

Langtímaáhrif nituráburðar á kolefni, nitur og auðleyst næringarefni í snauðri sandjörð

Þorsteinn Guðmundsson*, Hólmgeir Björnsson og Guðni Þorvaldsson
Landbúnaðarháskóla Íslands

Ágrip

Áhrif N-áburðar á áður ógróna sandjörð í langtímatilraun á Geitasandi voru rannsökuð eftir 50 ára tilraunatímabil. Tilraunaliðir voru árlega 50, 100, 150 og 200 kg N ha⁻¹ auk 53 kg P og 100 kg K ha⁻¹ á alla liði. Jarðvegssýni voru tekin úr 0-5, 5-10 og 10-20 cm dýptum. Rúmpyngd, pH og heildarmagn C og N voru mæld, og auðleyst Ca, Mg, K, Na og P voru greind í ammóníumlaktatskoli (AL-skol). Á tilraunatímabilinu myndaðist um 10 cm þykk rótar-og trefjamotta ofan á sandinum. Að meðaltali söfnuðust 424 til 597 kg C ha⁻¹ og 24 til 46 kg N ha⁻¹ á ári. Fyrir hvert kíló af ábornu N safnaðist 1,05 kg af C og 0,15 kg af N ha⁻¹ að meðaltali á ári í jarðveginn. Sýrustig lækkaði með vaxandi N-áburði. Heildarmagn auðleystra næringarefna í ammóníumlaktatskoli minnkaði í efstu 10 cm jarðvegsins með auknum N-áburði frá 50 í 200 kg N ha⁻¹; Ca lækkaði úr 625 í 198 kg ha⁻¹, Mg úr 139 í 55 kg ha⁻¹, K úr 240 í 105 kg ha⁻¹, Na úr 54 í 28 kg ha⁻¹ og P úr 365 í 308 kg ha⁻¹. Meirihluti áborinna næringarefna hafði verið fjarlægður með uppskeru eða var í efstu 10 cm jarðvegsins.

Efnisorð: Söfnun á C og N, langtímatilraunir, nýtanleg næringarefni, snauð sandjörð

Abstract

Long-term effects of nitrogen fertiliser on carbon, nitrogen and available nutrients in marginal sandy soils.

The influence of N fertilisers on previously barren sandy soils in Geitasandur was investigated after 50 years of fertilisation. The treatments were 50, 100, 150 and 200 kg N and 53 kg P and 100 kg K ha⁻¹ on all treatments annually. Soil samples were collected from 0-5, 5-10 and 10-20 cm depths, bulk density, pH, total C and N and ammonium lactate (AL-extraction) extractable Ca, Mg, K, Na and P were determined. About 10 cm thick fibrous root mat had developed in the fertilised experimental area. The total yearly increase in C and N was 424 to 597 and 24 to 46 kg ha⁻¹ respectively. For each kg of applied N 1.05 kg C and 0.15 kg N ha⁻¹ accumulated in the soil annually. The pH decreased with increasing N application. Soluble nutrients decreased with increasing N fertilisers. Total contents of nutrients extracted in ammonium lactate decreased in the top 10 cm of the soils with increasing N application from 50 to 200 kg N ha⁻¹; Ca from 625 to 198 kg ha⁻¹, Mg from 139 to 55 kg ha⁻¹, K from 240 to 105 kg ha⁻¹, Na from 54 to 28 kg ha⁻¹ and P from 365 to 308 kg ha⁻¹. Most of the applied nutrients can be accounted for in the harvest and in the soil.

Keywords: C and N accumulation, long-term experiment, available nutrients, Vitric Andosol.

*thorsteinng@lbhi.is

Inngangur

Sáning og árleg notkun tilbúins áburðar á ógróið land hefur margskonar áhrif. Samfelld gróðurþekja verður til og lífræn rótar- og trefjamotta myndast á yfirborði (Guðni Þorvaldsson 1975, Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2011). Á uppgæðslusvæðum með minni áburðargjöf myndast ekki alltaf samfelld gróðurþekja en tilbúinn áburður leiðir til þess að lífræn efni safnast fyrir í efstu lögum jarðvegsins (Arnalds o.fl. 2000, Arnalds o.fl. 2013). Hinsvegar getur dregið úr söfnun kolefnis og hún jafnvel hætt þegar áburðargjöf er hætt. Þar sem lúpinu var sáð og hún hafði náð sér á strik hélt söfnun kolefnis þó áfram (Tanner o.fl. 2015). Samhliða söfnun á kolefni safnast áfok í svörðinn. Áætlað hefur verið að >2500 kg ha⁻¹ safnist fyrir árlega (Arnalds 2010) á þeim hluta Suðurlands sem Geitasandur er á, og Arnalds o.fl. (2014) meta að ákoman sé 5000 kg ha⁻¹ að meðaltali á þessu svæði. Ofar á Geitasandi reyndist ákoma fokafna vera 1200 - 6700 kg ha⁻¹ (Arnalds o.fl. 2012). Hversu mikið áfok hefur borist í þá tilraun sem hér er fjallað um er ekki vitað.

Auk áhrifa á lífræn efni í jarðvegi hefur áburðargjöf að jafnaði margvísleg áhrif á önnur næringarefni. Fosfór er oft borinn á umfram upptöku og safnast því fyrir. Á hinn bóginn gengur á önnur næringarefni nema nægilega sé borið á af þeim (Belay o.fl. 2002, Guðmundsson o.fl. 2005, Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2006, 2007, Riley 2007, Lucas o.fl. 2011). Þessar rannsóknir sýndu að með vaxandi N-áburði lækkar pH, og auðleyst Mg getur lækkað það mikið að það nálgist skortsmörk.

