykju og árangur ísáningar með DGI niðurfellingabúnaði. I. Áburðaráhrif. Fræðaðing landbúnaðarins 2006.149-163.

Árskýrslur jarðræktarrannsókna

Skýrslur tilraunastöðanna árin 1947-1961 Útgefandi Tilraunaráð jarðræktar.

Jarðræktarskýrslur Rannsóknastofnunar landbúnaðarins Fjölrít RALA frá 1977-2003 (sum ár undir heitinu Jarðræktarrannsóknir).

Tilraunskýrslur Fjölrít Bændaskólans á Hvanneyri 1977-1990.

Jarðræktarrannsóknir 2004. Rit LbhÍ nr. 6,
Jarðræktarrannsóknir 2005. Rit LbhÍ nr. 11,
Jarðræktarrannsóknir 2006. Rit LbhÍ nr. 12,
Jarðræktarrannsóknir 2007. Rit LbhÍ nr. 18.

Myndaskrá

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. MYND. HLUTFALLSLEG ÞYNGD FRUMEINDA (NR. 1-20) OG SAMEINDA (NR 21-37) Í BÓK DALTONS FRÁ 1808 A NEW SYSTEM OF CHEMICAL PHILOSOPHY. | 19 |
| 2. MYND LOTUKERFI MENDELEEV'S. ÚRDRÁTTUR ÚR FYRSTU GREIN MENDELEEV'S UM LOTUKERFIÐ 1869: UM SAMBAND EIGINLEIKA FRUMEFNANNA VIÐ ATÓMPUNGA (UEBER DIE BEZIEHUNGEN DER EIGENSCHAFTEN ZU DEN ATOMGEWICHTEN DER ELEMENTE. ZEITSCHRIFT FÜR CHEMIE 1869) | 28 |
| 3. MYND. UPPSKERA VIÐ VAXANDI N ÁBURÐ Á MÝRARTÚN (0-100 KG/HA N) OG MÓATÚN (60-240 KG/HA N) Á SÁMSSTÖÐUM. | 64 |
| 4. MYND. UPPSKERA VIÐ VIÐ VAXANDI P-ÁBURÐ Á SANDATÚN Á GEITASANDI Á RANGÁRVÖLLUM OG MÝRARTÚN Á SÁMSSTÖÐUM Í FLJÓTSHLIÐ. | 64 |
| 5. MYND ÁHRIF VAXANDI KALÍÁBURÐAR Á UPPSKERU AF TÚNUM. MYNDIN TIL VINSTRI SÝNIR NIÐURSTÖÐUR AF SANDATÚNINU Á GEITASANDI OG TIL HÆGRI ERU NIÐURSTÖÐUR AF MÝRARTÚNINU Á SÁMSSTÖÐUM. | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| 6. MYND. FYLGN VAXTAR TÓMATAPLANTNA VIÐ KLÓRSTYRK NÆRINGARLAUSNA. RÆTUR ($R^2=0,96$), STÖNGLAR + BLAÐSTILKIR ($R^2=0,93$), OG LAUFBLÖÐ ($R^2=0,98$). BROYER OG FL. 1954. | 94 |
| 7. MYND. ÁHRIF KÓBALTS Á VÖXT BLÁLÚPÍNU (<i>LUPINUS ANGUSTIFOLIUS L.</i>), ÞURREFNI G/PLÖNTU Á TÍMBILINU FRÁ TVEIMUR TIL ELLEFU VIKUM EFTIR SÁNINGU. (A) SMITAD MEÐ RIZOBIUM LUPINI, (B) | |

