Fjölrit RALA – RALA report

209

Efna- og eðliseiginleikar votheys í rúlluböggum

Þóroddur Sveinsson
Bjarni E. Guðleifsson
Jóhann Örlygsson

Útgefandi:
Rannsóknastofnun landbúnaðarins
Keldnaholti, 112 Reykjavík
Agricultural Research Institute
Keldnaholt, IS-112 Reykjavík, Iceland

Umsjón með útgáfu:
Tryggvi Gunnarsson

EFNISYFIRLIT

FORMÁLI . . . 7
I. SAGAN . . . 9
II. LÍFFRÆÐI FÓÐURJURTA . . . 13
Plöntufruman . . . 13
Plöntuvefirnir . . . 13
Lífefnafræði plantna . . . 15
Vatn . . . 15
Kolvetni . . . 17
Hráprótein . . . 20
Fituefni . . . 21
Lífrænar sýrur . . . 22
Steinefni . . . 23
III. ÖRVERUR . . . 25
Ásætuörverur . . . 25
Votheysörverur . . . 26
Mjólkursýrugerlar . . . 27
Sveppir (*Fungi*) . . . 28
Smjörsýrugerlar (*Clostridium*) . . . 29
Iðragerlar (*Enterobacteria*) . . . 30
*Bacillus*gerlar . . . 30
Listeríugerlar (*Listeria*) . . . 31
Ediksýrugerlar (*Acetobacter*) . . . 31
Própíónsýrugerlar (*Propionibacterium*) . . . 31
IV. LOFTSKIPTIN . . . 33
V. GERJUNARHÆFNI HEYS . . . 35
Verkunarferill votheys . . . 35
Áhrif forþurrkunar . . . 36
Áhrif pökkunar og geymslu . . . 39
Áhrif hjálparefna . . . 40
Áhrif þroskastigs grasa . . . 42
Áhrif áburðar . . . 43
Áhrif fóðurtegunda . . . 43
Áhrif skurðar . . . 44
VI. VERKUNARTAP VIÐ VOTHEYSVERKUN . . . 45
Frá slætti til hirðingar . . . 45
Frá hirðingu til gjafar . . . 46
Heildartap . . . 47
Áhrif rangrar gerjunar . . . 48
VII. FÓÐRUNARVIRÐI VOTHEYS . . . 51
Nýting fóðurorkunnar . . . 51
Nýting hrápróteins . . . 52
Lystugleiki votheys . . . 52
Rannsóknir á fóðrunarvirði . . . 54
Sauðfé . . . 54
Mjólkurkýr . . . 56
VIII. SAMANTEKT . . . 59
IX. SUMMARY . . . 62
X. LOKAORÐ . . . 65
XI. HEIMILDARSKRÁ . . . 67

Töflur og myndir

1. tafla. Helstu verkefni sem unnin hafa verið á Íslandi og tengjast rúllubaggaverkun 11
2. tafla. Hlutfall vefjaflokka í blöðum og stönglum kaldtempraðra grasa 15
3. tafla. Mikilvæg kolvetni og aðrir trénisþættir í íslenskum grösum 20
4. tafla. Amínósýrur sem mynda plöntuprótein 21
5. tafla. Lífrænar sýrur í rúlluvotheyi á pökkunardegi 22
6. tafla. Dæmi um magn helstu steinefna í íslenskum túngrösum 23
7. tafla. Meðaltöl flokka og fjölda ásætu- og votheysörvera í votheyi á Hvanneyri sumarið 1993 . 25
8. tafla. Tegundir mjólkursýrumyndandi gerla sem hafa þýðingu við votheysgerjun 28
9. tafla. Áhrif geymslustaðar á meðalhita í kjarna rúlla fyrstu átta sólarhringana eftir pökkun í samanburði við hita í veðurstöð 40
10. tafla. Flokkar hjálparefna fyrir votheysgerð 41
11. tafla. Þurrefnis-, orku- og próteintap við votverkun rúlluheys með yfir 30% þurrefni . . . 46
12. tafla. Mikilvægir loftfirrðir gerjunarferlar af völdum örvera í votheyi og afleiðingar þeirra . 47

1. mynd. Fyrsta stórbaggavélin kom til Íslands árið 1979 og var ætlað að binda þurrhey til útflutnings 9
2. mynd. Plastfilma og pökkunarvélar auðvelduðu votheysverkun í böggum og urðu til þess að tæknin varð á örskömmum tíma allsráðandi við heyverkun á Íslandi 10
3. mynd. Vothey sem hlutfall af heildarheyfeng á Íslandi frá því fyrsta pökkunarvélin kom til landsins 10
4. mynd. Frumulíffæri í dæmigerðri lifandi plöntufrumu 13
5. mynd. Nokkrar helstu frumugerðir í plöntum 14
6. mynd. Þversnið af blaðslíðri og stöngli nálægt stöngulhné í hveiti 14
7. mynd. Þversnið af laufblaði í hveiti 15
8. mynd. Afdrif leysanlegra stórsameinda við loftháða frálífun í plöntufrumum 16
9. mynd. Þurrkhraði mismunandi grastegunda 17
10. mynd. Þurrkhraði blaða og stöngla í vallarfoxgrasi 17
11. mynd. Frálífun einsykrunga í plöntufrumum við loftfirrðar og loftháðar aðstæður 18
12. mynd. Tvísykrungurinn sukrósi er gerður úr glukósa og fruktósa og er algengasta form sykra sem flyst á milli staða innan plöntunnar 18
13. mynd. Sterkja og sellulósi eru hvorutveggja glukósakeðjur þar sem einungis tengingar eru mismunandi 18
14. mynd. Meðalmagn vatnsleysanlegra sykra í 5 grastegundum fyrstu 2 dagana eftir pökkun . . 19
15. mynd. Próteinið sem er brúin á milli hins líflausa og lifandi heims er ensímið Ribulose 1,5 bisphosphate carboxylase (RuBPCase) 21
16. mynd. Áhrif forþurrkunar og búfjáráburðar á fjölda gróa próteinsundrandi smjörsýrugerla og mjólkursýrugerla 26
17. mynd. Vatnsvirkni sem fall af þurrefnisstyrk heys. Örveruflokkum raðað við lægstu lífvænlegu mörk þeirra 26
18. mynd. Helstu gerjunarafurðir loftfirrðra votheysörvera fyrir utan H_2O og CO_2 27
19. mynd. Meðalfjöldi loftfirrðra örvera í 6 vallarfoxgrasrúllum á Möðruvöllum 1997–1998 . . 27
20. mynd. Meðalfjöldi helstu flokka og tegunda loftfirrðra örvera í 6 vallarfoxgrasrúllum á mismunandi geymslutímum 27
21. mynd. Sýrustig sem fall af mjólkursýru í ýmsum gerðum af fullverkuðu rúlluheyi á Möðruvöllum í Hörgárdal 1994–1997 28
22. mynd. Uppsöfnun koltvísýrings í tveimur rúllum á Möðruvöllum 1995 33
23. mynd. Helstu lofttegundir í rýgresisrúllum fyrstu 275 dagana eftir pökkun 33
24. mynd. Þrjár helstu gerðir frumverkunar í velverkuðu rúlluheyi sem fall af dögum frá pökkun . 35
25. mynd. Helstu gerjunarafurðir á fyrstu 30 dögum gerjunar í 6 grænfóðurrúllum (bygg og rýgresi) á Möðruvöllum 1994 36
26. mynd. Mjólkursýrustyrkur sem fall af þurrefni í fullverkuðu rúlluvotheyi 37
27. mynd. Sýrustig sem fall af þurrefni í fullverkuðu rúlluvotheyi 37
28. mynd. Þurrefnistap vegna safafrárennslis í votheyi 37
29. mynd. Gerjunarafurðir í fullverkuðu rúlluheyi sem fall af þurrkstigi 37
30. mynd. Áhrif þurrkstigs í rúlluvotheyi á hlutfallslegt magn einstakra gerjunarafurða af heildargerjunarafurðum 38

31. mynd. Sykrustyrkur í votheyi við pökkun annars vegar og gjöf hins vegar sem fall af þurrefnishlutfalli í ýmsum rúllugerðum á Möðruvöllum 1996–1998 38
32. mynd. Sykrustyrkur í þurrefni votheys við pökkun annars vegar og við gjöf hins vegar sem fall af þurrefnishlutfalli í ýmsum rúllugerðum á Möðruvöllum 1996–1998 38
33. mynd. Áhrif geymslustaðar á meðalhita í rúllum í samanburði við nærliggjandi veðurstöð (200–400 m fjarlægð) á Möðruvöllum 1997–1998 39
34. mynd. Áhrif geymslustaðar á fjölda og samsetningu örveruflórunnar eftir 252 daga geymslu í 6 vallarfoxgrasrúllum á Möðruvöllum 1997–1998 40
35. mynd. Áhrif hjálparefnisins Foraform á nokkra verkunarþætti í rúlluböggum. 42
36. mynd. Áhrif hjálparefnisins Foraform á nokkra verkunarþætti í hröktu og fersku heyi í rúlluböggum 42
37. mynd. Áhrif sláttutíma vallarfoxgrass 1997 á verkun í rúllum 43
38. mynd. Þéttni votheys í lauskjarna rúllum sem fall af þurrefnisstyrk í samanburði við ráðlagða þéttni í votheyi í sílóum 44
39. mynd. Áhrif lofthita og þurrkstigs á þurrefnistap af völdum öndunar plöntufrumna 46
40. mynd. Þurrefnishlutfall í 31 innirúllu við hirðingu og gjöf 46
41. mynd. Hlutfall ammóníumbundins N sem fall af vatnsleysanlegum sykrum í fullverkuðu rúllu-votheyi 48
42. mynd. Afdrif fóðurorkunnar 51
43. mynd. Áhrif orkustyrkleika fóðursins á nýtingu breytiorkunnar yfir í nettóorku til viðhalds, mjólkurmyndunar og vaxtar 51
44. mynd. Áhrif þurrefnisstyrks í rúlluvotheyi á niðurbrot hráprótein í vömb mjólkurkúa . . . 52
45. mynd. Flokkar kolvetna og N-sambanda (hráprótein) annars vegar í ógerjuðu grasi/heyi og hins vegar í votheyi þar sem gerjun hefur farið fram 53
46. mynd. Áhrif þurrkstigs í rúllum á hlutfall meltanlegrar orku sem bundin er í sýrum og etanóli . 54
47. mynd. Áhrif þurrkstigs í rúllum á hlutfall orku í mældum efnum eftir og fyrir gerjun . . . 54
48. mynd. Daglegt át gimbra á vetrarfóðrum sem fall af þurrefnisstyrk í rúllum 55
49. mynd. Daglegt át gimbra á vetrarfóðrum sem fall af orkustyrk í rúlluheyi 55
50. mynd. Sýrustig í íslensku rúlluvotheyi sem fall af þurrkstigi votheys og borið saman við æskilegt sýrustig til þess að tryggja góða verkun í sílóum eða flatgryfjum 59
51. mynd. Meðalhvarf (%) helstu vatnsleysanlegrasykra (VLS) í fullverkuðum, forþurrkuðum rúllum . 59

FORMÁLI

> Á meðan landbúnaðurinn var hálft líf okkar og þó gott betur, var tilvera þjóðarinnar, líf hennar og menning háð því að tækist að afla nægra og góðra heyja, svo að fleyta mætti búsmalanum fram veturinn.
>
> *Bjarni Guðmundsson 1981*

Allt frá upphafi byggðar og fram á okkar daga hefur fóðuröflun á Íslandi byggst á þurrheysverkun. Heyöflunin hafði í gegn um aldirnar þann tilgang að viðhalda lífi í búfénu yfir háveturinn þegar jarðbönn útilokuðu beit. En á innan við 100 árum tók landbúnaðurinn stakkaskiptum í takt við breytta tíma sem þekking og framfarir sköpuðu. Íbúafjöldinn fjórfaldaðist og þeim sem vinna við matvælaöflun fækkaði stöðugt. Nú er svo komið að einungis um 4% þjóðarinnar vinnur við landbúnaðartengda framleiðslu, en fyrir um 60 árum unnu 32% þjóðarinnar við sömu störf. Framleiðniaukning í landbúnaði hefur því verið gífurleg. Þrátt fyrir að búgreinar sem byggja eingöngu á aðfluttu hráefni stækki stöðugt þá er grasrækt og heyverkun enn undirstaða íslensks landbúnaðar. Sauðfjár- og hrossaræktin fær nánast allt sitt fóður af beit og heimafengnum heyjum og nautgriparæktin að stærstum hluta, eða um 80–95%. Það hefur lengi verið stefna í íslenskum landbúnaði að ala búfé sem mest á heimafengnu fóðri sem fellur vel að nútíma hugmyndum um vistvæna og sjálfbæra framleiðslu. Kröfur til magns og gæða heyfengs með sem minnstum tilkostnaði aukast stöðugt, enda er ætlast til þess að búfé skili sífellt meiru allt árið um kring.

Á síðustu öld byggðist aukinn fóðurframleiðsla á framræslu, nýræktun, tilbúnum áburði og vélvæddri þurrheysverkun. Árið 1986 var t.a.m. vothey einungis 14% af heildarheyfeng á landinu. Um aldamótin er vothey komið með yfir 80% hlutdeild. Það sem olli straumhvörfum var ný tækni sem pakkaði inn stórböggum í plastfilmu. Ástæður fyrir þessum umskiptum eru margþættar. Aðstæður í landbúnaði leyfðu ekki dýrar fjárfestingar í góðum súgþurrkunarhlöðum, heymetisturnum og tækjum þeim samfara, sem var nauðsynlegt að fara út í ef auka átti gæði heyja og afköst við heyskap. Fjármagnskostnaður í rúlluúthaldi er minni og viðráðanlegri og verð á plasti hefur verið hagstætt í samanburði við raforkuverð. Bústærð og aðstæður til heyskapar á Íslandi falla vel að þessari tækni, en það gæti breyst með stærri rekstraeiningum og hækkandi verði á plasti. Bændum finnst heyskapur með rúllubaggatækninni vera léttari og heygæðin jafnari en áður þegar þeir voru háðari duttlungafullri sumarveðráttu.

Votverkun í stórböggum er á margan hátt ólík bæði hefðbundinni votheysgerð og þurrheysverkun og kallaði hún á nýja þekkingu og endurskoðun gamalla heyverkunargilda. Rannsókna- og leiðbeiningakerfi landbúnaðarins hefur á síðustu tveimur áratugum unnið kappsamlega að þekkingaröflun á verkun heys í böggum, þannig að hún nýtist sem best við íslenskar aðstæður.

Hér er ætlunin að horfa um öxl, rifja upp líffræði fóðurjurta og leitast við að draga saman þá innlendu þekkingu sem við höfum höndlað um efna- og eðliseiginleika baggavotheys með skírskotun til erlendra heimilda um lífefnafræði votverkunar þar sem við á. Fyrir utan Rannsóknastofnun landbúnaðarins hafa Framleiðnisjóður landbúnaðarins og RANNÍS kostað þetta verkefni, líkt og mörg önnur í þessum verkefnaflokki á undaförnum árum og fá þeir bestu þakkir fyrir.

Möðruvöllum í Hörgárdal, 1. maí 2001
Þóroddur Sveinsson

I. SAGAN

> Uxarnir og asnarnir, sem akurinn erja, skulu eta saltan fóðurblending, sem hreinsaður hefir verið með varpskóflu og varpkvísl.
>
> *Gamla Testamentið (Jesaja 30:24)*

Votverkun gróffóðurs er ævaforn verkunarmáti sem má rekja a.m.k. tvö til þrjú þúsund ár aftur í tímann, eða nokkrum þúsund árum eftir að maðurinn fer að yrkja jörðina og fóðra búfé. Til eru biblíulegar, grískar og rómverskar heimildir um hvernig fornar menningarþjóðir verkuðu fóður í gryfjum og lágreistum hlöðnum turnum (Woolford 1984). Á Ítalíu hefur votverkun heys verið þekkt í a.m.k. 700 ár og í Svíþjóð og Eystrasaltslöndunum síðan í upphafi 19. aldar. Það er þó ekki fyrr en á seinni hluta 19. aldar sem þessi aðferð fær athygli eftir að Grieswald nokkur lýsti árið 1842 hvernig standa bæri að þess konar verkun í Eystrasaltslöndunum. Hans rit var þó ekki birt í Þýskalandi fyrr en 1862 og í Frakklandi 1870. Upphaf hagnýtrar votheysverkunar á nútíma er eignað franska bóndanum Goffard sem árið 1877 gaf út bók um reynslu sína af votverkun grænmaíss (McDonald o.fl. 1991). Svo skemmtilega vill til að sama ár birtist í Andvara, riti Hins íslenska þjóðvinafélags, grein eftir Svein Sveinsson um súrsun heys, sennilega sú fyrsta á íslensku. Upp úr aldamótunum 1900 fær votverkun maíss sífellt meira vægi í Bandaríkjunum, en í Evrópu er þurrheysverkun áfram aðalverkunaraðferðin langt fram eftir 20. öldinni. Halldór Vilhjálmsson skólastjóri á Hvanneyri var einn helsti brautryðjandi votheysverkunar hér á landi á fyrri hluta 20. aldar. Hann hvatti bændaefni til þess að verka hey í súr (Bjarni Guðmundsson 1995). Þó að votheysverkun væri víða reynd að hans tilstuðlan festist hún samt hvergi í sessi nema á einstaka stöðum, þá sérstaklega við Húnaflóa. Segja má að viss vatnaskil hafi orðið í Norður-Evrópu þegar Finninn A.I. Virtanen kynnti árið 1933 nýstárlega votheysverkunaraðferð sem byggðist á notkun ólífrænna sýra (Woolford 1984). Aðferðir Virtanens og ástandið eftir seinni heimsstyrjöldina, þegar þjóðir heimsins kepptust við að gera eigin landbúnað sem mest sjálfbæran, leiddi til þess að votheysverkun varð sífellt stærri hluti verkaðs gróffóðurs í Norður-Evrópu. Í dag er stærsti hluti verkaðs gróffóðurs í Evrópu votverkaður. Þessi áhugi fór ekki fram hjá Íslendingum og á 6. áratug 20. aldar var talsvert skrifað um votheysverkun og rannsóknir tengdar henni (t.d. Marteinn Björnsson 1950, Björn Jóhannesson og Kristín Kristjánsdóttir 1954, Pétur Gunnarsson 1956, Stefán Aðalsteinsson o.fl. 1960). Bjarni Guðmundsson, prófessor við Landbúnaðarháskólann á Hvanneyri, hefur á síðustu þremur til fjórum áratugum frætt bændur í ræðu og riti um leyndardóma votheysverkunar. Bjarni er afkastamesti íslenski vísindamaðurinn á þessu sviði og því eru tilvitnanir í Bjarna ótalmargar í þessu riti.

Fyrsta heybindivélin var tekin í notkun á Íslandi á Þingeyrum í Húnaþingi sumarið 1945 (Árni G. Eylands 1950). Sú vél batt heyið með vírum og þurfti að moka í hana með handafli. Sjálfvirkar bindivélar, eins og þær voru kallaðar, komu ekki til Íslands fyrr en talsvert seinna, en nutu einungis tímabundið vinsælda meðal bænda. Þær þóttu vinnufrekar og þar sem góð súgþurrkunaraðstaða var ekki fyrir hendi vildi þurrheyið mygla og skemmast. Stórbaggavélar komu fyrst fram erlendis um 1960 (t.d. Grétar Einarsson 1991) og fyrsta stórferbaggavélin á Íslandi var keypt í Eyjafjörð 1979 á vegum Markaðsnefndar landbúnaðarins (1. mynd). Hún var fengin til landsins til þess að binda hey í útflutning til Noregs og Færeyja (Guðmundur Steindórsson, persónulegar upplýsingar). Þessar vélar voru fyrst og fremst ætlaðar til að binda hálm eða þurrhey.

Fyrstu rúllubaggavélarnar komu til Íslands

1. mynd. Fyrsta stórbaggavélin kom til Íslands árið 1979 á vegum Markaðsnefndar landbúnaðarins. Henni var ætlað að binda þurrhey til útflutnings. (Ljósmynd Guðmundur Steindórsson, vorið 1979).

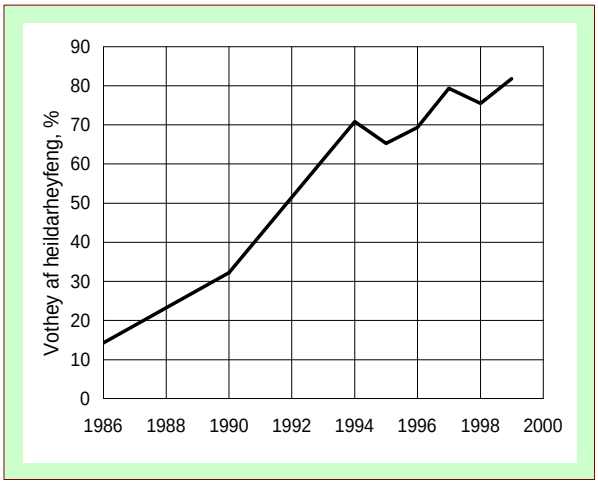
árið 1982 (Grétar Einarsson 1991) og 1983 var vothey verkað í rúllum fyrsta sinn á Íslandi (Bjarni Guðmundsson 1998). Upphaflega var rúllunum pakkað í plastpoka, en með tilkomu plastfilmunnar og pökkunarvéla árið 1986 vekur þessi tækni fyrst almennilega athygli bænda (2. mynd). Sumarið 1996 komu síðan fyrstu stórferbaggavélarnar til Íslands sem ætlaðar eru til að binda vothey (persónulegar upplýsingar frá vélainnflytjendum). Þær eru nú að ná talsverðri útbreiðslu á kostnað rúllubaggavélanna. Kostir þeirra fram yfir rúlluvélarnar eru taldir, meiri afköst við bindingu og flutninga og hugsanlega heldur betri verkun og auðveldari fóðrun. Stórbaggavæðingin hefur leitt til þess að á einungis 15 árum fer hlutur votheys af heildarheyfeng landsmanna úr 10% og upp í 80% eins og kemur fram á 3. mynd (Hagtölur landbúnaðarins 2000).

Tilraunir voru gerðar hér á landi með að verka vothey í venjulegum smáböggum og plastumbúðum strax upp úr 1968. Þær tilraunir þóttust gefast vel (Grétar Einarsson, persónulegar upplýsingar). Einnig var gerð tilraun til að verka laust vothey í stökkum með plastdúk sem á voru sérstakar læsingar til að loka samskeytum (Guðmundur Jónsson 1998). En hagnýta tækni skorti þar til pökkunarvélarnar komu á markaðinn tveimur áratugum síðar.

Enda þótt rannsóknamenn hefðu löngu áður gert tilraunir með að pakka hey í plast er upphaf votverkunar í böggum rakið til enska bóndans L. Fosters árið 1978. Hann gafst upp á að þurrka há í vætutíð og endaði með að rúllubinda blautan hrakninginn sem hann stakk í plastpoka. „Þetta var upphaf byltingar í heyverkunartækni“ (Bjarni Guðmundsson 1998). Fyrstu árin eftir þetta var rúlluböggunum stungið í plastpoka sem bundið var fyrir. Þessi aðferð var vinnufrek og verkunin tókst ekki alltaf sem skyldi (t.d. Tryggvi Eiríksson 1984). Aðferðin fékk því takmarkaða útbreiðslu.

Rannsóknir með vothey í rúlluböggum hefjast á Bændaskólanum á Hvanneyri og bútæknideild RALA á fyrri hluta 9. áratugar síðustu aldar. RALA hefur einnig staðið að ýmsum rannsóknum á votverkun heys í rúlluböggum á Möðruvöllum og á Stóra Ármóti. Í 1. töflu er yfirlit yfir flest ef ekki öll verkefni sem unnin hafa verið á Íslandi og snerta votverkun heys í böggum á síðustu tveimur áratugum. Auk þess kemur fram hvað var mælt, metið eða skráð og tilvísun í minnst eina heimild fyrir hvert verkefni. Hér eru ekki meðtaldar búvélaprófanir og prófanir á tækni við meðhöndlun og gerð rúllubagga, enda er það sérstakur verkefnaflokkur og utan við efni þessa rits. Alls eru þetta ríflega 40 verkefni sem hér eru talin upp. Þau eru mismikil að umfangi, eða allt frá einfaldri skoðanakönnun til fjölþátta langtímarannsókna með mörgum tilraunum innanborðs. Flest verkefnin fjalla á einn eða annan hátt um hvernig ákveðið hráefni og meðferð þess fyrir og við pökkun verkast og skilar sér sem fóður fyrir búpeninginn. Það er ljóst á upptalningunni að þessi verkefnaflokkur hefur átt sinn sess í íslenskum landbúnaðarrannsóknum um alllangt skeið.

2. mynd. Plastfilma og pökkunarvélar auðvelduðu votheysverkun í böggum og urðu til þess að tæknin varð á örskömmum tíma allsráðandi við heyverkun á Íslandi. (Ljósmynd Þóroddur Sveinsson).



3. mynd. Vothey sem hlutfall af heildarheyfeng á Íslandi frá því fyrsta pökkunarvélin kom til landsins (Hagtölur landbúnaðarins 2000).

1. tafla. Helstu verkefni sem unnin hafa verið á Íslandi og tengjast rúllubaggaverkun.

Heiti verkefnis	Heimildar-tilvísun	Hvað var mælt, metið eða skráð														
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Áhrif þurrkstigs á fóðrunarvirði heys í rúllum	27	1	1			1			1				1			
Samanburður á tveimur heyverkunaraðferðum	27, 157	1	1										1			
Rúlluhey og súgþurrkuðu heyi handa hrossum	12		1													
Áhrif hjálparefna og forþurrkunar á gæði heys í rúllum	12	1	1			1		1	1			1			1	
Áhrif skurðar og hjálparefna á verkun heys í rúllum	12, 14	1	1		1	1		1	1			1	1	1	1	
Samanburður á verkun háar og rýgresis handa mjólkurkúm	12, 27	1	1		1	1		1	1			1	1			
Súrsun lúpínublandaðs heys og fóðrunarvirði þess	16	1	1											1		
Forþurrkun rúlluheys og efnabreytingar í því	16, 33	1				1				1						
Heilt og skorið rúlluhey handa sauðfé	16, 36	1	1						1				1	1		
Súgþurrkuð taða og rúlluhey handa mjólkurkúm	16, 27	1	1			1			1				1			
Forþurrkun, heyskurður og Kofasafi	16, 21	1	1		1	1		1	1			1	1		1	
Áhrif túnteðslu á örveruflóru grasa og verkun votheys	16, 32	1	1						1	1		1				
Sykrur í íslenskum fóðurgrösum og gerjun úr þeim	57, 58	1			1	1	1	1	1	1		1		1		
Hjálparefni við verkun rýgresis	34	1	1			1		1	1			1				
Verkun háar í rúlluböggum og nýting hennar	34	1	1							1						
Afföll við geymslu rúllubagga	34															1
Áhrif hitastigs og þurrkstigs á gerjun heys í rúlluböggum	39, 43	1				1			1						1	
Hjúpun og geymsla rúllubagga	39	1											1		1	
Áburðarhættir og verkun heys – taða og tilbúinn áburður	43	1	1													
Verkun háar í rúlluböggum	50, 51	1											1	1		1
Hjálparefni við verkun heys – Foraform, GrasAAT	39, 44	1	1		1	1	1	1					1	1		1
Að bjarga hröktu heyi	43	1	1													1
Verkun og geymsla votheys í smáböggum	43	1											1	1		
Efnamagn í rúllum	185	1														
Reynsla bænda í utanverðri Eyjafjarðarsýslu af rúlluheyi	178, 179	1			1		1	1	1				1	1		1
Fóðurgildi og gerjunarferlar í mismunandi rúlluheyi	180	1		1	1		1	1	1		1		1	1		1
Geymsluþol rúlluheys	182	1		1	1		1	1	1				1	1		
Áhrif heygerða og þurrkstigs á votheysverkun í rúllum	185	1		1	1	1	1	1	1			1	1	1		
Áhrif sýnatökuaðferðar á niðurstöður mælinga í rúlluheyi	185	1		1	1	1	1	1	1					1		
Áhrif geymslustaðar á hitastig og gerjun í rúlluheyi	185	1		1	1	1	1	1	1				1	1	1	
Áhrif sláttutíma vallarfoxgrass á verkun í rúlluböggum	119, 185	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1		
Áhrif þroskastigs og forþurrkunar á fóðurgildi	168	1	1						1							
Verkun grænfóðurs í rúllum	145	1											1	1		
Hitafar í rúllum	145														1	
Athugun á áhrifum rúlluheys og mjólkurgæði	2, 6, 7	1			1			1	1			1	1			1
Verkun í rúlluböggum	169	1			1			1	1			1	1			1
Reynsla af rúlluböggum	122, 123	1						1	1			1		1		1
Þurrhey af 1. slætti og há handa mjólkurkúm	157	1	1											1		
Grænfóður og þurrhey fyrir kýr á fyrsta mjaltaskeiði	101	1	1											1		
Leysanleiki próteins í rúlluheyi	62, 64	1														
Hert loðnulýsi og fóðurkál fyrir mjólkurkýr	100															
Hálíngresi og vallarfoxgras handa mjólkurkúm	99	1	1											1		
Samtals		38	21	6	14	15	9	17	22	4	1	12	20	19	7	9

A= Fóðurgildi (a.m.k. meltanleiki og þurrefnismæling, oftast próteinmæling og stundum steinefni).
B= Fóðrunarvirði (átgeta búfjár (sauðfé, hross, kýr), afurðir og vöxtur).
C= Plöntusýrur (lífrænar sýrur sem fyrirfinnast í lifandi plöntum).
D= Gerjunarsýrur (lífrænar sýrur sem myndast við gerjun).
E= Sykrur.
F= Etanól.
G= Ammóníum N.
H= pH.
I= Buffervirkni.
J= Lofttegundir.
K= Örverur.
L= Myglumat.
M=Gæðamat.
N=Hitastig.
O=Spurningalisti.

II. LÍFFRÆÐI FÓÐURJURTA

Vothey er ferskar eða hálfþurrkaðar fóðurjurtir sem hafa verið verkaðar í loftþéttum umbúðum eða geymslum í einhvern tíma. Súrhey er vothey með hátt rakastig og verkunin byggist á að sýra votheyið sem mest með hjálp mjólkursýrugerla eða sýrugjafa sem bætt er í heyið. Heymeti er vothey með lágt rakastig og þar byggist verkunin á því að takmarka öndun og virkni örvera með forþurrkun og útilokun súrefnis (Bjarni Guðmundsson 1981).

Segja má að allar fóðurjurtir megi nota sem hráefni til votverkunar og sennilega hafa flestar fóðurjurtir verið prófaðar til votheysgerðar. Meginuppistaða fóðurjurta hér á landi eru fjölærar grastegundir, en einnig er verkað í vothey grænfóður af tegundum eins og einæru rýgresi, byggi og höfrum. Nokkuð er um að bændur votverki repju, hreina eða í blöndu með öðru grænfóðri, en það er í smáum stíl. Fóðurjurtir eru yfirleitt með einæran ofanjarðarvöxt, eru næringaríkar, auðmeltar og safaríkar sem grasbítar sækja í að éta. Að auki þurfa fóðurjurtirnar að uppfylla þau skilyrði sem maðurinn setur, þ.e. að þær séu auðræktanlegar, uppskerumiklar og auðveldar í verkun. Túngrösin íslensku uppfylla öll þessi skilyrði. Ekki verður hjá því komist að lýsa hér í stuttu máli byggingu fóðurjurtanna og efnasamsetningu, en hvorutveggja er nauðsynlegt að þekkja nokkur deili á þegar fjallað er um heyverkun.

PLÖNTUFRUMAN

Grunneining plantna sem og annarra lífvera er fruman, hvort heldur litið er á hana sem byggingarblokk eða miðstöð aðgerða. Skipta má plöntufrumunni í tvö meginsvæði, þ.e. frymið og frumuvegginn sem umlykur það (4. mynd). Inni í fryminu er frumukjarni, umfrymi sem inniheldur margskonar himnutengd frumulíffæri og oftast ein stór safabóla sem er forðabúr frumunnar af söltum og lífrænum sameindum í upplausn og nýtt eru í margskonar efnaskiptum (Hall o.fl. 1982). Þrátt fyrir að þessi lýsing eigi við langflestar plöntufrumur er lögun þeirra og hlutverk afar breytilegt og oft á tíðum sérhæft. Til hægðarauka er frumunum skipt upp í nokkra meginflokka eftir hlutverki þeirra. Í fóðurjurtum er venjulega nóg að skipta frumunum í 6–7 meginflokka (5. mynd), en í öðrum jurtum, eins og t.d. í trjám, eru þeir fleiri.

PLÖNTUVEFIRNIR

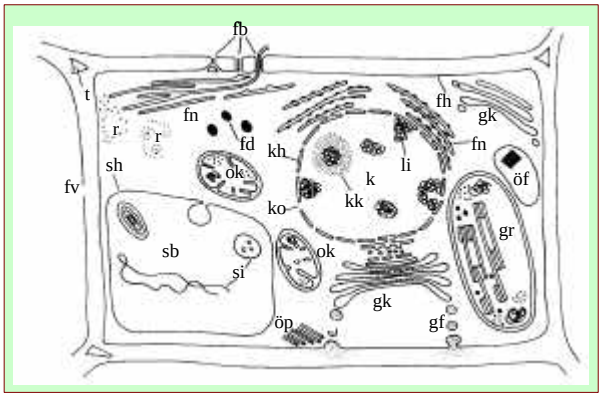
Jurtir eru byggðar upp af frumum sem eru steyptar saman með millifrumuefnum og tengjast innbyrðis með frymisbrúm (4. mynd). Meginfrumuflokkarnir mynda síðan helstu vefi plöntulíkamans, en þeir eru (Esau 1977):

Vaxtarvefur (*meristem*) samanstendur af vaxtarfrumum (5. mynd) sem eru breytilegar í stærð, lögun, þykkt frumuveggjar og fjölda safabóla (4. og 5. mynd). Þær framleiða frymi (*protoplasm*) og nýjar frumur með frumuskiptingu sem er upphafið að sérhæfingu og nýjum vefjum. Vaxtarvef er að finna í rótar- og blaðskotum.

Frumvefur (*parenchyma*) er safn lítt sérhæfðra lifandi frumna (grunnfrumna) og virkra starfsfrumna sem geta verið breytilegar í stærð og formi og eru oft með eina stóra og miðlæga safabólu (5. mynd) eða stór forðalíffæri, eins og t.d. í fræjum. Frumur frumvefjar geta vaxið og skipt sér og finnast um alla plöntuna. Frumvefir eru mjög virkir í lífeðlis- og lífefnastarfssemi plantna og í þeim fer m.a. fram ljóstillífun, margskonar forðasöfnun og hjávöxtur.

Þykkhyrnuvefur (*collenchyma*) er náskyldur frumvef sem samanstendur af frumum með ofurþykkum, en breytilegum, frumuveggjum nálægt yfirborði, eins og t.d. stönglum grasa. Hann virkar sem stoðkerfi í grænum plöntuhlutum og getur vaxið og skipt sér.

Húðvefur (*epidermis*) þekur allt yfirborð plöntunnar og er byggður upp af frumum sem eru breytilegar í



4. mynd. Frumulífæri í dæmigerðri lifandi plöntufrumu. Skammstafanir; li=litni, gr=grænukorn, fv=frumuveggur, gk=golgikerfi, gv=golgifar, t=tóm, fd=fitudropar, öf=örfylling, ok=orkukorn, k= kjarni, kh= kjarnahimna, ko=kjarnaop, kk=kjarnakorn, fb=frymisbrú, fh=frumuhimna, fn=frymisnet, r=ríbósóm, sb= safabóla, sh=safabóluhimna, si=safabóluinnlyksur. Ath. líffærahlutföll eru ekki rétt (Hall o.fl. 1982).

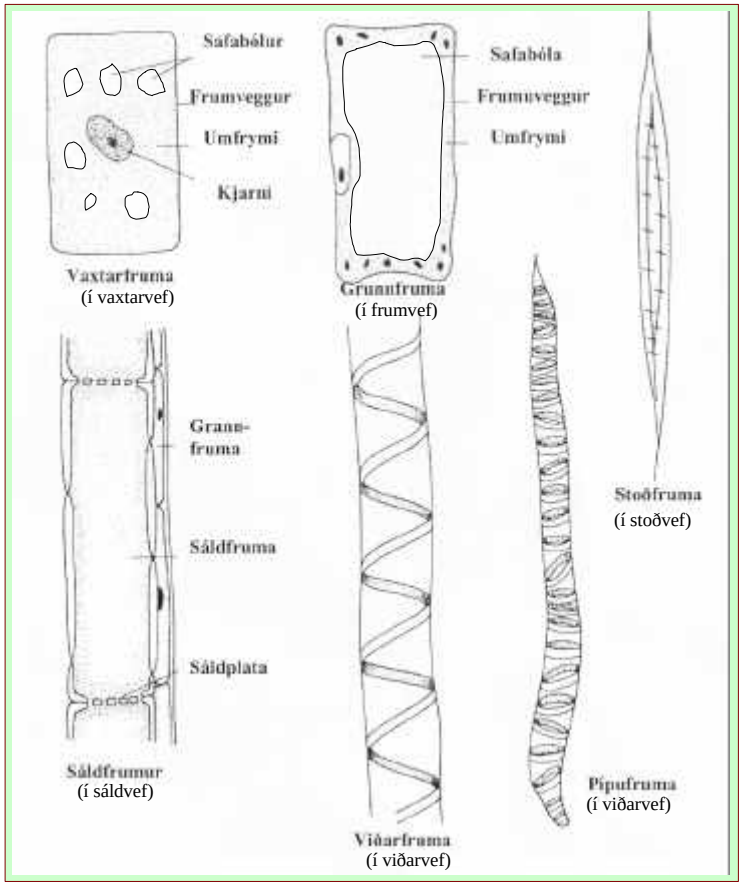
lögun, en yfirleitt flatlaga. Aðrar húðfrumur eru sérhæfðar varafrumur utan um loftop og hjávöxt (t.d. hár eða kirtla). Ytra yfirborð húðfrumnanna er yfirleitt þakið húð úr vaxi til þess að stjórna útgufun og loftun, auk þess sem það ver plöntuna fyrir hnjaski og ytra áreiti smávera.