Á Geitasandi (N 63° 47' 19,5" V 20° 17' 15,8") voru gerðar 3 áburðartilraunir á árunum 1958 til 2007. Það voru tilraun 19-58 með vaxandi N-áburði, tilraun 3-59 með vaxandi P-áburði og tilraun 11-59 með vaxandi K-áburði (Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2011). Á tilraunatímabilinu myndaðist um það bil 10 cm þykk rótar- og trefjamotta á sandinum og safnaðist þar mikið af lífrænum efnum. Aðstæðum og aðferðum er nánar lýst í Þorsteinn Guðmundsson o.fl. (2011) og Hólmgeir Björnsson o.fl. (2018). Markmið þessarar greinar er að gera nánari grein fyrir áhrifum vaxandi skammta af nituráburði á C, N, pH og auðleyst næringarefni í tilraun 19-59 með vaxandi N-áburði.

Efni og aðferðir

Tilraunaliðir voru fjórir (1. tafla) og endurtekningar þrjár, reitir 5×10 m², raðað hlið við hlið og í stafrófs-röð innan endurtekninga, þ.e. kerfisbundið. Nitur var borið á sem ammóníumnítrat (Kjarni) og var árlegur N-áburður eftirfarandi í kg ha⁻¹: a-liður 50N að vori, b-liður 100N að vori, c-liður 100N að vori og 50N eftir slátt, samtals 150N og d-liður 100N að vori og 100N eftir slátt, samtals 200N. Ekki er vitað hvort þessari áætlun um áburð var fylgt sáðárið 1958. Lokaárið, 2007, var aukalega borið á a-lið 100 kg N og 50 kg N á b-lið vegna mistaka. Vegna óvissu um áburð fyrsta árið er miðað við að uppsöfnun á C og N hafi átt sér stað í 49 ár og ekki er tekið tillit til mistaka í áburðargjöf 2007. Árlegur grunnáburður á alla liði var 99,6 kg K ha⁻¹ í Kalí (KCl), og 53,4 kg P ha⁻¹ í þrífosfati, en í þrífosfati eru um 20% P, 12 – 14 % Ca og 1,5% S.

Jarðvegur á Geitasandi á Rangárvöllum er malarríkur sandur, en allar efnagreiningar voru gerðar á fínum jarðvegsefnum, < 2 mm. Grófara efnið var síað frá eftir þurrkun við 30°C. Grófar rætur voru vigtaðar með grófa efninu. Magn steina og róta var notað til að umreikna magn frumefna í fínefnum jarðvegs á jarðveginn í heild sinni. Aðstæðum og aðferðum er nánar lýst í Þorsteinn Guðmundsson o.fl. (2011) og Hólmgeir Björnsson o.fl. (2018). Til samanburðar voru sýni tekin á þremur stöðum utan tilraunarinnar og greind á sama hátt og sýni úr tilrauninni.

Tafla 1. Árleg meðalupptaka af N, P og K, og upptaka í hlutfalli af ábornu magni (Þorsteinn Guðmundsson o. fl. 2011, Hólmgeir Björnsson o.fl. 2018).

Table 1. Yearly mean uptake and percent of applied fertilisers removed with the grass.

Liður Treatment	N áborið N fertiliser kg ha ⁻¹	Árleg upptaka kg ha ⁻¹ . Meðaltal 48/49 ára ¹⁾ Annual uptake kg ha ⁻¹ . Mean of 48/49 years ¹⁾			% af ábornu í uppskeru % of fertiliser removed		
		N	P	K	N	P	K
a	50	26	5	28	52	9	28
b	100	66	10	68	66	19	68
c	150	96	16	97	69	30	98
d	200	97	15	92	49	28	92

1) N í 48 ár, P og K í 49 ár

Rúmþyngd einstakra reita í efstu 0-5 cm jarðvegsins var fundin með því að taka heildarþyngd sýna úr 0-5 cm dýpt og deila með samanlögðu rúmmáli þeirra úr sýnatökubor (Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2011). Rúmþyngd úr 5-10 og 10-20 cm dýptum í einstökum reitum var mæld á þurrkuðum og sigtuðum sýnum með því að sléttfylla 200 cm³ dós og vigta. Rúmþyngdin var notuð til að reikna magn efna á hektara þar sem

$$\text{Efni kg ha}^{-1} = \text{Efni [mg kg}^{-1}] \times \text{rúmþyngd [kg l}^{-1}] \times \text{þykkt lags [cm]} \times \text{hlutfall fínefna}$$

Auðleyst næringarefni voru greind í ammóníumlaktatskoli (AL-skol) eftir Egnér o.fl. (1960) þar sem K og Na voru greind með ljóslogamæli, Ca og Mg í AAS og P í bláum lit. Kolefni og nitur voru greind eftir brennslu við 1200°C í Leco tæki og pH var greint í vatni með glerelektróðu. Utan tilraunar voru sýni tekin á þremur mismunandi stöðum og greind með sömu aðferðum og notuð til viðmiðunar vegna þess að lið án áburðar vantar. Þessi sýni eru ekki úr tilraunalið og því ekki tekin með í tölfræðigreiningu.

Tölfræðigreiningar voru gerðar með forritinu JMP 11 frá SAS Institute.

Niðurstöður

Gróðurinn tók upp áburðinn að hluta og vöxtur ofanjarðar var fjarlægður með uppskeru. Áhrifum N-áburðar á uppskeru og gróðurfur eru gerð skil í annarri grein í Skrínu (Hólmgeir Björnsson o.fl. 2018). Í 1. töflu er meðalupptaka niturs, fosfórs og kalís í uppskeru sýnd. Hlutfall fosfórs sem gróður tók upp var lágt, frá 9 til 30% af því sem á var borið, þannig að mikið var eftir í jarðveginum. Með auknum N-áburði jókst upptaka á K og var yfir 90% af ábornu í liðunum með 150 og 200 kg N á hektara.