ÓSMITÆÐ. ○ SMITÆÐ, CO BORIÐ Á, Δ SMITÆÐ ENGINN CO ÁBURÐUR; ● ÓSMITÆÐ, CO BORIÐ Á ▲ ÓSMITÆÐ, ENGINN CO ÁBURÐUR. VAXTARAUKI EFIR KÓBALT ER MARKTÆKUR (P < 0,001), ÁHRIF SMITUNAR OG VIXLVERKUN ERU MARKTÆK (P < 0,05). ROBSON O.FL 1979	104
8. MYND. KOLEFNI OG NÍTUR Í SÝNUM AF ÍSLENSKUM JARÐVEGI Í 25. TAFLA.	119
9. MYND. N Í PLÖNTULEIFUM OG C/N HLUTFALL.	120
10. MYND. ÁHRIF SÁPULEYSANLEGS N (NDS-N, NEUTRAL DETERGENT SOLUBLE N) Í PLÖNTUM Á NÍTURLOSUN ÚR PLÖNTULEIFUM Í JARÐVEGI. LÍNURITIÐ SÝNIR LOSUN EFTIR 42 DAGA OG 80 DAGA VIÐ 15°C (SEM SAMSVARAR 620 OG 1200 DAGGRÁÐUM) SEM FALL AF LEYSANLEGU N.	124
11. MYND. ÁHRIF HEILDAR N Í PLÖNTUM Á NÍTURLOSUN ÚR PLÖNTULEIFUM Í JARÐVEGI.	124
12. MYND. DÆMI UM TÍMAFERLI NÍTURLOSUNAR ÚR PLÖNTUM 1.	126
13. MYND. TÍMAFERLI NETTÓ LOSUNAR OG BINDINGAR NÍTURS ÚR PLÖNTUM Í JARÐVEG .	127
14. MYND. HOLOSELLULÓSI (SELLULÓSI + HEMISELLULÓSI) OG KOLEFNISLOSUN ÚR PLÖNTULEIFUM, MÆLD GILDI OG AÐHVARFSLÍNUR. FJÖLDI PLÖNTUSÝNA VAR AÐ MEÐALTALI 73 OG ENDURTEKNNGAR 3.	131
15. MYND. MÆLINGAR Á LOSUN N Í JARÐVEGI. LAUST N ER AMMMÓNÍUM- OG NÍTRAT-N MÆLT Í 0-20 SM DÝPT. KORNRÆKT Á MÓAJÖRÐ Á KORPU 2003.	135
16. MYND. NÍTURBINDING OG LOSUN Í JARÐVEGSKJÖRNUM. LAUST N Í LOK LOSUNARTÍMA AÐ FRÁDREGNU LAUSU N Í BYRJUN HVERS TVEGGJA VIKNA LOSUNARTÍMABILS. KORNAKUR Á MÓAJÖRÐ. KORPA 2003	136
17. MYND. UPPSÖFNUM NÍTURLOSUN Í JARÐVEGSKJÖRNUM Á STAÐNUM FRÁ 7.EÐA 21, JÚLÍ TIL 29. SEPTEMBER. LOSUNIN BYRJAR FYRR ÞAR SEM VETRARÝGRESI VAR MEÐ BYGGINU	138
18. MYND. NETTÓLOSUN N Í JARÐVEGI ÁTTA TILRAUNREITA Á MÓAJÖRÐ. BYGGAKUR Á KORPU 2003.	139
19. MYND. NÍTURNÁM ÚR LOFTI Í FÓÐURLÚPÍNU OG ÚRKOMA Á VAXTARTÍMA SJÁ NÁNAR Í 45ERROR! REFERENCE SOURCE NOT FOUND.. TÖFLU	147
20. MYND. ÁHRIF SMITUNAR, N-ÁBURÐAR OG SAMBÝLISPLANTNA Á NÍTURNÁM FÓÐURLÚPÍNU, 1984.	149
21. MYND. ÁHRIF MISMUNANDI STOFNA AF NÍTURNÁMSBAKTERÍUM Á NÍTURNÁM ÚR LOFTI Í RAUÐSMÁRA 1998 FIN: STOFN PL FINLANDI, NOR: STOFN M NOREGI OG ÍSL ER STOFN NR. 3 FRÁ ÍSLANDI. .	151
22. MYND. UPPSKERA AF RAUÐSMÁRA OG VALLARFOXGRASI Í HREINRÆKT OG BLÖNDU Í TVEIMUR SLÁTTUM, ÞURREFNI HKG/HA. KORPA 1997	152