Sáldvefur (*phloem*) er byggður upp af frumvefsþráðum sem breytast í sérhæfðar sáldfrumur (5. mynd) með sáldplötum á endum og aflöngum grannfrumum á hliðum sem saman mynda æðarkerfi plantna ásamt viðarvef. Sáldvefurinn inniheldur einnig margskonar stoðfrumur. Meginhlutverk sáldæða er að flytja uppleyst næringarefni á milli staða innan plöntunnar.

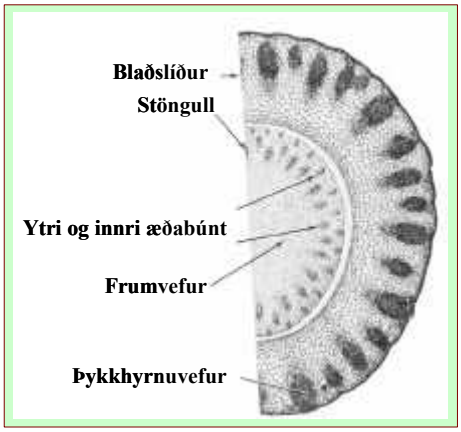
Viðarvefur (*xylem*) er líkt og sáldvefur byggður upp af frumvefsþráðum sem breytast í viðaræðar (5. mynd) sem eru holar að innan og mynda æðar, og pípufrumum (*tracheid*) sem eru lokaðar í báða enda og mynda því ekki holar æðar. Viðarvefur er oft hluti af stoðkerfi fjölærra plantna. Meginhlutverk viðarvefs er að flytja og stýra vatnsflæðinu innan plöntunnar og halda uppi vökvaspennu.

Stoðvefur (*sclerenchyma*) eru byggður upp af stoðfrumum (5. mynd) sem eru breytilegar í stærð og formi og oft með þykkan trénaðan aukafrumuvegg. Þráðlaga stoðfrumur kallast trefjar (*fiber*), en litlar hnöttóttar stoðfrumur kallast steinfrumur (*sclereid*). Þær eru aðalhluti stoðkerfis plantna og fullþroska eru þær oft án frymis. Stoðvef er að finna bæði í blöðum grasa (sérstaklega blaðröndum) og í stönglum rétt undir húðvefnum.

Saman mynda þessir vefir öll líffæri plöntunnar, rætur, blöð, stöngla og blóm (Esau 1977). Blöð og stönglar, og hugsanlega eitthvað af hálfþroskuðuð blómum fóðurjurtanna, er hráefnið sem nýtt er til heyverkunar. Til þess að líta aðeins betur á vefjasamsetningu blaða og stöngla eru hér sýnd þversnið af stöngli og blaðslíðri (6. mynd) og blaði (7. mynd) hveitis sem er nokkuð dæmigert fyrir grastegundir. Í stönglinum eru æðavefir (sáld- og viðarvefir) í búntum, oftast í tveimur röðum í kaldtempruðum grösum, umlukin stoð- eða sérhæfðum frumvef. Í stöngulmiðjum er frumvefsmassi sem með þroska grasanna leysist upp og stöngullin verður þá holur að innan nema á hnjáliðum. Stoðvefur er einnig rétt undir húðvefnum ásamt ljóstillífandi frumvef og áberandi þykkhyrnuvef. Í blöðunum ber mest á ljóstillífandi frumvef, en æðabúnt sem flytja vatn frá rótunum og afurðir tillífunar til rótanna og annarra líffæra raða sér með jöfnu millibili eftir endilöngu blaðinu. Í 2. töflu er sýnd hlutfallsleg skipting vefjaflokkana miðað við flatarmál í þversniðum blaða og stöngla í grösum. Frá fóðurfræðilegu sjónarmiði eru ýmsar gerðir virkra frumvefja í blöðum og stönglum ásamt sáldæðunum næringaríkastir, en stoðvefirnir sem sífellt verða öflugri með þroska jurtanna eru vissulega nauðsynlegur hluti gróffóðurs, en þó aðeins í hæfilegu magni.



5. mynd. Nokkrar helstu frumugerðir í plöntum (Hall o.fl. 1982).



6. mynd. Þversnið af blaðslíðri og stöngli nálægt stöngulhné í hveiti (Esau 1977).

2. tafla. Hlutfall (%) vefjaflokka í blöðum og stönglum kaldtempraðra grasa. Mælt sem flatarmál af heildarsvæði í þversniðum (±staðalskekkja).[a)]

Laufblöð	
Æðarvefir (sáld- og viðar-)	15±5
- þar af trénaðir æðarvefir	7±2
Frumvefur utan um æðarvefi	6±2
Húðvefur	23±6
Stoðvefur	6±2
Ljóstillífandi frumvefur	57±5
Stönglar	
Húðvefur, æðarvefir og stoðvefur	28±4
Frumvefur	52±3

a) Nelson 1995.

LÍFEFNAFRÆÐI PLANTNA

Jurtir eru frumbjarga, þ.e. þær búa sjálfar til allar sínar lífrænu sameindir gagnstætt dýrum sem eru ófrumbjarga og þurfa lífræn efni í fæðunni til að byggja sig upp. Jurtir þurfa engu að síður vatn, eins og aðrar lífverur, og fjölda steinefna sem þær sækja úr jarðvegi og áburði til þess að byggja upp stórsameindir próteina, kolvetna og fitu. Lífræna hlutann fá plönturnar úr afurðum ljóstillífunar, sem með sólarorkunni, koltvísýringi og vatni framleiðir kolvetni (sykrur) og súrefni samkvæmt ferlinu;

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow{\text{sólarorka}} \text{kolvetni} + O_2$$

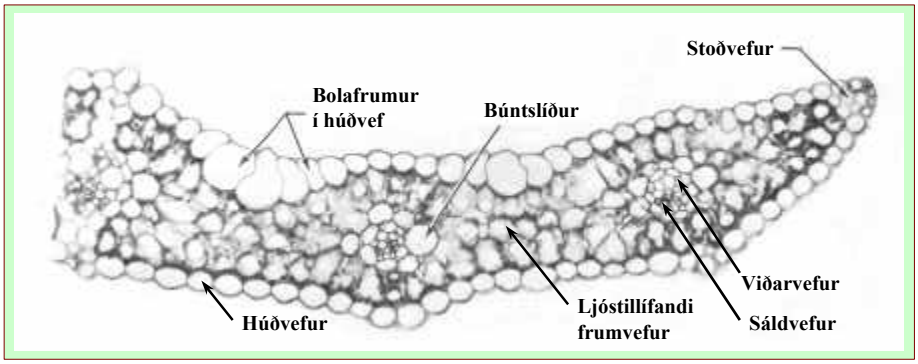
Í lifandi plöntum fara samtímis fram orkukrefjandi tillífanir til að byggja upp stórar sameindir úr smærri sameindum og orkulosandi frálífanir (öndun) sem brjóta niður stórar sameindir í smærri til þess að losa um orku fyrir nýjar tillífanir. Sykrurnar úr ljóstillífuninni eru notaðar sem kolefnisgrunnur og orkugjafi við tillífun og sem byggir upp allar gerðir lífrænna sameinda sem plönturnar þurfa.

Um leið og grasið er slegið stöðvast ljóstillífun fljótt og frálífun verður allsráðandi. Efnaniðurbrotið heldur áfram og með hjálp virkra plöntuensíma er stórsameindum kolvetna, próteina og fituefna sundrað í smærri sameindir (8. mynd). Niðurbrotshraðinn er háður hitastigi, sýrustigi, súrefni og aðgengilegu vatni. Umhverfið stýrir því hversu langt efnasundrunin nær og hverjar verða afurðir hennar. Þau ferli sem hafa hvað mesta þýðingu fyrir votheysverkunina og gæði hennar, frá því grasið er slegið og það pakkað inn, tengjast kolvetna- og próteinniðurbroti. Hér á eftir verður lýst helstu efnaflokkum fóðurjurta og þýðingu þeirra fyrir votheysverkun.

Vatn

> When the well's dry, we know the worth of water.
> Þegar brunnurinn er þurr, gerum við okkur grein fyrir verðgildi vatns.
> *Benjamin Franklin 1746*

Vatn er það efnasamband sem mest er af í öllum lífverum. Í jurtkenndum gróðri eins og fóðurjurtum er 75–90% af heildarþyngdinni vatn. Vatnið gegnir margskonar mikilvægum hlutverkum í plöntum. Fyrir utan að forma og halda plöntunni reistri með vökvaspennu er það leysir fyrir lofttegundir, sykrur, steinefni og önnur efni sem flytja þarf á milli staða innan plöntunnar. Vatnið tekur þátt í mikilvægum ensímefnaferlum í frálífunum og tillífunum sem vetnisgjafi eða vetnisgeymir. Hreyfing vatns í gegnum misgegndræpar himnur, eins og t.d. frumuhimnuna eða safabóluhimnuna, kallast osmósi (Y). Vatnsþrýstingur frumu (Y_{frumu}) eða heys (Y_{hey}) tjáir tilhneigingu vatns á einum stað til að dreifast, gufa upp eða draga til sín nærliggjandi vatn í gegnum frumuhimnur. Mælieining vatnsþrýstings er loftþrýstingseiningin bar, eða joule m^{-3} eða megapascal (MPa). Þar sem ekki er hægt að mæla beint hreyfiorku vatnssameindanna hefur 100% hreint vatn Y=0. Osmósuþrýstingur (Y_p) lausnar er því minni sem meira



7. mynd. Þversnið af laufblaði í hveiti. Bolafrumur eru sérhæfðar húðfrumur sem eru taldar stjórna verpingi blaðanna. Búntslíður umlykja æðarvefi (sáld- og viðarvef) og eru venjulega gerð úr sérhæfðum frumvef eða stoðvef (Esau 1977).

er af uppleystum sykrum og söltum í vatninu og er þess vegna alltaf neikvæð stærð í frumum. Efnin draga semsagt úr þrýstigetu vatnssameindanna. Vatnið í plöntunum hreyfir sig alltaf í átt að lægri vatnsþrýstingi.

Plöntur reyna að halda sem lengst í vatnið undir álagi, eins og t.d. í miklum þurrkum og hitum. Það gera þær m.a. með því að loka loftopum og skreppa saman til að draga úr yfirborði. Það sama gerist þegar fóðurgrös eru slegin og upptaka vatns með rót er stöðvuð. Í frumvefjum plöntunnar er mest vatn inni í safabólu frymisins. Í safabólunni er einnig að finna flest öll sölt, sykrur, amínósýrur og önnur uppleyst efni frumunnar. Vatnsþrýstingur í safabólunni er þess vegna lítill og þegar nóg vatn umlykur frumurnar leitar vatnið þangað inn og myndar þrýsting á frumuveggina sem veldur mótþrýstingi þangað til jafnvægi næst. Mótþrýstingur (Y_p) er mjög breytilegur og fer eftir styrk frumuveggjar og safaspennu nærliggjandi frumna. Mótþrýstingur er alltaf jákvæð stærð í lifandi frumum, en í dauðum frumum, eins og í viðarfrumum, er hún neikvæð. Vatnsþrýstingur lifandi frumna er summan af osmósuþrýstingi og mótþrýstingi þ.e.;

$$Y_{frumu} = Y_p + Y_p$$

Við fulla safaspennu er;

$$Y_p = -Y_p \text{ og því } Y_{frumu} = 0$$

Í byrjun frymisrofs vegna t.d. þurrka er;

$$Y_p = 0 \text{ og } Y_{frumu} = Y_p$$

Þegar grasið er slegið streymir frymisvatnið áfram út úr frumunum vegna útgufunar, en aðflutningur frá rót til frumnanna stöðvast. Vatnþrýstingur umfrymisins verður óhjákvæmilega minni, en safabólunnar og vatnið fer að streyma þaðan út og áfram í gegn um frumuvegginn í átt að minni vatnsþrýstingi. Frymið dregst saman vegna minnkandi spennu og ef þurrkurinn heldur áfram verður frymisrof og fruman drepst (Galston o.fl. 1980). Mismunurinn á vatnsþrýstingi heysins (Y_{hey}) og vatnsþrýstingi loftsins (Y_{loft}) kallast eimhungur lofts (ΔÞ) og er mælikvarði á gæði þurrksins eða þurrkhraðanum (Bjarni Guðmundsson 1981). Eimhungur loftsins er;

$$DÞ = E \times (1 - r/100)$$

þar sem E er mettunareimþrýstingur loftsins (t.d. bör eða MPa) og r er hlutfallslegt (*relative*) rakastig loftsins (%) við ákveðið hitastig. Samband eimhungurs og vatnsþrýstings andrúmsloftsins er því;

$$Y_{loft} = 0 - DÞ$$

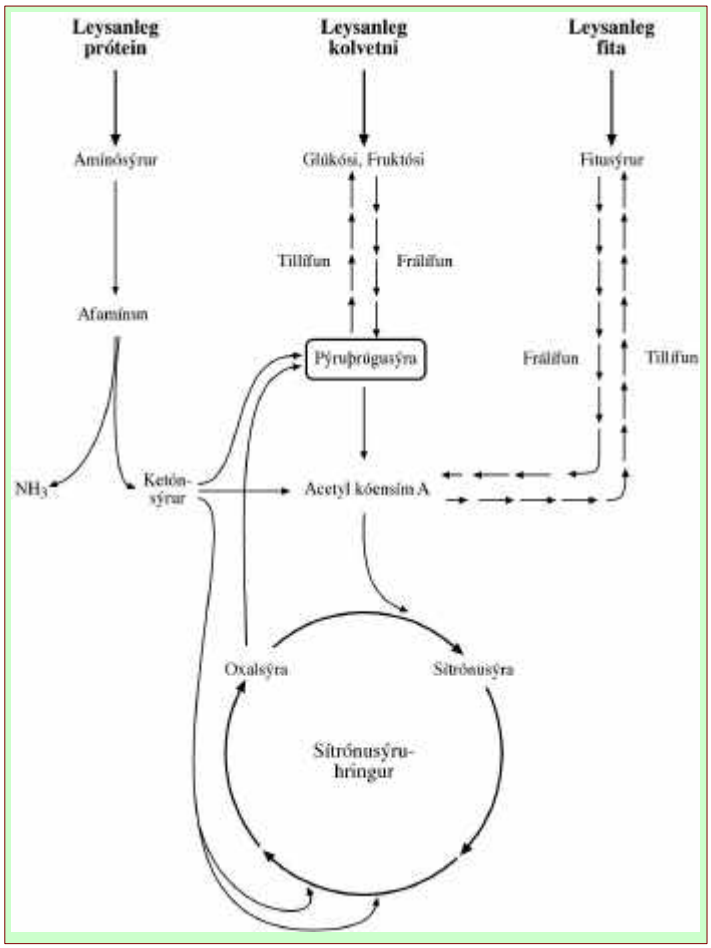
Þurrkgetan er því;

$$Y_{loft} - Y_{hey}$$

eða;

$$DÞ + Y_{hey}$$

Eftir því sem heyið þornar minnkar vatnsþrýstingur heysins sem dregur úr þurrkhraðanum við sama ΔÞ vegna þess að munurinn á milli Y_{hey} og Y_{loft} minnkar. Útgufunarflöturinn, þar sem vatn fer úr vatns- og yfir í gufufasa, flyst frá yfirborði og inn í blöð og stöngla þegar þau þorna, með þeim afleiðingum að eimhungrið minnkar einnig vegna aukins rakastigs (r), nema þurrkurinn og blásturinn er þeim mun meiri. Þetta hvorutveggja þýðir að sífellt erfiðara verður að þurrka heyið því meira sem það



8. mynd. Afdrif leysanlegra stórsameinda við loftháða frálífun í plöntufrumum.

þornar. Rakajafnvægi er náð þegar $Y_{loft} = Y_{hey}$ sem er venjulega þegar þurrefnisstyrkur heys í hlöðu er u.þ.b. 80–85% við íslenskar aðstæður.

Það er mjög tegundabundið hversu hratt plöntur þorna eftir slátt og fer það eftir vefjasamsetningu grasanna og þykkt vaxhúðar utan á húðvef sem takmarkar loftstreymi inn í blöð og stöngla. Bjarni Guðmundsson (1981) hefur rannsakað þurrkhraða þriggja grastegunda (9. mynd). Þurrkhraði vallarfoxgrass er mun minni en í snarrót og vallarsveifgrasi, vegna þess að hlutfall stöngla af heildargrasmassanum er hæst í vallarfoxgrasinu. Bjarni Guðmundsson rannsakaði einnig þurrkhraða blaða annars vegar og stöngla hins vegar í vallarfoxgrasi (10. mynd). Þar kom í ljós að þurrkhraði stöngla er mun minni en blaða. Útgufunarhraði vatns er minni í stönglum en laufblöðum vegna færri loftopa, meiri þykktar og efnismeiri vefja með þykkum frumuveggjum. Þetta er óheppilegt því að verðmætustu fóðurefnin eru í blöðunum og þeim hættir því til að tapast í þurrkinum vegna molnunar.

Kolvetni

> Carbohydrate is not a very exact term.
> Kolvetni er ekki ýkja nákvæmt hugtak.
> *Robert C. Bohinski 1983*

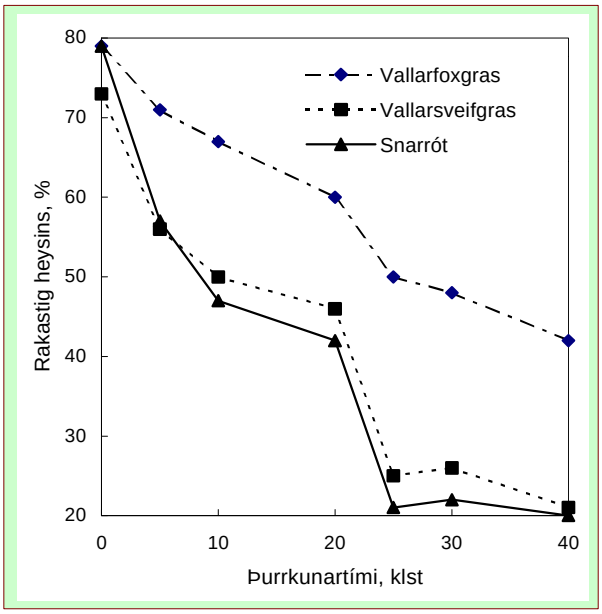
Stærsti þurrefnishluti plantna, eða 60–90%, samanstendur af kolvetnum (Hall o.fl. 1982). Kolvetnunum má skipta upp í sykrur eða formlaus kolvetni (*non-structural carbohydrades*), sem geyma aðgengilegasta orkuforða plöntunnar, og formbundin kolvetni (*structural carbohydrades*), sem eru auk ligníns uppistaða trénis og saman mynda stoðkerfi plantna. Formlausu kolvetnin eru í umfrymi og safabólum frumnanna, en formbundnu kolvetnin eru aðalhluti frumuveggjanna.

Þrátt fyrir að bæði prótein og fituefni losi orku við frálífun er aðalorkuforði plantna bundin í kolvetnum. Grunnæti oxunar eru einsykrur sem fara í gegn um sk. sykurrof (glukólysu) sem er loftfirrð sundrun þrúgusykurs (glukósa) og ávaxtasykurs (fruktósa) í pýruþrúgusýru og fer fram í umfryminu. Þetta ferli er sameiginlegt loftháðum og loftfirrðum ferlum sem báðir nota pýruþrúgusýru sem grunn í sínum efnaskiptum (11. mynd).

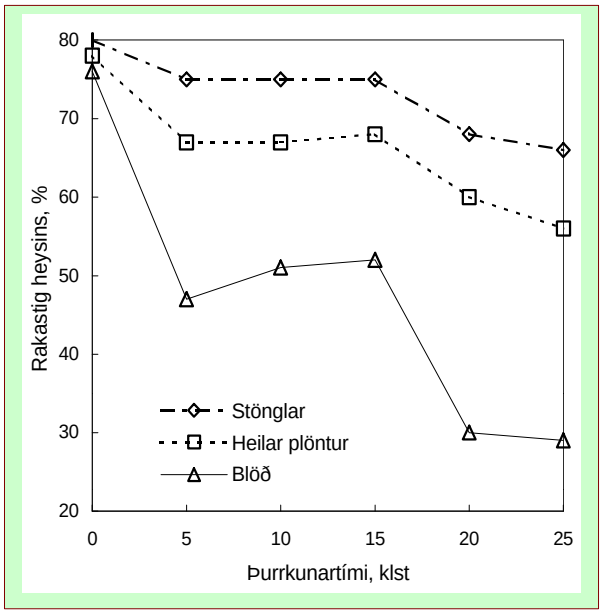
Ef súrefni er til staðar er pýruþrúgusýrunni breytt í acetyl kóensím A sem keyrir sk. sítrónusýruhringrás áfram. Út úr hringrásinni kemur mikið magn af mjög orkuríkum sameindum, þ.e. ATP, NADH og $FADH_2$. Síðan er NADH og $FADH_2$ í gegn um öndunarkeðju breytt í ATP (adenósín-þrífosfat) eins og kemur fram á 11. mynd. ATP er aðalorkugjafi í líffræðilegum efnahvörfum og er nauðsynlegt í flestum loftháðum tillífunum. Fullkomin öndun glukósasameindar er hægt að draga saman þannig:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2872\ kJ$$

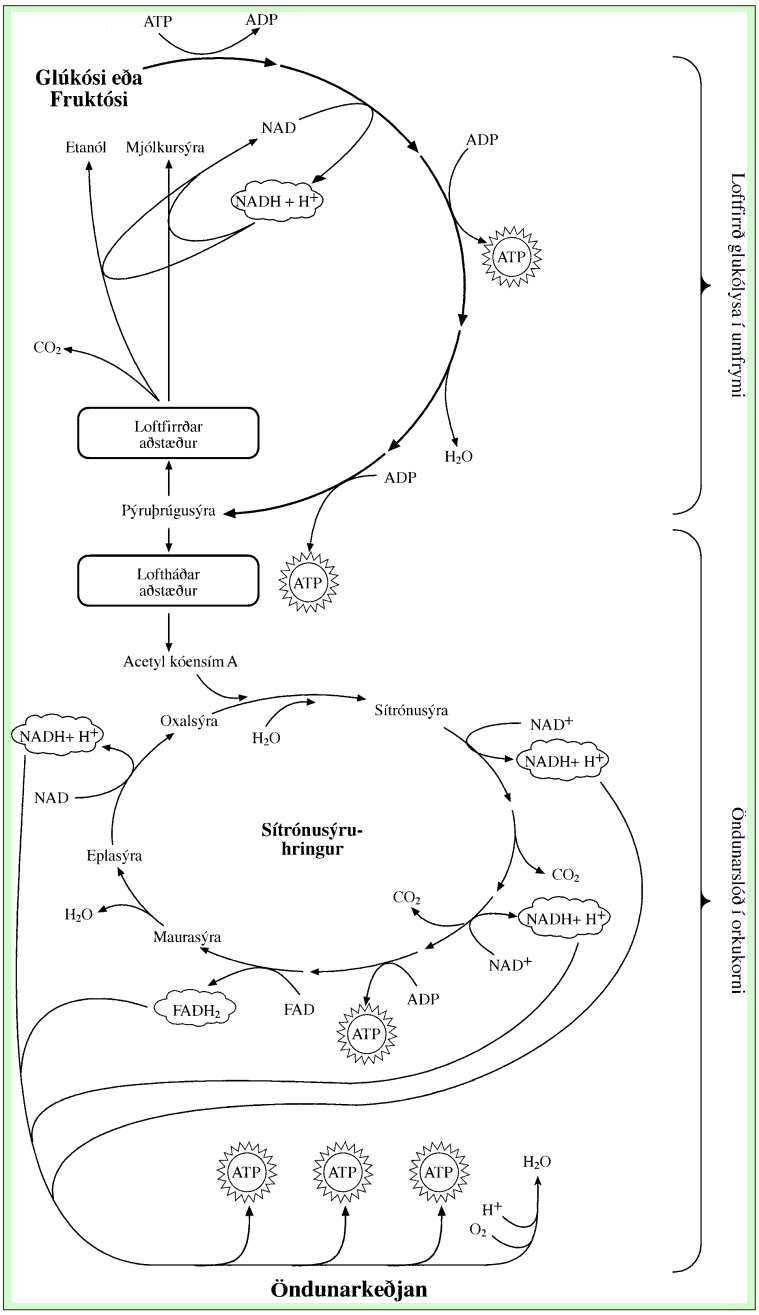
Glukósi+súrefni → koltvísýringur+vatn+hiti



9. mynd. Þurrkhraði mismunandi grastegunda. (Eftir Bjarna Guðmundssyni 1981).



10. mynd. Þurrkhraði blaða og stöngla í vallarfoxgrasi. (Eftir Bjarna Guðmundssyni 1981).

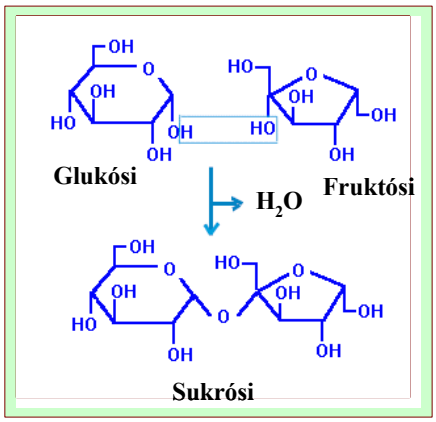


11. mynd. Frálífun einsykrunga í plöntufrumum við loftfirrðar og loftháðar aðstæður. ATP sólirnar eru orkuríkar sameindir sem verða til og eru nauðsynlegar í margskonar tillífunum innan plöntufrumnanna.

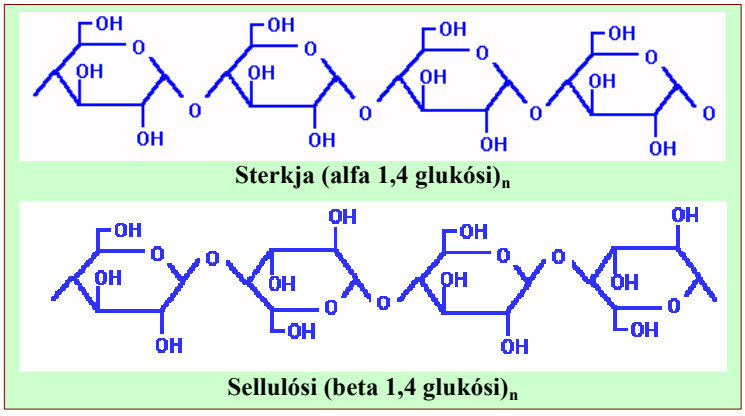
Þetta ferli skilar sem svarar 36–38 sameindum af ATP, auk hita. Í dauðum eða deyjandi plöntufrumum er þessi orka töpuð.

Við vissar aðstæður verður súrefnisskortur í lifandi plöntufrumum með þeim afleiðingum að sítrónusýruhringrásin og öndunarkeðjan stöðvast og þá er pýruþrúgusýrunni fyrst og fremst breytt í etanól, en hugsanlega einnig mjólkursýru og CO_2 með þar til gerðum ensímum og orku frá NADH úr glukólysunni. Þessi efni safnast upp við þessar aðstæður (McDonald o.fl. 1991).

Formlaus kolvetni í grösum kaldtemprað beltisins eru mest hexósar (6 kolefna hringar) einsykrurnar glukósi og fruktósi, tvísykurinn súkrósi (12. mynd) sem er aðallega í sáldæðum og fruktanar sem eru hópar fjölsykra og aðalforðasykrur grasa kaldtemprað beltisins (Chatterton o.fl. 1989). Fruktanar, sem eru mislangar fruktósakeðjur með glukósaenda, safnast fyrir í safabólum frumna og hafa þess vegna áhrif á vatnsþrýsting þeirra og eru taldir gegna mikilvægu hlutverki í kuldaþoli plantna og í ljóstillífun við lágt hitastig (Pontis 1989). Tvísykran melibiosi, þrísykrurnar raffínosi og



12. mynd. Tvísykrungurinn sukrósi er gerður úr glukósa og fruktósa og er algengasta form sykra sem flyst á milli staða innan plöntunnar. Þess vegna finnst hann í mestu magni í sáldæðunum.



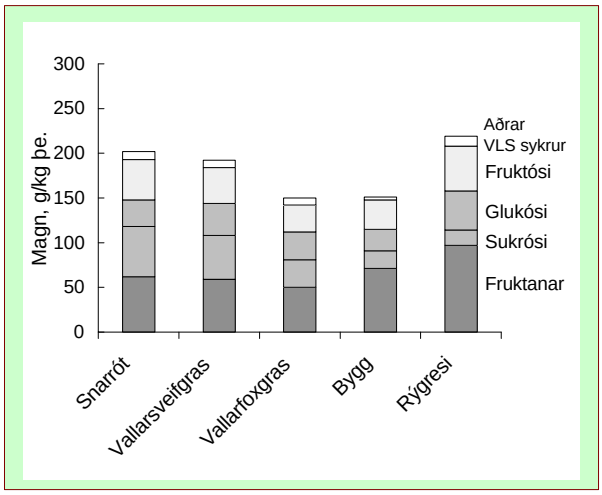
13. mynd. Sterkja og sellulósi eru hvorutveggja glukósakeðjur þar sem einungis tengingar eru mismunandi.

ketosi og fjórsykran stachyosi finnast einnig í grösum í minna magni. Allar þessar sykrur eru leysanlegar í köldu vatni og hafa því sameiginlega verið kölluð „vatnsleysanlegar sykrur“ (VLS). Af sykrum sem eru lítið sem ekkert vatnsleysanlegar er sterkjan algengust (13. mynd). Sterkja er gerð úr amylósa og amylópektínum sem eru misgreinóttar glukósakeðjur (glukön). Hún er mikilvæg forðasykra í belgjurtum og grösum heittempraða beltisins. Þar gegnir hún svipuðu hlutverki og fruktanar í grösum kaldtempraða beltisins. Sterkja finnst aðallega í fræjum algengustu fóðurgrasa kaldtempraða beltisins, en einnig í allnokkru magni í öðrum líffærum, eins og t.d. laufblöðum (Chatterton o.fl. 1989). Sterkja nýtist lítið sem orkugjafi við frumgerjun votheys vegna skorts á rofensíminu amylasa (Pattersson 1988). Sterkja getur hins vegar nýst í síðari gerjunarferlum. Einnig eru vísbendingar um að fruktanar sumra grasa nýtist illa í upphafi frumgerjunar (Lättemäe 1997).

Magn sykra í fóðurgrösum er háð plöntutegundum, hitastigi og tegundum kolefnisefnaskipta plöntunnar (C_3 eða C_4 kolefnishringrás). Belgjurtir eru með mun lægra heildarmagn af formlausum kolvetnum en grös kaldtempraða beltisins og eru þau yfirleitt á bilinu 6–10% af þurrefnisþyngd þeirra. Í grösum kaldtempraða beltisins (C_3 grös) er hlutdeildin á bilinu 10–30% og fer það eftir því hitastigi sem grösin vaxa upp við (Nelson 1995, Chatterton o.fl. 1989, Bjarni Guðmundsson og Ásdís Helga Bjarnadóttir 1995), úrkomu (Woolford 1984), dægursveiflum (Pettersson 1988) og tegundum og arfgerðum plantna (McDonald o.fl. 1991).

Talsverðar mælingar á vatnsleysanlegum kolvetnum og samsetningu þeirra hafa verið gerðar í íslenskum grösum í tengslum við rannsóknir á votverkun heys (sjá 1. töflu). Á 14. mynd eru sýndar niðurstöður úr VLS mælingum í hirðingarsýnum í fimm heygerðum á Möðruvöllum sumarið 1996. Talsverður munur er á heildarsykrumagni á milli heygerðanna sem stafar af mismunandi þurrefnisstyrk, þroskastigi grasanna eða eðlislægum tegundamun. Í forþurrkaða heyinu er mest af fruktönum og sukrósa, en í grænfóðrinu (byggi og rýgresi) er mest af fruktönum. Þriggja ára rannsókn á Hvanneyri með fjórum grastegundum sem slegnar voru á þremur mismunandi þroskastigum sýndi talsverðan tegundamun á heildarsykrumagni (þ.m.t. sterkju). Árferðismunurinn var þó enn meiri en munurinn á milli tegunda. Sykrustyrkur vallarfoxgrass, vallarsveifgrass og túnvinguls mældur sem magn sykra í vatni jókst með þroska grasanna (Thorsteinsson o.fl. 1999). Í rannsókn Þóroddar Sveinsson og Bjarna E. Guðleifssonar (1999) á áhrifum sláttutíma vallarfoxgrass var sykrustyrkurinn, bæði á þurrefnis- og heildargrunni, mestur í snemmslegnasta heyinu. Sykrustyrkur rýgresis eykst með vexti grasanna á blaðstigi, en fer síðan minnkandi. Skoskar rannsóknir sýndu að þar í landi er sykrustyrkur vallarfoxgrass, hávinguls og axhnoðapunts mestur í maí/júní og aftur í júlí/ágúst (eftir McDonald o.fl. 1991). Út frá samantektum erlendra rannsókna má álykta að sykrumagn grasa aukist yfirleitt með þroska fram að blómgun, en fer þá aftur minnkandi (Pettersson 1988). Þetta er þó ekki algilt.

Friðrik Pálmason (1970) mældi heildarmagn vatnsleysanlegra sykra í grassýnishornum úr áburðar-, sláttutíma- og grastegundatilraunum, auk nokkurra verkaðra töðusýnishorna. Sykrumagn var afar breytilegt í sýnunum eða frá 60–400 g VLS í kg þurrefnis. Minnst var af VLS í grasi af fósfórsnauðu sandtúni af fyrri slætti, en mest í mýrartúni á Hvanneyri sem fékk lítinn köfnunarefnisskammt (60 kg N/ha). Sykrumagn í há er um helmingi meira en í fyrri slætti af sama túni og það eykst eftir því sem líður á haustið. Kalsíum, fosfór og kalí auka sykrumagn grasa, en köfnunarefni, sérstaklega í ofurskömmtum, lækkar sykrumagnið.



14. mynd. Meðalmagn vatnsleysanlegra sykra í 5 grastegundum fyrstu tvo dagana eftir pökkun (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999).

3. tafla. Mikilvæg kolvetni og aðrir trénisþættir í íslenskum grösum.[a)]

Flokkur	Spönn, g/kg þe.
Formlaus kolvetni	
Glukósi	24–44
Fruktósi	30–50
Sukrósi	15–56
Raffínósi	2–10
Stachyósi	2–10
Glukanar (sterkja)	12–28
Fruktanar	50–97
Alls	135–295
Formbundin kolvetni og aðrir trénisþættir[b)]	
NDF	614–722
ADF	292–408
Hemisellulósi	266–371
Sellulósi	265–341
Lignín	24–51
Hrátréni	126–352

a) Byggt á Þóroddi Sveinssyni og Bjarna E. Guðleifssyni 1999, Braga L. Ólafssyni 1997, Gunnari Ólafssyni 1979, Thorsteinsson, Gudmundsson og Brynjolfsson 1999.

b) NDF = Hemisellulósi + lignín + trefjabundið N + sellulósi + þvottheld steinefni.
ADF = NDF – hemisellulósi, hrátréni = sápuhelt lignín + trefjabundið N + sellulósi (heimild: Fisher, o.fl. 1995).

Aðalbyggingarefni frumuveggjarins er gert úr formbundnum kolvetnum, sem eru annars vegar sk. millifrumuefni (*matrix*) sem samanstendur mest af hemisellulósa og pektínefnum og hins vegar kristölluðum trefjaefnum sem eru aðallega sellulósi, sem auk ligníns bindur stoðkerfi plantna saman. Hemisellulósi hefur nokkuð tilviljanakennda hringlaga byggingu gerða úr pentósa (5 kolefna hringur) einsykrunum xylósa og arabínósa, en einnig glukósa, mannósa og galaktósa. Sellulósi er það kolvetni sem mest er af í náttúrunni og er myndaður af glukósakeðjum líkt og sterkjan (13. mynd). Lignín er ekki kolvetni, en finnst alltaf í tengslum við sellulósa og önnur formbundin kolvetni í plöntum. Hlutverk ligníns er að líma saman sellulósaþræði frumuveggjarins, auk þess sem það er talið hlífa frumunum fyrir margskonar ytra áreiti (Hall o.fl. 1982). Lignín er ómeltanlegt og hefur áhrif á leysanleika formbundinna kolvetna, sérstaklega sellulósa. Formbundnu kolvetnin eru í mestu magni í viðar- og stoðvefjum plöntunnar, en þar eru frumuveggir hvað þykkastir. Sykrueiningar þessara kolvetna eru ekki aðgengilegar sem orka fyrir gerjun í votheyi eða vömb jórturdýra nema tilkomi vatnsrof (hydrolýsa) af völdum ensíma eða sýru og sem splundrar þeim í grunneiningar sínar eins og glukósa, galaktósa, mannósa, xylósa eða arabinósa (McDonald o.fl. 1991). Forbundin kolvetni nýtast þess vegna að hluta til sem orkugjafi við votheysverkunina, aðallega hemisellulósi og einnig eru þau talsverður hluti þeirra kolvetna sem grasbítar geta nýtt sem orkugjafa. Hlutdeild formbundinna kolvetna eykst í réttu hlutfalli við þroskastig fóðurjurtanna. Meltanleiki formbundinna kolvetna minnkar hins vegar með auknum þroska og meltanleiki þeirra er einnig breytilegur eftir tegundum fóðurjurta.