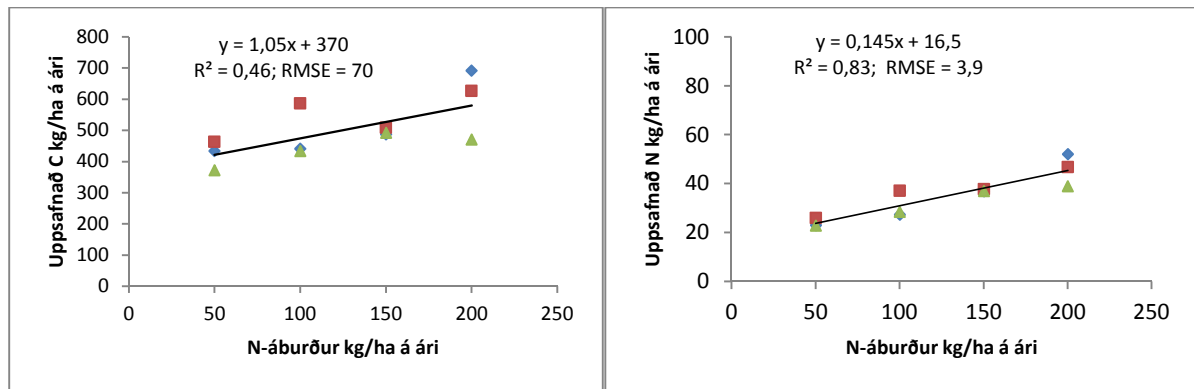
Rúmþyngd var mjög lág í efsta laginu en jókst með dýpt og var um 1,2 í neðsta laginu. Í melnum utan tilraunar var rúmþyngdin há, 1,2 til 1,6 og jókst með dýpt. Sýrustig hækkaði með dýpt en lækkaði með auknum N-áburði í öllum dýptum. Bæði kolefni og nitur voru langhæst í efstu 5 cm og bæði C og N jukust með auknum áburði (2. tafla). Utan tilraunar var kolefnishlutfallið mun lægra en innan hennar, en ekki er þekkt hvernig það breyttist frá upphafi tilraunarinnar. Sé gert ráð fyrir að það hafi lítið breyst hefur kolefni aukist úr 13 t ha⁻¹ utan tilraunarinnar í 33 til 42 tonn innan hennar og samsvarar það árlegri aukningu á bilinu 424-597 kg ha⁻¹ (3. tafla). Samsvarandi aukning á N var frá 0,77 t ha⁻¹ utan tilraunar í 1,95 til 3,02 t ha⁻¹ innan hennar og það samsvarar árlegri uppsöfnun á bilinu 24-46 kg N ha⁻¹. Aukning á C og N fylgdi auknum N-áburði og gott línulegt samband var milli uppsöfnunar og áburðarmagns frá 50-200 kg N ha⁻¹ (1. mynd). Fyrir hvert kg af ábornu N á bilinu 50-200 kg ha⁻¹ söfnuðust að meðaltali 1,05 ± 0,36 kg C og 0,145 ± 0,020 kg N fyrir árlega.

Tafla 2. Rúmþyngd, pH, heildarmagn C og N, C/N, og auðleyst næringarefni (AL-skol) í mismunandi áburðarliðum og dýptum ásamt staðalskekkju mismunar (SED), n=3.

Table 2. Bulk density, pH, total C and N, C/N and available nutrients (AL-extraction) in the different N treatments and depths with standard error of difference (SED), n=3.

N-áb. N-fer- tiliser	Dýpt Depth	Rúmþ. BD kg/l	pH	C _t g/kg	N _t g/kg	C/N	Ca _{AL} mg/kg	Mg _{AL} mg/kg	K _{AL} mg/kg	Na _{AL} mg/kg	P _{AL} mg/kg
50	0-5	0,103	5,06	181	8,14	22,2	1940	455	988	85	762
100	0-5	0,103	5,03	178	9,08	19,6	1581	396	755	74	781
150	0-5	0,137	4,94	179	10,6	16,9	1232	326	484	75	846
200	0-5	0,120	4,94	190	11,6	16,4	1147	351	567	78	697
SED		0,008	0,052	22	1,07	0,42	125	36	102	7,9	91
50	5-10	0,80	5,69	32	1,94	16,6	1316	290	476	123	792
100	5-10	0,79	5,41	37	2,30	15,9	871	187	328	80	756
150	5-10	0,90	5,34	28	2,00	13,8	587	145	180	82	558
200	5-10	0,86	5,07	36	2,69	13,4	298	79	163	55	626
SED		0,030	0,079	5,7	0,36	0,46	35	12	33	13	76
50	10-20	1,21	6,22	9,4	0,62	15,1	1208	316	326	130	196
100	10-20	1,18	6,04	10,9	0,77	14,3	1047	267	216	115	104
150	10-20	1,22	6,00	10,2	0,80	12,7	915	225	133	110	64
200	10-20	1,18	5,65	12,6	0,99	12,8	555	157	134	84	69
SED		0,025	0,112	0,80	0,07	0,59	49	18	9,9	8,6	26
ut ¹⁾	0-5	1,16	6,19	12,4	0,65	19,3	665	265	112	95	10
ut ¹⁾	5-10	1,45	6,61	3,5	0,23	14,8	898	286	125	98	8
ut ¹⁾	10-20	1,60	6,60	2,0	0,15	13,6	1231	307	182	98	4

1) ut = utan tilraunar / not fertilised area adjacent to the experiment



Mynd 1. Línulegt aðhvarf uppsöfnunar á kolefni og nitri að N-áburði. Punktarnir sýna einstaka tilraunareiti.

Figure 1. Linear regression of annual accumulation of carbon and nitrogen ($kg\ ha^{-1}$) plotted against the annual rate of N-fertilisation. The points show the variation within each treatment.

Tafla 3. Heildarmagn kolefnis og niturs í efstu 20 cm jarðvegsins ($t\ ha^{-1}$) og árleg uppsöfnun ($kg\ ha^{-1}$) umfram kolefnis- og niturmagn í efstu 20 cm jarðvegs utan tilraunar, ásamt staðalskekku mismunar (SED), $n=3$.

Table 3. Total C and N in the top 20 cm of the soil ($t\ ha^{-1}$) and yearly increase ($kg\ ha^{-1}$) where the C amount in the top 20 cm of the soil adjacent to the experiment was subtracted, with standard error of difference (SED), $n=3$.