23. MYND NÍTURNÁM RAUÐSMÁRA Í ÖÐRUM SLÆTTI Á SÁNINGARÁRI	153
24. MYND. NÍTURNÁM HVÍTSMÁRA Á SÁNINGARÁRI, KORPA 1986.	153
25. MYND. UPPSKERA TÚNVINGULS OG BLÖNDU AF HVÍTSMÁRA OG TÚNVINGLI Í GUNNARSHOLTI 1991-1994. EKKI VAR BORIÐ Á ÞESSI ÁR.	155
26. MYND. ÁÆTLAÐ NÍTURNÁM ÚR LOFTI Í ALASKA LÚPÍNU Á 7 ÁRA TÍMABILI LANDGRÆÐSLU Á GEITASANDI BYGGT Á MÆLINGUM 2, 5 OG 7 ÁRUM EFTIR SÁNINGU	157
27. MYND. FLUTNINGUR N FRÁ LÚPÍNU TIL VETRARRÝGRESIS. ENGINN FLUTNINGUR MÆLDIST TIL SUMARRÝGRESIS OG SUMARHAFRA 1984.	158
28. MYND. ÁHRIF BELGJURTAR Á NÍTURUPPTÖKU SAMBÝLISPLANTNA. TILRAUN Á KORPU 1984.	160
29. MYND. NÍTURNÁM ÚR LOFTI Í ELRIPLÖNTUM.	165
30. MYND. NÍTURNÁM ÚR LOFTI Í LERKIPLÖNTUM Í UPPELDI.	166
31. MYND. ÁHRIF FOSFÓRÁBURÐAR Á HEYFENG Í TILRAUN 9-50 Á SÁMSTÖÐUM. GRUNNÁBURÐUR 70 N OG 75 K. UPPSKERA 1950 TIL1969 LEIÐRÉTT VEGNA BREYTINGA Á ÞURRKUN SÝNA ÁRIÐ 1967. MYNDIN SÝNIR AÐHVARFSLÍNUR FYRIR 2. GRÁÐU LÍKINGAR. BYGGT Á GÖGNUM ÚR GREIN HÓLMGEIRS BJÖRNSSONAR O.FL. 2007.	171
32. MYND. UPPSKERA VIÐ VAXANDI SKAMMTA AF FOSFÓRÁBURÐI Á Í TILRAUNUM 1985-1988 Á FIMM BÆJUM Í HÖRÐUDAL, MIÐDÖLUM OG HAUKADAL. RÍKHARÐ BRYNJÓLFSSON 1990.	173
33. MYND. UPPSKERA VIÐ VAXANDI SKAMMTA AF KALÍÁBURÐI Á Í TILRAUNUM 1985-1988 Á FIMM BÆJUM Í HÖRÐUDAL, MIÐDÖLUM OG HAUKADAL. RÍKHARÐ BRYNJÓLFSSON 1990.	176
34. MYND. SÝRUSTIG Í JARÐVEGI OG MANGAN Í GRASI. TILRAUN 20-56 REYKHÓLUM, MÆLINGAR 1965, 1968 OG 1970.	181
35. MYND. UPPSKERAUKI FYRIR N Í KJARNA OG KALKSALTPÉTRI (75 N OG 120 N) UMFRAM 0 N KG HA ⁻¹ . ÞRIÐJU GRÁÐU FJÖLLIÐA AÐHVARFSLÍNA BYGGÐ Á ÞRIGGJA ÁRA SAMFELLDUM MEÐALTÖLUM. UNNIÐ ÚR GÖGNUM Á MYND 2 BLS. Í GREIN HÓLMGEIRS BJÖRNSSONAR 2003.	192
36. MYND. NÍTURJÖFNUMUR JARÐVEGS Á ÖLLU RÆKTUÐU LAND ÁRIN 1985-2005. ÚR GÖGNUM SEM TEKIN VORU SAMAN FYRIR EFNAHAGSSTOFNUN EVRÓPU OECD.	198
37. MYND. RÆKTUNARJÖFNUMUR N, P OG K SEM FALL AF ÁBORNUM NÆRINGAREFNUM Á 12 KÚABÚUM Í EYJAFIRÐI. TÖLUR INNAN SVIGA ERU STAÐALSKEKKJUR HALLASTUÐLA OG SKURÐPUNKTA. ÞÓRODDUR SVEINSSON 1998	201