Lítið hefur verið gert af því að mæla formbundin kolvetni í íslenskum grösum. Þó mældi Gunnar Ólafsson (1979) hrátréni ýmissa túngrasa á mismunandi þroskastigi og Bragi Líndal Ólafsson (1997) hefur birt niðurstöður Van Soestgreiningar á helstu trénisþáttum fjögurra túngrasa á mismunandi þroskastigum. Í 3. töflu er yfirlit yfir niðurstöður mælinga á einstökum kolvetnum og trénisþáttum í íslenskum grösum.

Hráprótein

> Proteins are ubiquitous and indispensable …
> Prótein eru hvarvetna og ómissandi …
> *Hall, Flowers og Roberts 1982*

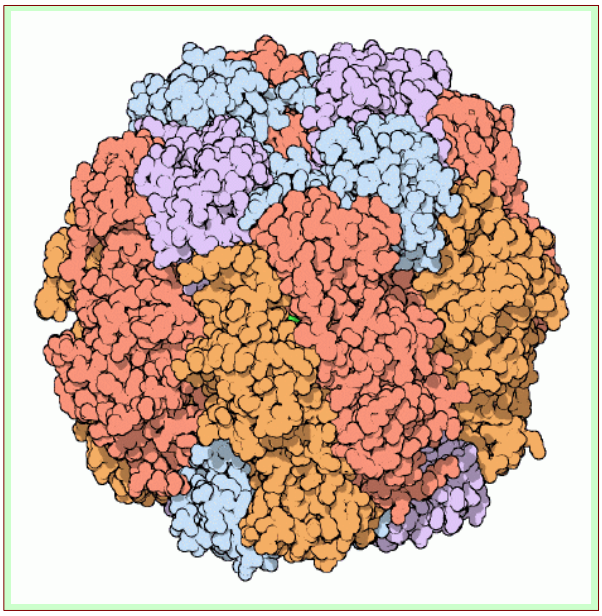
Um 8–25% af þurrefnishlutdeild fóðurjurta er sk. hráprótein. Í fersku lifandi grasi er um 75–90% hrápróteinsins raunveruleg prótein. Afgangurinn eru peptíðar, lausar amínósýrur, amíð, úrefni, kjarnasýrur, blaðgræna, nítröt og ammoníum. Sameiginlegt með þessum sameindum er að þau innihalda nitur eða köfnunarefni (N). Köfnunarefni getur verið um 1–4% af þurrefni grasa.

Prótein eru mjög stórar og flóknar hnatt- eða þráðlaga sameindir. Grunneiningar allra próteina (*primary structure*) eru amínósýrur sem eru 20 talsins í plöntum og er arginín í mestu magni (4. tafla). Amínósýrurunur vefjast venjulega um hvirfingu (*helix*) sem er sk. annarsstigs form próteina (*secondary structure*). Hvirfingarnar leggjast síðan saman og mynda sérstakt mynstur og er það kallað þriðjastigs form próteina (*tertiary structure*). Fjórðastigs form er einnig til í stórum próteinum sem samsett eru úr fleiri en

4. tafla. Amínósýrur sem mynda plöntuprótein. [a)]

1. Grunnamínósýrur
   - Lysín
   - Arginín
   - Histidín
2. Keðjumyndandi amínósýrur
   - Glysín
   - Alanín
   - Valín
   - Leusín
   - Ísóleusín
3. Amínósýrur sem innihalda brennistein
   - Systín
   - Meþíonín
4. Tvíkarboxýlsýrur
   - Aspartiksýra
   - Glutamiksýra
5. Hýdroxýl amínósýrur
   - Serín
   - Þreonín
6. Hringtengdar amínósýrur
   - Fenylalanín
   - Tyrosín
   - Tryptofan
7. Iminósýrur
   - Prolín
8. Amíð
   - Asparagín
   - Glutamín

a) McDonald o.fl. 1991.



15. mynd. Próteinið sem er brúin á milli hins líflausa og lifandi heims er ensímið Ribulose 1,5 bisphosphate carboxylase (RuBPCase). (Mynd frá <www.rcsb.org/pdb/molecules/pdb11_1.html>).

einni fjölliða amínósýrurunu. Amínsósýrusamruninn fer fram í ríbósómunum (4. mynd). Ólíkt dýrapróteinum, sem eru að mestu byggingarefni, eru plöntuprótein að megninu til margskonar ensím, efnahvatar, sem hvetja flest allar efnabreytingar í plöntum. Þó eru prótein einnig mikilvægur byggingarhluti allra frumuhimna í plöntum. Ensímin eru mest í kringum frumuhimnur og í frymisneti frumnanna (4. mynd). Það er að minnsta kosti eitt ensím fyrir hvert þrep við öndun, ljóstillífun, afritun erfðavísa, upplýsingavinnslu og frumubyggingu, svo eitthvað sé nefnt. Um 75% af próteini í laufblöðum er að finna í grænukornunum og er um helmingur þess eitt ensím, *ribulose 1,5 bisphosphate carboxylase* (RuBPCase) sem er það prótein sem mest er af í náttúrunni (15. mynd).

Strax og fóðurjurtin er slegin stöðvast próteintillífun, en próteinrof af völdum ensíma heldur áfram. Rofhraðinn er mjög háður tegundum fóðurjurta, sýrustigi, þurrki og hitastigi. Í fóðurgildismælingum er köfnunarefni mælt og það margfaldað með stuðlinum 6,25 sem er hlutfall köfnunarefnis í hráprótein. Hráprótein er því summa próteina og allra annarra köfnunarefnissambanda í fóðurjurtinni. Fóðurfræðileg gæði hráprótein og próteinrof er sjaldnar rannsakað. Rannsóknir á áhrifum forþurrkunar rúlluheys á niðurbrotshraða (leysanleika) próteins í vömbum mjólkurkúa varpa ljósi á niðurbrot próteins í rúlluheyi og verða niðurstöður þeirra kynntar í VII. kafla hér á eftir. Í tengslum við rannsóknir á votheyi er þó oft ákvarðað N bundið sem ammoníum (sjá 1. töflu) til þess m.a. að meta gæði verkunarinnar. Íslenskar rannsóknir hafa mælt hlut ammóníum bundins N af heildar-N á bilinu 0,5–3,5% um og við pökkun. Ammóníum mælist mest í blautu grænfóðri sem legið hefur óhreift í sláttuskára í einhvern tíma fyrir pökkun og minnst í vel forþurrkuðu rúlluheyi (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1996, 1999).

Fituefni

Fituefni (*lipid*) er ósamstæður hópur lífrænna mjög orkuríkra efnasambanda sem eiga það sameiginlegt að vera vatnsfælin, en leysanleg í ýmsum lífrænum leysiefnum. Auk fitu teljast olía, vax og sterólar til fituefna. Fituefni gegna að mörgu leyti svipuðu hlutverki og kolvetnin í plöntum, þ.e. sem orkugjafi og byggingarefni. Algengasta

fituefnið í náttúrunni er þríglyseríð (*triglyceride*) sem er þríester glyseróls með þremur fitusýrum (Hall o.fl. 1982). Fitusýrur eru gerðar úr mislöngum kolefnarunum og algengasta fitusýran í grösum er fjölómettaða omega-3 línólensýra (C18:3) og er hún oft 0,8–1,5% af þurrefnishlutdeild grasa (Dewhurst o.fl. 2001). Fitusýrur eru í mesta magni í grösum snemma vors og seint á haustin. Fituefnin eru oft aðalorkugjafinn í frumuefnaskiptum og sumar tegundir plantna geyma orkuforða sinn í olíum í stað sterkju. Í hverju grammi af fitu er bundin ríflega helmingi meiri orka en í grammi af kolvetnum, en ólíkt þeim flyst hún ekki á milli frumna. Fita er aðalefni frumuhimna, ásamt próteinum. Himnurnar stjórna flæði efna inn og út um frumulíffærin og milli frumna. Himnufita er frábrugðin venjulegri fitu að því leyti að hún er að hluta til fituleysanleg og hluta til vatnsleysanleg sem er nauðsynlegur eiginleiki til að hún hleypi í gegnum sig bæði fitu- og vatnsleysanlegum efnum.

Lítið hefur verið skrifað um þýðingu fituefna fyrir votheysverkun. Þau eru samt um 3–5% af þurrefnishlutdeild fjölærra grasa, en um helmingi minni í korntegundunum, byggi, hveiti, höfrum og rúgi. Magn fituefna er þó talsvert tegundabundið. Fitusýrur eins og línólensýra eyðist við forþurrkun vegna loftháðrar frálífunar, en við loftfirrðar aðstæður í votheyi breytist fitusýrusamsetningin lítið (Dewhurst og King 1998). Flest fituefnin eru meltanleg, þau eru brotin niður með hjálp ensíma (lípasa) og nýtast sem orkugjafar í gerjunarferlum í vömbum grasbíta og sveppa í votheyi.

Lífrænar sýrur

Lífrænar sýrur og sölt þeirra eru afurðir efnaskipta í plöntufrumum og örverum. Í votheyi má flokka þær í plöntusýrur, sem eru aðallega óstöðug milliefni í efnaskiptum og orkubúskap lifandi plantna (sjá t.d. 11. mynd), og gerjunarsýrur, sem verða til og safnast fyrir við gerjun á deyjandi eða dauðu lífrænu hráefni, aðallega af völdum örvera. Þessar sýrur verða til við frálífun kolvetna, fitu og próteina eða amínósýra og nýtast misjafnlega vel fyrir vambarörverur og búfé.

Hlutdeild plöntusýra í lifandi grösum er venjulega á bilinu 2–6% af þurrefni, en 6–8% í belgjurtum (Woolford 1984). Að magni til er mest af epla-, sítrónu- og kítínsýru (McDonald o.fl. 1991). Á Íslandi hefur kítínsýra ekki verið mæld í votheyi. Hins vegar sýna íslenskar rannsóknir að í sumum tegundum fóðurgrasa er oxalsýra í miklu magni. Þetta er sérstaklega áberandi í vallarfoxgrasi, en einnig er talsvert magn af oxalsýru í vallarsveifgrasi, háliðagrasi og rýgresi, en er vart mælanlegt í byggi og snarrót (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999). Pýruþrúgusýran mælist einungis í litlu magni og er samkvæmt fjölda mælinga í rúlluheyi á Möðruvöllum um 0,1% af þurrefni þrátt fyrir að vera lykilafurð glukólýsunnar og upphafið í flest öllum orkutengdum loftháðum eða loftfirrðum efnaskiftum (8. og 11. mynd).

5. tafla. Lífrænar sýrur í rúlluvotheyi á pökkunardegi (±staðalfrávik).[a)]

	g/kg þe.
Plöntusýrur	
Eplasýra	8,48±2,42
Fumarsýra	0,34±0,13
Maurasýra	0,71±1,51
Pýruþrúgusýra	0,76±0,66
Oxalsýra	4,73±3,14
Shikimiksýra	0,81±0,38
Sítrónusýra	4,26±3,29
Gerjunarsýrur	
Ediksýra	1,94±3,61
Mjólkursýra	0,95±1,17
Própíónsýra	0,00±0,00
Smjörsýra	0,00±0,00

a) Bygg á gagnasafni úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum 1992–1996 (n=62).

Hlutdeild gerjunarsýra er lítil í lifandi plöntum, en þær safnast hratt fyrir við loftfirrða öndun örvera ef hagstæð skilyrði eru fyrir hendi og getur hlutdeild þeirra þá náð allt að 25% af þurrefnisþyngd. Mikilvægasta gerjunasýran er mjólkursýra, en ediksýra sem myndast oft í miklu magni er ekki talin eins æskileg í fóðurverkun. Smjörsýra í votheyi er vísbending um óæskilega gerjun. Í 5. töflu má sjá þær plöntu- og gerjunarsýrur sem mældar hafa verið í fersku íslensku hráefni.

Lífrænar sýrur hafa mikil áhrif á útkomu votverkunarinnar vegna áhrifa þeirra á buffer- (dempara-) eiginleika heysins. Bufferhæfni er sá eiginleiki að standast breytingar á sýrustigi. Því meiri sem bufferhæfnin er því meira er viðnám við öllum sýrustigsbreytingum. Af þessum sökum er mikil bufferhæfni talin óæskileg í hefðbundinni

votheysverkun. Bufferhæfni er venjulega mæld sem millí-jafngildi (mE) basa sem þarf til þess að breyta sýrustigi í einu grammi þurrefnis frá pH 4 til pH 6 (t.d. McDonald o.fl. 1991). Bufferhæfni lífrænna sýra er þó mjög breytileg, en í grófum dráttum er bufferhæfni gerjunarsýra mun meiri en plöntusýra. Talið er að af bufferhæfni fóðurjurta sé 68–80% vegna lífrænna sýra, súlfata, nítrats og klóríðs, en einungis 10–20% sé vegna próteina. Bufferhæfni votheys er þess vegna í beinu samhengi við styrk lífrænna sýra í hráefninu (Woolford 1984).

Erlendar rannsóknir sýna að bufferhæfni grasa fer minnkandi með auknu þroskastigi þess (Woolford 1984). Íslensk rannsókn á áhrifum sláttutíma (þroskastigs) á verkun vallarfoxgrass í rúllum sýndu að styrkur plöntusýra og hrápróteins minnkaði hratt frá því rétt fyrir skrið þar til 10 dögum eftir miðskriðtíma, eða 19 dögum seinna. Þetta var talið hafa áhrif á bufferhæfni hráefnisins, sem þó var ekki mæld, og er það talið skýra ólíka verkun í rúllunum eftir sláttutímum (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999). Á Íslandi hefur bufferhæfni fóðurjurta verið mæld í nokkrum af mörgum rannsóknum Bjarna Guðmundssonar. Rannsóknir hans benda til þess að bufferhæfni fjölærra íslenskra fóðurgrasa sé svipuð og mælst hefur erlendis (t.d. McDonald o.fl. 1991). Bufferhæfnin í fjölærum grösum er venjulega á bilinu 200–400 mE kg/þurrefni og tengist þurrkstigi og þroskastigi við slátt (Bjarni Guðmundsson og Ásdís Helga Bjarnadóttir 1995, Björn Þorsteinsson o.fl. 1993).

Steinefni

Aska er samheiti þeirra föstu efna sem eftir verða þegar plöntur eru brenndar. Uppistaða öskunnar eru steinefni sem mörg hver gegna mikilvægum hlutverkum í vexti og þrifum plantna og grasbíta, m.a. sem fylgiþættir ensíma. Askan er venjulega um 8–12% af þurrefnishluta grasa og í 6. töflu gefur að líta mikilvægustu steinefnin. Lítið er vitað um áhrif einstakra steinefna á verkun votheys. Þekkt er að mjólkursýrugerlar nota mangan (Mn) sem fylgiþátt fyrir mörg lífsnauðsynleg ensím í stað magnesíums í öðrum lífverum. Mjólkursýrugerlar virðast þurfa mangan til þess að geta vaxið og þolað laust súrefni. Plöntusafi örvar mjög vöxt mjólkursýrugerla, en hann er einmitt mjög Mn ríkur (McDonald o.fl. 1991). Zink er einnig nauðsynlegur fylgiþáttur loftfirrðra afvetnara (ensíma) sem breyta pýruþrúgusýru í mjólkursýru og etanól (Hall o.fl. 1982). Hlutdeild ösku hefur áhrif á meltanleika fóðursins. Sérstaklega hefur kísill (Si) verið rannsakaður í þessu sambandi, en hann er mikilvægur fyrir stoð- og varnarkerfi grasa og um leið hefur hann neikvæð áhrif á meltanleika og hugsanlega lystugleika grasanna (Van Soest og Jones 1986). Grös eru þekktir kísilsafnarar, en snarrótin er samt sú tegund hér á landi sem safnar hvað mest kísli í sig og hefur mælst vera með 2,7–3,8% af þurrefnishlutdeild (Hilmar Ágústsson og Þóroddur Sveinsson, óbirtar niðurstöður).

6. tafla. Dæmi um magn helstu steinefna í íslenskum túngrösum (tilraun nr. 5-45, Akureyri).[a)]

Steinefni		g/kg þe.
Kalí	K[b)]	23,167
Kísill	Si	22,333
Kalsíum	Ca[b)]	3,467
Fosfór	P	2,533
Brennisteinn	S	2,067
Magnesíum	Mg[b)]	1,633
Járn	Fe[b)]	0,151
Mangan	Mn[b)]	0,109
Aluminíum	Al	0,070
Zink	Zn[b)]	0,020
Kopar	Cu[b)]	0,005
Samtals		5,555

a) Bjarni E. Guðleifsson og Evald Schung 1990.
b) Nauðsynleg mörgum ensímum sem fylgiþáttur.

III. ÖRVERUR

> "Microbes are the foundation of life on Earth."
> „Örverur eru undirstaða jarðlífs."
> *American Society for Microbiology 2000*

Grundvöllur góðrar votheysverkunar er að hafa stjórn á örveruflóru heysins. Verkun heys með hátt vatnsinnihald byggist á hagnýtingu ákveðinna örvera til að skapa geymslufestu og lágmarka verkunartap. Í heyi með lágt vatnsinnihald er öll gerjunarvirkni örvera verulega skert. En um leið og plastumbúðir utan um vothey eldast eða laskast af einhverjum orsökum eða eru fjarlægðar fyrir gjafir eykst örveruvirknin aftur og getur á stuttum tíma valdið miklu tapi næringarefna. Þetta á ekki síst við baggavothey sem hefur litla þéttni og mikið yfirborð miðað við rúmmál.

Hér verður greint frá mikilvægustu flokkum örvera og þýðingu þeirra á votheysverkunina. Þessi kafli er að mestu byggður á McDonald o.fl. (1991), nema annað sé tekið fram.

ÁSÆTUÖRVERUR

Votheysörverur eru upprunalega ásætuörverur (*epiphytic microorganisms*), þ.e. náttúrlegar örverur sem eru á heyinu fyrir pökkun. Ásætuörverur eru fjölskrúðug flóra af algjörlega loftháðum (*obligate aerobic*), loftfirrðum (*obligate anaerobic*) eða loftvalfrjálsum (*facultative anaerobic*) örverum. Langstærsti hluti þeirra eru lofháðar og hafa þess vegna lítil eða engin áhrif í votheysverkun.

Helstu flokkar ásætuörvera sem þrífast í votheyi eru margskonar mjólkursýrugerlar, myglu- og gersveppir, iðragerlar (*Enterobacteriaceae*), smjörsýrugerlar (*Clostridium*) og gerlar af *Bacillus* ættkvíslinni.

Á Hvanneyri hafa áhrif grasþroska frumvaxtar, búfjáráburðar og forþurrkunar á ásætuörverur verið rannsökuð (Bjarni Guðmundsson og Aðalsteinn Geirsson 1995). Þessar rannsóknir sýndu að örverufjöldinn á grasinu var ekki háður sprettutíma fram að slætti né tegundar áburðar. Fjöldi örvera (líftala) í hverju grammi heys mældist 1–14 milljónir í nýslegnu grasi, en 13–34 milljónir í forþurrkuðu heyi við pökkun. Mest var af Gram neikvæðum gerlum í heyinu fyrir pökkun (þ.m.t. iðragerlum), en forþurrkun jók mest fjölda mjólkursýrugerla og sveppa. Við gjöf hafði örverufjöldinn minnkað aftur umtalsvert, sérstaklega Gram neikvæðu gerlarnir, en einnig sveppirnir (7. tafla). Vordreifing búfjáráburðar á tún virtist hafa lítil áhrif á fjölda örvera í fersku hráefni. Hins vegar jókst örverufjöldinn meira við forþurrkun í heyi sem fékk búfjáráburð í samanburði við hey sem fékk eingöngu tilbúinn áburð (16. mynd). Þetta var talið stafa af veltingi heysins á vellinum, en við það blandast taðleifar og kusk úr sverði og jarðvegi við hráefnið.

Aðrir þættir sem hafa áhrif á fjölda og samsetningu ásætuörvera er veðurfar (Woolford 1984) og söxun hráefnisins á velli (Bolsen 1995). Knosun eða söxun heysins á velli eykur mikið fjölda ásætuörvera og ekki hvað síst mjólkur-

7. tafla. Meðaltöl flokka og fjölda ásætu- og votheysörvera í votheyi á Hvanneyri sumarið 1993.[a)]

		Örverufjöldi, 1000/g heys			
		Á velli		Við gjöf	
	Við slátt	F6[b)]	F12[b)]	F6[b)]	F12[b)]
Þurrefnisstyrkur heys, %	22	28	53	28	53
Flokkur:					
Gram neikvæðir gerlar[c)]	1047	5421	5464	~	~
Gró smjörsýrugerla (*Clostridium*)	1	~	2	7	~
Mjólkursýrugerlar (*Lactobacillus*)	~	264	1528	142	756
Ger- og myglusveppir (*Fungi*)	191	1807	1493	1	2
Líftala, heildarörverufjöldi	1586	12861	26839	423	2618

a) Byggt á Bjarna Guðmundssyni og Aðalsteini Geirssyni 1995.
b) F6= forþurrkað í 6 tíma, F12= forþurrkað í 12 tíma.
c) Þar með taldir iðragerlar (*Enterobacteria*).

sýrugerla. Lengi var talið að það væri vegna þess að vélbúnaðurinn sem saxaði eða knosaði heyið dreifði gerlasmiti betur um allt hráefnið. Í dag eru uppi efasemdir um að það geti staðist og nú er talið líklegra að hinn mikli frumusafi sem losnar við meðferðina kveiki í mjólkursýrugerlum sem eru til staðar með einhverjum hætti, t.d. með auknu aðgengi mangans eins og áður var greint frá. Þessir mjólkursýrugerlar mælast ekki í fersku ósöxuðu hráefni með þeirri aðferðafræði sem almennt var notuð og fjöldi þeirra var því vanáætlaður (Bolsen 1995).

VOTHEYSÖRVERUR

Eins og áður er vikið að eru votheysörverur ásætuörverur sem vaxa og fjölga sér við súrefnisskertar eða loftfirrðar aðstæður. Kröfur þessara örvera til ætis, sýrustigs og hita, svo eitthvað sé nefnt, eru æði misjafnar, en skarast oft á tíðum. Líkt og aðrar lífverur þurfa örverur aðgengilegt vatn til þess að vaxa. Vatnsvirkni (a_w) plöntusafa í heyi er mælistika á nýtanlegt vatn fyrir örverur og er náskylt vatnsþrýstihugtakinu sem áður hefur verið lýst. Sumar vatnssameindir í plöntum eru bundnar („uppteknar“) við stórsameindir á meðan aðrar eru bundnar í flækjum þess hluta stoðkerfisins sem er óleysanlegur. Þessar vatnssameindir eru ekki aðgengilegar fyrir örverur. Vatnsvirkni plöntusafa er skilgreindur sem hlutfallslegur (*relative*) vatnsþrýstingur í heyi eða;

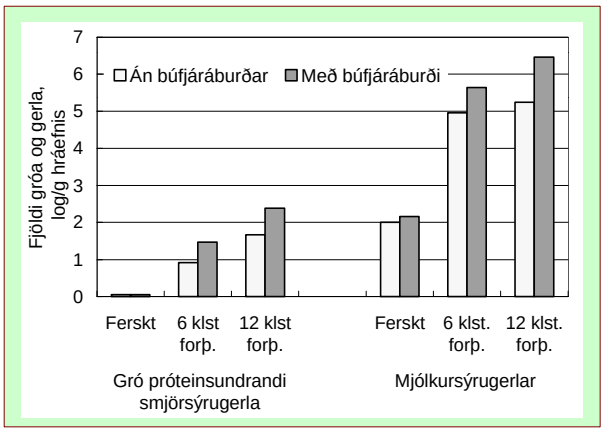
$$a_w=1-c/m$$

þar sem m er rakastig plöntunnar sem g vatns í g þurrefnis og c er fasti sem ákvarðast af þyngd sameinda og jóna í plöntusafanum. Vatn sem er 100% hreint hefur því vatnsvirknina a_w=1. Í ljós kemur að vatnsvirkni votheys er mjög háð þurrkstigi og minnkar eftir því sem þurrefnisstyrkurinn eykst (17. mynd). Forþurrkun stýrir þess vegna mikið hvaða örverur þrífast í heyinu að aflokinni pökkun.

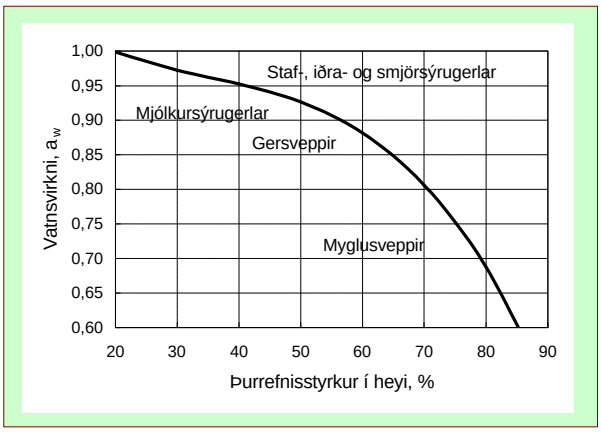
Eins og í sykruniðurbroti í lifandi plöntufrumum (11. mynd) er pýruþrúgusýrusalt sem myndast í glukólysu grunnurinn í gerjunarferlum örvera, en í stað plöntuensíma í ferlinu koma bakteríuensím. Gerjunarferlar af völdum örvera eru tegundabundnir og ekki nauðsynlega þeir sömu og af völdum plöntuensíma. Þessir ferlar eru dregnir upp í meðfylgjandi skýririti sem sýnir helstu afurðir gerjunar af völdum votheysörvera (18. mynd).

Tiltölulega fáar íslenskar rannsóknir hafa verið gerðar á örverum í votheyi (sjá 1. töflu) og flestar hafa einungis greint helstu flokka þeirra. Þær sýna að í rúlluvotheyi er að finna loftfirrðar örverur sem brjóta niður einsykrunga, amínósýrur (prótein) og sellulósa. Loftháðir eða loftvalfrjálsir myglu- og gersveppir finnast, en í mjög litlu magni. Langstærsti hluti loftfirrðra örvera í rúlluvotheyi eru glukósasundrendur (aðallega mjólkursýrugerlar), eða allt að 99,9% (Jarðræktarskýrsla RALA 1997).

Heildarfjöldi örvera í fullverkuðu rúlluvotheyi hefur mælst afar breytilegur eða frá 420 þúsund og upp í 57 milljónir í grammi votheys (19. mynd) (Bjarni Guðmundsson og Aðalsteinn Geirsson 1995). Rannsókn sem gerð var á Möðruvöllum 1997–1998 mældi heildarfjölda loftfirrðra örvera á bilinu 0,5–32 milljónir í grammi fullverkaðs vot-

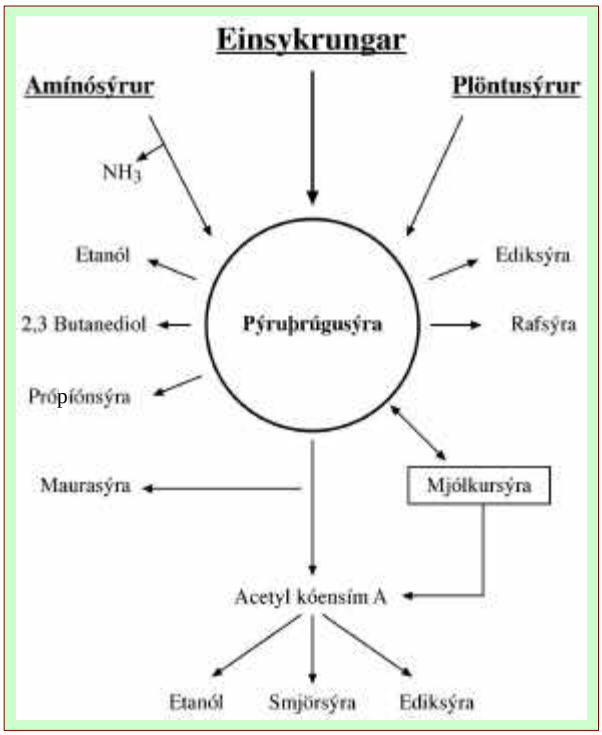


16. mynd. Áhrif forþurrkunar og búfjáraburðar á fjölda gróa próteinsundrandi smjörsýrugerla og mjólkursýrugerla (Bjarni Guðmundsson og Aðalsteinn Geirsson 1995).

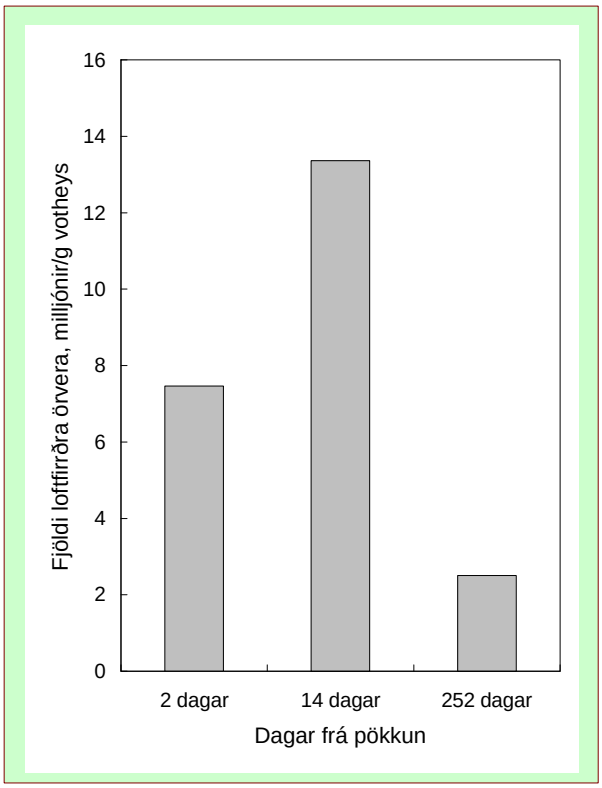


17. mynd. Vatnsvirkni (a_w) sem fall af þurrefnisstyrk heys. Örveruflokkum raðað við lægstu lífvænlegu mörk þeirra. (Byggt á Lättemäe 1997).

heys. Mestur fjöldi loftfirrðra örvera mældist 14 dögum eftir pökkun, en minnstur við gjöf (252 dögum eftir pökkun). Samsetning örveruflórunnar á geymslutímanum breytist einnig eins og kemur glöggt fram á 20. mynd og fjallað verður nánar um hér á eftir.



18. mynd. Helstu gerjunarafurðir loftfirrðra votheysörvera fyrir utan H_2O og CO_2. Hvaða arfurðir myndast fer eftir tegundum örvera (sjá einnig 12. töflu).

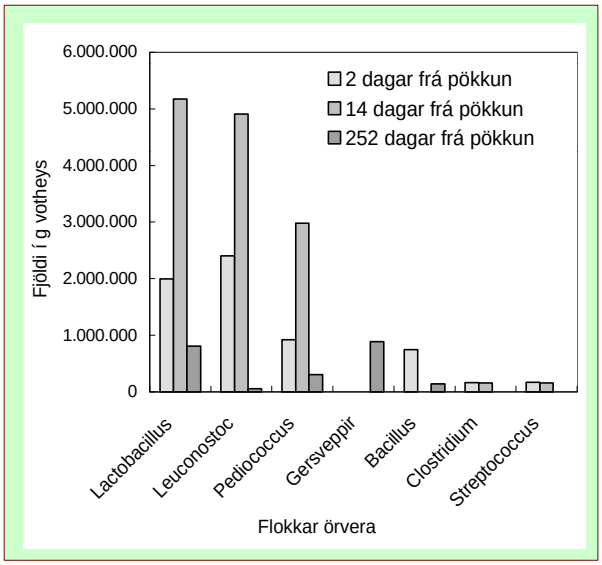


19. mynd. Meðalfjöldi loftfirrðra örvera í 6 vallarfoxgrasrúllum (með um 36% þe.) á Möðruvöllum 1997–1998.

Tiltölulegar fáar rannsóknir hafa metið örverumassa votheys. Í nýlegri hollenskri rannsókn var mældur örverumassi í rýgresisvotheyi og reyndist hann vera 0,6–1,6% af heildarþurrefni í blautlegu votheyi (20% þe.) og 0,3–0,6% í þurrlegu votheyi (37% þe.). Örveru N (hráprótein) var 1–5% af heildar-N sem er talsvert lægra en mældist í eldri rannsóknum, en aðferðafræði þeirra hefur verið gagnrýnd. Höfundar ályktuðu þess vegna að örverumassinn sem slíkur hefði lítil áhrif á fóðurgildi og nýtingu próteins fyrir búfé (Driehuis og van Wikselaar 2001).

Mjólkursýrugerlar

Í frumgerjun votheys eru mjólkursýrugerlar mikilvægustu gerlarnir. Þeir mynda aðallega mjólkursýru úr einsykrum. Þetta eru yfirleitt loftfirrðir, Gram jákvæðir, ekki grómyndandi og ekki hreyfanlegir, staflaga eða kúlulaga, gerlar. Þótt mjólkursýrugerlar þurfi loftfirrðar aðstæður til vaxtar, lifa þeir ágætlega í viðurvist súrefnis. Í náttúrunni finnast mjólkursýrugerlar í skemmdum og sérðum plöntuvefjum og þess vegna eru þeir taldir hafa hlutverki að gegna í sóttvörnum plantna. Mjólkursýrugerlar eru sýruþolnari en flestir aðrir gerlar og þrífast við pH 4,0–6,8. Kjörhiti þeirra til vaxtar er um 30°C,



20. mynd. Meðalfjöldi helstu flokka og tegunda loftfirrðra örvera í 6 vallarfoxgrasrúllum (36% þe.) á mismunandi geymslutímum.

en þeir þrífast við 5–50°C hita, allt eftir tegundum. Af gerlum að vera þola margir þeirra einnig frekar þurrt æti, eða með vatnsvirkni allt niður í a_w 0,91 (Lättemäe 1997). Það samsvarar 55% þurrefnisstyrks í votheyi.

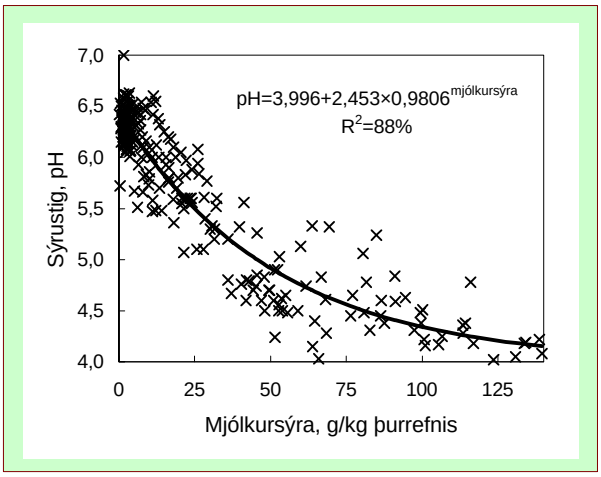
Hexósa einsykrur eru grundvöllur mjólkursýrugerjunar, en pentósa einsykrur sem verða til við hydrólýsu (vatnsrof) á hemisellulósa eru einnig nýtilegar, en skila ekki eins hagkvæmri gerjun. Mjólkursýra er sú gerjunarsýra sem hefur langmest sýrandi áhrif í votheyi (21. mynd) og hún kemur í veg fyrir að ýmsir miður góðir gerjunarferlar fari af stað. Aðrar gerjunarsýrur hafa ekki eins sýrandi áhrif og eru auk þess taldar óæskilegar í miklu magni af ýmsum ástæðum. Mjólkursýrumyndandi gerlar eru flokkaðir eftir því hvaða æti þeir þurfa eða hvaða gerjunarafurðir þeir mynda, þ.e.;

Eingerjungar (*obligate homofermenters*) sem gerja eingöngu einsykrur af hexósa gerð (glukósa og fruktósa) í mjólkursýru.

Valfrjálsir fjölgerjungar (*facultative heterofermenters*) gerja hexósa einsykrur aðallega til mjólkursýru og pentósa einsykrur til mjólkur- og ediksýru.

Fjölgerjungar (*obligate heterofermenters*) gerja hexósa einsykrur til mjólkur- og ediksýru, etanól og CO_2.

Í 8. töflu er listi yfir algengar ættkvíslir mjólkursýrumyndandi gerla í votheyi og sýnt hvaða flokki þeir tilheyra. Í flestu votheyi er að finna alla þessa flokka. Í vallarfoxgrasrúllum á Möðruvöllum voru mjólkursýrugerlar langstærsti hluti örveruflórunnar og sérstaklega á fyrstu vikum eftir pökkun (20. mynd). Mest var af *Lactobacillus*, sem er ættkvísl ein- og fjölgerjunga, og



21. mynd. Sýrustig sem fall af mjólkursýru í ýmsum gerðum af fullverkuðu rúlluheyi á Möðruvöllum í Hörgárdal 1994–1997. Samtals 249 sýni.