Áburður N fertiliser	Dýpt Depth	Jarðvegur/soil $t\ ha^{-1}$	C _t $t\ ha^{-1}$	N _t $t\ ha^{-1}$	C _{upps} $kg\ ha^{-1}\ á r^{-1}$	N _{upps} $kg\ ha^{-1}\ á r^{-1}$
50	0-20	1664	33	1,95	424	24
100	0-20	1632	37	2,29	488	31
150	0-20	1736	37	2,60	496	37
200	0-20	1673	42	3,02	597	46
SED		38	3,1	0,17	62	3,5
Ut ¹⁾	0-20	2853	13	0,77		

1) ut = utan tilraunar / not fertilised area adjacent to the experiment

Tafla 4. Heildarmagn auðleystra næringarefna í ammóníumlaktatskoli í efstu 10 cm jarðvegs í tilrauninni og til samanburðar í efstu 5 cm jarðvegs utan tilraunar, ásamt staðalskekku mismunar (SED), $n=3$.

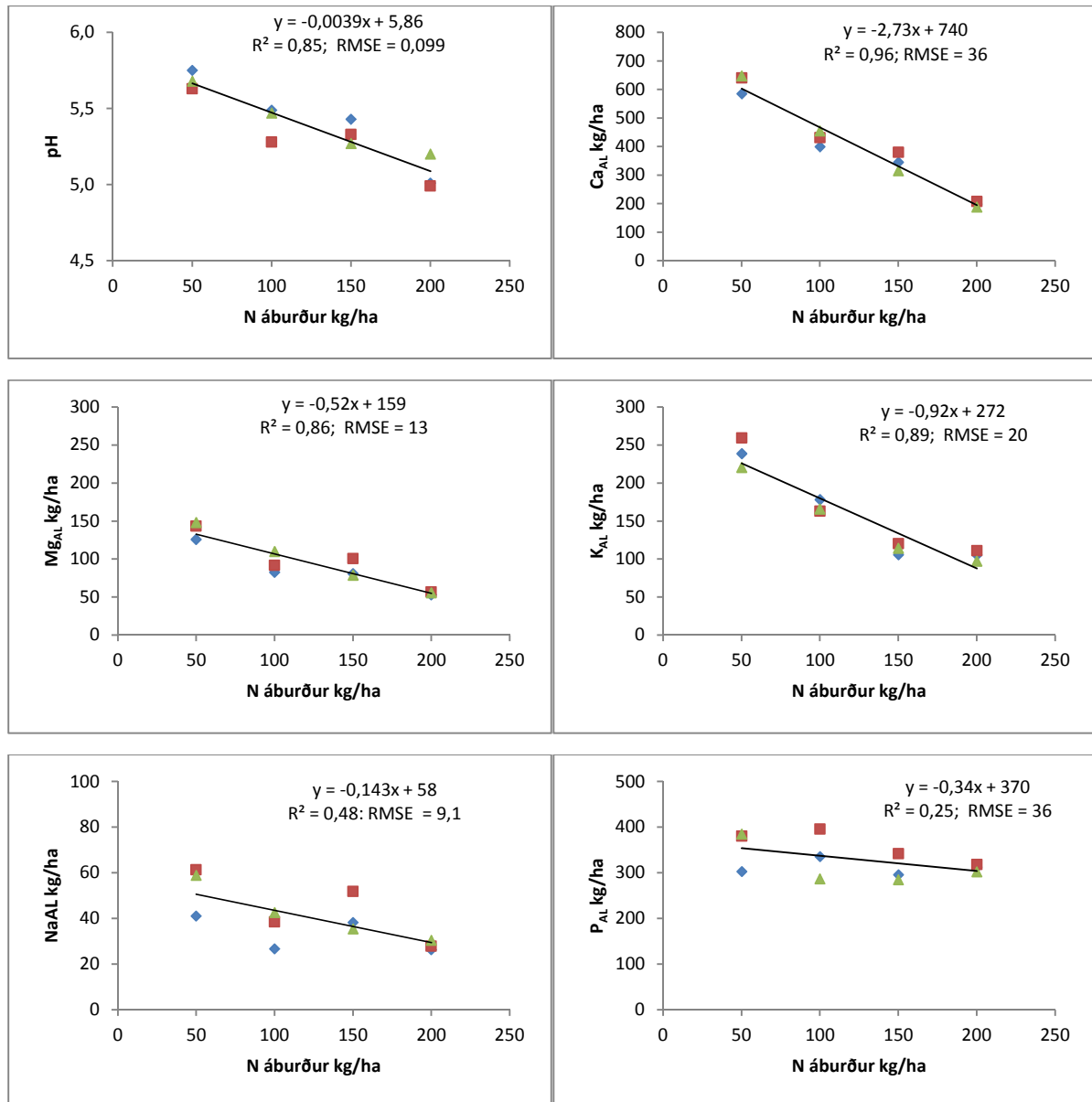
Table 4. Total contents of available nutrients in the top 10 cm of the soil within the experiment and for comparison in the top 5 cm adjacent to it with standard error of difference (SED), $n=3$.

Áburður N fertil.	Dýpt Depth	Jarðvegur/soil $t\ ha^{-1}$	Ca _{AL} $kg\ ha^{-1}$	Mg _{AL} $kg\ ha^{-1}$	K _{AL} $kg\ ha^{-1}$	Na _{AL} $kg\ ha^{-1}$	P _{AL} $kg\ ha^{-1}$
50	0-10	451	625	139	240	54	365
100	0-10	449	428	95	169	36	340
150	0-10	516	347	87	114	42	308
200	0-10	490	198	55	105	28	311
SED		20	23	8,9	9,5	6,7	32
Ut ¹⁾	0-5	508	333	133	56	48	5