2. Kvarðar fyrir vatnspennu í jarðvegi

2. tafla

		Vatnssúla cm	pF	kPa	Loftþyngdir atm.
Mettaður jarðvegur		1	0,00	0,1	0,001
Blautur		5	0,70	0,5	0,005
“		10	1,00	1	0,01
Rakur	Auðnýtt vatn	100	2,00	10	0,1
“	“	150	2,18	15	0,15
“	“	200	2,30	20	0,2
“	“	300	2,48	30	0,3
Þurr		500	2,70	50	0,5
“		800	2,90	80	0,8
“		1000	3,00	100	1
Visnunarmörk		15.000	4,18	-1500	-14,9
Loftþurr jarðvegur		220.000	5,34	-2200	-218

Vatnsrýmd (e. field capacity): vatnsmagn í jarðvegi við 10-30 kPa

3. Kolefni og nítur í lífrænum efnum plöntuleifa (van Soest flokkun)

Úr norrænu samstarfsverkefni, Stenberg o.fl. 2004, Jensen o.fl. 2005, Bruun o.fl.2005, Salo o.fl. 2006, Henriksen o.fl 2007

3 tafla. Kolefnis- og nítursambönd flokkuð í sápuleysanleg (NDS) sambönd og trénisflokka.

Plöntusýni	Upprunaland - ábórið N kg/ha	Kolefnissambönd C mg g ⁻¹ þurrefni				Nítursambönd N mg g ⁻¹ þurrefni			
		NDS	HEMI	CELL	LIGN	NDS	HEMI	CELL	LIGN
Bygg, græn blöð	DK – 0	106,4	140,6	151,6	14,9	14,79	2,45	0,31	0,44
Bygg, hismi	DK – 0	306,9	84,3	31,9	1,6	11,88	1,11	0,07	0,02
Bygghálmur	SE-120	72,7	162,7	194,3	19,8	3,45	0,70	0,46	0,28
Bygghálmur	DK – 100	74,8	154,6	207,9	35,2	1,91	0,29	0,32	0,41
Bygghálmur, Súla	IS – 90	125,8	123,8	159,5	20,7	4,58	0,87	0,23	0,22
Hafrar, yrki Sanna	IS – 90	210,3	105,5	122,9	10,3	5,66	0,49	0,12	0,08
Vetrarrúgur	DK – 0	240,0	83,8	98,1	11,1	46,05	5,65	1,49	0,62
Vallarsveif, sina	IS - 0	132,9	144,3	137,1	11,5	9,63	1,73	0,23	0,19
Túnvingull, sina	IS – 0	106,7	145,0	157,8	22,9	8,47	1,16	0,26	0,29
Háliðagras, sina	IS – 0	125,8	142,4	143,7	11,2	6,08	1,69	0,28	0,27
Axhnoðapunktur, græn strá	SE – 80	147,2	131,6	144,7	10,9	6,29	1,24	0,15	0,07
Axhnoðap., gras	FIN -100	177,9	114,6	133,8	7,5	18,30	4,13	0,44	0,27
Sumarrýgresi, gras	IS -100	192,4	98,7	119,9	9,2	11,87	1,51	0,15	0,10
Sumarrýgresi, gras	FIN – 100	173,5	113,2	142,9	14,2	8,72	0,86	0,28	0,21
Rauðsmári blöð og stönglar	IS – 0	263,9	31,4	122,4	29,7	15,63	0,43	0,86	0,64
Rauðsmári, græn blöð	SE – 0	324,9	42,5	70,0	11,7	32,82	5,73	1,35	0,78
Rauðsmári, grænir stönglar	SE – 0	203,4	45,4	159,1	34,4	12,76	0,46	0,79	0,70
Hvítsmári, ofanjarðarhluti	NO – 0	334,0	23,9	67,9	24,5	34,63	5,01	4,75	0,46
Gul lúpina, græn blöð	NO – 0	280,7	60,4	89,8	14,4	35,53	1,70	1,13	0,64
Gul lúpina stönglar	NO – 0	186,3	38,0	179,3	38,7	11,81	0,38	0,90	0,60
Alaska lúpina blöð og stönglar	IS- 0	242,6	47,1	134,4	30,0	16,17	1,10	1,32	1,06
Repja, stönglar	DK – 15	123,5	76,4	219,7	47,5	8,20	0,05	0,80	0,75
Repja, grænir stönglar	DK – 0	107,1	76,2	221,9	52,4	2,33	0,56	0,28	0,43
Repja, grænir stönglar	DK – 0	277,2	9,3	98,8	3,8	35,16	1,69	1,30	0,13
Gulrófnatoppur	S – 0	147,8	61,0	189,5	43,5	10,25	0,04	0,82	0,61
Fóðurnæpa, stönglar	FIN – 90	89,4	75,1	214,0	75,0	8,38	0,18	1,12	0,87
Fóðurnæpa, blöð	FIN – 90	325,7	38,4	40,4	3,7	53,45	4,64	0,83	0,21

4. Heildar C og N og C/N hlutfall í plöntusýnum.

4. tafla.

Plöntusýni	Upprunaland sýnis	Ábórið N kg/ha	Heildar N N mg g ⁻¹ þurrefni	Total C C mg g ⁻¹ þurrefni	C/N
Bygg græn blöð	DK	0	18,0	413,4	23,0
Bygg hismi	DK	0	13,1	424,8	32,5
Bygghálmur	SE	120	4,9	449,5	92,0
Bygghálmur	DK	100	2,9	472,5	160,9
Bygghálmur Súla	IS	90	5,9	429,9	73,0
Hafrar, yrki Sanna	IS	90	6,4	449,1	70,7
Vetrarrúgur	DK	0	53,8	433,1	8,0
Vallarsveif Lavang, sina	IS	0	11,8	425,9	36,1
Túnvingull sina	IS	0	10,2	432,4	42,5
Háliðagras sina	IS	0	8,3	423,0	50,9
Axhnoðapuntur græn strá	SE	80	7,8	434,4	56,1
Axhnoðapuntur gras	FIN	100	23,2	433,8	18,7
Sumarrýgresi gras	IS	100	13,6	420,3	30,8
Sumarrýgresi gras	FIN	100	10,1	443,7	44,1
Rauðsmári blöð og stönglar	IS	0	17,6	447,4	25,5
Rauðsmari græn blöð	SE	0	40,7	449,1	11,0
Rauðsmari grænir stönglar	SE	00	14,7	442,3	30,1
Hvítsmári ofanjarðarhluti	NO	0	44,9	450,4	10,0
Gul lúpina græn blöð	NO	0	39,0	445,2	11,4
Gul lúpina stönglar	NO	0	13,7	442,3	32,3
Alaska lúpina blöð og stönglar	IS	0	19,7	454,1	23,1
Repja stönglar	DK	15	9,8	467,1	47,7
Repja grænir stönglar	DK	0	3,6	457,6	127,2
Repja grænir stönglar	DK	0	38,3	389,2	10,2
Gulrófnatoppur	S	0	11,7	441,8	37,7
Fóðurnæpa stönglar	FIN	0	10,6	453,7	43,0
Fóðurnæpa blöð	FIN	0	59,1	408,2	6,9

5. Aðferðir við mælingar á níturlosun

Aðferðir notaðar við mælingar á níturlosun í jarðvegi á staðnum og í rannsóknastofu .