8. tafla. Tegundir mjólkursýrumyndandi gerla sem hafa þýðingu við votheysgerjun.[a)]

Ættkvísl	Tegund	Tegund glukósagerjunar
Lactobacillus	*acidophillus*	Eingerja[b)]
Lactobacillus	*casei*	“
Lactobacillus	*cornyiformis*	“
Lactobacillus	*curvatus*	“
Lactobacillus	*plantarum*	“
Lactobacillus	*salivarius*	“
Lactobacillus	*brevis*	Fjölgerja[c)]
Lactobacillus	*buchneri*	“
Lactobacillus	*fermentum*	“
Lactobacillus	*viridescens*	“
Pediococcus	*acidilactici*	Eingerja
Pediococcus	*cerevisiae*	“
Pediococcus	*pentosaceus*	“
Enterococcus	*faecalis*	Eingerja
Enterococcus	*faecium*	“
Lactococcus	*lactis*	Eingerja
Streptococcus	*bovis*	Eingerja
Leuconostoc	*mesenteroides*	Fjölgerja

a) McDonald o.fl. 1991.
b) Gerlar (homofermentative) sem gerja sykrur nánast eingöngu til mjólkursýru.
c) Gerlar (heterofermetative) sem gerja sykrur í ýmsar lífrænar sýrur (mest mjólkur- og ediksýru), etanól og CO_2.

Leuconostoc, sem eru fjölgerjungar. Heldur minna var af *Pediococcus* sem eru eingerjungar. *Streptococcus*, sem eru eingerjungar og teljast til mjólkursýrugerla, mældust einungis í litlu magni.

Þó að pýruþrúgusýra úr glukólýsu sé grunnhráefnið geta sumir mjólkursýrugerlar einnig sótt orku úr sítrónu- og eplasýrusöltum úr sítrónusýruhringnum (11. og 18. mynd) og myndað mjólkur-, maura- og ediksýru, auk etanóls og CO_2. Þá geta sumir mjólkursýrugerlar brotið mjólkursýru áfram niður í edik- og maurasýru. Í nærveru súrefnis er vitað að *Lactobacillus plantarum* nýtir salt mjólkursýru til að framleiða ediksýru.

Mjólkursýrugerlar eru einungis að mjög litlu leyti taldir brjóta niður prótein og amínósýrur. Sumir mjólkursýrugerlar geta þó brotið niður amínósýrurnar arginín og serín og einnig afoxað nítrat í nítrít.

*Sveppir (*Fungi*)*

Mikilvægasti flokkur örvera í hjágerjun votheys

eru sveppir. Þeir eru heilkjörnungar og ófrumbjarga örverur sem vaxa annað hvort sem stakir einfrumungar (gersveppir) eða sem þyrping þráðmyndandi fjölfrumunga (myglusveppir). Þeir finnast alls staðar í umhverfinu og lifa mest á rotnandi plöntuleifum. Þeir nærast með því að gefa frá sér ýmis ensím (próteasa, lípasa, amylasa, sellulasa) sem brjóta stórsameindir niður í grunneiningar sínar sem þeir síðan soga til sín í gegn um frumuvegginn. Fyrir utan gersveppi eru flestir sveppir algjörlega loftháðir þó að sumir myglusveppir geta lifað við loftfirrðar eða loftskertar aðstæður, svo fremi þar sé nægjanleg orka í formi sykra til að gerja.

Í byrjun 20. aldar var talið að gersveppir gegndu mikilvægu hlutverki við frumgerjun votheys, en fljótlega kom í ljós að svo var ekki. Hins vegar má yfirleitt rekja upphaf síðari gerjunarferla til gersveppa, ekki síst í forþurrkuðu heyi, því þeir dafna ágætlega við lágan súrefnisþrýsting og lága vatnsvirkni (Lindgren o.fl. 1985). Í vallarfoxgrasrúllum á Möðruvöllum mældust loftfirrðir gersveppir einungis í lok geymslutímans (252 dagar), en sama og engir gersveppir mældust 2 og 14 dögum eftir pökkun (20. mynd). Í tveimur tilraunum á Hvanneyri mældist einnig nokkurt magn af gersveppum við gjafir í mars (Bjarni Guðmundsson og Aðalsteinn Geirsson 1995, 1996).

Tegundir gersveppa eru ótalmargar sem lifa við breytileg súrefnisskilyrði. Við loftháðar aðstæður nýta þeir margskonar orkugjafa fyrir utan sykrur, eins og t.d. lífrænar sýrur og etanól. Í algjörlega loftfirrðu umhverfi þurfa gersveppir hins vegar að hafa aðgang að sykrum sem þeir gerja aðallega í etanól, en einnig í própíón-, edik-, smjör- og mjólkursýru (18. mynd). Gersveppir hafa verið flokkaðir í tvo lífeðlisfræðilega flokka;

Botnlægir (*sediment*) gersveppir hafa mikla hæfni til að gerja sykrur, en geta einungis takmarkað tileinkað sér mjólkursýru.

Yfirborðs (*pellicle*) gersveppir hafa ekki eins mikla gerjunarhæfileika og botnlægir gersveppir, en geta nýtt mjólkursýru sem orkugjafa.

Gersveppir eru sérstaklega sýruþolnir og flestir geta þrifist við pH 3–8, en kjör sýrustig þeirra liggur á bilinu pH 3,5–6,5. Kjörhitastig gersveppa er á bilinu 0–37°C. Þeir geta lifað á æti með mjög lága vatnsvirkni (a_w 0,91–0,87) sem samsvarar 52–62% þurrefnisstyrks í votheyi (Lättemäe 1997). Við loftháðar aðstæður eru gersveppir mjög afkastamiklir við að brjóta niður sykrur eftir svipuðum ferlum og gerist í æðri plöntum (11. mynd) og þar eru lokaafurðirnar CO_2 og H_2O. Gersveppir geta þá ekki bara nýtt sér einsykrur (hexósa og pentósa) heldur einnig margskonar kolvetni, sykrualkóhól og lífrænar sýrur. Við slíkar aðstæður gengur mjög hratt á kolefnisforða votheysins. Fitusýrur hamla vexti gersveppa og fer það eftir sýrustigi og lengd fitusýranna hversu árangursríkar þær eru. Sérstaklega eru C_{11}–C_{14} fitusýrur áhrifaríkar. Própíónsýra er einnig mjög áhrifarík til þess að halda gersveppavexti niðri.

Myglusveppir eru, ólíkt gersveppunum, yfirleitt loftháðir og ekki eins sýruþolnir. Vöxtur þeirra takmarkast þess vegna við yfirborð votheys þar sem nóg súrefni er til staðar og sýrustig er hagstætt. Við þessar aðstæður eru myglusveppir mjög skaðlegir vegna þess að þeir geta auk formlausra kolvetna brotið niður formbundin kolvetni, prótein og fituefni. Algengustu myglusveppirnir koma úr jarðvegi og þurfa einungis vatn, súrefni og lífræn efni til að þrífast. Kjörhiti þeirra er mjög breytilegur, en liggur yfirleitt á bilinu 25–35°C. Sömuleiðis er kjörsýrustig þeirra mjög breytilegt eftir tegundum, en er yfirleitt í kring um pH 5. Myglusveppir geta lifað á enn þurrara æti en gersveppir (a_w 0,87–0,70) ef sýrustig er nægilega hátt (Lättemäe 1997). Það samsvarar 62–79% þurrefnisstyrks í votheyi. Sumir myglusveppir gefa frá sér varasamt sveppaeitur (*mycotoxin*) og eru þess vegna alltaf taldir óæskilegir í votheyi. Fitusýrur hemja vöxt myglusveppa líkt og vöxt gersveppa. Í tveimur tilraunum á Hvanneyri mældist talsverður fjöldi myglusveppa í forþurrkuðu rúlluheyi (Bjarni Guðmundsson og Aðalsteinn Geirsson 1995, 1996).

*Smjörsýrugerlar (*Clostridium*)*

Smjörsýrugerlar eiga uppruna sinn aðallega í jarðvegi og eru Gram jákvæðir, grómyndandi, venjulega hreyfanlegir, staflaga og loftffirrðir gerlar sem gerja sykrur, lífrænar sýrur eða prótein. Smjörsýrugerlar drepast yfirleitt í nærveru súrefnis og lifa þá einungis af sem gró. Þó eru til tegundir sem þrífast við lágan súrefnisþrýsting. Smjörsýrugerlum er venjulega skipt upp eftir því hvort þeir gerja ammínósýrur (*proteolytic*) eða sykrur og lífrænar sýrur (*saccharolytic*). Nokkrar

tegundir gerja þó hvorutveggja. Bótulíneitrun sem veldur taugalömun stafar af eiturefni sem *Clostridium botulinum* myndar. Hann kemur úr jarðvegi og getur leynst í illa verkuðu votheyi, en veldur sjaldan tjóni hér á landi sem annars staðar.

Smjörsýrugerlar þrífast best í heitu votheyi, t.d. heyi sem hefur hitnað vegna öndunar í utanáliggjandi lögum. Meðalkjörhiti smjörsýrugerla er 37°C. Þeir þola ver en flestar aðrar örverur forþurrkun og dafna í blautu votheyi (a_w>0,95), þar sem styrkur vatnsleysanlegra sykra er í lágmarki, en bufferhæfni mikil eins og t.d. í snemmslegnu grasi. Kjörsýrustig er 7,0–7,4 og þeir þola ekki súrt umhverfi.

Sumar tegundir smjörsýrugerla gerja nær eingöngu glukósa og fruktósa á meðan aðrir gerja eingöngu mjólkursýru með hjálp ediksýru. Þessar sýrur gerjast síðan endanlega niður í smjörsýru með hjálp sömu gerla. Aðrir smjörsýrugerlar gerja glukósa niður í etanól, ediksýru, CO_2, vetni og mjólkursýru.

Próteinsundrandi smjörsýrugerlar geta brotið niður flestar amínósýrur. Þar eru einkum þrír ferlar;

Afamínun (*deamination*) þar sem amínósýrur eru brotnar niður í ammóníum (NH_3) annarsvegar og ýmsar lífrænar sýrur eins og edik- og smjörsýru eða smærri nitursambönd hins vegar.

Afkarboxílering (*decarboxylation*) þar sem amínósýrur eru brotnar niður í koltvísýring (CO_2) annars vegar og smærri nitursambönd hins vegar.

Oxun/afoxun (*oxidation/reduction)* eða svokallað Stickland niðurbrot sem er jafnframt langalgengasta aðferðin. Stickland leiðin brýtur niður amínósýrur í ýmsar fitusýrur, eins og t.d. ediksýru og einnig ammóníum og CO_2.

Í íslenskum rannsóknum finnast yfirleitt gró smjörsýrugerla í einhverju magni í rúlluvotheyi (Bjarni Guðmundsson og Aðalsteinn Geirsson 1995, Bjarni E. Guðleifsson o.fl. 1990). Í vallarfoxgrasrúllum á Möðruvöllum fannst lítið magn af smjörsýrugerlum fyrstu dagana eftir pökkun, en engir í lok geymslutímans (20. mynd).

*Iðragerlar (*Enterobacteria*)*

Iðragerlar er flokkur ýmissa gerla sem finnast í miklu magni í meltingarvegi dýra. Iðragerlar eru Gram neikvæðir, ekki grómyndandi, loftvalfrjálsir, venjulega hreyfanlegir og staflaga gerlar sem gerja kolvetni og amínósýrur. Þeir þurfa æti með háa vatnsvirkni og þola ekki lágt sýrustig (Lindgren o.fl. 1985). Í votheyi voru iðragerlar í fyrstu rannsakaðir vegna ýmissa sjúkdóma sem þeir valda í plöntum, búfé og mönnum. Framan af var talið að þeir hefðu litla þýðingu í gerjunarferlum og það væru yfirleitt fáir skaðlausir iðragerlar í votheyi. Þeir eru þó stundum í talsverðu magni og teljast óæskilegir vegna þess að þeir keppa um næringu við mjólkursýrugerla, auk þess sem þeir geta framleitt eiturefni (*endotoxin*) og eru ábyrgir fyrir stórum hluta þess ammóníums sem myndast í votheyi. Í tveimur tilraunum á Hvanneyri fannst talsvert af Gram neikvæðum gerlum, en eiginlegir iðragerlar voru ekki mælanlegir í rúlluheyi við gjafir (Bjarni Guðmundsson og Aðalsteinn Geirsson 1995).

Iðragerlar gerja kolvetni í megindráttum á tvennan hátt í votheyi. Annars vegar eru það þeir sem framleiða blöndu af sýrum, mjólkur-, edik-, maura- og rafsýru, auk einhvers etanóls. Hins vegar eru það gerlar sem gerja kolvetni niður í butanediol (18. mynd). Butanediolstyrkur í votheyi hefur ekki verið mældur hérlendis, en erlendis hefur hann mælst frá 0,9–5,0% af þurrefni, m.a. í rúlluvotheyi (Lättemäe og Sarand 2000).

Upphaflega var talið að smjörsýrugerlar væru ríkjandi í próteinniðurbroti og ammóníummyndun í votheyi. Engu að síður mælist oft engin smjörsýra í votheyi, þrátt fyrir talsvert próteinniðurbrot. Rannsóknir hafa sýnt að iðragerlar geta framleitt mikið magn ammóníums í votheyi. Og þó að bæði mjólkur- og smjörsýrubakteríur geti afoxað nítrat er nú talið að iðragerlar gegni þar aðalhlutverki.

Bacillus*gerlar*

*Bacillus*gerlar er ættkvísl staflaga baktería sem líkjast smjörsýrugerlum á margan hátt. Þeir eru Gram jákvæðir, grómyndandi og þurfa æti með háa vatnsvirkni (a_w>0,95), en eru yfirleitt loftháðir eða loftvalfrjálsir. Þeir finnast um allt, í jarðvegi, vatni og á loftögnum (ryki) og meira að segja í meltingarvegi manna. *Bacillus*gerlar eru yfirleit ekki taldir hafa mikla þýðingu á frumverkunarstigi votheys, en geta skipt máli eftir að seinni verkunarferlar af völdum ger- og myglusveppa eru komnir vel af stað. Margir *Bacillus*gerlar eru hita- og sýruþolnir og vaxa í blautu

votheyi með lágt sykruinnihald þar sem þeir gerja sykrur niður mjólkur- og ediksýru. Í vallarfoxgrasrúllum á Möðruvöllum mældist nokkur fjöldi *Bacillus*gerla 2 og 252 dögum eftir pökkun, en engir mældust 14 dögum eftir pökkun (20. mynd).

*Listeríugerlar (*Listeria*)*

Listeríugerlar eru Gram jákvæðir, hreyfanlegir, loftvalfrjálsir staflaga gerlar og mjög útbreiddar í náttúrunni. Þeir finnast í jarðvegi, plöntum, skólpi og þörmum bæði manna og dýra. Vegna útbreiðslu er erfitt að koma í veg fyrir mengun af þeirra völdum og erlendar rannsóknir sýna að þeir eru í votheyi, sérstaklega því sem verkað er í stórböggum. Meðal þeirra er tegundin *Listeria monocytogenes* sem veldur sk. votheysveiki (Hvanneyrarveiki) eða *listeriosis* og er hættuleg búfé, sérstaklega lambfullum ám (Bjarni Guðmundsson 1998). Dýr geta sýkst af votheyinu án þess að sýna einkenni og breitt smit út í umhverfið. Ekki er vitað hversu útbreidd tegundin er í votheyi hér á landi, en það er sjaldgæft að hún valdi skaða í búfé.

Listeria monocytogenes getur einnig orsakað sjúkdóm hjá mönnum og eru einkennin eins og mild flensa, vöðvaverkir, hiti og stundum ógleði og niðurgangur. Alvarlegri afleiðingar eru bannvæn heilahimnubólga í ungbörnum, blóðeitrun og fósturlát (sjá heimasíðu Hollustuverndar ríkisins; <www.hollver.is/mat/hrammi/matsjuk/listeria.htm>). Þessi veiki er engu að síður afar sjaldgæf, bæði í mönnum og dýrum.

Listeríugerlar eru mjög þolnir og geta fjölgað sér á breiðu sýrustigsbili frá pH 4,1 upp í 9,6. Þó er talið að lágt sýrustig takmarki mjög vöxt þeirra. Kjörhitastig gerlanna er 30–37°C, en þeir geta fjölgað sér á hitastigsbilinu 1–45°C. Þeir þrífast einnig í mjög söltu hráefni með hárri buffervirkni.

*Ediksýrugerlar (*Acetobacter*)*

Ediksýrugerlar eru Gram neikvæðir (eða Gram valfrjálsir), ekki grómyndandi og algjörlega loftháðir gerlar. Þess vegna finnast þeir eingöngu í loftskemmdu votheyi og oft með gersveppum. Þeir mynda fyrst ediksýru úr etanóli og síðan gerja þeir mjólkur- og ediksýru yfir í CO_2 og H_2O. Sumir gerlar í þessum flokki geta þó ekki gerjað mjólkursýru og þurfa þess vegna sykrur og alkóhól. Í samanburði við gersveppina er lítið vitað um þessa gerla og þýðingu þeirra í loftskemmdu votheyi. Í bandarískum heimildum er víða talað um loftfirrða ediksýrugerla, en það eru gerlar sem flokkaðir eru hér sem fjölgerja mjólkursýrugerlar sem framleiða ediksýru.

*Própíónsýrugerlar (*Propionibacterium*)*

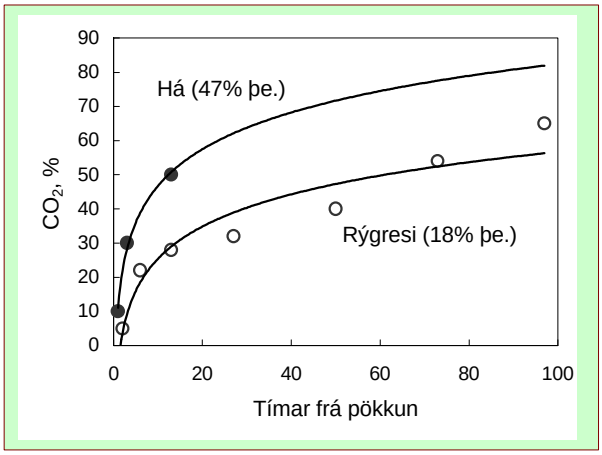
Própíónsýrugerlar eru dæmigerðir Gram jákvæðir, ekki grómyndandi, loftfirrðir eða loftþolnir, óreglulega staflaga (*pleiomorphic*) gerlar. Gerjunarafurðir þeirra eru aðallega própíónsýra, en einnig ediksýra og CO_2 ásamt ýmsum öðrum lífrænum sýrum. Smjörsýrugerillinn *Clostridium propionicum* framleiðir própíónsýru úr mjólkursýru og telst því einnig til þessa gerlaflokks. Þrátt fyrir að þessir gerlar breyti mjólkursýru í própíónsýru er ekki talið að þeir skemmi vothey mikið. Meira að segja hefur verið reynt, án árangurs, að ísetja þessa gerla í vothey til þess að hemja sveppavöxt. Própíónsýra í forþurrkuðu kanadísku rúllu-votheyi (>40% þurrefni) var talin vera vegna própíonsýrugerla (Beaulieu o.fl. 1993), en í íslensku rúlluheyi vegna gersveppa (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1996). Í hvorugri tilrauninni var gerð örverugreining.

IV. LOFTSKIPTIN

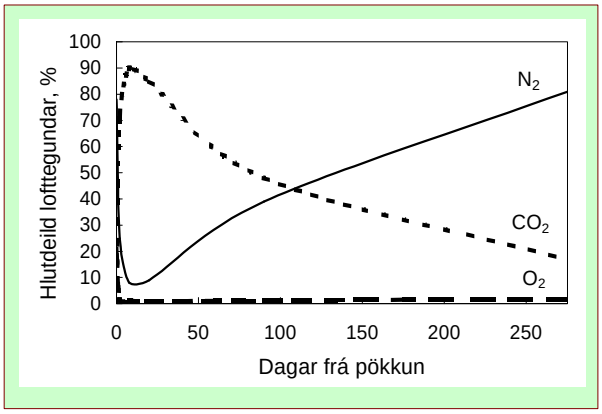
Eins og áður segir hefst frálífun og niðurbrot stórsameinda í plöntufrumunum strax og grasið hefur verið slegið, en öll ljóstillífun stöðvast fljótt. Fram að pökkun er niðurbrotinu að mestu stýrt af súrefnisháðum ensímhvörfum. Helstu loftkenndu afurðir sundrunarferla eru CO_2 og H_2, en NO, N_2O og NH_3 myndast einnig í mismiklu magni og blandast andrúmsloftinu, sem samanstendur að mestu af nitri (um 78% N_2) og súrefni (um 21% O_2).

Strax og hráefninu hefur verið pakkað í loftþéttar umbúðir hægist loftblöndun og þess vegna safnast umræddar lofttegundir og jónir þeirra fyrir inni í plasthjúpnum og umhverfis hráefnið, bæði sem gastegundir og uppleystar í vatni. Í stórum loftþéttum votheysgeymslum hverfur laust súrefni úr umhverfinu á örfáum klukkustundum vegna öndunar. Baggaplast hins vegar nær aldrei að koma algjörlega í veg fyrir loftskipti við venjulegar aðstæður (Grétar Einarsson 1993). Koltvísýringur var mældur í tveimur rúllum á Möðruvöllum haustið 1995 fyrstu 100 tímana eftir pökkun eða upp að 50% CO_2-mettun, en aðrar lofttegundir voru ekki mældar (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1996). Þær mælingar sýndu að koltvísýringssöfnun er mjög hröð fyrstu klukkustundirnar, en er greinilega talsvert breytileg í rúllum (22. mynd). Helstu ástæður þess gætu verið mismunandi lofthiti (kæling sem hægir á önduninni), gæði pökkunar, þurrkstig, nitursamsetning og rúmþyngd.

Forristal o.fl. (1999) mældu lofttegundir í rúlluböggum og er meginniðurstaða þeirra mælinga sýnd á 24. mynd. Þar sést í fyrsta lagi að það verður aldrei algjör súrefnisþurrð í rúllunum. Í öðru lagi að eftir að koltvísýringsstyrkurinn hefur náð hámarki eftir u.þ.b. 20 daga (90% CO_2) fer hann ört minnkandi aftur og í staðinn eykst N_2 styrkurinn. Þessi aukning í N_2 bendir til þess að utanaðkomandi lofttegundir eins og súrefni síist stöðugt í gegn um plasthjúpinn. Ástæðan fyrir því að súrefnisstyrkurinn eykst ekki í líkingu við N_2 er sennilega sú að það er nýtt jafnóðum í öndunarferlum.



22. mynd. Uppsöfnun koltvísýrings í tveimur rúllum á Möðruvöllum 1995. Háin er að uppistöðu háliðagras og snarrót með 71% meltanlegt þurrefni og 15,7% hráprótein. Grænfóðrið er sumarrýgresi með 67% meltanlegt þurrefni og 22,8% hráprótein (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1996).



23. mynd. Helstu lofttegundir í rýgresisrúllum (30% þe.) fyrstu 275 dagana eftir pökkun. Pakkað í sexfaldan plasthjúp. (Byggt á Forristal o.fl. 1999).

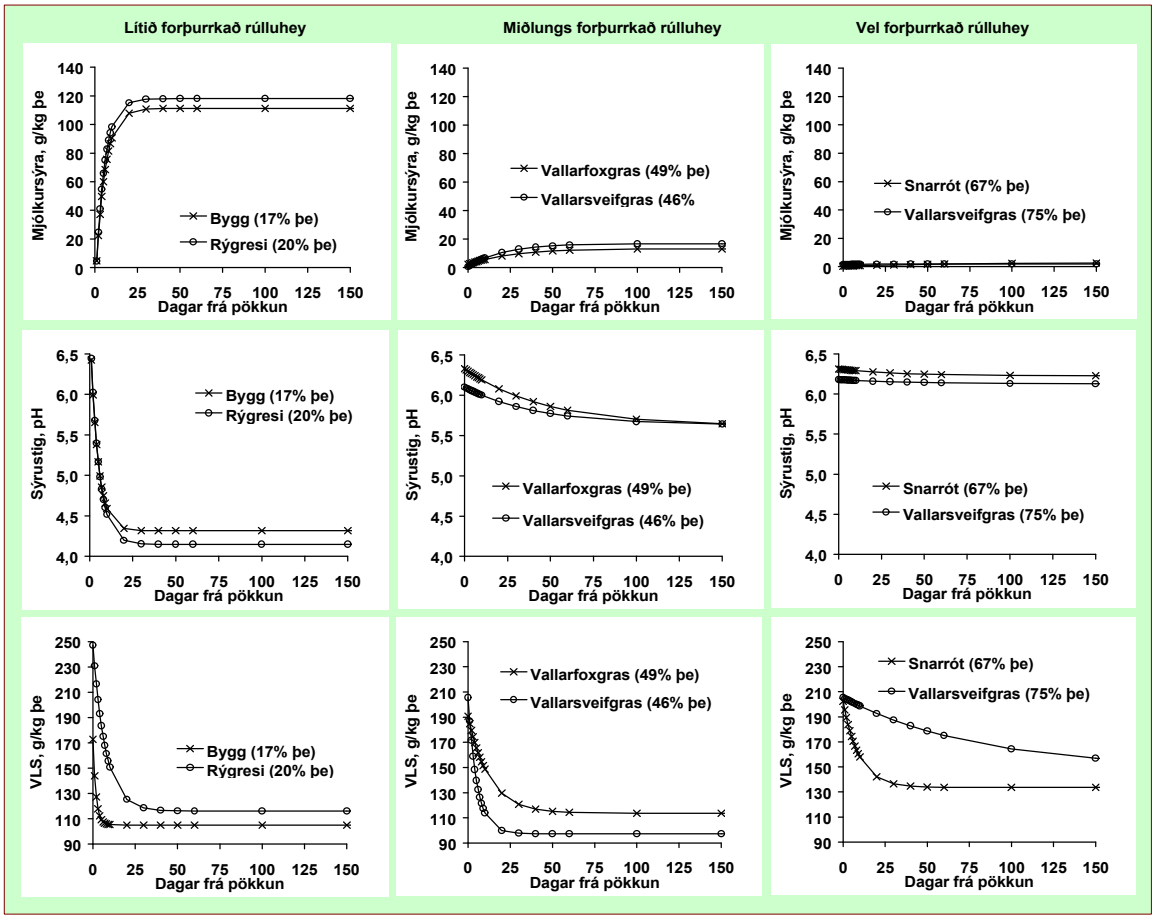
V. GERJUNARHÆFNI HEYS

Niðurbrot stórsameinda í súrefnisskertu umhverfi kallast gerjun (*fermentation*) einu nafni, hvort heldur hún er af völdum plöntu-, bakteríu- eða sveppaensíma. Gerjunarhæfni er eiginleiki tilbúins heys til að gerjast. Út frá verkunarsjónarmiðum er það talinn kostur að gerjunarhæfni súrheys sé sem mest, vegna þess að vel heppnuð gerjun lágmarkar orkutap og eykur geymslufestu. Í blautlegu votheyi byggist verkunin fyrst og fremst á örverugerjun á fyrstu dögum og vikum frá pökkun, sk. frumgerjun (*primary*). Í mjög þurrlegu heyi verður einnig frumgerjun, en heildaráhrif hennar á efnasamsetningu eru lítil. Þegar reyna fer á geymsluþol votheysins hefst annarskonar gerjun í votheyinu. Sú gerjun kallast hjágerjun (*secondary*) og er allt annars eðlis eins og dregið verður fram hér á eftir. Hey með litla frumgerjunarhæfni, t.d. vegna forþurrkunar, getur haft mikla hjágerjunarhæfni. Í þessum kafla verður farið yfir helstu þætti sem stjórna gerjunarhæfni heys og afleiðingar hennar á efnasamsetningu heysins.

VERKUNARFERILL VOTHEYS

Um leið og loftfirrðar aðstæður hafa skapast í heyinu verður grundvallarbreyting á niðurbroti stórsameinda (11. og 18. mynd). Sítrónusýruhringurinn og öndunarkeðjan verða óvirk og í staðinn myndast miskolefnisríkar lífrænar sýrur, NH_4^+ og etanól, allt eftir því hvaða lífverur geta nýtt sér næringarefnin í heyinu við loftfirrðar aðstæður. Frumgerjun í mismunandi rúlluheyi sem fall af tíma er sýnd í meðfylgjandi myndaröð (24. mynd).

Verkun í lítt sem ekkert forþurrkuðu rúlluheyi, svo sem í grænfóðri (<35% þe.), er dæmigerð súrheysverkun þar sem mjólkursýrugerjun er allsráðandi. Algengt er að magn mjólkursýru í fullverkuðu heyi sé á bilinu 80–120 g/kg þurrefnis. Vegna hagstæðs rakastigs fyrir mjólkursýrugerla, ásamt loftfirrðu umhverfi, fer fram ört niðurbrot sykra yfir í mjólkursýru. Eins og kemur fram í myndröðinni er sýrustigslækkunin og sjáanlegt sykruhvarf í réttu hlutfalli við mjólkursýrumyndunina í heyinu.



24. mynd. Þrjár helstu gerðir frumverkunar í velverkuðu rúlluheyi sem fall af dögum frá pökkun (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999).

Í miðlungs forþurrkuðu rúlluheyi (35–55% þe.) er gerjunin bæði af völdum örveru- og plöntuensíma. Virkni mjólkursýrugerla sem og annarra gerla er engu að síður skert sökum hás þurrefnis og pH fellur hægt. Hámarks mjólkursýrumyndun fer sjaldan yfir 60 g/kg þurrefnis. Í myndröðinni sést að sjáanlegt sykruhvarf er mun hraðara en örverugerjunin (mjólkursýrumyndunin og lækkun pH) gefur til kynna. Þetta stafar sennilega af mikilli virkni plöntuensíma, vegna tiltölulega hagstæðs rakastigs í upphafi verkunartímans, sem gerja sykrur í minna sýrandi afurðir eins og etanól.

Í vel forþurrkuðu rúlluheyi (55–80% þurrefni) verður lítil sem engin gerjun. Mjólkursýra mælist <2g/kg þurrefnis og þar af leiðandi er lækkun sýrustigs vart merkjanleg. Sjáanlegt sykruhvarf er engu að síður umtalsvert (18–35%), en fer minnkandi með auknu þurrkstigi. Ástæður sykruneyslunnar eru sennilega öndun lifandi plöntufrumna og ensímvirkni sem í byrjun verkunar ummyndar sykrur í CO_2 og H_2O, en eftir því sem umhverfið verður loftfirrðara verður öndunin ófullkomin og sykrurnar ummyndast þá mest í etanól (McDonald o.fl. 1991). Sykruleifar í forþurrkuðu votheyi eru oftast meiri en í blautlegu votheyi eins og kemur fram í myndröðinni.

Verkunarferlinu, frá pökkun og fram að gjöfum, má skipta upp í stig. Ráðunautaþjónusta Bandaríkjanna skiptir henni upp í fimm stig (Penn State Extension Circular 396: <www3.das.psu.edu/dcn/catforg/396/index.html>):

Stig 1 er öndunarhlutinn og stendur yfirleitt ekki nema í nokkrar klukkustundir eftir pökkun á meðan laust súrefni er enn til staðar. Í stórböggum með kraftmiklu votheyi tútnar plastið út, ef pökkunin er í lagi, vegna tímabundinnar hitamyndunar sem verður vegna öndunarinnar.

Stig 2 er hinn svo kallaði ediksýruhluti gerjunarinnar sem er kominn af stað rétt áður en stigi 1 lýkur. Þá eru fjölgerjungar og hugsanlega einnig ediksýrugerlar að verki. Mikil ediksýrumyndun í upphafi gerjunar hefur mælst í blautu rúlluheyi á Möðruvöllum eins og kemur fram á 25. mynd. Þessi áfangi stendur yfirleitt ekki nema í nokkra daga. Ef rúlla er opnuð á þessu stigi finnst greinileg ediksýrulykt.

Stig 3 er mjólkursýruhluti gerjunarinnar, þ.e. ef sykrur og vatnsvirkni votheysins er hagstæð fyrir mjólkursýrugerlana. Í vatnsfirrðu votheyi (>45% þurrefni) er gerjunin mjög skert og sú sem er til staðar er sennilega að mestu af völdum plöntuensíma eða gersveppa sem brjóta sykrur niður í etanól frekar en mjólkursýru.

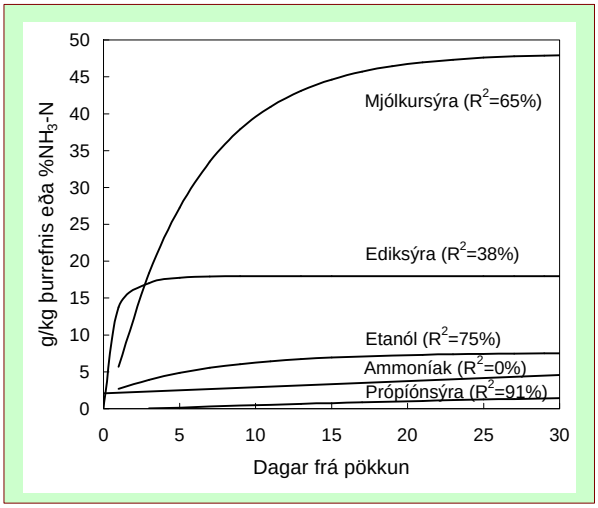
Stig 4 er einnig kallað stöðuleikatímabil þegar ekkert á að geta gerst sem gæðarýrir votheyið og hefst þegar öll ensímvirkni er komin í lágmark, annaðhvort vegna sýru eða skorts á vatnsvirkni og/eða aðgengilegri orku. Upphaf og lok þessa stigs fer eftir lofthita, gerjunarhæfni votheysins og gæðum plasthjúpsins (pökkunarinnar), en hefst venjulegar 20–30 dögum eftir pökkun.

Stig 5 hefst þegar hjágerjunarferlar fara af stað vegna þess að plasthjúpurinn er farinn að gefa eftir eða í síðasta lagi þegar hann er fjarlægður fyrir gjöf. Geymsluþol rúllubagga er takmarkað og er ekki ósennilegt að þessum áfanga sé oftast náð hér á landi á útmánuðum þegar hlýna fer aftur í veðri. Þetta er þó mjög háð geymsluaðstæðum og gæðum pökkunar eins og síðar verður vikið að. Mjög sennilega eru þarna fyrst og fremst að verki gersveppir í upphafi sem þrífast við mjög lágan súrefnisþrýsting, en síðan taka loftháðari örverur við með enn meiri eyðingarkraft.

Fyrstu fjögur stig þessarar þróunar má sjá á 25. mynd. Í raun skarast yfirleitt þessi stig nokkuð, en samkvæmt sömu heimildum er ekki ráðlagt að gefa votheyið fyrr en stigi 4 er náð og í fyrsta lagi 14 dögum eftir pökkun.

ÁHRIF FORÞURRKUNAR

Forþurrkun er sá einstaki þáttur sem ræður langmestu um kraft frumgerjunarinnar og afleiðingar hennar á efnasamsetningu votheysins. Mjólkursýrustyrkur (26. mynd) og sýrustig (27. mynd) sem fall af þurrkstigi rúlluvotheysins sýna þessi áhrif einna best. Þrátt fyrir talsverðan breytileika í magni mjólkursýru og sýrustigi við ákveðið

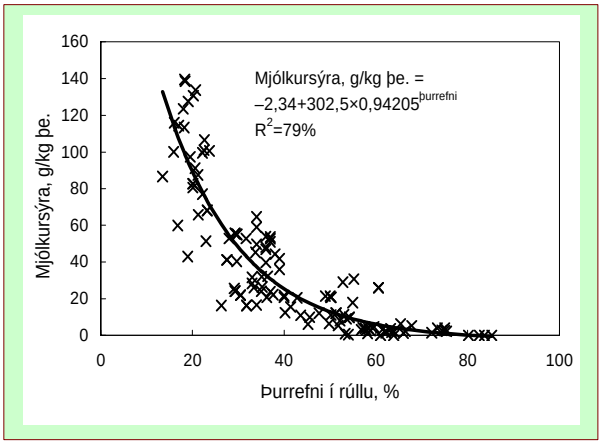


25. mynd. Helstu gerjunarafurðir á fyrstu 30 dögum gerjunar í 6 grænfóðurrúllum (bygg og rýgresi) á Möðruvöllum 1994. Meltanleiki þurrefnis 73%, hráprótein 17% og meðalþurrefnisstyrkur í rúllu 26% (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1996).

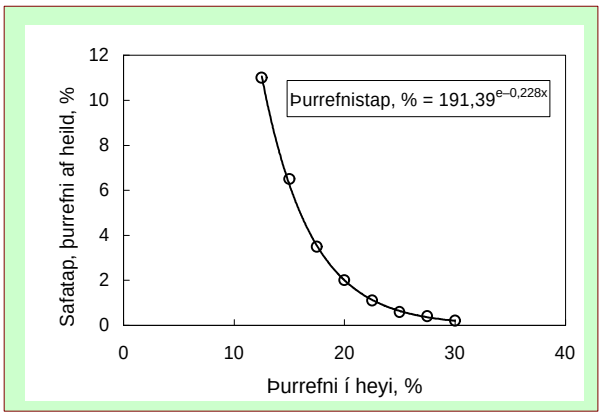
þurrkstig er tilhneigingin afdráttarlaus. Breytileikinn sem þarna kemur fram stafar m.a. af mismunandi gerjunarhæfni votheysins sem er misjöfn eftir grastegundum og árferði (Thorsteinsson o.fl. 1999) og þroskastigi grasanna sem hefur áhrif á bufferhæfnina (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999).