1) ut = utan tilraunar / not fertilised area adjacent to the experiment

Vegna gróðurtorfunnar sem myndast hefur í tilrauninni reyndist erfitt að bera saman styrk og efnamagn auðleystra næringarefna í tilrauninni og á landinu umhverfis hana. Jarðvegur í 10-20 cm dýpt í tilrauninni var nær því að vera sambærilegur við 5-10 cm en 10 – 20 cm utan hennar. Styrkur katjóna var mestur í 0-5 cm dýpt, lægstur í 5-10 cm og Ca og Mg hækkaði síðan heldur í 10-20 cm dýpt (2. tafla). Gott línulegt samband var milli lækkandi heildarmagns auðleystra næringarefna og aukningar á N-áburði (4. tafla og 2. mynd). Fosfórinn var sér á báti því að mun meira var borið á en upp var tekið. Fosfór sem ekki var tekinn upp safnaðist að mestu fyrir í efstu 10 cm jarðvegsins en einnig að hluta í meiri dýpt

Munur á magni Ca í liðum með 50 og 200 $kg\ N\ ha^{-1}$ voru 427 $kg\ ha^{-1}$ sem samsvarar því að fyrir hvert kg af N hafi magn Ca í efstu 10 cm minnkað um 2,7 $kg\ ha^{-1}$ á 49 ára tímabili. Samsvarandi tölur fyrir auðleyst Mg, K, Na og P voru 0,52, 0,92, 0,14 og 0,34 $kg\ ha^{-1}$ fyrir hvert ábórið kg af N.



Mynd 2. Aðhvarf pH í 5-10 cm dýpt og auðleystra næringarefna (AL-skol) í efstu 10 cm jarðvegsins eftir 50 ára áburðargjöf að árlegum N-áburði. Punktarnir sýna einstaka reiti.

Figure 2. Regression of pH in 5-10 cm depth and available nutrients (AL-extraction) in the top 10 cm of the soil after 50 years of fertiliser application. The points show the variability within each treatment.

Umræður

Jarðvegsmyndun

Myndun jarðvegs á tilraunasvæðinu einkenndist af uppsöfnun lítið rotinna lífrænna efna sem mynduðu mjög seiga rótar- og trefjamottu ofan á sandinum. Í efsta laginu var C/N hlutfallið um og yfir 20 við lægstu áburðarskammtana en lækkaði með auknum N-áburði. C/N hlutfallið lækkaði einnig með dýpt. Þetta bendir til þess að lítið sé um jarðvegsdýr sem sjá um að smækka það sem til fellur og blanda lífrænum efnum og steinefnum saman. Þannig er myndun moldarefna (humus) mjög takmörkuð að 50 árum liðnum, en þó komin lengra á veg í neðsta laginu og virðist aukast með auknum N-áburði sé tekið

mið af C/N hlutfallinu. Lægra C/N hlutfall í liðunum 150 og 200 N bendir til að það hafi haft jákvæð áhrif á umsetningu lífrænna efna í jarðvegi að bæta við N-áburði eftir slátt, enda hefur N úr áburði verið til þurrðar gengið þar sem magn N-áburðar að vori, 50 eða 100, var fremur lítið.

Hversu mikið hefur bæst við af fokefnum á tilraunasvæðinu er ekki vitað en miða má við 2500 kg ha⁻¹ á ári (Arnalds 2010, Arnalds o.fl. 2012, Arnalds o.fl. 2014). Það samsvarar því að 125 t ha⁻¹ af fokefnum hafi borist á tilraunátímanum. Í efstu 10 cm jarðvegsins voru að meðaltali 466 t ha⁻¹ af fínum jarðvegsefnum sem skiptust í 413 tonn af steinefnum og 53 tonn af lífrænum efnum ef glæðitap er notað til að reikna hlutföll steinefna og lífrænna efna. Ef gert er ráð fyrir að fokefnin séu að mestu steinefni þá gætu um fjórðungur steinefna jarðvegsins hafa borist sem fokefni á tilraunátímanum. Hlutfall lífrænna efna í fokefnum er hins vegar ekki þekkt. Vegna uppsöfnunar á bæði lífrænum efnum og fokefnum hefur yfirborðið hækkað og það gerir samanburð við nærliggjandi svæði erfiðan. Þrátt fyrir þessa vankanta er áætlað að nær allt kolefni og nitur sé að finna í efstu 20 cm jarðvegsins og eru útreikningar á magni miðaðar við það.

C og N

Árleg söfnun á kolefni á bilinu 400 til 600 kg á hektara er innan þeirra marka sem fundist hafa á landgræðslusvæðum víðsvegar um land (Arnalds o.fl. 2000). Rannsóknir á jarðvegi stórrar tilraunar í vistheimt mun ofar á Geitasandi sýndu að hröð uppsöfnun á kolefni í ábornum liðum (Arnalds o.fl. 2013) hélst ekki og varð lítil eða engin (Tanner et al. 2015) án áburðar nema þar sem lúpína var. Áfok kann að vera ein af ástæðum þess að hlutfall kolefnis í jarðvegi stóð í stað eða minnkaði.

Línulegt samband var milli magns N-áburðar og uppsöfnunar á C og N. Gefur það nokkuð góða mynd af því við hverju megi búast af auknum áburði við uppbyggingu á lífrænum efnum á sandi. Hér voru það 1,05 kg C og 0,144 kg N að meðaltali fyrir hvert kg af N-áburði. Kätterer o.fl. (2014) fundu að meðaltali 1,15 kg C ha⁻¹ fyrir hvert kg af ábornu N í efstu 20 cm jarðvegs í mörgum tilraunum í Svíþjóð samanborið við liði án N-áburðar. Það sem við fundum var mjög svipað. Áburðurinn hefur því bæði nýst þeirri uppskeru sem var fjarlægð og til uppbyggingar á lífrænu efni í jarðveginum.