Texti að mestu úr greininni **Nitrogen mineralization in situ and in laboratory in Icelandic Andosol, Icel.Agric. Sci. 19, 2006, bls. 3-13 .**

For determination of bulk density soil was sampled from 0-20 cm soil depth. C, N and water holding capacity at 10 kPa, in soil fraction < 2 mm particle size, was determined on samples taken for incubation in the laboratory. The in situ method (Raison et al. 1987, Deboasz 1994, Subler et al. 1995) was used to estimate net N mineralization in the field. Steel cylinders 30 cm high and 4.3 cm in inner diameter were used for incubation in situ. Holes were drilled in the sides of the cylinders to ensure hydraulic continuity as suggested by Subler et al. 1995. The holes were 3 mm in diameter in four vertical rows, five holes in each row in 4-16 cm soil depth. Incubations periods in situ were 2 and 4 weeks starting on May the 13th for the purpose of testing the influence of sampling frequency on the estimate of net mineralization.

The cylinders were inserted in soil to 20 cm depth and covered with U-tubes excluding leaching by rainfall. One cylinder was inserted in each plot of the two treatment, a total of eight plots in the beginning of each period. Soil samples consisting of four cores 3 cm in diameter were taken down to 20 cm in 15 -20 cm distance around each cylinder at the beginning of each incubation for determination of initial inorganic N (N_{min}) in the incubation periods.

The soil samples from incubations in situ were kept at low temperatures, 2-4°C during the time from sampling to extraction, approximately 24 hours, sieved (2 mm mesh). The two soil fractions from the sieving were weighted for bulk density determinations. Approx. 33 g fresh soil from the < 2 mm fraction was weighted exactly (± 0.01 g) and extracted with 100 ml 1 M KCl corresponding to a dry soil:extract ratio 1:4. Subsamples were taken for dry matter determination.

Soil samples for incubation at controlled temperature and water potential were taken in four replicated plots in each treatment of the experiment at the same time as incubation in situ started. Soil sampling depth was 0-20 cm. The samples were frozen at -18°C on the day of sampling, taken from the freezer 153 days after sampling, thawed overnight and 1-2 kg of soil from each plot placed in the incubator at 15°C on next day after thawing overnight. Dry matter in the soil portions and water content at -10 kPa was then measured on sub samples, (table 1). Seven days after thawing the soil portions from each plot were watered to the water content at -10kPa (table 1), placed again in the incubator at 15°C and further preincubated for 22 days until approximately 50 g soil was weighted exactly (0.01g) in 120 ml plastic beakers on the two first days of incubation, samples taken for ammonium and nitrate analysis weighted on first day. The samples were sieved through a 2 mm sieve before weighing.

Soil corresponding to 12,5 g DM was weighted for extraction of ammonium and nitrate with 50 ml 1 M KCl for 1 hour in rotating extractor. A subsample was taken for dry matter determination. Ammonium was distilled from the extract after addition of magnesiumoxide into 2% boric acid. Dewarda mixture was added and nitrate reduced to ammonium (Keeney and Nelson, 1982) and distilled over in a another portion of 2% boric acid. The boric acid neutralized by the ammoniak in the two samples is titrated back by use of 0,005 N HCl. Automatic tiration was used.

6. Aðferðir við útreikninga á níturlosun í jarðvegi.

Calculations and statistics

Texti úr greininni **Nitrogen mineralization in situ and in laboratory in Icelandis Andosol, Icel.Agric. Sci. 19,2006 bls.3-13**

Net mineralization in incubated soil in situ was calculated by subtracting inorganic N in samples of undisturbed soil ($N_{min,u}$) taken at the beginning of each incubation period from inorganic N in soil cores after two and four weeks incubation (Equation 1). The difference in inorganic N in samples from undisturbed soil sampled outside the cores at the end and beginning of the same interval represent net mineralization less uptake and losses from soil (Equation 2).

The sum of uptake and losses may be calculated as follows, if no uptake and losses occur in the incubation and net mineralization in the incubated soil cores is of the same magnitude as in intact soil:

Examples of calculations for the first incubation period:

Net mineralization in the period from day 1 to 14:

$$\text{inorg. } N_{\text{soil core, day 14}} - \text{inorg. } N_{\text{undisturbed soil, day 1}} = \text{net mineralization } N_{\text{day 1-14}} \quad \text{Equation 5.}$$

Net mineralization exceeding N uptake in plants and N losses from soil:

$$\text{inorg. } N_{\text{undisturbed soil, day 14}} - \text{inorg. } N_{\text{undisturbed soil, day 1}} = (\text{net mineralization } N - N_{\text{uptake}} - N_{\text{loss}})_{\text{day 1-14}} \quad \text{Equation 6.}$$