Vatnsríkt vothey hefur mikla vatnsvirkni sem er grundvöllur hraðra efnaskipta og gerjunar, svo fremi sem næg orka er til staðar. Há vatnsvirkni flýtir sjálfseyðingu plöntufrumnanna sem leysir upp frumuveggi og losar um frumusafann fyrir mjólkursýrugerlana. Það eru plöntuensímin sjálf sem sjá um þessa eyðingu að mestu með mismikilli hjálp mjólkursýrugerla. Vatnsríkt vothey hefur þann ókost að rúmþyngd (þéttleiki) þess er lítil og það dregur úr sykrustyrk, sem getur leitt til rangrar gerjunar, mikils efna- og orkutaps og skerts fóðrunarvirðis í sykrusnauðu heyi. Þurrefnistap með safafrárennsli getur einnig verið umtalsvert (28. mynd). Í forþurrkuðu votheyi er vatnsvirknin hins vegar lítil, vatnið hefur gufað upp, frymið er samanskroppið og tætt og næringarríku hálf- eða líttmeltu efni frymisins sitja eftir vegna vatnsskorts. Þannig hey er ákjósanlegt fóður fyrir gersveppi.

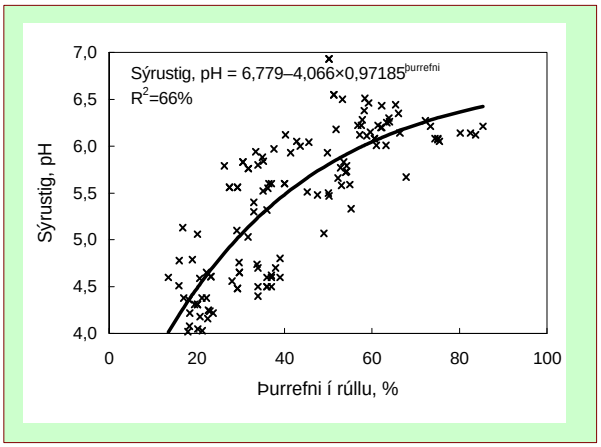
Á 29. mynd eru dregin saman áhrif þurrkstigs á gerjunarvirknina og helstu afurðir hennar í íslensku rúlluheyi. Í blautlegu votheyi er mjólkursýran helsta afurðin, en einnig er talsvert magn af ediksýru sem bendir til þess að gerjunin er mikið til vegna mjólkursýrugerla. Ammóníaksmyndun bendir ekki til mikils próteinniðurbrots og er óháð þurrkstigi. Hlutfall einstakra gerjunarafurða breytist einnig mikið með auknu þurrkstigi votheysins (30. mynd). Hlutur mjólkur-



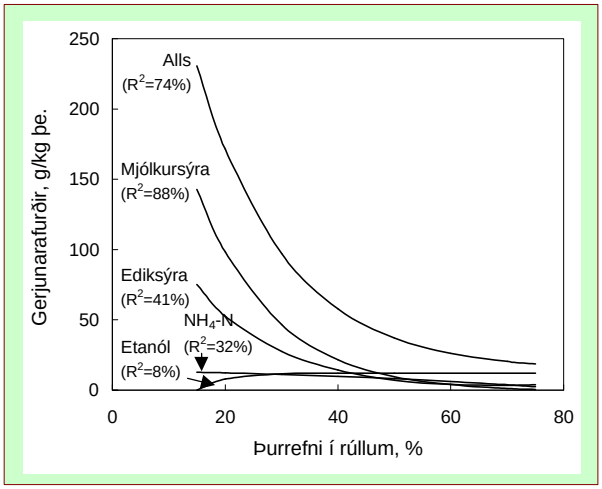
26. mynd. Mjólkursýrustyrkur sem fall af þurrefni í fullverkuðu rúlluvotheyi. (Byggt á gagnasafni úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum 1994–1998).



28. mynd. Þurrefnistap vegna safafrárennslis í votheyi. (Byggt á Bastiman og Altman, frá McDonald o.fl. 1991).



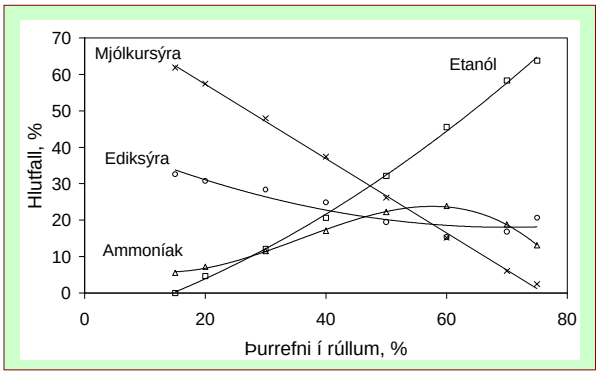
27. mynd. Sýrustig sem fall af þurrefni í fullverkuðu rúlluvotheyi. (Byggt á gagnasafni úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum 1994–1998).



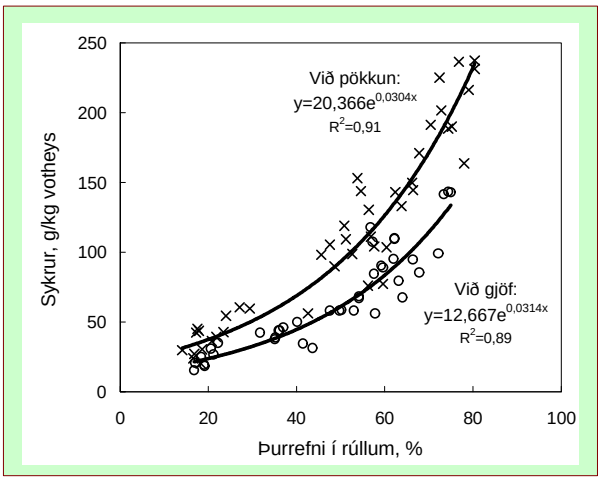
29. mynd. Gerjunarafurðir í fullverkuðu rúlluheyi sem fall af þurrkstigi. (Byggt á gagnasafni úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum 1994–1998).

sýrunnar fellur línulega, en hlutur etanóls eykst línulega með auknu þurrkstigi og er kominn yfir 60% af heildargerjunarafurðunum við 70% þurrefni. Þetta bendir til þess að gerjunin stafi þá fyrst og fremst af plöntuensímum sem gerja pýruþrúgusýru niður í etanól frekar en mjólkursýru (Hall o.fl. 1982). Hlutur ediksýru minnkar einnig með auknu þurrkstigi, en er alltaf einhver, og við 60% þurrefni myndast meiri ediksýra en mjólkursýra. Ammoníak sem að magni til er yfirleitt lítið í rúlluheyi myndast hlutfallslega mest við um 60% þurrefni.

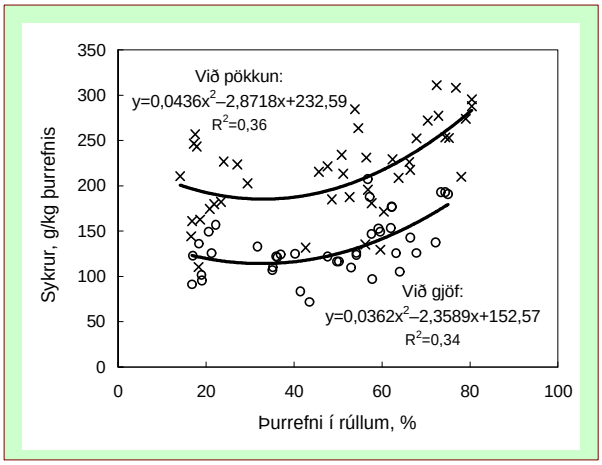
Gerjunin er knúin áfram af aðgengilegum orkugjöfum í vatnslausn votheysins sem eru aðallega sykrur. Þar sem sykrustyrkur eykst með þurrefnisstyrk votheysins (31. mynd), virðist þversagnakennt að sykrustyrkurinn er nokkurn veginn í öfugu hlutfalli við gerjunarvirknina (29. mynd). Það er vegna þess að eftir því sem þurrefnið eykst fækkar loftfirrðu örverunum sem ná að nýta sér sykrurnar vegna minnkandi vatnsvirkni sem fylgir hækkandi þurrefnisstyrk. Meðalsykrumagn í sex gerðum af rúlluvotheyi á Möðruvöllum var 241 g (±56) VLS/kg þurrefnis við hirðingu og 132 g (±32) í heyinu fullverkuðu. Mesta sjáanlega sykruneyslan er fyrstu tvo dagana eftir pökkun sem heldur áfram næstu 10 dagana, en eftir það breytist sykrumagnið lítið í rúlluvotheyinu (24. mynd). Sykrumagnið, hvort heldur er við hirðingu eða lok verkunarinnar, er nokkuð hærra í þurrasta votheyinu. Þar sem um ólíkar grastegundir er að ræða er ekki hægt að greina hvort ræður þarna ferðinni, tegundamunur eða áhrif forþurrkunarinnar. Sjáanlegt sykruhvarf (um 109 g VLS/kg þurrefnis) virtist hins vegar óháð þurrkstigi (32. mynd). Fjöldi erlendra rannsókna sýna að VLS-magn er mun lægra í fullverkuðu blautu votheyi heldur en forþurrkuðu. Hins vegar er ekki óalgengt að sykrumagn við hirðingu er einnig hærra í forþurrkaða heyinu miðað við það blauta við hirðingu (t.d. McDonald o.fl. 1991). Í blautlegu votheyi sem verkað er í stórum sílóum eða í smáum rannsóknastofusílóum mælast oft litlar sem engar VLS eftir í lok verkunarinnar (t.d. Lättemäe 1997, McDonald o.fl. 1991). Verkun votheys í böggum er frábrugðin að þessu leyti vegna þess að mjólkursýrumyndun og súrnun verður ekki eins mikil og þess vegna mælast meiri sykruleifar í fullverkuðu baggavotheyi í samanburði við jafnblautt vothey í sílóum (t.d. Beaulieu o.fl. 1993). Eins og komið hefur fram er erfitt að reikna út raunverulega



30. mynd. Áhrif þurrkstigs í rúlluvotheyi á hlutfallslegt magn einstakra gerjunarafurða af heildargerjunarafurðum. (Byggt á gagnasafni úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum 1994–1998).



31. mynd. Sykrustyrkur í votheyi við pökkun annars vegar og gjöf hins vegar sem fall af þurrefnishlutfalli í ýmsum rúllugerðum á Möðruvöllum 1996–1998.



32. mynd. Sykrustyrkur í þurrefni votheys við pökkun annars vegar og við gjöf hins vegar sem fall af þurrefnishlutfalli í ýmsum rúllugerðum á Möðruvöllum 1996–1998. Meðalsykruneyslan er 109 g/kg þurrefnis.

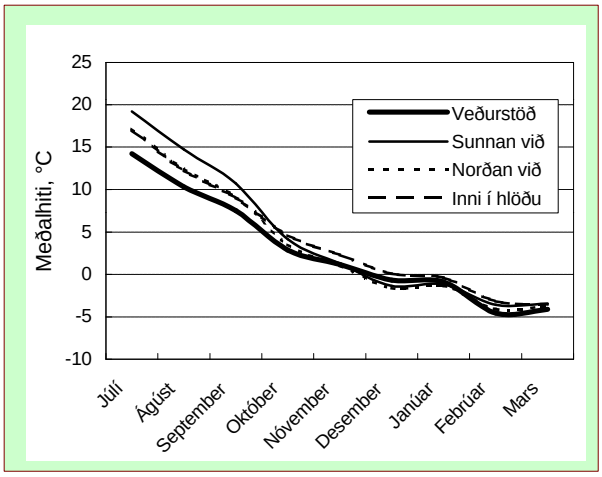
sykruneyslu sem verður við gerjun, vegna þess að formbundin kolvetni eru brotin niður og mata gerjunina að hluta. Rannsóknir benda til þess að formbundin kolvetni, aðallega hemisellulósi, nýtist eingöngu til gerjunar í blautlegu votheyi, en lítið sem ekkert í forþurrkuðu heyi (Pettersson 1988, Beaulieu o.fl. 1993).

ÁHRIF PÖKKUNAR OG GEYMSLU

Góð votheysverkun byggist á því að tryggja loftfirrðar aðstæður sem lengst. Þess vegna hafa gæði pökkunar og geymslu afgerandi áhrif á verkun og geymsluþol bagganna. Mikilvægt er að pökkunarvélin sé rétt stillt og að henni sé rétt beitt. Eiginleikar plastfilmunnar m.t.t. súrefnisgegndræpis, loðhæfni (límingar), togstyrks og höggþols er háð tegundum og aldri plastfilmunnar og hafa þeir afgerandi þýðingu (Grétar Einarsson 1993). Plastfilman sem notuð er til þess að hjúpa bagga er ekki alveg súrefnisheld (sjá 23. mynd), auk þess sem gegndræpið eykst eftir því sem plastið eldist (veðrast). Súrefnisgegndræpið minnkar með aukinni þykkt plastsins, en hraði veðrunar fer eftir geymsluaðstæðum. Aukin plastþykkt dregur úr meltanleikatapi, próteinsundrun og myglumyndun og eykur súrnun (Forristal o.fl. 1999). Þar sem plastið er einn helsti breytilegi kostnaðarliður baggaverkunar er tilhneiging til þess að spara plastið eins og kostur er. Við venjulegar aðstæður hefur verið talið nægjanlegt að pakka í fjórfalda plastfilmu þeim böggum sem á að gefa í upphafi innistöðu og fram að þorra, en aðra bagga ætti að pakka a.m.k. sexfalt. Nýlegar rannsóknaniðurstöður Bjarna Guðmundssonar (2001) sýna að jafnvel eftir einungis 7 mánaða geymslu skilar áttfaldur, í stað sexfaldur, plasthjúpur gæðameira votheyi.

Annar þáttur, sem nýlegar rannsóknir sýna að hafi þýðingu á endingu plasthjúpsins, og þar með geymsluþol votheysins, er geymslustaðurinn. Gerðar hafa verið hitamælingar í rúllum sem geymdar voru á berangri, sólarmegin við vegg, í forsælu norðan við vegg og inni í hlöðu. Á Hvanneyri var meðalhiti fyrstu 7 vikurnar eftir pökkun svipaður í kjörnum rúllubagga sem geymdir voru sólarmegin og í forsælu, en tæplega einni gráðu hærri í 15 cm dýpt í rúllunni sem var sólarmegin. Eftir 7 mánaða geymslu var meðalþurrefnistap talsvert hærra úr rúllunum sólarmegin en rúllunum í forsælu, þó að hann væri ekki tölfræðilega marktækur sökum mikils breytileika milli rúlla sama liðar. En hneigðin er trúverðug (Bjarni Guðmundsson 2001). Í tveggja ára samanburði á rúlluböggum á berangri, í skjóli og í hlöðu kom umtalsverður gæðamunur í ljós við gjafir eftir 8–9 mánaða geymslutíma. Heyið í skýldu rúlluböggunum fékk 10% hærri gæðaeinkunn en hey úr rúlluböggum á berangri og heyið úr böggum úr hlöðunni fengu 20% hærri gæðaeinkunn en berangursheyið (Bjarni Guðmundsson 2001; á <www.bondi.is>).

Á Möðruvöllum er meiri hitamunur í rúllum eftir geymslustöðum en fannst á Hvanneyri. Tveggja ára niðurstöður sýna að meðalhiti í kjörnum rúllubagga sunnan undir vegg er um 2°C hærri en í rúlluböggum norðan undir vegg eða inni í hlöðu og um 4°C hærri í samanburði við meðalhita í veðurstöð í 2 m hæð fyrstu 8 sólarhringana eftir pökkun (9. tafla). Þessi munur helst langt fram eftir vetri, en fer minnkandi í mesta skammdeginu (33. mynd). Að teknu tilliti til mismunandi þurrkstigs í rúllunum og meðalhita á milli ára, virðast niðurstöður beggja ára samhljóða. Þrátt fyrir heldur hærri meðalhita í rúllum sunnan undir vegg (2°C), sem ætti að leiða til aukinnar gerjunarvirkni, kemur það ekki marktækt fram í ólíkum gerjunarafurðum eða sjáanlegri sykruneyslu, en breytileiki milli endurtekninga innan sömu tilraunaliða var hár (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999). Rúllur sem staðsettar eru sólarmegin verða fyrir mun meiri hitasveiflum á sólarhring en



33. mynd. Áhrif geymslustaðar á meðalhita í rúllum í samanburði við nærliggjandi veðurstöð (200–400 m fjarlægð) á Möðruvöllum 1997–1998. Hiti skráður á klukkustunda fresti. Rúllum pakkað sexfalt inn í Tenospin plast. Hráefnið er vallarfoxgras slegið 16. júlí með um 35% þurrefni og 66% meltanlegt þurrefni.

9. tafla. Áhrif geymslustaðar á meðalhita (°C) í kjarna rúlla fyrstu átta sólarhringana eftir pökkun í samanburði við hita í veðurstöð á Möðruvöllum.

Ár [a)]	Veðurstöð[b)]	Geymslustaður rúllu[c)] Sunnan	Norðan	Inni
Meðalhiti				
1996	13,5	17,5	14,6	14,7
1997	14,2	19,4	17,9	17,9
Meðaltal	13,9	18,4	16,3	16,3
Staðalfrávik	3,0	3,8	2,9	2,1
Hámarkshiti				
1996	23,0	30,5	22,0	16,0
1997	22,6	33,1	37,1	37,0
Meðaltal	22,8	31,8	29,5	26,5

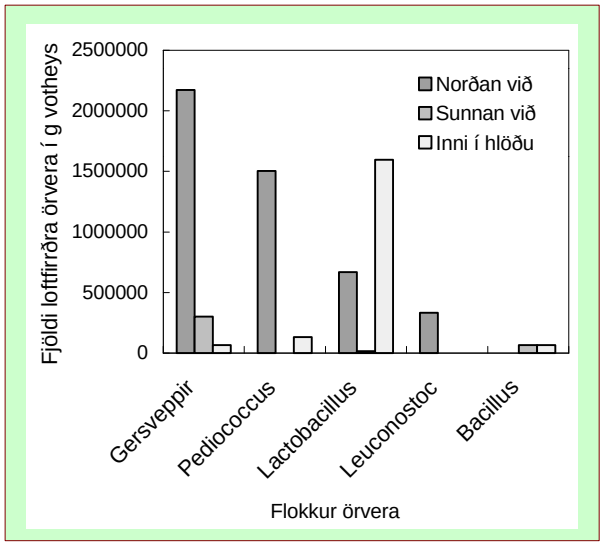
a) Rúllum pakkað sexfalt inn í hvítt Tenospin plast. 1996: snarrótarrúllur með um 64% þurrefni og 66% meltanlegt þurrefni 1997: vallarfoxgrasrúllur með um 35% þurrefni og 66% meltanlegt þurrefni.
b) Veðurstöð í 2 m hæð og 200–400 m fjarlægð frá rúllum.
c) Útirúllur í skjóli sunnan eða norðan við vegg og innirúllur í óupphitaðri hlöðu.

rúllur í forsælu. Meðaldægursveiflan er um 20°C sunnan undir vegg, en er lítil sem engin inni í hlöðu. Mælst hefur á Möðruvöllum 49°C hiti í yfirborði rúllu í hvítu plasti sunnan undir vegg í blanka logni, heiðríkju og 20°C lofthita. Á sama tíma fór hitinn í kjarna rúllunnar upp í 34°C. Ef skoðað er hvort einhver hitahröðun eigi sér frekar stað í rúllum sólarmegin heldur en í forsælu, sem gæti gefið vísbendingar um aukna gerjunarvirkni, er niðurstaðan neikvæð. Gerjunarvirkni mæld á þennan hátt er ekki meiri í rúllum sólarmegin en í forsælu og þess vegna er hitamunurinn eingöngu vegna meiri sólgeislunar. Hafa verður í huga að vegna mikils yfirborðs í hlutfalli við massa er loftkæling mjög hröð ef einhver hitamyndun vegna gerjunar er til staðar. Fylgst var með örveruflórunni í fyrrnefndum rúllum frá sumrinu 1997. Eftir 252 daga geymslu kemur fram marktækur munur á samsetningu loftfirrðu örveruflórunnar eftir geymslustöðum (34. mynd). Það sem vekur fyrst athygli er hvað örverufjöldinn er breytilegur eftir staðsetningu rúllanna. Þannig er langmest af örverum í rúllunum norðan við vegg og langminnst í rúllunum sunnan undir vegg, eða einungis um 500 þúsund í grammi votheys. Mest er af gersveppum í útirúllunum, en í innirúllunum er *Lactobacillus* enn ríkjandi. Í rúllum norðan við vegg er enn talsvert af lifandi mjólkursýrugerlum, en nánast ekkert í rúllunum sunnan undir vegg. Út frá þessum niðurstöðum má draga þá ályktun að rúlluplastið hefur veðrast mest á rúllunum sunnan undir vegg, þar sem hitasveiflur eru mestar, og minnst á rúllunum innan dyra, þar sem hitasveiflur eru minnstar og sólin nær aldrei að skína á þær.

ÁHRIF HJÁLPAREFNA

Hjálparefni hafa með beinum eða óbeinum hætti áhrif á ásætuflóruna. Þeim er ætlað að auka eða viðhalda betur fóðurgildi og/eða auka fóðrunarvirði hráefnisins í gegn um verkunarferlið. Í 10. töflu eru sýndir flokkar hjálparefna. Woolford (1984) fjallar ítarlega um þessi efni og telur að enn hafi ekki fundist hagkvæm íblöndunarefni sem tryggja örugga verkun við allar aðstæður. Hjálparefni á markaði skipta hundruðum og fæst þeirra, ef nokkur, standa undir væntingum að hans mati. Síðan þá hafa hins vegar sífellt fleiri rannsóknir sýnt að þau geti bætt gæði verkunar í votheyi markvert.

Tilraunir með hjálparefni í vothey til að tryggja góða verkun og lítið verkunartap hafa verið ótalmargar. Þessum efnum má skipta í tvo meginflokka, gerjunarhvata eða gerjunartálma. Gerjunarhvatar eiga að örva mjólkursýrugerjun, en tálmarnir að takmarka örveruvöxt. Efnum úr þessum flokkum er stundum blandað saman til að fá breiðari virkni. Grundvallarkrafa sem gera þarf til hjálparefna er að þau séu ekki eitruð eða skaðleg fyrir menn og skepnur og raski ekki eðlilegri vambargerjun (Lättemäe 1997). Almennt má



34. mynd. Áhrif geymslustaðar á fjölda og samsetningu örveruflórunnar eftir 252 daga geymslu í 6 vallarfoxgrasrúllum (36% þe.) á Möðruvöllum 1997–1998.

10. tafla. Flokkar hjálparefna fyrir votheysgerð.[a)]

Flokkur		Aðgerð	Dæmi
Sýrugjafar	-ólífrænar sýrur -lífrænar sýrur	Lækkar sýrustig til að örva hagstæða örveruflóru	Brennisteins- og saltsýra, maura- og akrílsýrur
Gerjunartálmar	-bein sótthreinsun -óbein sótthreinsun	Tálmar alla örverustarfssemi, annað hvort strax eða á raðbundinn hátt	Formaldehýð, hexamín
Gerjunarhvatar	-æti -ensím -ræktaðar örverur	Örvar gerjun með því að auka hráefni til gerjunar eða fjölga hagstæðum örverum	Melassi, frumuveggs og sterkju niðurbrjótandi ensím, mjólkursýrugerlar
Fúkalyf	-náttúrleg fúkalyf -tilbúin fúkalyf -önnur hemjandi efni	Hemja vöxt örvera sem beinlínis spilla eða skemma vothey	Bacitracin, streptomycin, Bronopol, natríum klóríð og natríum nítrít
Næringarefni	-orka -köfnunarefni -steinefni	Bætir beint næringarefnagildi votheysins	Sterkja, kartöflur, úrea, kalsíum karbonat

a) Byggt á Woolford 1984.

segja að virkni íblöndunarefna er yfirleitt í réttu hlutfalli við vatnsvirkni votheysins og í votheyi með >30% þurrefni er oftar en ekki erfitt að greina bein áhrif þeirra á gæði og einkenni gerjunar (Pettersson 1988). Ný og endurbætt íblöndunarefni virðast þó vera að færa þessi þurrefnismörk stöðugt ofar.

Gerjunarhvatar geta verið ensím, melassi, mysa eða malað korn af einhverju tagi, en einnig lifandi bakteríur sem framleiða mjólkursýru (sjá 10. töflu). Íblöndun sykurefna getur bætt verkun í sykrusnauðu votheyi, en rannsóknir hafa ekki sýnt einhlýtar niðurstöður með íblöndun lifanda baktería (Noller og Thomas 1985) og þær virka því aðeins að nægar sykrur séu til staðar (Pettersson 1988). Íblöndun lifandi mjólkursýrugerla í blautu rúlluvotheyi lækkaði sýrustig, styrk ammoníumbundins N og smjörsýru, en jók styrk mjólkursýru (Haigh o.fl. 1996). Samanburður á íblöndun mjólkursýrugerla annars vegar og sýru- eða ammoníumblöndum hins vegar sýndi að aðfengnu mjólkursýrugerlarnir höfðu jákvæð áhrif á verkun í fersku votheyi, en skiluðu samt ekki eins góðri verkun og önnur hjálparefni (O'Kiely 2000).

Þótt margar ólíkar gerðir hjálparefna hafi verið prófaðar (10. tafla) virðast ýmsar sýrur og nitursambönd einna árangursríkust. Þetta eru sýrugjafar og gerjunartálmarar sem örverur þola misvel. Langalgengasta hjálparefnið er maurasýra, hrein eða í blöndu með öðrum sýrum eins og ediksýru og/eða nitursamböndum. Virkni þessara efna byggist á því að takmarka öndun á stigi 1 og vöxt óæskilegra örvera eða alla örveruvirkni á síðari frumgerjunarstigum. Í rúlluheyi draga þessi efni einnig verulega úr fjölda ger- og myglusveppa og smjörsýrugerlagróa (Lättemäe og Sarand 2000). Nítratmyndandi hjálparefni draga verulega úr virkni smjörsýru- og iðragerla, en ekki mjólkursýrugerla. Virkni þessara efna er þó stutt nema í súru votheyi (Lättemäe 1997). Maurasýru sem blandað er í blautt sykrusnautt vothey í nægjanlegum styrkleika eykur mjólkursýrumyndun, lækkar sýrustig, minnkar edik- og smjörsýrumyndun og dregur úr próteinniðurbroti í samanburði við sams konar vothey án maurasýru. Í blautu sykruríku votheyi takmarkar maurasýra alla örverustarfssemi með þeim afleiðingum að sjáanlegt sykruhvarf verður minna og þar af leiðandi verður minna til af gerjunarsýrum (Randby 2000). Örverur eru ákaflega misnæmar fyrir maurasýrunni og eru gersveppir hvað þolnastir. Maurasýrublandað vothey hefur af þessum sökum sýnt minni geymslufestu en sambærilegt vothey án maurasýru (Agnew og Carson 2000). Gersveppir eru hins vegar viðkvæmir fyrir própíónsýru eins og fyrr er getið.

Gerðar hafa verið rannsóknir með íblöndun Kofasafa (KOFASIL) í forþurrkuðu (55–62% þe.) og fersku (23–29% þe.) heyi, bæði skornu og óskornu (Bjarni Guðmundsson 1994). Virku efnin í Kofasafa eru natríumnítrít (21,5%) og hexameþylentetramín (16,2%). Hitamyndun

fyrstu 12 daga eftir hirðingu var 1–3°C meiri í forþurrkaða heyinu en í ferska heyinu. Sömuleiðis var hitamyndun 1–3°C meiri í heyi án hjálparefna en í heyi með hjálparefnum. Mestur var hitamunurinn á öðrum degi eftir hirðingu. Kofasafi dró mjög úr niðurbroti sykra og vexti próteinkljúfandi smjörsýrugerla, sérstaklega í ferska heyinu. Að auki reyndist meltanleiki þurrefnis meiri og þurrefnistap minna í verkuðu heyi með Kofasafa en án.

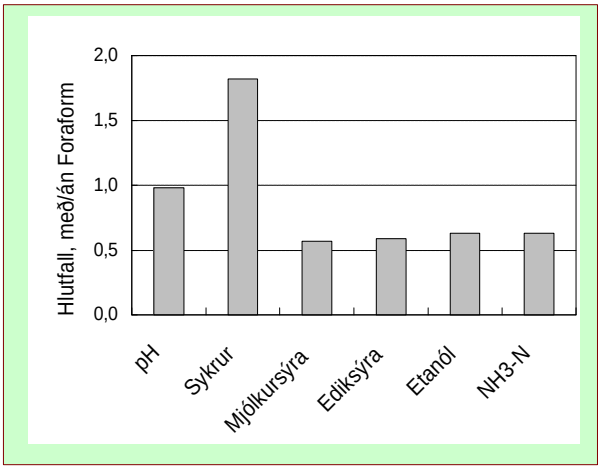
Hjálparefnið Foraform er að mestu maurasýra (48%) og ammoníumformíat (22%), auk vatns. Það hefur verið talsvert prófað á Hvanneyri og úti á meðal bænda (Bjarni Guðmundsson 1998). Fjórar tilraunir með hey úr fyrri og seinni slætti sýndu umtalsverð jákvæð áhrif af Foraform á verkun heysins samanborið við samskonar hey án hjálparefna (35. mynd). Foraform dró marktækt úr sjáanlegu sykruhvarfi, etanól-, ammoníaks-, mjólkursýru- og ediksýrumyndun án þess að það hefði áhrif á sýrustig. Foraform hefur einnig verið prófað á hrakið hey og þar reyndist það draga enn frekar úr sjáanlegu sykruhvarfi miðað við ferskt hey (36. mynd).

GrasAAT er ætlað að vera arftaki Foraform og eru virku efnin 64,5% maurasýra og 6% ammoníak. Það hefur verið prófað í tilraunum á Hvanneyri á svipaðan hátt og Foraform (Gudmundsson og Thorsteinsson 1999, Bjarni Guðmundsson 1999). GrasAAT virkaði svipað og Foraform. Það virðist þó ekki draga eins mikið úr mjólkur- og ediksýrumyndun eins og Foraform, en sýrustig var marktækt lægra með GrasAAT (Gudmundsson og Thorsteinsson 1999).

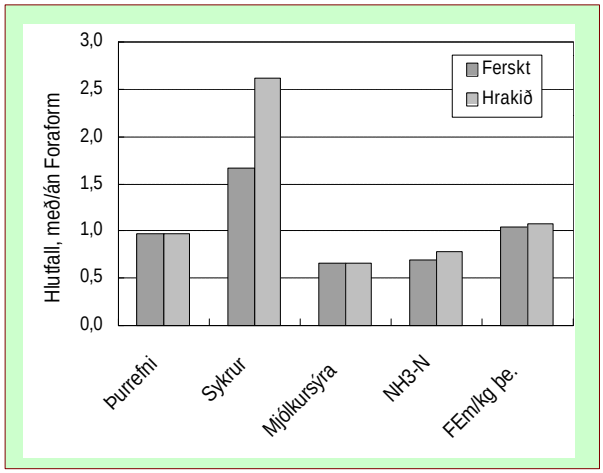
Samandregin niðurstaða þessara tilrauna sýna að umrædd hjálparefni draga verulega úr gerjunarvirkni votheys sem er með þurrefnisstyrk undir 40–45% og því meira sem það er blautara. Sykrumælingar með og án hjálparefna sýna þetta einna best og er oft góður mælikvarði á aukið fóðrunarvirði heysins (Bjarni Guðmundsson 1994, Bjarni Guðmundsson 1998, Gudmundsson og Thorsteinsson 1999, Bjarni Guðmundsson 1999). Sömu efni skila litlu eða engu í vel forþurrkuðu heyi, en íhuga þarf hvort önnur efni henti ekki betur til þess að seinka hjágerjun þar. Nánar verður fjallað um áhrif hjálparefna á fóðrunarvirði votheys í öðrum kafla hér á eftir.

ÁHRIF ÞROSKASTIGS GRASA

Efnasamsetning fóðurgrasanna breytist mikið með þroskastigi þeirra. Efnasamsetning og vefjasamsetning endurvaxtar (háar) er einnig talsvert önnur en frumvaxtar. Með auknum þroska eykst hlutfall stoðvefja og verðminni fóðurefna í plöntunum. Meltanleiki fjölærra fóðurgrasa, próteinstyrkur og styrkur lífrænna sýra fellur því með vaxtartíma. Í einærum fóðurgrösum, eins og t.d. byggi, gerist það sama þangað til frjóvgaðir blómvísar hafa safnað í sig sterkju sem eykur meltanleikann aftur (sk. heilsæðisvothey). Gerjunarhæfni heilsæðis er þó allt önnur en gerjunarhæfni í byggi á blaðstigi, vegna þess VLS styrkurinn er mjög lítill og kolvetnaforðinn er



35. mynd. Áhrif hjálparefnisins Foraform á nokkra verkunarþætti í rúlluböggum (Bjarni Guðmundsson 1998).



36. mynd. Áhrif hjálparefnisins Foraform á nokkra verkunarþætti í hröktu og fersku heyi í rúlluböggum (Bjarni Guðmundsson 1998).

að mestu bundinn í sterkju sem nýtist illa í votheysgerjun (t.d. Ohlson 1996). Innan eðlilegra marka eykst venjulega gerjunarhæfni fóðurgrasa með auknu þroskastigi sem er fyrst og fremst vegna lægri bufferhæfni þeirra (t.d. Keady og O'Kiely 1998). Á Möðruvöllum var vallarfoxgras slegið á þremur þroskastigum við sama þurrkstig og verkað í rúllur. Gerjunarhæfnin var minnst í snemmslegna vallarfoxgrasinu, sem slegið var fyrir skrið 7. júlí, í samanburði við vallarfoxgras sem slegið var eftir miðskriðtíma þess, 16. eða 26. júlí (37. mynd). Ástæður þessa voru fyrst og fremst taldar vera hærri buffervirkni í snemmslegna vallarfoxgrasinu (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999).

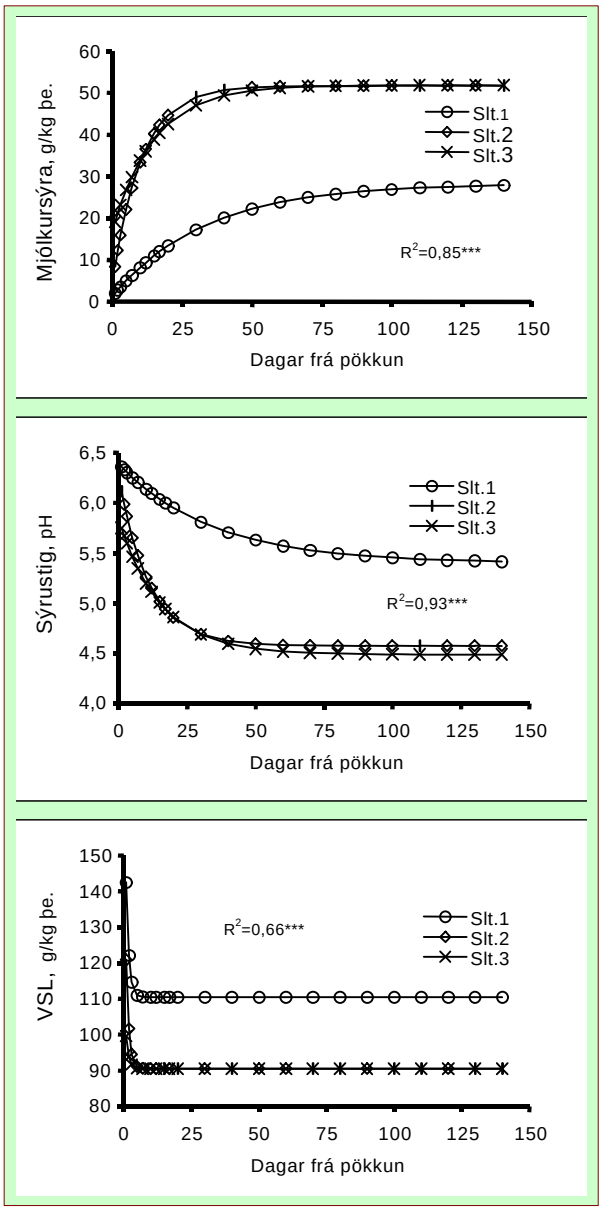
ÁHRIF ÁBURÐAR

Vitað er að N-áburður getur haft mikil áhrif á gerjunarhæfni votheys. Samspil N-áburðar og þroskastigs grasanna við slátt er einnig augljóst. Því styttri tími sem líður frá því að borið er á og fram að slætti því lakari verður gerjunarhæfnin. Það köfnunarefnissamband sem mest eykst við hækkandi N-áburðarskammta er nítrat og getur nítrat-N numið allt að 10% af heildarköfnunarefni plöntunnar þegar ríflega er borið á og stutt er á milli áburðargjafar og sláttar. Nítrat er talið neikvæður gæðaþáttur í votheysverkun, þrátt fyrir að það dragi úr virkni smjörsýru- og iðragerla. Það er vegna þess að nítrat afoxast í nítrít og síðan ammóníum sem leiðir til hækkandi sýrustigs. Einnig hefur verið sýnt fram á neikvætt samband nýtanlegra kolvetna við gerjun og nítratstyrk í hráefni, enda krefst afoxun nítrats orku úr sykrum (McDonald o.fl. 1991, Woolford 1984). Sá hluti VLS sem köfnunarefni hefur mest áhrif á eru fruktanar, en magn þeirra minnkar með auknum köfnunarefnisáburði (Pettersson 1988). Aukinn köfnunarefnisáburður (úr 120 í 168 kg N/ha) jók safatap, bufferhæfni, prótein- og ammoníummagn á meða kalíáburður (0–240 kg K/ha) hafði engin mælanleg áhrif á gerjunarhæfni fersks rýgresisvotheys (Keady og O'Kiely 1998). Lítið hefur verið skrifað um áhrif annarra áburðarefna á gerjunarhæfni votheys.