Þessi tilraun var mjög sérstök að því leyti að lögmál Mitcherlichs um minnkandi vaxtarauka (Mengel og Kirkby 1982) gilti ekki við lægstu áburðarskammtana. Uppskeruauki við að auka N-áburð úr 50N í 100N var meiri en uppskera af 50N og að sama skapi var aukning N-upptöku hlutfallslega meiri (Hólmgeir Björnsson o.fl. 2018). Samkvæmt útreikningum á N í uppskeru og í jarðvegi voru 26 kg fjarlægð með uppskeru árlega í 50N og 24 kg N söfnuðust fyrir í jarðvegi eða samtals 50 kg, tilraunaskekka var þó veruleg (Hólmgeir Björnsson o.fl. 2018 og 3. tafla). Samkeppni um N var mikil, C/N hlutfallið hátt og N sem losnaði eða kom úr áburði gat bundist í jarðveginum án þess að nýtast ofanjarðarvexti. Þetta virtist helst gerast þegar vor voru köld. N-upptaka var að meðaltali 52% af ábornu sem er léleg nýtni áborins N í uppskeru. Niturnýtni á 50N áburði til viðbótar var 79%, þ.e. upptaka jókst um 39,5 kg. Í jarðvegi jókst N um 7,2 kg ha⁻¹ á ári að meðaltali við það að auka áburð úr 50N í 100N og C/N hlutfallið lækkaði. Hlutfall C/N lækkaði með auknum N-áburði, en þá dregur úr samkeppni um aðgengilegt N.

Kolefni var 8,5 t ha⁻¹ eða um 25% meira í 200N lið en í 50N lið. Til samanburðar jókst N um 1,07 t ha⁻¹ sem eða 55% aukning og C/N fer því lakkandi. Þessar niðurstöður benda til þess að nitrið nýtist vel í niðurbrot á lífrænum efnum sem eftir verða og samræmast því að moldarmyndun sé komin lengra á veg í liðum með miklum N-áburði. Tap á N sem lofttegund var væntanlega mjög lítið í þessu þurra landi. Þó að hvorki sé tekið tillit til bindingar á N úr andrúmslofti né útskolunar gefa þessar niðurstöður

allgóða vísbendingu um að 100 kg N-áburðar á hektara skili sér vel í uppskeru og bindingu á C í jarðvegi ef önnur næringarefni skortir ekki.

pH og katjónir

Sýrandi áhrif af völdum aukins N-áburðar með NH_4^+ og lækkandi magn katjóna í jarðvegi er í samræmi við bæði íslenskar og erlendar rannsóknir (Sigfús Ólafsson 1978, Bjarni Helgason 1975, Belay o.fl. 2002, Guðmundsson o.fl. 2004, Riley 2007 og Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2007). Ef tekið er tillit til þess að hér var um uppsöfnun á lítið rotnuðu lífrænu efni (raw humus) að ræða var pH frekar hátt, rétt um 5 í efstu 5 cm jarðvegsins og yfir 6,0 við lægri tvo áburðarskammtana í 20 cm dýpt. Bæði áfoksefnin og hröð veðrun á basalti vinna á móti lækkun sýrustigs sem annars gæti orðið. Auðleyst næringarefni berast með áburði, losna við veðrun og þau skolast út. Þau eru með öðrum orðum ekki föst stærð og því ekki hægt að reikna jöfnuð eins og hægt er með heildarmagn efna. Erfiðara er að skýra áhrif aukins magns lífrænna efna á auðleyst næringarefni. Í efstu 5 cm jarðvegsins innan tilraunarinnar var styrkur auðleysts Ca, Mg og K mun meiri en í efstu 5 cm utan hennar jafnvel þó pH væri hærra utan tilraunar en innan hennar. Þetta má setja í samband við aukna jónrýmd sem fylgir uppsöfnun á lífrænum efnum og væntanlega vegna fínafna sem borist hafa með áfoki.

Kalsíum og magnesíum

Þó að engar ákveðnar viðmiðunartölur séu enn til fyrir Ca og Mg í ammóníumlaktatskoli í jarðvegi á Íslandi má miða við að Ca-tölur <400 og Mg-tölur <60 mg kg⁻¹ séu lágar og að Ca-tölur >3000 og Mg-tölur >600 mg kg⁻¹ séu háar (Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2011). Miðað við það eru Ca- og Mg-tölur í efsta laginu í sandinum utan tilraunar í meðallagi og tölurnar hækka með dýpt. Í tilrauninni hafði N-áburður mikil áhrif á þessi efni. Þar sem 50 og 100 N voru borin á eru Ca- og Mg-gildin há eða í meðallagi en við 150 og 200N komu fram frekar lág eða lág Mg-gildi, það lægsta 79 mg kg⁻¹ í 5-10 cm dýpt í 200N lið. Í lið 50N voru 625 kg Ca_{AL} ha⁻¹ og 139 kg Mg_{AL} ha⁻¹ í efstu 10 cm jarðvegsins samanborið við 198 og 55 kg í 200N lið. Um 35 kg Ca voru borin á árlega með fosfóráburðinum og ræktunarjöfnuðurinn var jákvæður um 1447 kg ha⁻¹ í 50N liðnum og um 989 kg í 200N lið og hefur það væntanlega dregið úr lækkun á skiptanlegu kalsíum. Íslenskur jarðvegur er eingöngu með breytilega hleðslu og hefur lækkun á pH þau áhrif að bæði jónrýmd og basamettun lækka með sýrustigi. Álíka mikil lækkun á Ca og Mg kom fram í tilraun á Sámsstöðum með vaxandi skammta af N (Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2007) og í Noregi nálgadist Mg_{AL} skortsmörk þar sem háir skammtar af N höfðu verið bornir á í 20 ár (Riley 2007).