If nitrogen net mineralization in soil cores equals net mineralization in undisturbed soil outside the cores then plant uptake of nitrogen and N losses from soil in the period from day 1 to day 14 can be calculated as:

$$\text{inorg. } N_{\text{soil core, day 14}} - \text{inorg. } N_{\text{undisturbed soil, day 14}} = (N_{\text{uptake}} + N_{\text{loss}})_{\text{day 1-14}} \quad \text{Equation 7 = Eq.(1)}$$

– Eq.(2)

Explanations:

$\text{inorg. } N_{\text{undisturbed soil}}$: inorganic N in soil sampled outside the cores

N_{uptake} : nitrogen uptake by plants

N_{loss} : losses of N from soil (leaching, denitrification)

Net mineralization in the laboratory is nitrogen accumulated from the start to each sampling date.

The Arrhenius equation was used to convert net mineralization measured in incubation at 15°C in each incubation period to the actual temperatures in the field:

$$\ln k_i = \ln k_{\text{ref}} - (E_a/R)(1/T_i - 1/T_{\text{ref}}) \quad \text{(Equation 8)}$$

where k_i is the rate of net mineralization at the mean temperature measured in the field in incubation period i , k_{ref} is the rate in comparable period in laboratory incubation, T_{ref} the

reference temperature is 288°K (15°C). the gas constant R is known and Ea the activation energy can be calculated for a given Q₁₀ value.

The functions used for temperature corrections are as follows:

Net mineralization calculated for each period of incubation:

$$\text{LN(Net Nmin at } x^{\circ}\text{C)} = \text{LN(NetminN at } 15^{\circ}\text{C \& } 10\text{kPa)} - (\text{Ea/R}) * [1/(273+x^{\circ}\text{C}_{\text{field}}) - 1/(273+15)]$$

Equation 9

Net immobilization calculated for each period of incubation:

$$\text{LN(Net Nmin at } x^{\circ}\text{C)} = \text{LN(-NetminN at } 15^{\circ}\text{C } 10\text{kPa)} - (\text{Ea/R}) * [1/(273+x^{\circ}\text{C}_{\text{field}}) - 1/(273+15)]$$

Equation 10

The adjustment to field conditions is made by use of the Arrhenius equation and Q₁₀ and a net mineralization proportional to the ratio of water content in soil relative to water content at 10 kPa. The value of Q₁₀ = 2 used with reference to the results of Stanford et al (1973) is Ea= 46172.1Joule*mole⁻¹

Adjustment for water content in soil in each period was relative to water content in field samples as percentage of water content at field capacity (-10 kPa): Net mineralization * water content in field/water content at field capacity, Stanford & Epstein 1974, Paul et al. 2003.

The one pool exponential equation:

$$y = Y_{\text{max}} * (1 - \exp(-k * x))$$

Equation 11

where y is the net mineralization, negative values stand for immobilization, Y_{max} is asymptotic maximum or potential net mineralization, which equals the pool available for mineralization at the start of incubation, k is the rate constant and x is the time from start in days.

7. Niðurbrot kolefnisforða plöntuleifa

Niðurbrotið er hér metið með stuðlum í aðhvarfslíkingum. Stuðlarnir jafngilda hámarki kolefnislosunar, Y_{max} í veldisvísilíkingu, B_{max} í hyperbólu. Samanburður er gerður á einþættum og tvíþættum aðhvarfslíngalíkingum.

Í einþættri líkingu fyrir kolefnislosun er gert ráð fyrir að losanlegur forði kolefnis í jarðvegi sé einsleitur og hraðastuðull losunar (k) sé sá sami í öllu ferlinu. Í tvíþættri líkingu er forðinn samsettur af tveimur hlutum með mismunandi stuðla fyrir losunarhraða. Hámarkslosun (Y_{max}) má líta á sem nýtanlegan hluta heildarforða C í plöntum við gefnar aðstæður (hitastig og vatn í jarðvegi). Nýtanlegur forði er þá sá hluti forðans sem örverur geta brotið niður á mælingatímanum.

Kolefnislosun úr vallarfoxgrasi.

Mælingar á samburðarsýni í 10 mæliröðum að meðaltali í 217 daga hver við 15°C og vatnsspennu í jarðvegi 10 kPa (incubation). Gögn úr norrrænu samstarfsverkefni. Mælingar í fimm rannsóknastofum, tvær mæliraðir í hverri.

Aðhvörf fyrir fjórar líkingar voru reiknuð (Graph Pad forrit) og þær bornar saman. Líkingarnar eru einþætta og tvíþætta veldisvísilíkingar og hyperbólu líkingar. Skyldar líkingar voru bornar saman með F-prófi og af veldisvísilíkingunum var tvíþætta veldisvísilíking talin betri en einþætta og einþætta hyperbóla betri en tvíþætta. Fyrir óskyldar líkingar dugir F-próf ekki, en þær eru bornar saman með viðmiðun Akaike (Akaike's Information Criterion, AICc). Samkvæmt þeim samanburði var tvíþætta veldisvísilíking betri en einþætta hyperbóla.