ÁHRIF FÓÐURTEGUNDA

Þótt gerjunarhæfni fóðurtegunda sé mjög breytileg eru aðrir verkunarþættir mun veigameiri, eins og t.d. þroskastig, áburður, forþurrkun og gæði pökkunar, eins og hér hefur verið vikið að. Þrátt fyrir mikinn tegundamun innan grasaættarinnar er gerjunarhæfni belgjurta að jafnaði talin mun minni en grasa og stafar það af lágum VLS styrk og miklu magni plöntusýra sem veldur mikilli bufferhæfni (Lättemäe 1997). Þess vegna er votverkun belgjurta ekki talin eins örugg og votverkun flestra grasa. Votverkun belgjurta í blöndu með grösum í böggum gengur þó yfirleitt áfallalaust ef rétt er staðið að málum.

Efnagreiningar í íslenskum grösum sýna að þar er talsverður tegundamunur ef litið er á sykrusamsetningu þeirra og gerjunarhæfni. Á Hvanneyri var gerjunarhæfni fjögurra grastegunda

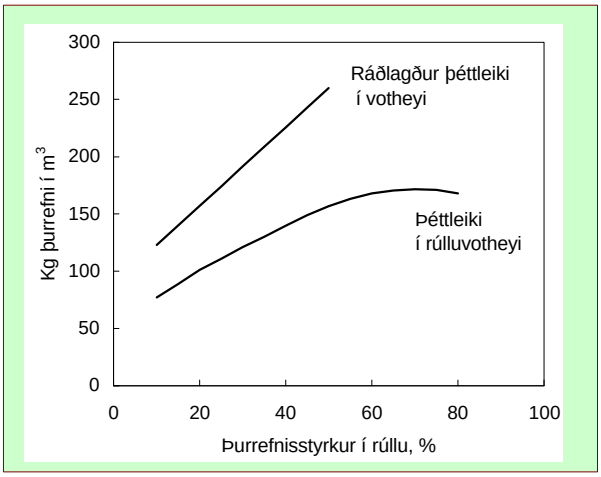


37. mynd. Áhrif sláttutíma vallarfoxgrass 1997 á verkun í rúllum. Slt.1= 7.7., slt.2= 16.7., slt.3= 26.7. Þurrefni= 34–37%. (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999).

metin í rannsóknastofukrukkum (Thorsteinsson o.fl. 1999). Rannsóknirnar spönnuðu þrjú ár og tegundirnar voru slegnar á þremur mismunandi þroskastigum. Sjáanlegt sykruhvarf var 114–164 g/kg þurrefnis að jafnaði eftir tegundum, minnst í vallarfoxgrasi og mest í beringspunti. Athygli vekur að heildargæðaeinkunn votheys var í öfugu hlutfalli við sjáanlega sykruneyslu, þ.e. vallarfoxgrasið fékk hæstu einkunn (4,12 af 5 mögulegum) og minnstu sykruneysluna, en beringspunturinn þá lægstu (3,77) og mestu sykruneysluna.

ÁHRIF SKURÐAR

Þéttleiki votheys (kg þurrefni/m^3) í böggum, og þá sérstaklega rúllubaggaheys, er lítill í samanburði við þéttleika votheys í sílóum. Aukinn þéttleiki er talin bæta verkun og geymslufestu votheysins, vegna þess m.a. að loft á síður greiðan aðgang inn í heymassann (t.d. McDonald o.fl. 1991). Aðrir telja að mikilvægi þéttleika til að tryggja góða verkun sé ofmetið (Lättemäe 1997 eftir Pauly 1993) og þættir eins og gæði pökkunar og geymslu vegi þar mun þyngra (Bjarni Guðmundsson 1993). Ráðlagður þéttleiki votheys til að tryggja góða verkun í flatgryfjum eða sílóum er 140–260 kg þurrefni/m^3 og eykst línulega eftir því sem þurrefnistyrkur eykst úr 15–50% (Lättemäe 1997 eftir Honig 1991). Þetta á að tryggja sama gljúpleika og loftaðgang í heyinu, óháð þurrkstiginu. Þegar þessar tölur eru bornar saman við þéttleika heys í hefðbundnum rúlluböggum sést að það vantar verulega uppá að þessi þéttleiki náist þar (38. mynd). Þéttleikinn í rúlluböggunum er mest háður þurrkstigi og í þurrlegasta heyinu fer fínleiki þess einnig að hafa áhrif. Leiðir til að auka þéttleika í rúllum er að skera heyið í smærri einingar. Í Hvanneyrartilraun jók skurður heys þéttleika rúllubagga í fersku heyi (23–29% þe.) um 6,8%, en ekki í forþurrkuðu heyi (55–62% þe.). Hins vegar hafði það ekki mælanleg áhrif á gerjunareiginleika og fóðrunarvirði votheysins (Bjarni Guðmundsson 1994). Eistnesk tilraun sýndi hins vegar mjög jákvæð áhrif skurðar í rúlluvotheyi með 50% vallarfoxgrasi og 50% rauðsmára. Skurðurinn hafði marktæk lækkandi áhrif á sýrustig, ediksýru-, smjörsýru-, etanól- og butanediolmyndun, auk þess sem fjöldi gersveppa var helmingi minni en í óskornu heyi og geymslufestan (*aerobic stability*) jókst (Lättemäe og Sarand 2000).



38. mynd. Þéttni (kg/m^3) votheys í lauskjarna 120 sm (Ø) rúllum sem fall af þurrefnisstyrk (Þóroddur Sveinsson 1997) í samanburði við ráðlagða þéttni í votheyi í sílóum (Lättemäe 1997).

VI. VERKUNARTAP VIÐ VOTHEYSVERKUN

> „Markmið [heyskapar] er að ná á ódýrastan hátt sem mestu af bagðgóðu, auðmeltu, næringaríku, þurefni og geyma það þannig, að það láti sem minst af ilm, bragði og fóðurorku."
>
> *Halldór Vilhjálmsson, Handbók fyrir bændur 1926*

Markmið heyverkunar er að halda sem mest lystugleika og fóðurgildi grasanna frá slætti og fram að gjöfum. Aldrei er þó hægt að útiloka allt tap. Tap við heyverkun er tvenns konar. Annars vegar er það magnið sem tapast í verkunarferlinu sem hægt er að mæla sem tap þurrefnis, fóðureininga, próteins eða annarra næringarefna. Hins vegar er það sem mætti kalla fóðrunarvirðistap. Um þann þátt verður fjallað nánar í VII. kafla, en hér verður áherslan lögð á hið beina mælanlega tap.

Í þurrheysverkun fer aðalverkunin fram á velli og þar er verkunartapið mest vegna mylsnu, slæðings og hugsanlega hraknings. Í votheysverkun hins vegar fer aðalverkunin fram eftir að votheyið er komið á geymslustað og þar má gera ráð fyrir að tapið verði ekki minna en á velli. Í 11. töflu hafa verið teknar saman niðurstöður úr flestum tilraunum hér á landi þar sem mælt hefur verið þurrefnis-, orku- eða próteintap frá slætti til hirðingar, frá hirðingu til gjafar eða frá slætti til gjafar. Til þess að útiloka að safatap rugli niðurstöðuna voru einungis tekin meðaltöl heyja sem höfðu að lágmarki 30% þurrefni. Þurrefnisstyrkur heyjanna var 34–75% og að meðaltali 54%. Að auki má gera ráð fyrir einhverju tapi vegna frákasts af völdum margs konar plastskemmda sem eyðileggur fóðrið. Tap af þessum sökum er mjög breytilegt og fer eftir gæðum pökkunar, frágangi á rúllum og fóðrunartækni. Að mati bænda er frákast að jafnaði lítið við rúllubaggaverkun, eða einungis um 1%, en þó getur það orðið umtalsvert meira ef einhver slys verða (t.d. Þóroddur Sveinsson 1993, Bjarni Guðmundsson 1995). Fjöldi fóðurtilrauna á Hvanneyri með rúlluhey sýna þó að sjáanlegar skemmdir af völdum myglu eykst jafnt og þétt þegar líður á veturinn og úrkast eykst að sama skapi.

FRÁ SLÆTTI TIL HIRÐINGAR

Tap frá slætti til hirðingar er háð veðurfari, tímalengd heysins á velli og forþurrkunarhraðanum. Þó að beint þurrefnistap á velli hafi ekki verið mælt í umræddum tilraunum getur það verið umtalsvert vegna molnunar og slæðings, sérstaklega ef heyið er forþurrkað mikið yfir 45% þurrefni. Ætla má að þurrefnistap á velli sé talsvert minna í rúlluheysverkun samanborið við þurrheysverkun (Bjarni Guðmundsson 1995). Meðalþurrefnisstyrkur rúlluheys á Íslandi er 50–60% í fyrri slætti og 40–50% í seinni slætti (t.d. Þóroddur Sveinsson 1994) og þess vegna má gera ráð fyrir nokkru þurrefnistapi við forþurrkun. Við hollenskar aðstæður er áætlað að 1,2% þurrefnis tapist á sólarhring fyrstu 2–4 dagana á velli, eða þar til þurrkstig heysins hefur náð 50% (Schukking og Overvest 1980 eftir McDonald o.fl. 1991). Ef forþurrkunin tekur lengri tíma, eða allt að 7 daga til þess að ná þessu þurrefnisstigi, er tapið 1,7% á sólarhring.

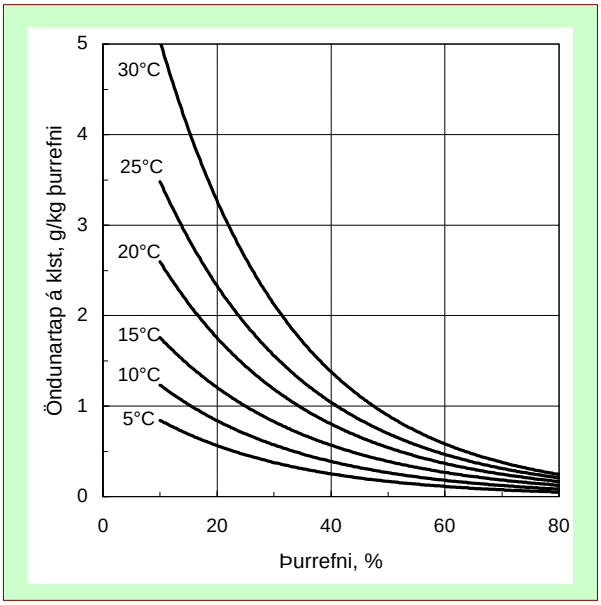
Styrkur meltanlegrar orku var að jafnaði 4% og hráprótein 5% minni í hirðingarsýnum en sláttusýnum af sömu spildum (11. tafla). Eins og staðalfrávikin sýna er breytileikinn mikill, sérstaklega í próteinstyrknum, og er tapið allt frá því að vera minna en ekkert og upp í meira en 13%. Engu að síður er þetta talsvert minna tap en gera má ráð fyrir ef heyið er fullþurrkað á velli, jafnvel við bestu aðstæður. Ástæður tapsins eru fyrst og fremst molnun á orku- og próteinríkasta hluta grasanna, þ.e. blaðanna. Þess vegna er blaðrík snemmslægja eða há sérstaklega viðkvæm fyrir slíkri rýrnun. Í slæglegum þurrki eða ef hey liggja of lengi í sláttuskárum eða stórum görðum tapast mikið vegna öndunar og próteinniðurbrots. Hægt er að draga úr þessu tapi með því að láta birtu leika sem lengst um allt heyið því það hefur sýnt sig að sykrutap vegna öndunar er mest í myrkri. Vitað er að bæði sukrósi og fruktanar eru vatnsrofin niður í glukósa og fruktósa frá slætti og fram að pökkun. Heildarneyslu er þó erfitt að magnmæla nákvæmlega vegna þess að sykrurnar sem tapast endurnýjast að hluta a.m.k. með niðurbroti á hemisellulósa, sellulósa og pektínum (t.d. McDonald o.fl. 1991). Hins vegar er auðveldara að mæla heildarþurrefnistap (sem er aðallega kolvetnatap) og er óumflýjanlegt. Heildaröndunartap sem verður af þessum sökum er margfeldi af þurrkhraða, loft-

11. tafla. Þurrefnis-, orku- og próteintap við votverkun rúlluheys með yfir 30% þurrefni.[a)]

	Þurrefni			Styrkur meltanlegrar orku			Styrkur hrápróteins		
	Tap %	Fjöldi	Staðal-frávik[b)]	Tap %	Fjöldi	Staðal-frávik[b)]	Tap %	Fjöldi	Staðal-frávik[b)]
Frá slætti til hirðingar	-	-	-	4	17	2,8	5	8	6,7
Frá hirðingu til gjafar	5	9	1,8	4	31	4,5	3	22	5,3
Frá slætti til gjafar	-	-	-	9	21	4,1	10	8	9,4

a) Samantekt úr rannsóknum á Hvanneyri og Möðruvöllum (sjá 1. töflu). Geymslutími 100–300 dagar. Meðalþurrefni í rúllu = 54% (spönn 34–75%).
b) Staðalfrávik milli meðaltala einstakra tilraunaliða.

hita og forþurrkunartíma. Reglan er að því fyrr sem tekst að þurrka heyið á velli því minna verður öndunartapið. Hver gráða frá 0 og upp að 30°C eykur niðurbrot kolvetna af völdum plöntuensíma á hraða veldisvaxtar (*exponential rate*). Þetta samspil, sem er dregið fram á 39. mynd, sýnir að eftir því sem lofthiti er minni og heyið er þurrara því minna verður öndunartapið á hverja tímaeiningu. Niðurbrot próteins er því minna sem þurrkhraðinn er meiri og aðgangur súrefnis að hráefninu er greiðari, sérstaklega fyrst eftir slátt. Engu að síður getur 10–50% af heildarpróteini jurtanna brotnað niður í einfaldari köfnunarefnissambönd, aðallega peptíða og amínósýrur, fram að hirðingu. Bændur sem verka hey í böggum spara heyvinnslutækin oft á tíðum einum of og draga að dreifa úr sláttuskárum eða görðum, sennilega í þeirri trú að það sé lítið á

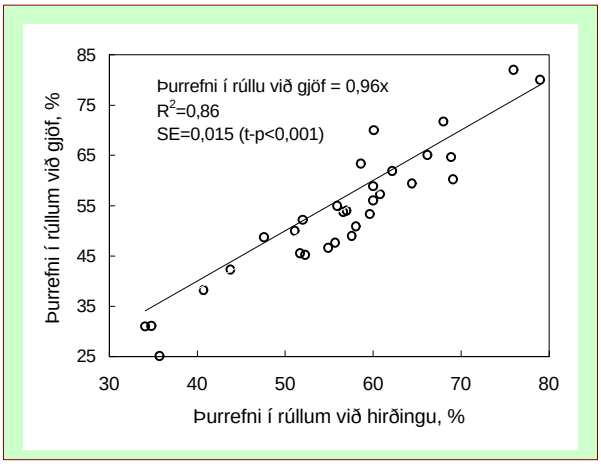


39. mynd. Áhrif lofthita og þurrkstigs á þurrefnistap af völdum öndunar plöntufrumna. (Byggt á Honig, frá McDonald o.fl. 1991).

því að græða. Af framansögðu er þó ljóst að forþurrkun rúlluheys lýtur sömu lögmálum og þurrheysverkun og þess vegna er nauðsynlegt að beita sama verklagi í stórbaggaheyskap til þess að draga sem mest úr vallartapinu.

FRÁ HIRÐINGU TIL GJAFAR

Að jafnaði má gera ráð fyrir að um 5% af þurrefninu í forþurrkuðum rúllum tapist frá hirðingu til gjafar á fyrsta vetri. Í rúlluheyi með undir 30% þurrefni má einnig gera ráð fyrir þurrefnistapi með safafrárennsli sem getur numið allt að 10% í mjög blautu hráefni (sjá 28. mynd). Útskolun orku er þó ekki hlutfallslega jafnmikil og þurrefnistapið (McDonald o.fl. 1991), en útskolun fosfórs, kalís og fleiri steinefna er hlutfallslega meiri en þurrefnistapið gefur til kynna (Bjarni Guðmundsson 1995, McDonald o.fl. 1991). Í 31 forþurrkaðri rúllu sem geymdar voru inni í hlöðu á Möðruvöllum reyndist meðalþurrefnistapið vera 4% eins og kemur fram á 40. mynd. Styrkur meltanlegrar orku í þessari samantekt (11. tafla)



40. mynd. Þurrefnishlutfall í 31 innirúllu við hirðingu og gjöf. Meðalgeymslutími 150 dagar. Línan er x=y. Úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum 1996 og 1997.

12. tafla. Mikilvægir loftfirrðir gerjunarferlar af völdum örvera í votheyi og afleiðingar þeirra.[a)]

Æti	Afurðir	Heimtur, % Þurrefni	Orka
Eingerjun mjólkursýrugerla			
Glukósi/fruktósi+2ADP+2P	Mjólkursýra+2ATP+2H_2O	100	98
2sítrónusýra+ADP+P	Mjólkursýra+3ediksýra+3CO_2+ATP	70	102
Eplasýra	Mjólkursýra+CO_2	67	102
Fjölgerjun mjólkursýrugerla			
Glukósi+ADP+P	Mjólkursýra+etanól+CO_2+ATP+H_2O	76	98
3fruktósi+2ADP+2P	Mjólkursýra+etanól+CO_2+mannitol+CO_2+2ATP+H_2O	95	99
Smjörsýrugerlagerjun			
2mjólkursýra+ADP+P	Smjörsýra+2CO_2+2H_2+ATP+H_2O	49	82
Iðragerlagerjun			
Glukósi+3ADP+3P	Ediksýra+ethanól+2CO_2+2H_2+3ATP+H_2O	59	83
Gersveppagerjun			
Glukósi+2ADP+2P	2etanól+2CO_2+2ATP+H_2O	51	97

a) McDonald o.fl. 1991.

féll að jafnaði um 4% og hrápróteins um 3% frá hirðingu til gjafar. Samanlagt má því áætla tap meltanlegs þurrefnis um 9% að jafnaði á votverkunartímanum. Þurrefnis- og orkutapið stafar af ýmsum gerjunarferlum sem breyta hluta af þurrefninu í koltvísýring og vatn, auk annarra afurða. Í 12. töflu má sjá hvaða afleiðingar algengir gerjunarferlar af völdum örvera í votheyi hafa á heimtur þurrefnis og heildarorku. Þar sést að þurrefnistap er oft á tíðum umtalsvert án þess að heildarorka tapist. Ekki er óalgengt að heildarorka og meltanleg orka velverkaðs votheys sé hærri en í grasinu sem það er búið til úr (McDonald o.fl. 1991). Mjólkursýrugerlar sem eru ríkjandi við frumgerjun rúlluheys valda minnsta orkutapinu þó að þurrefnistapið geti orðið allt að 30%. Gerjun gersveppa, iðra- og smjörsýrugerla orsaka 41–51% þurrefnistap, þó að orkutapið sé einungis 3–18%. En þá er ekki tekið tillit til þess að gerjunarafurðirnar sem orkan er bundin í, þ.e. smjörsýra, etanól og ediksýra, hafa neikvæðari áhrif á fóðrunarvirði heysins en mjólkursýra. Gerjunartap af völdum plöntuensíma sem framleiða mest etanól, en einnig mjólkursýru, er lítið m.t.t. heildarorku, þó að kolefnishvarfið geti numið 30% (Hall o.fl. 1982).

Fóðurgildi heyja er yfirleitt ákvarðað út frá hirðingarsýnum og þess vegna hefur það hagnýtt gildi ef hægt væri að ákvarða nokkurn veginn rýrnun á fóðurgildi frá hirðingu til gjafar. Rannsóknir sem hafa reynt að upplýsa þetta eru ekki samhljóða. Orkurýrnun í háarrúllum frá pökkun fram að gjöfum hefur t.a.m. mælst 8–11% í tilraunum á Hvanneyri og Möðruvöllum (Bjarni Guðmundsson 1995, Sigríður Bjarnadóttir 1998), en engin í öðrum rannsóknum á meðal bænda í Eyjafirði og Suðurlandi (Þóroddur Sveinsson 1994, Bjarni Guðmundsson 1999). Þurrefnistap var þó ekki mælt í þessum verkefnum. Sambærilegar niðurstöður er hægt að finna í rúlluheyi af fyrsta slætti (t.d. Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1996). Nokkuð stór rannsókn á meðal bænda í utanverðum Eyjafirði sýndi að orkurýrnunar frá hirðingu til gjafar gætti mest í auðmeltasta heyinu (Þóroddur Sveinsson 1994). Þetta fékkst hins vegar ekki staðfest í tilraun á Möðruvöllum tveimur árum seinna (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1996). Ástæður fyrir þessum breytilegu niðurstöðum geta verið margar, eins og t.d. árferðismunur og mislangur geymslutími. Þó að próteinrýrnun mælist að jafnaði nokkur er ekki óalgengt að styrkur próteins aukist frá hirðingu til gjafar (t.d. Bjarni Guðmundsson 1995). Þetta stafar af þurrefnistapi á verkunartímanum, sem t.d. sést á 40. mynd og er mest á kostnað kolvetna, en síður á kostnað köfnunarefnis.

HEILDARTAP

Ef þessar niðurstöður eru dregnar saman er ekki óvarlegt að áætla að tap meltanlegs þurrefnis í vel verkuðu rúlluheyi sé að jafnaði um 14–15% frá slætti til gjafar á fyrsta vetri og að styrkur

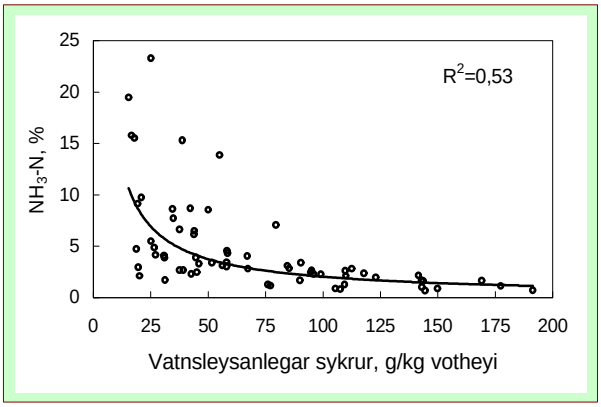
meltanlegrar orku og hrápróteins minnki um 8–10% á þessum tíma. Miðað við þurrheysverkun verður þetta tap að teljast lítið (sjá Bjarni Guðmundsson 1981, 1995).

Ef geyma þarf votheysbagga annan vetur má búast við áframhaldandi verkunartapi vegna aukinnar hjágerjunar. Gera má ráð fyrir að sjá merki hjágerjunar í rúllum strax og hlýna fer fyrsta vorið eða jafnvel fyrr, nema að pökkun og frágangur á rúllum hafi verið þeim mun betri. Þetta er ferli sem gerist ekki samtímis eða jafnhratt í öllum rúllum í sömu stæðu, því að hver rúlla fer að lifa sjálfstæðu lífi ef svo má segja. Rúllum með sjáanlegar mygluskemmdir eða hitamyndun fer þó stöðugt fjölgandi. Hjágerjun og öndun leiðir til ammoníum-, etanól- og própíónsýrumyndunar og sýrustig hækkar yfirleitt og mjólkursýrustyrkur lækkar. Hjágerjun á háu stigi og öndun í ystu lögum rúlluheys veldur þar að auki miklu þurrefnistapi (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1997).

Ef einhver tími líður frá því að baggarnir eru opnaðir og þangað til gefið er úr þeim má gera ráð fyrir enn frekara tapi þurrefnis. Geymslufesta votheys er oft metin á þann hátt að mæla tímann frá því að plastumbúðir hafa verið fjarlægðar og þangað til hitahröðun (hækkun) hefst. Geymslufesta votheys er afar breytileg og þess vegna er misjafnt hvað vothey þolir að standa „opið“ lengi. Geymslufesta votheys getur verið allt frá nokkrum klukkustundum upp í heila viku (Lättemäe og Sarand 2000, Bjarni Guðmundsson 1992, McDonald o.fl. 1991). Þó má gera ráð fyrir að fóðrunarvirði votheysins hraki fyrr en geymslufestan gefur til kynna. Það sem fyrst og fremst ræður geymslufestunni er lofthitinn á þessum tíma og einnig þurrk- og gerjunarstig heysins, skurður, hjálparefni og hvort einhver hjágerjun af völdum gersveppa er þegar hafin. Aukinn lofthiti flýtir tapi á geymslufestu sem og aukin forþurrkun (Bjarni Guðmundsson 1992). Mjög þurrt rúlluhey (um 80% þe.) hefur hins vegar mikla geymslufestu (Ohlson og Kristensen 1996, Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1997). Vel gerjað súrt vothey hefur meiri geymslufestu en lítið gerjað vothey. Það stafar ekki einvörðungu af súrnum, heldur er það einnig vegna meiri sykruleifa í lítt gerjuðu heyi sem eru nauðsynlegar fyrir vöxt gersveppa. Skurður heys í rúlluböggum eykur geymslufestuna (Lättemäe og Sarand 2000). Hjálparefni sem fyrst og fremst draga úr gerjun, eins og maurasýra og ýmis nitursambönd, draga samt ekki alltaf úr geymslufestu heldur geta aukið hana í vissum tilfellum (McDonald o.fl. 1991, Bjarni Guðmundsson 1992, Lättemäe og Sarand 2000, O'Kiely 2000). Hjágerjun, sem yfirleitt hefst vegna virkni gersveppa, getur verið farin af stað löngu áður hitamælingar gefa eitthvað til kynna og áður en plasthjúpurinn er fjarlægður. Í slíkum böggum er geymslufestan lítil sem engin og hitnar í böggunum nánast um leið þeir eru opnaðir.

ÁHRIF RANGRAR GERJUNAR

Stundum kemur fyrir að vothey eyðileggist vegna rangrar gerjunar. Slíkt tap er mjög tilfinnanlegt fyrir þann bónda sem í því lendir. Röng gerjun leiðir til þess að í stað mjólkursýrugerla eru iðragerlar eða smjörsýrugerlar allsráðandi. Aðalafurðir gerjunar verða, auk mjólkursýru, ediksýra, ammoníak og hugsanlega smjörsýra. Þannig vothey er illa lyktandi, stundum hálf úldið og sýrustig er hátt. Skilyrði fyrir því að þessir gerlar verði ofan á í samkeppni við mjólkursýrugerla er mikil vatnsvirkni fóðursins og lágt sykruinnihald. Iðra- og smjörsýrugerlar nýta betur en mjólkursýrugerlar aðra orkugjafa í stað sykra, eins og t.d. ammínósýrur. Þess vegna kemur ekki á óvart að amoníaksmyndun er mest í sykrusnauðasta rúlluheyinu þar sem amínósýrur eru væntanlega nýttar sem orkugjafar til gerjunar (41. mynd). Slík skilyrði skapast í heyi sem liggur í sláttuskárum lengi óhreift án þess að þorna að ráði. Myrkuröndun (*dark respiration*) veldur því



41. mynd. Hlutfall ammóníumbundins N sem fall af vatnsleysanlegum sykrum í fullverkuðu rúlluvotheyi. (Byggt á gagnasafni úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum 1996–1998).

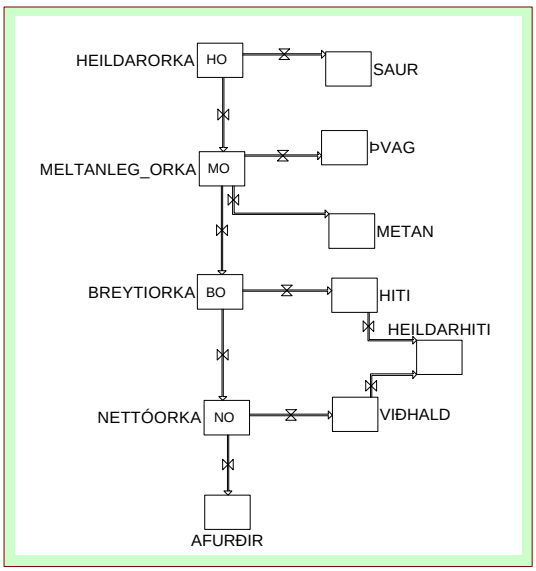
að hratt gengur á sykruforðann við slíkar aðstæður. Vel áborið grænfóðurbygg virðist sérstaklega viðkvæmt fyrir þessu þegar það er slegið við upphaf skriðs, en þá er sykrustyrkur þess mjög lágur (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999) og mjög nálægt þeim mörkum, um 25 g VLS/kg vothey, sem talin eru nauðsynleg fyrir góða verkun (Pettersson 1988).

VII. FÓÐRUNARVIRÐI VOTHEYS

Heyverkunin leiðir óumflýjanlega til breytinga á efnasamsetningu og gæðum fóðurefnanna fyrir búfé. Eins og hér hefur verið lýst eru kolefnisríkar stórsameindir brotnar niður í smærri kolefnissameindir sem margar hverjar nýtast ver fyrir líkamsstarfssemi búfjárins til viðhalds og afurða. Hefðbundnar mælingar á fóðurgildi heys, eins og t.d. meltanleiki þurrefnis og hráprótein, gefa takmarkaðar upplýsingar um þær efnabreytingar sem verða í heyinu við verkun. Sérstaklega á þetta við um nýtingu orkunnar, en nú þegar er farið að nota próteinmatskerfi sem gefur mun betri upplýsingar um nýtingu próteins til viðhalds og afurða. Með auknum rannsóknum og nýju fóðurmatskerfi má í framtíðinni búast við því að reiknað fóðurgildi gefi nákvæmari upplýsingar um þessar breytingar en nú er.

NÝTING FÓÐURORKUNNAR

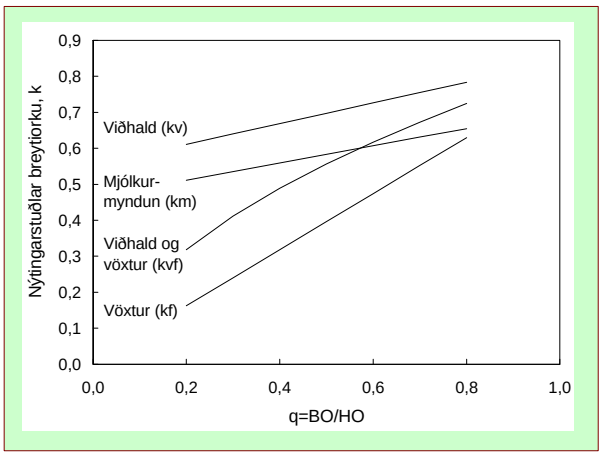
Hingað til hefur eingöngu verið fjallað um heildarorku (HO) heysins eða meltanlega orku (MO) þess. Það er hins vegar nauðsynlegt að þekkja hvernig orkan nýtist fyrir líkamsstarfsemi búfjárins og er það dregið fram á 42. mynd. Hér á eftir verður reynt að útskýra hvernig og með hvaða aðferðum nýting orkunnar er metin og verður stuðst við grein Jóhannesar Sveinbjörnssonar og Braga Líndals Ólafssonar (1999) um þetta efni ef annað er ekki tekið fram.



42. mynd. Afdrif fóðurorkunnar (Jóhannes Sveinbjörnsson og Bragi Líndal Ólafsson 1999).

Meltanleikamæling metur hve mikill hluti heildarorkunnar meltist eða kemur ekki út úr skepnunni í saur. Orkan sem tapast með saur getur numið 20–60% af heildarorkunni, en í íslensku heyi er hún yfirleitt á bilinu 25–40%. Af meltanlegu orkunni (MO) tapast síðan nokkuð með þvagi og metani, eða 18–19%, og það sem þá er eftir kallast breytiorka (BO). Drjúgur hluti breytiorkunnar tapast sem hiti, en það sem ekki tapast kallast nettóorka (NO). Nettóorkan er sú orka sem skilar sér í afurðum eins og í vexti og mjólk og er þess vegna mælanleg. Hlutur breytiorku af heildarorku (BO/HO) gefur upplýsingar um orkustyrkleika fóðursins, q. Eftir því sem q er stærra því stærri hluti breytiorkunnar nýtist sem nettóorka (43. mynd). Nýtingin er misjöfn eftir því hvort nettóorkan fer í viðhaldsþarfir, vöxt eða mjólkurmyndun. Þess vegna er nauðsynlegt að þekkja svonefnda k-stuðla fyrir hvert þessara tilvika, en þeir eru notaðir til þess að umreikna breytiorku yfir í nettóorku. Að auki eru k-stuðlarnir breytilegir eftir fóðurgerðum, eins og t.d. þurrheyi, mismunandi votheyi eða kjarnfóðri. Enn vantar þó talsvert upp á að þessi þekking hafi hagnýta þýðingu, vegna skorts á nægjanlegum rannsóknum sem skilað gætu stöðluðum aðferðum við endurbætt mat á fóðurgildi mismunandi gróffóðurs.

Til þess að meta orkugildi fóðurs er í dag notast við sk. fóðureiningu til mjólkurmyndunar, FE_m, en áður var miðað við fóðureiningu til



43. mynd. Áhrif orkustyrkleika fóðursins, q, á nýtingu breytiorkunnar yfir í nettóorku til viðhalds, mjólkurmyndunar og vaxtar (Jóhannes Sveinbjörnsson og Bragi Líndal Ólafsson 1999).

vaxtar, FE_f. FE_m er eining sem ber saman nettóorku fóðurs til mjólkurmyndunar við nettóorku staðlaðs byggs með 85% þurrefni. Hey með t.d. 0,75 FE_m og 85% þurrefni hefur 75% þeirrar nettóorku sem staðlaða byggið hefur. Á Íslandi er þessi fóðureining fundin í gróffóðri með því að mæla meltanleika (MO) í tilraunaglösum *in vitro* (með vambarsafa úr kúm) eða með pepsín- og cellulasa aðferðinni eða í NIR (*Near Infrared Reflectance Spectroscopy*). Þessi meltanleiki á að endurspegla sem mest *in vivo* (lifandi=raunverulegan) meltanleika í þeim skepnum sem um er að ræða. Út frá meltanleikaákvörðuninni er síðan út úr jöfnum fundin út nettóorkan (NO) með föstum stuðlum sem eru þeir sömu fyrir allt gróffóður. Jöfnunar eru sem hér segir;

$$HO = 18{,}4 \text{ MJ/kg þurrefni}$$

$$MO = f(HO, \text{ meltanleiki þurrefnis [mÞE]})$$

$$\text{Meltanleiki lífræns efnis (mLE)} = 0{,}98 \times \text{mÞE} - 4{,}8$$

$$BO = 15 \times mLE$$

$$q = BO/HO$$

$$k_m = 0{,}24q + 0{,}463 = 0{,}60 \times (1 + 0{,}4 \times (q - 0{,}57)),$$

m= til mjólkurmyndunar

$$NO_m = BO \times k_m \times 0{,}9752$$

$$FE_m = NO_m / 6{,}9$$

(NO_m staðlaðs byggs= 6,9 MJ)

Ekki verður farið í að útskýra þessar jöfnur hér, en vísað til greinar Jóhannesar Sveinsbjörnssonar og Braga Líndals Ólafssonar (1999). Þar sem sömu stuðlar eru notaðir fyrir allt gróffóður gefur núverandi fóðureining í raun engar upplýsingar umfram meltanleikagildið. Þær skekkjur við mat á raunverulegu fóðurgildi sem geta orðið af þessum sökum vega oft hver aðra upp, en geta í vissum tilvikum margfaldast. Almennt er talið að nýtingarstuðlar til vaxtar séu hærri í smáraheyi en grasheyi, jafnvel þó að meltanleiki grasheysins sé hærra. Samantekt úr 20 tilraunum með jórturdýr sýndi að nýtingarstuðlar til vaxtar (k_f) í votheyi voru að jafnaði 13% lægri en reiknuð staðalgildi Agricultural Research Council (ARC) í Bretlandi (McDonald o.fl. 1991). Erfitt er að draga miklar ályktanir af þessari samantekt vegna mikils breytileika sem ekki var hægt að skýra út frá mismunandi forþurrkun eða hjálparefnum. Samantekt 280 tilrauna bentu til þess að nýting breytiorkunnar til viðhalds og mjólkurmyndunar í þurrheyi og votheyi væri svipuð (Van Es 1969 eftir McDonald o.fl. 1991).