Kalí

Á Íslandi eru K-tölur <160 mg kg⁻¹ taldar lágar og >600 mjög háar (Þorsteinn Guðmundsson og Jóhannes Sigvaldason 2000, Þorsteinn Guðmundsson og Þóroddur Sveinsson 2011). Utan tilraunar voru K-tölur lágar í efstu tveimur lögnum. Í tilrauninni voru allar K-tölur háar eða mjög háar í efstu 5 cm jarðvegsins og í 20 cm dýpt voru K-tölur við minni áburðarskammtana í meðallagi en lágar við hærri áburðarskammtana. Það má rekja hinar háu K-tölur í liðum 50N og 100N til áhrifa af áburði umfram upptöku (1. tafla) en það á ekki við í liðunum 150N og 200N því þar var um það bil jafnmikið fjarlæggt af landinu og upp var tekið. K-tölur voru mun hærri í þessari tilraun á mel (Vitric Andosol) en í tilraunum

á þykkum móajarðvegi (Silandic Andosol) (Þorsteinn Guðmundsson o. fl. 2006 og 2007). Munurinn er þó líklega ekki tengdur jarðveginum heldur því að í hinum tilraununum var mun minna borið á af kalí en upp var tekið, en í þessari tilraun var ýmist meira borið á eða jafn mikið og upptakan. Í 50N lið voru 240 kg K ha⁻¹ í efstu 10 cm jarðvegsins og 105 kg í 200N lið sem er meira eða svipað magn og upp var tekið með uppskeru (1. tafla). Kalí binst ekki fast við leir í íslenskum jarðvegi og vegna lágs magns í basalti, og þar með takmarkaðrar losunar, er oft mjög lítið skiptanlegt kalí í jarðvegi, sérstaklega í neðri lögum. Þannig er auðleyst kalí iðulega mest í efstu cm jarðvegsins, væntanlega vegna þess að plöntur nái því úr neðri lögum og komi því í hringrás. Virðist það óháð því hvort upptaka er meiri eða minni en á er borið (Sigfús Ólafsson 1978, Guðmundsson o.fl. 2005, Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2007).

Natríum

Oft er meira af raðbundu Na en K í íslenskum jarðvegi (Sigfús Ólafsson 1974 og 1978, Guðmundsson o.fl. 2005, Þorsteinn Guðmundsson o.fl. 2007), og utan tilraunar var magn þessara efna í mg kg⁻¹ af svipaðri stærðargráðu. Natríum lækkaði með auknum áburði sem má líklega helst skýra með lækkanði pH og þar með minni jónrýmd og lægri basamettun. Skiptanlegt Na jókst með dýpt sem má skýra með því að það skolist í neðri lög.

Fosfór

Mikill P-áburður umfram upptöku hefur leitt til mikillar hækkunar á P-tölum. Á Íslandi eru P_{AL}-tölur <40 mg kg⁻¹ taldar lágar en tölur >150 mjög háar (Þorsteinn Guðmundsson og Jóhannes Sigvaldason 2000, Þorsteinn Guðmundsson og Þóroddur Sveinsson 2011). Utan tilraunar voru allar P-tölur mjög lágar, en í 0-5 og 5-10 cm jarðvegs innan tilraunarinnar voru allar P-tölur mjög háar, og einungis í 10-20 cm dýpt í liðum 150N og 200N voru miðlungs P-tölur. Áborinn fosfór safnast upp í jarðvegi og er að mestu bundinn við steinefnahlutann en minna í lífrænum efnum (Bjarni Helgason 2002, Guðmundsson o. fl. 2014). Í þessari tilraun var Si_{ox} (kísill sem leysist í ammóníumoxalati) á bilinu 11-16 g kg⁻¹ og Al_{ox} á bilinu 10-20 g kg⁻¹ (Sunna Áskelsdóttir 2012), en jákvætt samband er milli Al_{ox} og Si_{ox} og bindingar á P í jarðvegi Guðmundsson o.fl. (2014). Því er líklegt að fosfórin, sem bætist við með áburði, sé að mestu steinefnabundinn. Þar sem P-tölur eru háar og auðleystur fosfór því mikill (milli 300 og 400 kg ha⁻¹ í efstu 10 cm jarðvegsins) er hætta á að hann losni og skolist niður í neðri lög eða berist í vatn ef yfirborðslag skyldi rofna og getur þá valdið mengun. Í athugun Guðmundssonar o.fl. (2014) náði fosfór ekki krítískt mettnarstigi. Þar var hæsta P_{AL}-talan 168 mg kg⁻¹, en margar tölur voru á bilinu 600 til 800 mg kg⁻¹ á Geitasandi. Háar P-tölur í 10-20 cm dýpt í 50N og 100N liðum sýna hreyfingu á P niður á við. Þetta þyrfti því að kanna betur.

Ályktanir

Sáning og áburður í 50 ár hefur myndað og viðhaldið heilli gróðurþekju. Jarðvegsmyndunin var þó enn mjög skammt á veg komin. Lífræna efnið var fyrst og fremst í trefjaríku yfirborðslagi. Rotnun og umsetning lífrænna efna og moldarmyndun var takmörkuð.

Áburðurinn nýttist bæði til uppskeru sem var fjarlægð og til uppbyggingar á lífrænu efni. Bæði C og N hafa safnast í jarðveginn. Heildarmagn N jókst úr 0,77 í 2 til 3 tonn á hektara sem væntanlega er nægilegt til að viðhalda heilli gróðurþekju. Heildarmagn kolefnis jókst úr 13 í um 30 til 40 tonn á hektara og sýndi glögglega að samnýting landsins til fóðuröflunar, uppgræðslu og til að binda kolefni getur vel farið saman.

Þakkir

Höfundar þakka öllum sem héldu tilrauninni á Geitasandi gangandi í 50 ár. Einnig þakka þeim öllum sem unnið hafa að greiningum á plöntum og jarðvegi. Framleiðnisjóður landbúnaðarins styrkti verkefnið.

Heimildir

Arnalds, Olafur, Grétar Guðbergsson og Jón Guðmundsson 2000. Carbon sequestration and reclamation of severely degraded soils in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 13: 87-97.

Arnalds, Olafur 2010. Dust sources and deposition of aeolian material in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 23: 3-21.

Arnalds, Olafur, Fanney Osk Gísladóttir og Berglind Orradóttir 2012. Determination of aeolian transport rates of volcanic soils in Iceland. *Geomorphology* 167-168: 4-12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.039>

Arnalds, Olafur, Berglind Orradóttir og Asa L. Aradóttir 2013. Carbon accumulation in Icelandic desert Andosols during early stages of restoration. *Geoderma* 193-194: 172-179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.018>.