Samanburður skyldra (e. nested) aðhvarfslíkinga

5. tafla. Einþætt og tvíþætt hyperbola. Niðurstöður úr samanburði með Graph Pad forriti:

Data	
Number of X values	99
Number of Y replicates	3
Total number of values	297
Number of missing values	0

Einþætt hyperbola: $Y=B_{\max} \cdot X/(th+X)$

Tvíþætt hyperbola: $Y=B_{\max 1} \cdot x / (th_1+X) + B_{\max 2} \cdot x / (th_2+X)$

B_{max} er hámarkslosun kolefnis kolefnis og th er helmingatími kolefnisforðans B_{max}

	Timothy - % of total C
Comparison of Fits	
Null hypothesis	One site binding (hyperbola)
Alternative hypothesis	Two site binding (hyperbola)
P value	Not Necessary
Conclusion (alpha = 0.05)	Simpler model fits better
Preferred model	One site binding (hyperbola)
F (DFn, DFd)	

Bestu stuðlar í aðhvarfi (best fit values of parameters)	Einþætt	Tvíþætt	
		Forði 1	Forði 2
Stuðlar (parameters)			
B _{max} : Hámarkslosun C (% af heildar C)	40,32	35,83	4,48
th: Helmingatími C forða	5,86	5,85	5,90
Staðalskekkingja (standard error)			
B _{max} : Hámarkslosun C (% af heildar C)	0,5212	4,74E+06	4,74E+06
th: Helmingatími N forða	0,3139	10524	86601
Vikmörk (95% Confidence Intervals)			
B _{max}	39.29 to 41.34	0.0 to 9.3e+006	0.0 to 9.3e+006
Th	5.24 to 6.47	0.0 to 21	0.0 to 17
Aðhvarf metið. (Goodness of Fit)			
Degrees of Freedom	295	293	
R ²	0,8362	0,8362	
Kvaðratsumma	4958	4958	
Sy.x	4,10	4,11	

Frávik (lóðrétt) frá aðhvarfslínu (Sy.x) eru 4,1 kg/ha C eins fyrir einþætta og tvíþætta líkingu. Báðar líkingarnar skýra 84% af breytileika mælinga ($R^2= 0,84$), tafla. Hins vegar er óvissa miklu meiri (víðari vikmörk) á föstum mestu kolefnislosunar í tvíþættu líkingunum (kolefnisforða 1 og 2) og hraðaföstunum (k1 og k2) í tvíþættu líkingunni.

Einþætta líkingin er talin betri en sú tvíþætta.

Einþætt og tvíþætt veldisvísislíking (exponential equation)

Einþætt líking: $Y = Y_{\max} \cdot (1 - \exp(-k \cdot x))$

Tvíþætt líking: $Y = Y_{\max 1} \cdot (1 - \exp(-k_1 \cdot x)) + Y_{\max 2} \cdot (1 - \exp(-k_2 \cdot x))$

Y_{\max} er hámarks losun kolefnis, % af heildar C í vallarfoxgrasi

k er hraðafasti, x eru dagar frá byrjun losunartíma

Timothy - Y = % of total C	
Comparison of Fits	
Null hypothesis	One phase exponential association
Alternative hypothesis	Two phase exponential association
P value	$P < 0.0001$
Conclusion (alpha = 0.05)	Reject null hypothesis
Preferred model	Two phase exponential association
F (DFn, DFd)	32.23 (2,293)

Bestu stuðlar í aðhvarfi (best fit values of parameters)	Einþætt	Tvíþætt aðhvarfslíking	
		Forði 1	Forði 2
Stuðlar (parameters)			
Y_{\max} : Hámarkslosun C (% af heildar C)	35,8	41,8	31,7
k hraðafasti	0,1342	0,00148	0,1683
Helmingatími losunar dagar	5,2	468	4,1
Staðalskekkja (standard error)			
Y_{\max} : Hámarkslosun C (% af heildar C)	0,4	97,4	1,0
k hraðafasti	0,0054	0,00442	0,0106
Vikmörk (95% Confidence Intervals)			
Y_{\max}	35.0 to 36.5	-149 to 233	29.7 to 33.7
K	0.124 to 0.145	0.0 to 0.01014	0.148 to 0.189
Helmingatími losunar dagar	4.8 to 5.6		3.7 to 4.7
Aðhvarf metið. (Goodness of Fit)			
Degrees of Freedom	295	293	
R^2	0,82	0,85	
Kvaðratsumma	5557	4555	
$S_{y,x}$	4,34	3,94	

Tvíþætt veldisvísislíking er metin betri valkostur en einþætt: skýrir meira af breytileikanum (85%, $R^2 = 0,85$) og frávik mælinga frá aðhvarfslínu ($S_{y,x}$) er minna 3.94 % af heildar C í vallarfoxgrasinu.