NÝTING HRÁPRÓTEINS

Með tilkomu nákvæmara próteinmatskerfis (AAT/PBV-kerfið) varð mikilvægt að þekkja leysanleika (niðurbrot) próteinsins í vömb jórturdýra. Því hærri sem leysanleiki fóðurpróteinsins er því lakara nýtist það fyrir líkamsstarfssemi jórturdýra. Bragi Líndal Ólafsson o.fl. (2000) hafa rannsakað leysanleika próteins í rúlluheyi í vömb mjólkurkúa. Þeir fundu að hægt er að spá nokkuð nákvæmlega um niðurbrot próteins í fullverkuðu rúlluheyi með því að styðjast við mælingar á þurrkstigi, meltanleika þurrefnis og hrápróteininnihaldi samkvæmt eftirfarandi líkingu;

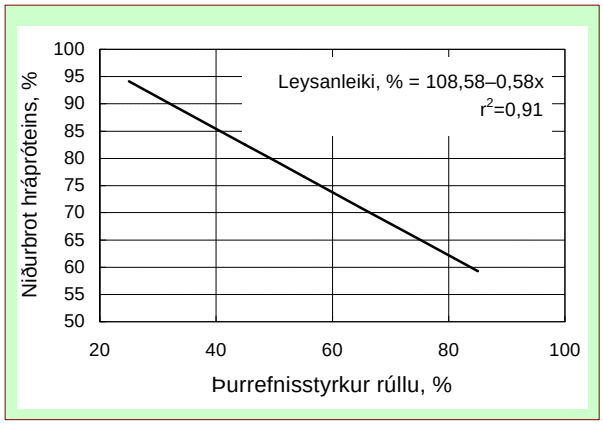
$$\text{Leysanleiki, \%} = 63{,}35 - 0{,}49 \times \text{þe.\%} + 0{,}46 \times \text{melt. þe.\%} + 0{,}43 \text{ hráprót.\% þe.} \qquad (r^2 = 0{,}92)$$

Spannir: Þurrefni, 30–80%. Meltanlegt þurrefni, 62–77%. Hráprótein í þurrefni, 9–20%.

Niðurstöðurnar sýna að leysanleiki próteins í velheppnuðu rúlluheyi er afar breytilegur og liggur á bilinu 60–90%. Leysanleikinn tengist fyrst og fremst þurrefnisstyrk heysins (44. mynd). Þessum rannsóknum er ekki lokið og t.d. á þessi jafna ekki við um mjög blautt hráefni, þ.e. þurrefnishlutdeild á bilinu 10–30%. Próteinniðurbrotið sem verður við votheysverkunina hefur neikvæð áhrif á fóðurnýtingu köfnunarefnis hjá jórturdýrum sem lýsir sér oftast þannig að stærri hluti köfnunarefnisins skolast burt með þvagi (Keady o.fl. 1996, McDonald o.fl. 1991, Woolford 1984).

LYSTUGLEIKI VOTHEYS

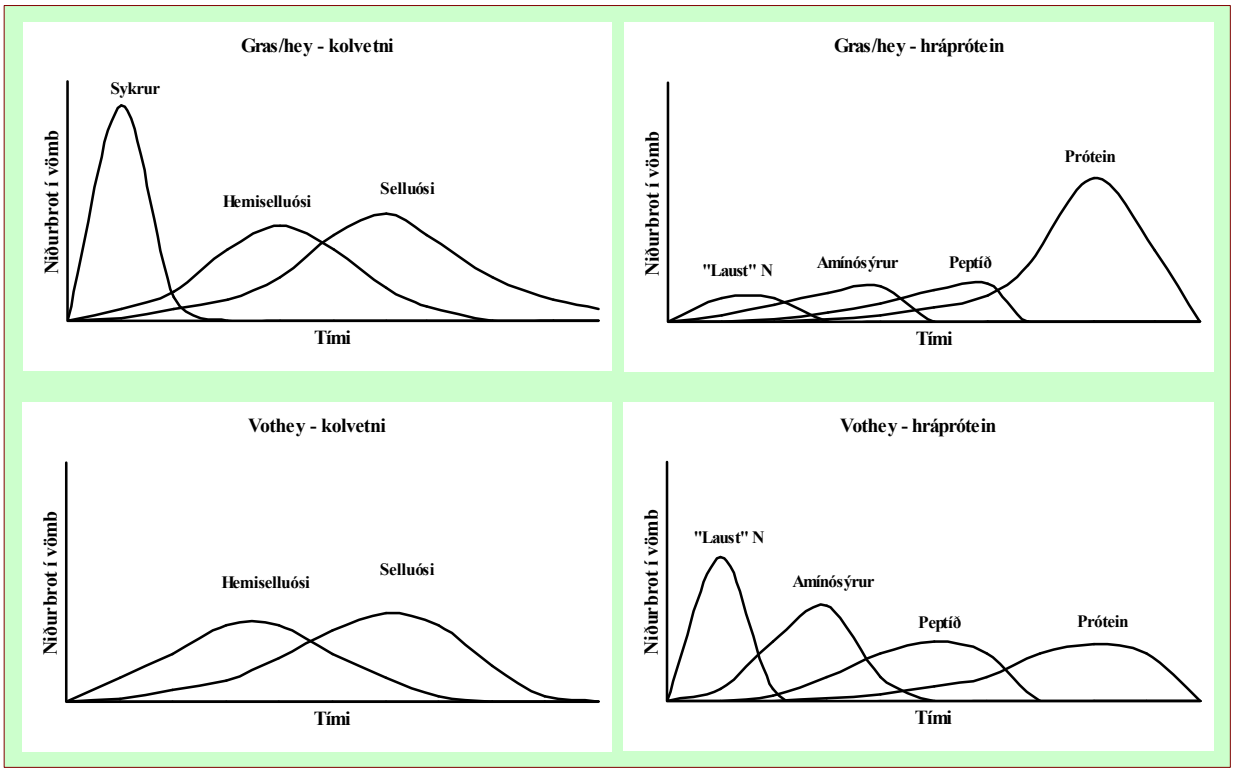
Margfeldi fóðurgildis og lystugleika er kallað fóðrunarvirði fóðursins (Bjarni Guðmundsson 1981). Algengast er að lystugleiki og fóðurgildi



44. mynd. Áhrif þurrefnisstyrks í rúlluvotheyi á niðurbrot hrápróteins í vömb mjólkurkúa (Bragi L. Ólafsson o.fl. 2000).

fari saman, en svo er þó ekki alltaf. Sömuleiðis skilar aukið fóðrunarvirði yfirleitt meiri afurðum í vexti eða mjólk, en það er þó ekki algilt. Það stafar af því að nýting fóðurefnanna til afurða getur verið mismunandi eins og útskýrt var hér á undan. Í samanburði við ferskt gras er lystugleiki verkaðs heys með sama fóðurgildi nánast undantekningalaust lægra. Munurinn er hvað mestur á mikið gerjuðu votheyi og fersku grasi og sauðfé er mun viðkvæmara fyrir verkunarþáttum sem þessum en nautgripir (McDonald o.fl. 1991). Samantekt 65 tilrauna sýndi að sauðfé át að jafnaði 37% minna af votverkuðu heyi í samanburði við ferskt gras af sama stofni. Þessi munur er ekki eins áþreifanlegur í nautgripum og hægt er að ná upp áti til jafns við ferskt gras af sama stofni með hjálparefnum (t.d. maurasýru). Þrátt fyrir þetta sýna rannsóknir að þó að meltanleiki votheys sé jafnvel hærri en í ferska grasinu og átið jafn mikið þá er mjólkurnytin 20% lægri hjá kúm sem fengu vothey í stað heys beint af ljánum. Sömuleiðis sýna rannsóknir að vaxtarhraði er 25% lægri hjá kjötnautgripum sem fengu vothey í stað óverkaðs heys beint af ljánum (Keady o.fl. 1996). Umfangsmiklar samantektir á fóðrunarvirði votheys í samanburði við ferskt gras af sama stofni sýna þó mjög breytilegar niðurstöður úr tilraunum. Þetta stafar sennilega af því að lystugleiki votheys með sama fóðurgildi er mjög háður samsetningu verkunarafurða, eins og t.d. mjólkursýru, ediksýru, smjörsýru og ammoníaks. Þótt sterkt samband sé yfirleitt á milli þurrefnisstyrks og fóðrunarvirðis votheys (Wright o.fl. 2000) er enn sterkara neikvætt samband milli fóðrunarvirðis og magns fitusýra (eins og smjör-, edik- og própíónsýru) í votheyi (McDonald o.fl. 1991). Mesta magn þessara fitusýra er einmitt í votheyi með þurrefnisstyrk undir 40%.

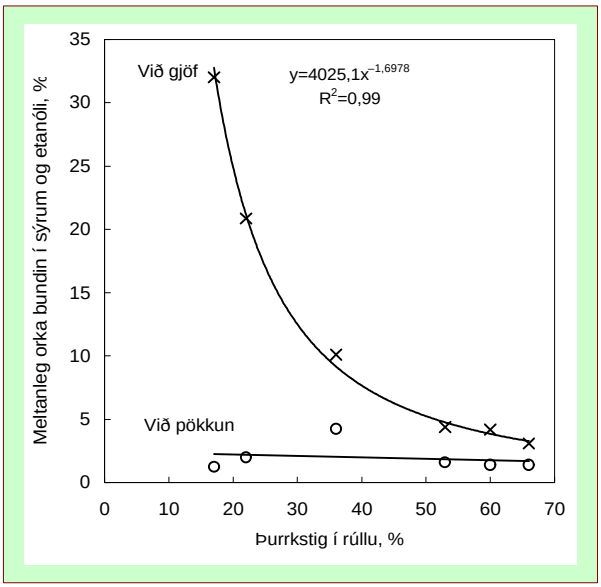
Í raun sýna flestar rannsóknir hversu mikilvægt það er m.t.t. fóðrunarvirðis að takmarka sem mest alla gerjun við votheysverkun. Það er vegna þess að gerjun í votheyi er á kostnað gerjunar í vömb og sú orka (ATP) sem örverur votheysins ná út úr sykrum grassins við að gerja þær yfir í sýrur kemur örverum vambarinnar ekki að gagni við uppbyggingu þeirra á örveruprótein (Jóhannes Sveinsbjörnsson 2000). Mikið gerjað vothey veldur einnig óhagstæðu gerjunarmunstri í vömb jórturdýra og lakari nýtingu köfnunarefnis, vegna þess að ammoníakstoppur og kolvetnatoppur fara ekki saman, eins og í vel verkuðu þurrheyi, og sést það á 45. mynd. Þetta má þó að einhverju leyti leiðrétta með réttu viðbótar-



45. mynd. Flokkar kolvetna og N-sambanda (hráprótein) annars vegar í ógerjuðu grasi/heyi og hins vegar í votheyi þar sem gerjun hefur farið fram. „Laust“-N eru smærri N sambönd (Bragi Líndal Ólafsson o.fl. 2000).

fóðri (McDonald o.fl. 1991). Algengasta aðferðin til að lágmarka gerjun er að forþurrka heyið, en einnig geta hjálparefni verið mjög áhrifarík eins og áður segir.

Eins og nú ætti að vera ljóst hefur þurrefnisstyrkur heysins afgerandi áhrif á það í hvaða efnum orkan og köfnunarefnið eru bundin að lokinni verkun. Flestar sykrur og gerjunarafurðir, auk hrápróteins, var mælt í tveimur tilraunum á Möðruvöllum (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999). Þegar heildarorka þessara efna var reiknuð við upphaf og lok verkunar sjást vel áhrif forþurrkunar á efnasamsetningu votheysins. Þar kemur í ljós að í blautasta (15–20% þe.) votheyinu eru allt að 35% sk. meltanlegrar orku bundnar í sýrum og etanóli, en innan við 3% í þurrasta (>60% þe.) votheyinu (46. mynd). Flest þessara efna nýtast illa eða ekkert sem orka fyrir vambarörverur (t.d. Randby 2000, Jóhannes Sveinbjörnsson 2000). Þegar hlutfall orku í mældum efnum fyrir og eftir gerjun er reiknað (47. mynd) kemur í ljós að í blautasta votheyinu hefur heildarorkan aukist um 40% í mældum efnum við gerjunina, en í þurrasta votheyinu minnkað um 6%. Hér er eflaust um eitthvert ofmat að ræða í blautasta votheyinu, vegna þess að gert er ráð fyrir að orka hrápróteins sé jafn mikil fyrir og eftir verkun og ekki er leiðrétt fyrir þurrefnistapi. Engu að síður er greinilegt að í blauta votheyinu kemur orka í gerjunina úr efnum sem ekki voru mæld, eins og t.d. við niðurbrot á hemisellulósa, en slíkt virðist síður eiga sér stað í forþurrkaða votheyinu og er það samræmi við erlendar niðurstöður (Pettersson 1988). Þrátt fyrir þetta er mæld meltanleikarýrnun heysins sem verður við verkunina ekki tengd þessu, enda geta vambarörverur nýtt mun meira af formbundnu kolvetnunum til gerjunar heldur en votheysörverurnar, sérstaklega sellulósa. Þetta þýðir að meltanleiki formbundinna kolvetna er hærri í þurrlegu, lítið gerjuðu votheyi í samanburði við mikið gerjað vothey.



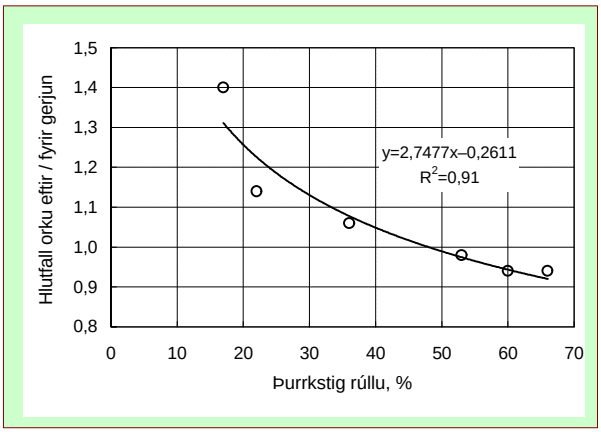
46. mynd. Áhrif þurrkstigs í rúllum á hlutfall meltanlegrar orku sem bundin er í sýrum og etanóli. (Byggt á gagnasafni úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum – Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifssson 1999).

RANNSÓKNIR Á FÓÐRUNARVIRÐI

Þurrefnisstyrkur rúlluheys hér á landi er yfirleitt talsvert hærri en almennt þekkist í votheyi erlendis. Fóðrunarvirðistilraunir með rúlluhey hér á landi hafa fyrst og fremst verið gerðar á sauðfé og mjólkurkúm. Rannsóknir Bjarna Guðmundssonar og félaga á Hvanneyri benda til þess að fóðrunarvirði rúlluheys geti verið mismunandi á milli búfjártegunda og er það í góðu samræmi við erlendar rannsóknaniðurstöður.

Sauðfé

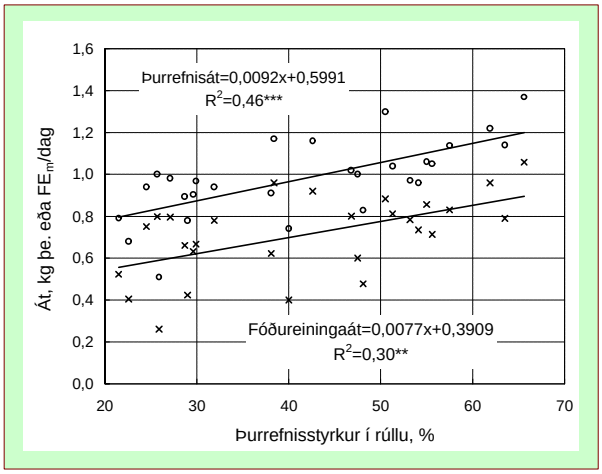
Fóðrunarvirði snemmslegins og síðslegins vallarfoxgrass og beringspunts á þremur forþurrkunarstigum var metin á gemlingum á Hvanneyri (Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1989). Forþurrkun úr 21% þe. í allt að 66% þe. ríflega tvöfaldaði fóðrunarvirði (át, FE/dag) rúlluheysins. Þar sem meltanleiki heysins sem bundið var og pakkað beint af ljánum var talsvert lægra en í forþurrkaða heyinu gætu áhrifin að hluta til stafað



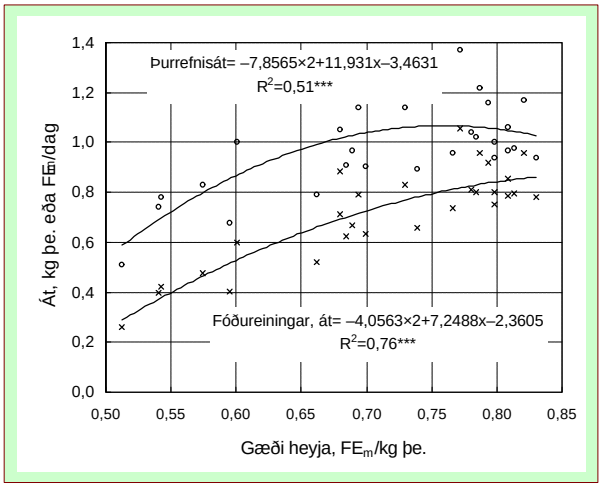
47. mynd. Áhrif þurrkstigs í rúllum á hlutfall orku í mældum efnum (sýrum, etanóli, hrápróteini og vatnsleysanlegum sykrum) eftir og fyrir gerjun. (Byggt á gagnasafni úr rúllubaggaverkefnum á Möðruvöllum – Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999).

af mismunandi fóðurgildi, en þekkt er að aukið fóðurgildi eykur jafnframt lystugleika fóðursins. Í annarri tilraun frá 1992 á Hvanneyri voru skoðuð áhrif forþurrkunar, heyskurðar og hjálparefna á verkun heys í rúlluböggum og fóðrunarvirði þess fyrir gemlinga (Bjarni Guðmundsson 1993). Í þessari tilraun var meltanleiki heysins svipaður í ferska (30% þe.) og forþurrkaða heyinu (57% þe.). Fóðrunarvirði (át, FE/dag) forþurrkaða heysins var um 20% meira í samanburði við ferska heyið, en áhrif hjálparefna (maurasýru eða blanda nitursalta) og skurðar voru hins vegar ekki marktæk. Í tveimur öðrum mjög sambærilegum tilraunum sem gerðar voru ári seinna á Hvanneyri (Bjarni Guðmundsson 1994, Bjarni Guðmundsson og Aðalsteinn Geirsson 1995) mældist hins vegar enginn munur á fóðrunarvirði fersks heys (23–30% þe.) og forþurrkaðs heys (51–62% þe.) fyrir gemlinga. Hins vegar hafði hjálparefnið Kofasafi (blanda af nitursöltum) jákvæð áhrif á fóðrunarvirðið sem jókst um 16–24% í báðum heygerðum (Bjarni Guðmundsson 1994). Áhrif forþurrkunar (27% og 43% þe.) og hjálparefna á fóðrunarvirði háar fyrir sláturlömb var skoðuð á Hvanneyri haustið 1998 (Gudmundsson og Thorsteinsson 1999). Forþurrkun jók fóðrunarvirði háarinnar um 13% og vaxtarhraða lambanna um 27% í samanburði við fersku hána. Ammoníum tetraformíat og maurasýra (GrasAAT™) juku fóðrunarvirði fersku háarinnar um 11%, en ekki vaxtarhraða lambanna. Áhrif hjálparefnisins Foraform, sem er 48% maurasýra og 22% ammoníumformíat, á fóðrunarvirði rúlluheys fyrir gimbrar var prófað í þremur tilraunum 1997–1998 (Bjarni Guðmundsson 1998). Þurrkstig heyjanna var misjafnt eftir tilraunum og þess vegna var hægt að skoða áhrif þess sem fall af áti. Fóðrunarvirði rúlluheysins var því meira sem það var þurrara (frá 25–60% þe.) og jókst mest um 17–25%. Foraform jók fóðrunarvirðið um 10% og gætti áhrifanna allt upp fyrir 45–50% þurrefnisstyrk. Sigríður Jónsdóttir og Bjarni Guðmundsson (1992) báru saman fóðrunarvirði rúlluheys (35–61% þe.) og súgþurrkaðs heys fyrir ær vetrarlangt 1988–1989 og 1989–1990. Enginn munur kom fram á heyáti ánna á milli þessara heygerða ef skoðuð eru vetrarmeðaltöl. Engu að síður kom fram að fóðrunarvirði rúlluheysins var meira en þurrheysins fyrri hluta vetrar, en minna síðari hluta vetrar. Þetta var rakið til mjög takmarkaðs geymsluþols rúlluheysins sem leiddi til aukinnar myglu í rúllunum þegar leið á veturinn.

Á 48. og 49. mynd er gerð tilraun til þess að draga saman heildarniðurstöður úr þessum verkefnum. Þrátt fyrir að horft er fram hjá þekktum skekkjuvöldum, eins t.d. mismun í þunga fjárins á milli tilrauna og áhrifa grastegunda og geymslustigs, þá fæst furðu gott samhengi á milli þurrk- og orkustigs heysins annars vegar og fóðrunarvirðis hins vegar. Forþurrkun úr 20% í 60% þurrefnisstyrk eykur marktækt fóðrunarvirði rúlluheys fyrir sauðfé um allt að 50–60% samkvæmt þessum niðurstöðum, eða 1,25–1,50% fyrir hvert prósentustig í þurrefni (48. mynd). Enn sterkara samband fæst þó á milli áts og fóðurgildis (FE_m/



48. mynd. Daglegt át gimbra á vetrarfóðrum sem fall af þurrefnisstyrk í rúllum. (Byggt á meðaltölum í 5 tilraunum í tilraunaskýrslum frá Bændaskólanum á Hvanneyri 1989–1996).



49. mynd. Daglegt át gimbra á vetrarfóðrum sem fall af orkustyrk (Fe_m/kg þe.) í rúlluheyi. (Byggt á meðaltölum í 5 tilraunum í tilraunaskýrslum frá Bændaskólanum á Hvanneyri 1989–1996).

kg þe.) heyjanna. Þurrefnsiát sauðfjár eykst línulega með auknu fóðurgildi heyjanna upp að 0,75 FE_m/kg þe., en hefur ekki áhrif upp fyrir það (49. mynd). Einnig má sjá að ef t.a.m. fóðurgildi heyjanna eykst um 33% eykst fóðrunarvirði (FE_m/dag) þeirra um 70%, eða tvöfalt meira. Á myndunum eru aðeins tekin saman meðaltöl rúlluheyja án hjálparefna, en eins og komið hefur hér fram hafa þau oftar en ekki jákvæð áhrif á fóðrunarvirði heyja fyrir sauðfé, sérstaklega það blautlega. Lauslegar athuganir af reynslu bænda af hjálparefnum gefa hins vegar ekki alltaf jafnskýrar niðurstöður (Bjarni Guðmundsson 1998) sem gæti verið vegna þess að oftar en ekki eru þau notuð undir ráðlögðum styrkleika.

Mjólkurkýr

Á margan hátt eru fóðrunartilraunir með mjólkurkýr vandasamari en tilraunir með sauðfé. Átlyst kúnna breytist stöðugt út mjaltaskeiðið og aldur, heilsufar og mismunandi holdafar getur valdið sveiflum (t.d. Laufey Bjarnadóttir og Þóroddur Sveinsson 1999). Erfitt er að leiðrétta fyrir öllum þessum þáttum til þess að fá raunhæfan samanburð á milli tilrauna. Flestar fóðrunarvirðistilraunir standa frekar stutt og einungis hluta úr mjaltaskeiði. Þótt svörun fáist á áti á ólíkum heygerðum eru áhrif á nyt yfirleitt mun minni vegna hæfileika kúnna til þess að jafna út átsveiflur.

Fóðrunarvirði rúlluheys með 46–50% þurrefni í samanburði við súgþurrkaða töðu fyrir mjólkurkýr var skoðað í tveimur tilraunum á Hvanneyri 1992–1993 og 1993–1994 (Bjarni Guðmundsson 1995). Fyrra árið var fóðurgildi heyjanna svipað og þá reyndist fóðrunarvirði súgþurrkuðu töðunnar heldur meira en rúlluheysins. Seinna árið var fóðurgildi rúlluheysins nokkuð hærra en töðunnar, en enginn munur fannst á fóðrunarvirðinu. Það ár kom einnig greinilega í ljós að fóðrunarvirði rúlluheysins minnkaði þegar leið á veturinn og er það svipað og gerðist í rannsókn Sigríðar Jónsdóttur og Bjarna Guðmundssonar (1992) með sauðfé. Enginn munur fannst á nyt eða kostum mjólkurinnar eftir heytegundum. Sigríður Bjarnadóttir (1998) bar saman á Möðruvöllum fóðrunarvirði þurrheys af 1. slætti og háar af sömu spildu í rúllum (44% þurrefni) fyrir mjólkurkýr. Kýrnar átu og mjólkuðu marktækt meira af þurrheyinu en hánni, en mesta átið fékkst þó með því að blanda heytegundunum saman. Fóðurgildi háarinnar var lægra en heysins af 1. slætti, þannig að ekki er hægt að fullyrða hvort votverkunin ein og sér hafði þessi áhrif á fóðrunarvirðið.

Áhrif þurrkstigs rúlluheys á fóðrunarvirði þess fyrir mjólkurkýr var prófað í tveimur tilraunum á Hvanneyri á árunum 1990–1992 (Bjarni Guðmundsson 1995). Ekki reyndist vera marktækur munur á heyáti kúnna eftir heyflokkum. Hins vegar héldu kýr betur á sér og skiluðu marktækt heldur meiri nyt á þurrlega heyinu (45–50% þurrefni) heldur en blautlega heyinu (30–35% þurrefni). Fóðrunarvirði háar og einærs rýgresis fyrir mjólkurkýr var prófað í þremur tilraunum á Hvanneyri 1991–1993 (Bjarni Guðmundsson 1995). Tvö ár af þremur ást rýgresið betur en háin. Háin ást betur eftir því sem hún var þurrari (29–57% þurrefni), án þess að framleiðslugildið (nytin) yxi að sama skapi. Enginn teljandi munur kom fram á kostum mjólkurinnar og dagsnyt kúnna, nema síðasta árið þar sem kýr á rýgresi mjólkuðu marktækt meira. Ef hins vegar var reiknuð nýting fóðursins til mjólkurmyndunar kom háin mun betur út og nam munurinn 18–20%. Þetta var rakið til umfangsmeiri gerjunar í rýgresinu sem vegna skorts á örveruþróteini leiddi til lakari nýtingar.

Á Stóra Ármóti var fóðrunarvirði þurrheys borið saman við fóðrunarvirði tvenns konar grænfóðurs í rúllum fyrir 1. kálfs kvígur (Gunnar Ríkharðsson og Einar Gestsson 1995). Grænfóðrið var vetrarrýgresi og vetrarrepja. Fóðurgildi rýgresisins og þurrheysins var svipað, en orkustyrkur var nokkuð hærri í repjunni. Allir hópar fengu þó þurrhey sem grunn sem var um 54% af heildargróffóðrinu í grænfóðurliðunum. Grænfóðrið jók gróffóðurátið um 5% á þurrefnisgrunni og 7% á orkugrunni. Kýrnar mjólkuðu einnig 9% meira þegar þær voru á repjunni og 2% meira á rýgresinu en þegar þær voru á þurrheyinu einu saman. Þessar niðurstöður eru í samræmi við niðurstöður Sigríðar Bjarnadóttur (1998) sem sýna að fjölbreytni í gróffóðri hefur lystaukandi áhrif á mjólkurkýr. Í annarri tilraun á Stóra Ármóti fékkst samanburður á fóðrunarvirði vetrarrepju í rúllum og votheyi úr turnum fyrir mjólkurkýr (Gunnar Ríkharðsson og Einar Gestsson 1996). Kýrnar fengu þurrhey sem grunn. Þurrefnisstyrkur votheysins var 33%, en repjunnar 16%. Meltanleiki repjunnar var hins

vegar 82%, en 72% í votheyinu. Kýrnar innbyrtu engu að síður svipað magn fóðureininga vegna þess að hlutur kálsins af heildargróffóðri var einungis 29%, en hlutur votheysins var 39%. Líkt og í fyrri tilraun var gróffóður með vetrarrepju mjólkurgæfast og mjólkuðu kýrnar á því 6% meira en kýr á turnvotheyi. Þessar tvær tilraunir sýna að vetrarepjan er mjög mjólkurgæft fóður, þrátt fyrir lágan þurrefnisstyrk. Fóðrunarvirði rúlluverkaðs mergkáls fyrir sláturlömb hefur einnig reynst hærra í samanburði við rýgresisvothey úr flatgryfjum (Vipond o.fl. 1998).

Samanburður á fóðrunarvirði hálíngresis af fyrri slætti og vallarfoxgrass af fyrri og seinni slætti fyrir mjólkurkýr var gerður á Stóra Ármóti vorið 1998 (Gunnar Ríkharðsson og Sigríður Bjarnadóttir 1999). Þurrkstyrkur heyjanna var svipaður eða á bilinu 42–45%. Fóðurgildi vallarfoxgrassins var talsvert hærra og sýrustig lægra í vallarfoxgrasinu af fyrri slætti en í hálíngresinu og vallarfoxgrashánni. Kýrnar átu ríflega þrisvar sinnum meira af fyrri sláttar vallarfoxgrasinu og 50% meira af vallarfoxgrashánni en hálíngresinu. Í fóðureiningum var munurinn tæplega tvöfaldur. Engu að síður jókst nyt kúnna ekki nema um 7%. Á Möðruvöllum voru skoðuð áhrif þriggja sláttutíma vallarfoxgrass (þroskastigs) á fóðrunarvirði rúlluheys fyrir mjólkurkýr (Laufey Bjarnadóttir og Þóroddur Sveinsson 1999). Þurrkstyrkur heyjanna af mismunandi sláttutíma var eins, eða 36–37%. Sýrustig var hæst og gerjun minnst í snemmslegna heyinu í samanburði við seinni sláttutímana tvo og var það talið vera vegna meiri buffervirkni í snemmslægjunni. Kýrnar átu 2,6 sinnum meira magn af vallarfoxgrasheyi sem slegið var rétt fyrir upphaf skriðs í samanburði við vallarfoxgrashey sem slegið var 19 dögum seinna, þó að orkustyrkur þess hafi aðeins fallið um 10% á sama tíma. Engu að síður mjólkuðu kýrnar einungis 14% meira af snemmslægjunni. Á Stóra Ármóti voru gerðar tvær tilraunir 1999 og 2000 til þess að skoða áhrif eins eða tveggja slátta á fóðrunarvirði vallarfoxgrass fyrir mjólkurkýr (Gunnar Ríkharðsson o.fl. 2001). Þurrefnisstyrkur heyjanna var á bilinu 42–63%. Kýrnar fengu þrennskonar gróffóður, 70/30 eða 30/70 fyrri/seinni sláttar vallarfoxgras eða vallfoxgras af einum slætti. Meltanleikinn var hæstur í fyrri slætti (77%), en svipaður í hánni og einslegna vallarfoxgrasinu (72%). Kýrnar átu minnst af gróffóðrinu þegar þær fengu eingöngu hey af eina slættinum og átu að jafnaði 18% meira þegar þær fengu blandað hey. Mest átu þær þó af blöndunni með 70% af fyrri slætti og 30% af seinni slætti, eða 24% meira. Engu að síður reyndist ekki marktækur munur á nyt kúnna, mældri í orkuleiðréttri mjólk, á milli þessara heyflokka.

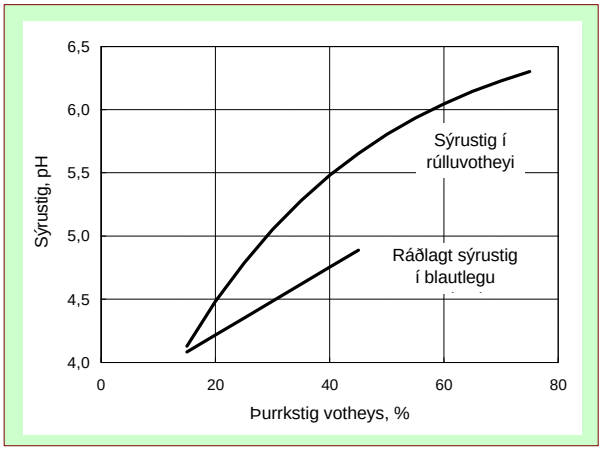
Erfitt er að draga saman niðurstöður úr þessum fóðrunarvirðistilraunum fyrir mjólkurkýr. Ekkert bendir til þess að votheysverkun í rúllum skili lakara fóðri fyrir mjólkurkýr en aðrar heyverkunaraðferðir ef staðið er rétt að málum og takmarkanir hennar virtar. Ljóst virðist að ferskleiki og fóðrunarvirði rúlluheys fyrir mjólkurkýr, líkt og fyrir sauðfé, endist tiltölulega stutt í samanburði við gott þurrhey. Rétt pökkun og frágangur á rúllum, ásamt réttum hjálparefnum, getur þó lengt þann tíma sem rúlluheyið heldur ferskleika sínum. Þá kemur oft fram í tilraunum að hægt er að auka át mjólkurkúa með því að gefa fjölbreytt gróffóður. Áhrif forþurrkunar á fóðrunarvirði rúlluheys fyrir mjólkurkýr virðast ekki eins skýr og í tilraunum með sauðfé. Rúlluverkað snemmslegið vallarfoxgras skilar mesta fóðrunarvirði gróffóðurs sem mælst hefur nokkru sinni í íslensku heyi. Þurrefnisátið á dag er með ólíkindum þegar best lætur, eða sem nemur 3,8 til 4,6% af líkamsþunga. Í þessum tilraunum var gefið a.m.k. tvenns konar gróffóður, þannig að fjölbreytileiki gæti einnig haft þarna áhrif. Í samanburðartilraun á Möðruvöllum 1994 var daglegt þurrefnisát mjólkurkúa sem fengu snemmslegið, súgþurrkað vallarfoxgras (0,88 FE_m/kg þe.) sem eina gróffóður „einungis“ 2,9% af líkamsþunga (Þóroddur Sveinsson og Gunnar Ríkharðsson 1995). Vonbrigðin eru þó að þetta mikla át skilar sér ekki nema að mjög litlu leyti í aukinni nyt né sjáanlegri holdasöfnun. Orkujafnvægisútreikningar sýna að kýrnar voru offóðraðar sem nam 2,2–5,2 FE_m á dag í þessum tilraunum, en ekki er vitað hvað varð um þessa umframorku. Líklega er meltanleiki snemmslegins, orkuríks heys ofmetinn. Það er vegna þess að flæðihraði heysins í gegnum meltingarveg gripanna er það mikill að orkunýtnin minnkar. Íslenskir nautgripir hafa einnig mikla getu til að safna orkuforða í fituvefjum utan um nýru og önnur innyfli sem erfitt er að greina með sjónmati á holdum.

VIII. SAMANTEKT

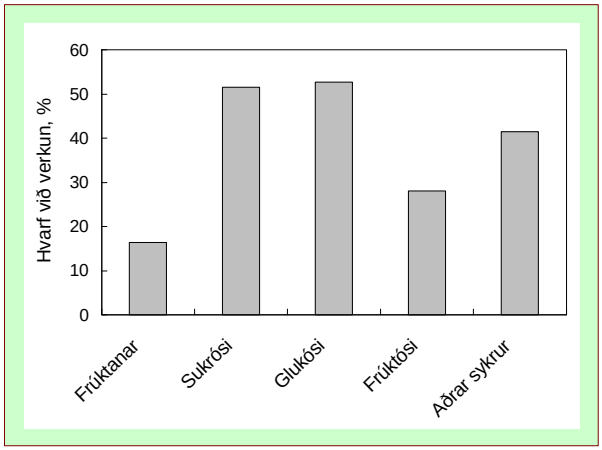
Rannsóknir leiða í ljós að baggavothey er á margan hátt frábrugðið sambærilegu votheyi í gryfjum eða turnum. Vothey í böggum hefur mikið yfirborð miðað við massa og litla þéttni í samanburði við vothey í stærri geymslum (38. mynd). Hitamyndun í rúllum af völdum frumuöndunar og gerjunar í upphafi verkunartímans er minni en gerist í stærri votheysgeymslum (Pétur Þór Jónasson 1987). Ástæðurnar eru fyrst og fremst mikið yfirborð rúllanna miðað við massa sem tryggir góða kælingu, auk þess sem áfyllingartíminn, þar sem súrefni hefur greiðan aðgang að votheysmassanum, er mun styttri við rúlluverkun.

Gerjunarhæfni baggavotheys er minni en gerjunarhæfni sambærilegs votheys í gryfjum og turnum. Þetta sést við samanburð á sýrustigi í rúllum og gryfjum eða turnum (t.d. Beaulieu o.fl. 1993). Sýrustig í rúllum virðist yfirleitt vera talsvert fyrir ofan það sem þarf til að tryggja góða verkun á hefðbundnu votheyi (50. mynd). Hærra sýrustig í baggavotheyi er afleiðing minni gerjunar sem lýsir sér í meiri sykruleifum og minni gerjunarafurðum miðað við sambærilegt hefðbundið vothey. Sykruleifar í fullverkuðu blautlegu rúlluvotheyi eru umtalsverðar (32. mynd), en í votheyi verkuðu í rannsóknastofusílóum eða á hefðbundinn hátt mælast oft litlar sem engar sykruleifar (McDonald o.fl. 1991, Woolford 1984). Það er ekki ljóst hvað veldur því að gerjunarhæfni rúlluvotheys er minni en annars votheys. Hugsanlega er það vegna mikillar kæligetu rúllubagganna. Hitinn í böggunum nær þess vegna sjaldan að nálgast kjörhita niðurbrotsensíma plantna og örvera með þeim afleiðingum að gerjunarhæfnin skerðist meira en í votheyi í stærri geymslum. Þrátt fyrir greinilega minni gerjunarhæfni eru engar vísbendingar um að fóðrunarvirði baggavotheys í samanburði við hefðbundið vothey sé minna, nema síður sé.