Arnalds, O., H. Olafsson og P. Dagsson-Waldhauserova 2014. Quantification of iron-rich volcanogenic dust emissions and deposition over the ocean from Icelandic dust sources. *Biogeosciences* 11: 6623–6632. doi:10.5194/bg-11-6623-2014.

Belay, A., A. Claassens og F.C. Wehner 2002. Effect of direct nitrogen and potassium and residual phosphorus fertilizers on soil chemical properties, microbial components and maize yield under long-term crop rotation. *Biology and Fertility of Soils* 35: 420-427.

Bjarni Helgason 1975. Breytingar af völdum ólíkra tegunda köfnunarefnisáburðar. Samanburður þriggja tegunda af köfnunarefnisáburði. *Journal of Agricultural Research in Iceland* 7: 8-19.

Bjarni Helgason 2002. Lífrænn fosfór í íslenskum jarðvegi. *Icelandic Agricultural Sciences* 15: 95-109.

Egnér, H., H. Rhiem og W.R. Domingo 1960. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kalibestimmung. *Kungeliga Lantbrukshögskolans annaler* 26: 199-215.

Guðni Þorvaldsson 1975. Áburðartilraunir og jarðvegsathuganir á Skógasandi. BS ritgerð við Framhaldsdeild Bændaskólans á Hvanneyri, 40 bls.

Guðmundsson, Þorsteinn, Hólmgeir Björnsson og Guðni Þorvaldsson 2004. Organic carbon accumulation and pH changes in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland. *Catena* 56: 213-224.

- Guðmundsson, Þorsteinn, Hólmgeir Björnsson og Guðni 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.
- Guðmundsson, Þorsteinn, Sigurdur Thór Guðmundsson og Guðni Thorvaldsson 2014. Soil phosphorus fractionation in Icelandic long-term grassland field experiments. *Icelandic Agricultural Sciences* 27:81-94.
- Hólmgeir Björnsson, Þorsteinn Guðmundsson og Guðni Þorvaldsson 2018. Áhrif nituráburðar og nýting hans í langtímatilraun á snauðri sandjörð. *Skrína* 4(1): 1-16 (www.skrina.is).
- Kätterer, T., H. Kirchmann, G. Börjesson og M.A. Bolinder 2014. Carbon sequestration in cropland – management strategies in long-term field experiments in northern Europe. In: Guðmundur Halldórsson, Francesca Bampa, Arna Björk Þorsteinsdóttir, Bjarni D. Sigurðsson, Luca Montanarella og Andrés Arnalds (eds.) 2014. *Soil carbon sequestration: for climate, food security and ecosystem services*. Proceedings of the International Conference 27-29 May 2013, Reykjavík, Iceland. JRC Scientific and Policy Reports. European Union. pp. 22-28.
- Lucas, R.W., J. Klaminder, M.N. Futterer, K.H. Bishop, G. Egnell, H. Laudonand og P. Högberg 2011. A meta-analysis of the effects of nitrogen addition on base cations: Implications for plants, soils and streams. *Forest Ecology and Management* 262: 95-104.
- Mengel, Konrad og Ernest A. Kirkby 1982. *Principles of Plant Nutrition*. International Potash Institute, 655 bls.
- Riley, H. 2007. Long-term fertilizer trials on loam soils at Möystad, south-eastern Norway: Crop yields, nutrient balances and soil chemical analysis from 1983 to 2003. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil and Plant Science* 57: 140-154.
- Sigfús Ólafsson 1974. Fysiske og fysisk-kemiske studier af Islandske jordtyper. Licentiatfhandling. Hydroteknisk Laboratorium, Den Kongelige Veteriner og Landbohøjskole, København. 151 bls.
- Sigfús Ólafsson 1978. Samanburður köfnunarefnisáburðartegunda á túnnum. II Áhrif Kjarna og kalksaltþéturs á efnamagn í mýrjarðvegi. *Íslenskar landbúnaðarrannsóknir* 10(1): 72-82.
- Sunna Áskelsdóttir 2012. Changes in soil organic carbon in four long-term hayfield fertilisation experiments in Iceland: Monitoring and modelling. MS thesis, Agricultural University of Iceland. 93p.
<http://skemman.is/item/view/1946/13249;jsessionid=A2E1D1BF3E32B792DFEA72DD460F1D89>
- Tanner, Lawrence H., Morgan Nivison, Olafur Arnalds, and Kristin Svavarsdóttir 2015. Soil Carbon Accumulation and CO₂ Flux in Experimental Restoration Plots, Southern Iceland: Comparing Soil Treatment Strategies. *Applied and Environmental Soil Science* 2015: Article ID 205846, 10 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2015/205846>
- Þorsteinn Guðmundsson og Jóhannes Sigvaldason 2000. Túlkun og hagnýting jarðvegsefnagreininga. *Ráðunautafundur* 2000: 132-137.
- Þorsteinn Guðmundsson, Hólmgeir Björnsson og Guðni Þorvaldsson, 2006. Áhrif N-áburðar á efnasamsetningu jarðvegs. *Fræðaving landbúnaðarins* 3: 190-196.
- Þorsteinn Guðmundsson, Hólmgeir Björnsson og Guðni Þorvaldsson, 2007. Langtímatilraunir í jarðrækt, hlutverk og dæmi um áhrif N-áburðar á auðleyst næringarefni. *Fræðaving landbúnaðarins* 4: 287-294.
- Þorsteinn Guðmundsson, Guðni Þorvaldsson og Hólmgeir Björnsson 2011. Langtímaáhrif áburðar á jarðveg og uppskeru á Geitasandi. *Rit Lbhí* nr. 35. Landbúnaðarháskóli Íslands. 79 bls.
- Þorsteinn Guðmundsson og Þóroddur Sveinsson 2011. Greiningar á jarðvegi túna og gildi þeirra fyrir ræktendur. *Fræðaving landbúnaðarins* 2011: 150-159.