Hvort sem hyperbóla er notuð eða veldisvísislíking (exponential) reynist skekkja hámarkslosunar (forða), hraðafasta (k í veldisvísislíkingu) og helmingatíma (th í hyperbólu) miklu minni fyrir einþætta líkingu en tvíþætta.

Samanburður óskyldra (e. nonnested) líkinga.

Þá er eftir að bera saman aðhvörf einþættrar hyperbólú og tvíþættrar veldisvísislíkingu að ferli kolefnislounar með tímanum. Þessar líkingar voru valdar í samanburðinum hér á undan við skyldar líkingar annars vegar við tvíþætta hyperbólú og hins vegar við einsþætta veldisvísislíkingu.

Akaike prófi	Timothy - % of total C
Comparison of Fits	
Simpler model	One site binding (hyperbola)
Probability it is correct	<0.01%
Alternative model	Two phase exponential association
Probability it is correct	>99.99%
Ratio of probabilities	
Preferred model	Two phase exponential association
Difference in AICc	21,07

Bestu stuðlar í aðhvarfi	Einþætt hyperbólú	Tvíþætt veldisvísislíking	
		Forði A	Forði B
Stuðlar (parameters)			
Ymax: Hámarkslosun C kg/ha	40,3	41,8	31,7
k hraðafasti		0,00148	0,1683
Helmingatími losunar dagar	5,9	468	4,1
Staðalskekkja (standard error)			
Ymax: Hámarkslosun C kg/ha	0,5	97,4	1,02
k hraðafasti		0,00442	0,0106
Helmingatími losunar dagar	0,3		
Vikmörk (95% Confidence Intervals)			
Ymax	39.29 to 41.34	-149.0 to 232.7	29.68 to 33.67
K		0.0 to 0.01014	0.1477 to 0.1890
Helmingatími losunar dagar	5.24to 6.5		
Aðhvarf metið. (Goodness of Fit)			
Degrees of Freedom	295		293
R ²	0,836		0,850
Kvaðratsumma	4958		4555
Sy.x	4,1		3,9

Aðhvarf tvíþættrar veldisvísislíkingar skýrir 85 % ($R^2 = 0,85$) af breytileika mælinga og frávik frá aðhvarfslínu er 3,9 % af heildar C í vallarfoxgrasinu sem er lítið eitt betra en samsvarandi gildi einþættrar hyperbólú.

Þegar spurt er hvort nota megi stuðla líkinganna Ymax og Bmax til þess að meta mestu kolefnislosun, þá skiptir máli hve mikil frávik eru á meðaltölum þeirra (e. precision) og hve nálægt raungildi hámarkslosunar eru stuðlarnir (e. accuracy). Með öðrum orðum að niðurstaðan gefi rétta mynd af mestu losun kolefnis með viðunandi nákvæmni.

Jafnframt verður að hafa í huga að stuðlar hámarkslosunar í líkingunum eru fengnir með framlengingu aðhvarfslínu út fyrir mælingar og er því hætt við að hámarkið sé ofmetið og því skemur sem mælingar á losun hafa staðið þeim mun fremur er hætt við ofmati.

Niðurstaðan er að tvíþætt veldisvísilíking sé að besti kosturinn til að meta ferli kolefnislosunar á mælingatímanum fyrir vallarfoxgrasið í þeim mælingum sem gerðar voru í 10 mælingaröðum á 5 rannsóknastofum. Erfiðara er hins vegar að meta hvort stuðlarnir Y_{max} og B_{max} í líkingunum gefi viðunandi mat af hámarkslosun, þó svo að nákvæmnin (staðalfrávik og vikið) sé þekkt.

Hvorugt matið á heildarlosun kolefnis er hægt að útloka, þótt mismunurinn sé mikill eins of ráða má af af töflunum hér fyrir neðan, þar sem gert er ráð fyrir að uppskera af vallarfoxgrasinu hafi verið á bilinu 30 til 70 hkg/ha af þurrefni.

Einþætt hyperbóla	Tvíþætt veldisvísilíking		
	Forði A	Forði B	Alls A+B
40,3	41,8	31,7	73,5

Uppskera	C í vallarfoxgrasi			
Þurrefni	Kolefni í vallarfoxgrasi		Hámarkslosun C kg/ha	
			40,3	73,5
hkg ha ⁻¹	% í þurrefni	kg/ha	% af N í uppskeru	
30	45,2	1356	3,0	5,4
40		1808	2,2	4,1
50		2260	1,8	3,3
60		2712	1,5	2,7
70		3164	1,3	2,3

Ljóst er þó að mæld kolefnislosun er lítil hluti af heildar kolefni í vallarfoxgrasinu, 1 til 5% af heildar C, hvor aðhvarfslíkingin sem valin er.