Íslensk fóðurgrös henta vel til votheysgerðar. Þau eru sykrurík og í fóðurgrösum ætluðum til votheysgerðar hafa mælst 135–295 g sykrur/kg þurrefnis (3. tafla). Mest er af fruktönum (50–97 g/kg þurrefnis) sem eru forðasykrur, en hinn hreyfanlegi sukrósi og einsykrurnar glukósi og fruktósi mælast á bilinu 15–56 g/kg þurrefnis. Þetta eru allt vatnsleysanlegar sykrur (VLS), en sterkja, sem er forðasykra og ekki vatnsleysanleg, og skyldar sykrur (glukanar) hafa mælst á bilinu 12–28 g/kg þurrefnis (Thorsteinsson o.fl. 1999). Sjáanleg sykruneysla er mest á kostnað glukósa og sukrósa, en magn fruktana og fruktósa breytist mun minna við votheysverkunina (51. mynd). Sykrumagn er yfirleitt nægjanlegt til að tryggja góða verkun í rúlluheyi. Undantekning er mjög blautt sykrusnautt grænfóður sem legið hefur í sláttuskárum í einhvern tíma án þess að þorna. Vegna lítils þéttleika getur sykrustyrkur í slíku votheyi farið undir þau mörk sem styðja mjólkursýrugerjun, en mörkin eru talin vera u.þ.b. 25 g VLS/kg votheys (Pettersson 1988).



50. mynd. Sýrustig í íslensku rúlluvotheyi (28. mynd) sem fall af þurrkstigi votheys og borið saman við æskilegt sýrustig til þess að tryggja góða verkun í sílóum eða flatgryfjum (Pettersson 1988).



51. mynd. Meðalhvarf (%) helstu vatnsleysanlegra sykra (VLS) í fullverkuðum, forþurrkuðum rúllum. Sjá einnig 14. mynd (Þóroddur Sveinsson og Bjarni E. Guðleifsson 1999).

Langstærsti hluti örveruflórunnar í rúlluvotheyi eru mjólkursýrugerlar og aðrir glukósasundrendur. Mest er af mjólkursýrugerlum af ættkvíslunum *Lactobacillus*, *Leuconostoc* og *Pediococcus* í upphafi frumgerjunar (8. tafla og 19. mynd). Örverufjöldi í rúlluvotheyi er mestur á frumgerjunarstigum verkunarinnar, en minnkar síðan þegar líður á geymslutímann svo fremi að hjágerjun sé ekki komin á skrið (Lättemäe 1997, 19. mynd). Þegar líða fer á geymslutímann hefst hjágerjun af völdum gersveppa. Gersveppir verða þá ríkjandi í votheyinu, en mjólkursýrugerlarnir hverfa (34. mynd). Örverugerjun er fyrst og fremst af völdum fjölgerjunga (8. tafla), þó að *Pediococcus*-gerlar, sem eru eingerjungar, hafi mælst þriðji stærsti örveruflokkurinn í rúlluvotheyi (20. mynd). Gerjunarafurðirnar eru þess vegna ekki einungis mjólkursýra heldur einnig blanda af öðrum lífrænum sýrum, mest ediksýru, ásamt etanóli og ammoníaki (29. mynd).

Í votheyi fer fyrst fram frumgerjun (*primary*) af völdum örvera og/eða öndunar plöntufruma, en síðar hefst hjágerjun (*secondary*) sem er eingöngu drifin áfram af örverum. Hægt er að greina þrjár gerðir frumgerjunar eftir þurrkstigi votheysins (24. mynd). Í vatnsríku votheyi (<35% þe.) er örverugerjun ríkjandi og árangur hennar ræðst fyrst og fremst af sykrumagni, buffervirkni og þéttni votheysins. Gerjunarvirknin er mikil og mjólkursýra er aðalgerjunarafurðin. Í miðlungsforþurrkuðu votheyi (35–55% þe.) hefur gerjunarvirknin skerst verulega vegna lágrar vatnsvirkni. Gerjunin er bæði af völdum örveru- og plöntuensíma. Mjólkursýra er yfirleitt aðalgerjunarafurðin, en hlutur annarra afurða, sérstaklega etanóls og einnig ediksýru, hefur aukist umtalsvert og því meira sem votheyið er þurrara (30. mynd). Árangur gerjunarinnar ræðst sennilega mest af bufferhæfni (37. mynd), þurrkstigi og gæðum pökkunar. Hjágerjun af völdum gersveppa getur orðið umtalsverð í þessu votheyi þegar plastumbúðir fara að gefa eftir. Í mikið forþurrkuðu rúlluheyi (55–80% þurrefni) er frumgerjunarvirknin ákaflega lítil og sennilega nánast eingöngu vegna plöntuensíma (11. mynd). Aðalgerjunarafurðin er etanól og koltvísýringur, en magnið er engu að síður lítið. Árangur verkunarinnar fer fyrst og fremst eftir gæðum pökkunar.

Orkuútreikningar benda til þess að gerjun í vatnsríku votheyi sé ekki einvörðungu á kostnað sykra heldur einnig á kostnað formbundinna kolvetna, eins og hemisellulósa (47. mynd). Í sykrusnauðu vatnsríku votheyi eru amínósýrur (prótein) einnig nýttar sem orkugjafar fyrir gerjun (41. mynd).

Gerjunarhæfni votheys er fyrst og fremst stýrt með forþurrkun, en hjálparefni sem tálma gerjun geta komið í stað forþurrkunar. Á Íslandi er rúlluvothey þurrkað óvenju mikið miðað við það sem þekkist í nálægum löndum. Það er vegna þess að rúlluplastið skemmist minna og seinna en í hlýrri löndum vegna lítils ágangs villtra dýra og lágs lofthita. Algengast er að fyrri sláttar rúlluvothey sé með 50–60% þurrefni, en há með 40–50% þurrefni (Þóroddur Sveinsson 1994). Mikið forþurrkað rúlluhey er viðkvæmara fyrir skemmdum en blautlegra vothey.

Forþurrkun hefur margvísleg mælanleg jákvæð áhrif á fóðurgæði votheysins fyrir utan augljósa hagkvæmni (Þóroddur Sveinsson 1997). Með vel heppnaðri forþurrkun dregur úr niðurbroti fóðurefnanna vegna gerjunar. Áhrif forþurrkunar lýsir sér í minni leysanleika hrápróteins í vömbum jórturdýra (44. mynd) og minna niðurbroti kolvetna í lífrænar sýrur (46. og 47. mynd) sem nýtast oft illa sem orkugjafar fyrir vambarörverur búfjár.

Geymsluþol rúllubagga er lítið í samanburði við þurrhey. Takmarkað geymsluþol lýsir sér í stigvaxandi hjágerjun, minnkandi fóðrunarvirði og aukinni tíðni myglubletta og skemmdra rúlla. Hægt er að auka verulega geymsluþol rúllubagga með vandaðri pökkun, aukinni plastþykkt, skjólgóðu geymslustæði og hjálparefnum.

Hjálparefni eins og maurasýra og ýmis nitursambönd geta verið gagnleg í vatnsríku votheyi, en síður í forþurrkuðu heyi (>40% þe.). Hjálparefni draga yfirleitt úr gerjunarvirkni í vatnsríku votheyi með þeim afleiðingum að sykruleifar verða meiri og fóðrunarvirðið batnar.

Heildarefnatap við verkun rúlluvotheys frá slætti til gjafar er að jafnaði ekki mikið og minna heldur en gengur og gerist við þurrheysverkun og hefðbundna votheysverkun. Samantekt úr íslenskum tilraunaniðurstöðum sýnir að gera megi ráð fyrir að tap meltanlegs þurrefnis í vel verkuðu rúlluheyi sé að jafnaði um 14–15% frá slætti til gjafar á fyrsta vetri og að styrkur meltanlegrar orku og hrápróteins minnki um 8–10%.

Vallartap er háð forþurrkunarhraðanum, tímalengd heysins á velli og veðurfari. Forþurrkun rúlluheys lýtur því sömu lögmálum og þurrkun við þurrheysverkun. Verkunartap frá pökkun til gjafar hefur mælst mjög breytilegt í rúlluvotheyi. Við verkunina verður beint þurrefnistap vegna gerjunar og nemur það að jafnaði um 5% (11. tafla og 40. mynd). Styrkur meltanlegrar orku fellur að jafnaði um 4% og hrápróteins um 3%, en breytileikinn milli tilrauna var mikill og dæmi um að styrkurinn aukist við verkunina, sérstaklega styrkur hrápróteins.

Fóðrunarvirði rúlluheys er afar breytilegt, en þeir þættir sem ráða þar mestu er forþurrkun, fóðurgildi (49. mynd), geymslutími og hjálparefni sem draga úr gerjunarvirkni. Jákvæð áhrif forþurrkunar á fóðrunarvirði rúlluvotheys eru greinileg hjá sauðfé (48. mynd), en óljósari hjá mjólkurkúm. Fóðrunarvirði rúlluheys minnkar með geymslutímanum, en hversu hratt það gerist fer alfarið eftir frágangi og gæðum pökkunar eins og greint hefur verið frá hér á undan. Hjálparefni geta aukið fóðrunarvirði vatnsríks votheys og geta þess vegna stundum komið í stað forþurrkunar.

IX. Summary

THE BIOLOGY AND PHYSIOCHEMICAL PROPERTIES OF ROUND BALE SILAGE

With the introduction of the plastic film and wrapping machines in 1986, big bale silage became very fast the dominating preservation technique to store roughage feed in Iceland. Big bale silage fits well in the Icelandic agricultural system which is based on fairly small family units. Big bales are low cost, easy to handle and allow safer hay- and silage making in a non-predictable climate. Also, the Icelandic cool climate and scarce population of animals that can be harmful to the bales are also factors that make this technique more attractive in Iceland than in other warmer countries.

Silage in round bales is somewhat different from silage in silos. Round bales are small independent units with high surface to mass ratio and low density compared to silage in silos. The relatively big surface area and often small time lapse between baling and wrapping, minimises temperature rise and carbohydrate losses in the silage caused by plant and microbial respiration.

Fermentation in round bale silage is usually less pronounced than in comparable silage stored in silos. The strongest evidence of this is higher pH values and more water soluble carbohydrate (WSC) residues in fully fermented round bale silage than is expected in comparable well preserved silage in silos. It is not fully understood why fermentation is repressed in round bale silage. It could be explained by their low density and big surface area which allows continuous rapid cooling of the silage mass and therefore, optimal temperatures for enzyme activities are rarely obtained during the fermentation processes. Another explanation could be the semi-anaerobic conditions that occur in round bales which inhibits most obligate anaerobic micro organisms but without allowing initiation of aerobic processes due to the very sporadic oxygen levels.

Icelandic forages which are mainly perennial temperate grasses, are well suited for silage. They are rich in WSC and range between 135–295 g WSC kg^{-1} DM depending on season, species and growth stage. Fructans are the most abundant WSC in Icelandic grasses for silage, ranging from 50–97 g WSC kg^{-1} DM, but the sucrose, glucose and fructose ranges between 15–56 g WSC kg^{-1} DM. Glucans (including starch), which are non-water soluble reserve carbohydrates, have been found in the range of 12–28 g WSC kg^{-1} DM.

Apparent WSC disappearance during fermentation is mostly at the cost of glucose and sucrose. Fructans and fructose are reduced during fermentation but to lesser extent. In a study with 6 types of round bale silages the average WSC disappearance was 109 g kg^{-1} DM and was not related to the DM content of the silage. This was on average 44% of the total WSC in the herbage at harvest. Half of the WSC disappearance occurs on average in the first two days after wrapping and stops 15 days later. WSC is usually in abundance to secure good conservation in high moisture silage. The exception is green fodder, like barley, which has been laying in swaths for extended time without drying. Such herbage has excessive water, low mass density and low WSC concentration (~25 g kg^{-1} silage), which can lead to insufficient lactic acid fermentation.

Silage microorganisms during primary fermentation are 99.9% *saccharolytic* and 99% of them are lactic acid bacteria according to a study with timothy silage. The most populous genera are *Lactobacillus, Leuconostoc* and *Pediococcus*. *Streptococcus* species which also are grouped as lactic acid bacteria were detected in sporadic amounts. The anaerobic microorganism population in the silage was greatest at the initial stages of fermentation but had severely declined after 252 days of storage and particularly in bales stored with no sunscreen. Anaerobic yeasts where only detected after 252 days of storage but *clostridium* bacteria only sporadically in the first days of fermentation.

The desired fermentation in silage is called primary. It starts immediately after sealing and is mainly controlled by the dry matter content of the parent roughage. Other important factors are plant maturity at cutting, silage additives, seasonal variation and plant species composition.

Fermentation intensity is a function of the dry

matter content of the silage material. Maximum activity is in high moisture silage with 15–20% DM and declines at a negative rate of power to only 25% and 10% of maximum intensity at approximately 40% and 60% DM respectively.

Studies show that fermentation intensity can be substantially reduced in high moisture silage (<40% DM) with silage additives based on formic acid and ammonium mixtures.

Fermentation intensity is controlled by the buffering capacity of the silage. High buffering capacity reduces microbial fermentation. Therefore, silage from juvenile and vegetative plant material has lower fermentation intensity than silage with more reproductive and mature plant tissues due to lower buffering capacity.

The fermentation process is driven by microbial and/or plant enzymes and will cease within 2–4 weeks after sealing. There are three types of primary fermentation in silage depending on its moisture content.

Fermentation in high moisture silage (<35% DM) is mostly based on vivid bacterial activity and its main product is lactate. The quality of the preservation depends on available WSC, buffer capacity and density of the herbage mass.

Fermentation intensity in moderately dry silage (35–55% DM) is severely reduced and the processes is a mixture of plant and bacterial enzyme action. Lactate is still the main product of fermentation but the proportion of ethanol and acetic acid increase the drier the silage material gets. The quality of the preservation depends on buffer capacity, silage density and sealing properties.

Fermentation intensity in low moisture silage, also called haylage (55–80% DM) is very low and primarily caused by plant enzyme action producing ethanol and CO_2 from WSC. The quality of the preservation is dependent on sealing properties.

In Iceland most big bale silages falls into the two latter categories i.e. moderately dry or low moisture silage with the exception of green fodder silage (annual ryegrass, oat, barley or rape). First cut silage has usually 50–60% DM and second cut silage 40–50% DM.

Unwanted fermentation in silages is called secondary. When primary fermentation has ceased, secondary fermentation may ignite as a result of or in combination with increased ambient temperature, deterioration of the plastic cover and microbial respiration on spots at the bale surface. Secondary fermentation may start with increased anaerobic yeast activity, colonies of mould growth at the surface and elevated populations of *bacillus* and *enterobacteria*. Lactic acid bacteria may also be involved but does not dominate the process like happens in moist silage during primary fermentation. Secondary fermentation is delayed with careful wrapping, increased plastic thickness (no. of layers), shade or barn storage and possibly with silage additives.

Losses from cutting to feeding are both quantitative and qualitative and are inevitable. Field losses from cutting to bailing depend on climatic and mechanical factors and are therefore highly variable. Besides direct DM losses, dry matter digestibility and total N concentration in the herbage declined on average by 4% (±2.8%) and 5% (±6.7%) respectively from cutting to bailing. Dry matter losses from bailing to feeding due to silage fermentation and respiration was on average 5% (±1.8%). Dry matter digestibility and total N concentration in the silage from bailing to feeding declined on average by 4% (± 4.5%) and 3% (±5.3%) respectively. Estimated overall dry matter digestibility and total N losses are in the range of 4–21% and 0–20% respectively. These losses occurred during the first winter after bailing. Round bale silage has low storability and therefore losses will escalate with extended storage.

Fermentation intensity in silage affects the protein degradability in rumen. Highly fermented silage results in high rumen degradable protein. Protein rumen degradability is a function of silage DM (r^2=0,92) and declines linearly from 90% (30% DM silage) to 60% (80% DM silage) or to a similar level as has been found in hay.

It is well established that the effects of ensiling *per se* on forage dry matter intake (DMI) particularly by sheep but also by cattle is substantial. According to Irish surveys, well fermented high moisture silage reduces DMI and productivity (growth rate, milk yield) relative to parent herbage both in sheep and cattle. Therefore, it should be important goal in ensiling to minimise fer-

mentation and hence minimise the negative effects on DMI and animal productivity.

In sheep DMI is a function of silage DM (i.e. fermentation intensity), dry matter digestibility, storability (freshness) and silage additives in high moisture silage. The same applies for dairy cows even though DMI is not as much affected by silage DM content. Also, dairy cows respond positively to polymorphous diet and studies indicate that rape silage in a mixture with grass silage, despite high moisture levels, stimulates milk yield more compared to totally grass based silage.

X. LOKAORÐ

Þessi ritsmíð er lokaáfangi þriggja ára rannsóknaverkefnis sem styrkt var af Tæknisjóði RANNÍS og Framleiðnisjóði landbúnaðarins. Það hafði í fyrsta lagi það markmið að mæla kolvetni og niðurbrot þeirra í rúlluvotheyi og upplýsa hvaða þættir hefðu þar áhrif. Þeir þættir sem voru prófaðir voru heygerð, forþurrkun (þurrkstig), þroskastig grasa og geymslustæði. Ábyrgðarmenn þessa hluta verkefnisins voru Bjarni E. Guðleifsson, RALA, sem bar ábyrgð á etanól-, ammoníaks-, sýru- og sykrumælingum og sýnatökum, og Jóhann Örlygsson, Háskólanum á Akureyri, sem bar ábyrgð á örveruhluta verkefnisins. Þóroddur Sveinsson bar ábyrgð á skipulagi, sýnatökum, fóðurgildismælingum og uppgjöri. Sigríður Dalmannsdóttir líffræðingur og Tryggvi Eiríksson fóðurfræðingur sáu um efnagreiningar, Laufey Bjarnadóttir, nú ráðunautur, sá um fóðurtilraun og bústjórarnir á Möðruvöllum þau Höskuldur Gunnarsson, Hilda Pálmadóttir og Brynjar Finnsson og þeirra starfsfólk sáu um heyskap og aðstoðuðu við ýmsa verkþætti. Í öðru lagi var markmiðið að gefa út fjölrit um efna- og eðliseiginleika votheys í rúlluböggum þar sem steypt er í heilstætt rit niðurstöðum úr rúllubaggarannsóknum sem gerðar hafa verið á Íslandi. Tryggvi Gunnarsson sá um yfirlestur, umbrot og samræmingu mynda og texta. Auglýsingastofan Stíll teiknaði myndir.

XI. HEIMILDARSKRÁ

Þær heimildir sem hér eru skráðar hafa ekki allar sérstakar tilvísanir í textanum hér að framan. Engu að síður hafa þær með einum eða öðrum hætti haft áhrif á þessa ritsmíð. Flestar íslenskar greinar um rúllubaggaverkun fram í mars 2001 ættu að hafa ratað í þessa skrá.

1. Agnew R.E. & M.T. Carson 2000. The effect of a silage additive and level of concentrate supplementation on silage intake, animal performance and carcass characteristics of finisihing beef cattle. *Grass and Forage Science 55*: 114–124.
2. Aðalsteinn Geirsson, Bjarni Guðmundsson & Sigtryggur Jón Björnsson 1991. Gerjun heys og gæði mjólkur. *Freyr 87(21)*: 850–853.
3. Árni G. Eylands 1950. *Búvélar og ræktun*. Bókaútgáfa Menningarsjóðs, 475 s.
4. Beaulieu, R., J.R. Seoane, P. Savoie, G.F. Tremblay & R. Thériault 1993. Effects of dry-matter content on the nutritive value of individually wrapped round-bale timothy silage fed to sheep. *Can. J. Anim. Sci. 73*: 343–354.
5. Bjarni Guðmundsson 1981. *Heyverkun*. Bændaskólinn á Hvanneyri, 115 s.
6. Bjarni E. Guðleifsson, Júlíus Kristjánsson & Aðalsteinn Geirsson 1990. Athugun á áhrifum rúlluheys á mjólkurgæði. *Fjölrit BRT nr. 16*, 11 s.
7. Bjarni E. Guðleifsson & Evald Schung 1990. The effect of soil pH on element-availability and element-uptake by grasses grown on Icelandic peatsoils. *Búvísindi 4*: 11–18.
8. Bjarni Guðmundsson 1991. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1990*. *Fjölrit Bændaskólans á Hvanneyri nr. 64*, s. 11–20.
9. Bjarni Guðmundsson 1991. „Búskapur er heyskapur“. Í: *Ráðunautafundur 1991*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 105–114.
10. Bjarni Guðmundsson 1991. Rundballesurfór – konservering og fóringsverdi – forsöksresultater fra Hvanneyri. Seminar nr. 201 NJF sektion VII; 24–25 okt. 1991; Hótel Örk, Hveragerði, 12 s.
11. Bjarni Guðmundsson, Aðalsteinn Geirsson & Sigtryggur J. Björnsson 1991. Gerjun heys og gæði mjólkur. *Freyr 87(21)*: 850–853.
12. Bjarni Guðmundsson 1992. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1991* (ritstj. Ríkharð Brynjólfsson). *Rit búvísindadeildar nr. 2*, s. 17–28.
13. Bjarni Guðmundsson & Ingimar Sveinsson 1992. Hrossahey – þurrt eða þvalt? *Fjölrit Bændaskólans á Hvanneyri nr. 65*, 14 s.
14. Bjarni Guðmundsson. 1993. Áhrif forþurrkunar, heyskurðar og hjálparefna á verkun heys í rúlluböggum. Í: *Ráðunautafundur 1993*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 222–231.
15. Bjarni Guðmundsson 1993. Flokkun rúlluheys og birgðabókhald. Í: *Handbók bænda 43*, s. 91–96.
16. Bjarni Guðmundsson 1993. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1992* (ritstj. Runólfur Sigursveinsson). *Rit búvísindadeildar nr. 3*, s. 20–28.
17. Bjarni Guðmundsson 1993. Heyöflun og votheysgerð – könnun á árangri nokkurra bænda á Suðurlandi. *Freyr 89(11)*: 427–431.
18. Bjarni Guðmundsson 1993. Verkast skorið hey betur í rúlluböggum en óskorið? *Freyr 89(10)*: 390–394.
19. Bjarni Guðmundsson 1994. Kort notat angående pröving av kondisjoneringsutstyr for gras. Fjölrit lagt fram á Nordisk prövesjefsmöte, Hvanneyri, 25.–26. ág. 1994, 3 s.
20. Bjarni Guðmundsson 1994. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1993* (ritstj. Edda Þorvaldsdóttir). *Rit búvísindadeildar nr. 5*, s. 69–78.
21. Bjarni Guðmundsson 1994. Áhrif forþurrkunar, skurðar og notkunar Kofasafa á verkun heys í rúlluböggum. *Búvísindi 8*: 115–125.
22. Bjarni Guðmundsson 1995. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1994* (ritstj. Edda Þorvaldsdóttir). *Rit búvísindadeildar nr. 9*, s. 58–61.
23. Bjarni Guðmundsson 1995. *Halldór á Hvanneyri*. Bændaskólinn á Hvanneyri, 285 s.
24. Bjarni Guðmundsson 1995. Frá slætti til gjafa – árangur nokkurra heyverkunartilrauna á Hvanneyri 1990–1994. Í: *Ráðunautafundur 1995*. Búnaðarfélag Íslands / Stéttarsamband bænda (Sameinuð bændasamtök) og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 140–148.
25. Bjarni Guðmundsson 1995. Dyrkningsteknikk i et lav-innsats jordbruk. *Nordisk jordbruksforskning 77(2)*: 32–35.
26. Bjarni Guðmundsson 1995. The effect of conditioning on the wilting rate of grass for silage. Veggspjald nr. 62 á XX. þingi NJF í Reykjavík, 26.–29. júní 1995. *Norisk jordbruksforskning 77(3)*: 133.
27. Bjarni Guðmundsson 1995. Öflun og verkun heys handa mjólkurkúm. *Rit Búvísindadeildar nr. 7*, 46 s.
28. Bjarni Guðmundsson 1995. Heyöflun handa mjólkurkúm. 1. Súgþurrkuð taða og rúlluhey. *Freyr 91(5)*: 198–201.
29. Bjarni Guðmundsson 1995. Heyöflun handa mjólkurkúm. 2. Há og rýgresi verkað í rúllur. *Freyr 91(6)*: 264–267.
30. Bjarni Guðmundsson 1995. Kofa-safi getur bætt verkun votheys. *Bændablaðið 1(8)*: 4.
31. Bjarni Guðmundsson 1995. Slysahætta af rúlluböggum. Í: *Handbók bænda 45*, s. 111–117.
32. Bjarni Guðmundsson & Aðalsteinn Geirsson 1995. Áhrif túnteðslu og örveruflóru grasa og verkun votheys úr þeim. *Rit Búvísindadeildar Bændaskólans á Hvanneyri nr. 11*, 18 s.

33. Bjarni Guðmundsson & Ásdís Helga Bjarnadóttir 1995. Heyþurrkun og grasgæði. *Rit búvísindadeildar nr. 10*, 38 s.
34. Bjarni Guðmundsson 1996. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1995* (ritstj. Edda Þorvaldsdóttir). *Rit búvísindadeildar nr. 12*, s. 48–51.
35. Bjarni Guðmundsson 1996. Spillir búfjáráburður verkun rúlluheys? *Bændablaðið 2(10)*: 5.
36. Bjarni Guðmundsson 1996. Verkun heys í rúlluböggum handa ám. *Rit Búvísindadeildar Bændaskólans á Hvanneyri nr. 17*, 46 s.
37. Bjarni Guðmundsson & Aðalsteinn Geirsson 1996. Áhrif búfjáráburðar á gerlaflóru votheys. Í: *Ráðunautafundur 1996*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 135–142.
38. Bjarni Guðmundsson 1997. Foraform som ensileringsmiddel til rundballer. Skýrsla til Norsk Hydro, fjölrit 26 s.
39. Bjarni Guðmundsson 1997. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1996* (ritstj. Edda Þorvaldsdóttir). *Rit búvísindadeildar nr. 18*, s. 32–37.
40. Bjarni Guðmundsson 1997. Rúlluhey handa ám. *Bændablaðið 3(13)*: 18.
41. Bjarni Guðmundsson 1997. Nýtt hjálparefni við verkun heys reynt á Hvanneyri. *Bændablaðið 3(20)*: 1.
42. Bjarni Guðmundsson, Grétar Einarsson & Gísli Sverrisson 1997. Fjárhirðing og heyöflun. Í: *Ráðunautafundur 1997*. Búnaðarfélag Íslands / Stéttarsamband bænda (Sameinuð bændasamtök) og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 13–24.
43. Bjarni Guðmundsson 1998. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1997* (ritstj. Edda Þorvaldsdóttir). *Rit búvísindadeildar nr. 22*, s. 47–53.
44. Bjarni Guðmundsson 1998. Hjálparefni við verkun heys í rúllum. Í: *Ráðunautafundur 1998*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 35–40.
45. Bjarni Guðmundsson 1998. *Verkun heys í rúlluböggum og öðrum böggum*. Bændaskólinn á Hvanneyri, tilraunaútgáfa, 43 s.
46. Bjarni Guðmundsson & Daði Már Kristófersson 1998. Vinna og vélakostnaður við heyskap – athugun á 23 búum. Í: *Ráðunautafundur 1998*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 20–29. Einnig (birt nokkuð breytt) *Freyr 94(7)*: 7–10.
47. Bjarni Guðmundsson & Guðmundur Hallgrímsson 1998. Rúlluhey handa sláturdilkum. *Bændablaðið 4(7)*: 14.
48. Bjarni Guðmundsson 1999. Heyverkunarrannsóknir. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1998* (ritstj. Ríkharð Brynjólfsson & Ragnhildur Helga Jónsdóttir). *Rit búvísindadeildar nr. 24*, s. 41–47.
49. Bjarni Guðmundsson 1999. Er gagn af GrasAAT? *Bændablaðið 5(10)*: 16.
50. Bjarni Guðmundsson, Björn Þorsteinsson & Helgi Björn Ólafsson 1999. Há í rúllum – verkun og lystugleiki. Í: *Ráðunautafundur 1999*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 174–181.
51. Bjarni Guðmundsson, Björn Þorsteinsson & Helgi Björn Ólafsson 1999. Verkun háar og lystugleiki hennar fyrir kýr. Í: *Ársrit Búnaðarsamband Suðurlands 1998*, s. 61–68.
52. Bjarni Guðmundsson & Björn Þorsteinsson 1999. The effect of wilting and ammonium tetraformiat (ATF) additive on big bale second cut grass fermentation and subsequent lamb feeding intake and performance. Í*: The XIIth Int. Silage Conference, Uppsala, 5.–7. júlí*. Swedish University of Agricultural Sciences: 183–184.
53. Bjarni Guðmundsson 2000. Hvar er best að geyma rúllubaggana? Vefhandbók bænda, Bændasamtökunum, www.bondi.is.
54. Bjarni Guðmundsson 2001. Geymsla rúllubagga í 6- og 8-földum plasthjúp í forsælu og sólarmegin. Í: *Ráðunautafundur 2001*. Bændasamtök Íslands, Landbúnaðarháskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 311–314.
55. Björn Birkisson 1980. Tækni við votheysöflun. *Fjölrit RALA nr. 60*, 80 s.
56. Björn Jóhannesson & Kristín Kristjánsdóttir 1954. Nokkrir eiginleikar mýra á Suðurlandi og efnasamsetning grass á ýmsum aldursstigum og hæfni þess til votheysgerðar. *Rit landbúnaðardeildar Atvinnudeildar Háskólans B6*, 37 s.
57. Björn Þorsteinsson, Bjarni Guðmundsson & Ríkharð Brynjólfsson 1993. Sykrur úr íslenskum fóðurgrösum og gerjun votheys úr þeim. Í: *Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1992. Rit búvísindadeildar nr. 3*, s. 82.
58. Björn Þorsteinsson, Bjarni Guðmundsson & Ríkharð Brynjólfsson 1996. Efnamagn og gerjunarhæfni túngrasa. Í: *Ráðunautafundur 1996*. Bændasamtök Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 124–134.
59. Boehringer Mannheim 1992. *Biochemical Pathways* (ritstj. G. Michal), 18 s.
60. Bolsen, K.K. 1995. Silage:Basic Principles. Í*: Forages. Vol. II. The Science of Grassland Agriculture*. Iowa State University Press, Ames, Iowa 50014, s. 163–176.
61. Bragi Líndal Ólafsson 1997. Gerjun nokkurra grastegunda í vömb jórturdýra. Í: *Ráðunautafundur 1997*. Bændasamtök Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 234–241.
62. Bragi Líndal Ólafsson & Páll Eydal Reynisson 1998. Þættir sem hafa áhrif á niðurbrot próteins í gróffóðri í vömb jórturdýra. Í: *Ráðunautafundur 1998*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 261–270 (sérprent).
63. Bragi Líndal Ólafsson & Jóhannes Sveinbjörnsson 1999. Quality aspects of preserved forage. Í: *NJF Kongres Rapport, Ås 28. juni – 1. juli 1999*, s. 299–309.

64. Bragi Líndal Ólafsson, Tryggvi Eiríksson, Jóhannes Sveinsbjörnsson, Eiríkur Þórkelsson & Lárus Pétursson 2000. Próteingildi rúlluheys. Í: *Ráðunautafundur 2000*. Bændasamtök Íslands, Landbúnaðarháskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 138–144.
65. Bragi Líndal, Jóhannes Sveinsbjörnsson & Emma Eyþórsdóttir 2000. Efnainnihald í mjólk. Í: *Ráðunautafundur 2000*. Bændasamtök Íslands, Landbúnaðarháskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 158–170.
66. Boehringer Mannheim 1996. *Biochemicals Catalog. Enzymatic BioAnalysis and Food Analysis*, s. 551–586.
67. Castle, M.E., W.C. Retter & J.N. Watson 1980. Silage and milk production: a comparison between three grass silages at different digestibilities. *Grass and Forage Science 35*: 219–225.
68. Castle, M.E. & J.N. Watson 1973. The relationship beetween the DM Content of herbage for silage making and effluent production. *Journal of British Grassland Society 28*: 135–138.
69. Chatterton, N.J., P.A. Harrison, J.H. Bennett & K.H. Asay 1989. Carbohydrate partitioning in 185 accessions of gramineae grown under warm and cool temperatures. *J. Plant Physiol. 134*: 169–179.
70. Dampney, P.M.R. 1992. The effect of timing and rate of potash application on the yield and herbage composition of grass grown for silage. *Grass and Forage Science 47*: 280–289.
71. Davies, D.R, R.J. Merry, A.P. Williams, E.L. Bakewell, D.K. Leemans & J.K.S. Tweed 1998. Proteolysis during ensilage of forages varying in soluble sugar content. *J. Dairy Sci. 81*: 444–453.
72. Dewhurst, R.J. & P.J. King 1998. Effects of extended wilting, shading and chemical additives on the fatty acids in laboratory grass silage. *Grass and Forage Science 53*: 219–224.
73. Dewhurst, R.J., N.D. Scollan, S.J. Youell, J.K.S. Tweed & M.O. Humphreys 2001. Influence of species, cutting date and cutting interval og the fatty acid composition of grasses. *Grass and Forage Science 56*: 68–74.
74. DiRienzo, D.B., K.E. Webb, Jr., D.E. Brann & M.M. Alley 1991. Effect of spring nitrogen application on barley forage yields and silage fermentation. *J. Prod. Agric. 4(1)*: 39–44.
75. DiRienzo, D.B., K.E. Webb, Jr., & D.E. Brann 1991. Spring nitrogen application: effects on yield and quality of barley silage. *J. Prod. Agric. 4(1)*: 45–50.
76. Dräger-Tube Handbook 1994. *Soil, Water and Air Investigations as well as Technical Gas Analysis*. 9. útg. Drägerwerk Aktiengesellschaft Lübeck, 367 s.
77. Driehuis, F., S.J.W.H. Oude Elferink & P.G. Van Wikselaar 2000. Fermentation characteristics and aerobic stability of grass silgae inoculated with *Lactobacillus buchneri* alone and in mixture with *Pediococcus pentosaceus* and *Lactobacillus plantarum*. Í: *EGF 2000, Grassland Farming. Balancing Environmental and Economic Demands, Álaborg, Danmörku* (ritstj. K. Søegaard, C. Ohlson, J. Sehested & T. Kristensen). Grassland Science in Europe. Vol. 5, s. 41–43.
78. Driehuis, F. & P.G. van Wikselaar 2001. Determination of microbial protein in perennial rygrass silage. *Grass and Forage Science 56*: 75–83.
79. Esau Katherine 1977. *Anatomy of Seed Plants*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-24520-8, 550 s.
80. Ferris, C.P., D.C. Patterson, F.J. Gordon & D.J. Kilpatrick 2000. The effects of incorporating small quantities of straw in grass/grass silage-based diets for dairy cows. *Grass and Forage Science 55*: 146–158.
81. Forristal, P.D., P. O'Kiely & J.J. Lenehan 1999. The influence of the number of layers of film cover and film colour on silage preservation, gas composition and mould growth in big bales. Í: *Proceediongs of the XIIth International Silage Conference (July 5–9 Uppsala, Sweden)* (ritstj. T. Pauli). ISBN 91 576 5678 9, s. 305–306.
82. Fisher, D.S., J.C. Burns & J.E. Moore 1995. The Nutritive Evaluation of Forage. Í: *Forages. Vol. II. The Science of Grassland Agriculture*. Iowa State University Press, Ames, Iowa 50014, s. 105–115.
83. Friðrik Pálmason 1970. Vatnsleysanlegar sykrur í grasi. *Íslenskar landbúnaðarrannsóknir 2(2)*: 19–33.
84. Galston, A.W., P.J. Davies & R.L. Satter 1980. *The Life of the Green Plant*. Prentice Hall International, Inc., London, 464 s.
85. Gill, M., A.J. Rook & L.R.S. Thiago 1988. Factors affecting the voluntary intake of roughages by the dairy cow. Í: *Nutrition and Lactation in the Dairy Cow* (ritstj. P.C. Garnsworthy). Butterworth, London, s. 262–279.
86. Gísli Sverrisson 1990. Kostnaður við rúllbagga. *Freyr 86(6)*: 450–451.
87. Gísli Sverrisson & Pétur Jónsson 1990. Afköst búvéla. Í: *Handbók bænda 40*, s. 351–355.
88. Gísli Sverrisson 1993. Heyskurður, söxun og þjöppun í rúllur. Í: *Ráðunautafundur 1993*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 215–221.
89. Gordon, F.J. 1980. The effect of interval between harvests and wilting on silage for milk production. *Animal Production 31*: 35–41.
90. Grétar Einarsson 1987. Tækni við votheysgerð. Í: *Ráðunautafundur 1987*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 109–114.
91. Grétar Einarsson 1991. Tækni við verkun heys í rúlluböggum. Í: *Ráðunautafundur 1991*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 95–104.
92. Grétar Einarsson 1991. Tækni við verkun heys í rúlluböggum. *Freyr 87(5)*: 184–189.
93. Grétar Einarsson 1993. Rúlluplast. Prófanir – notkun – afdrif. Í: *Ráðunautafundur 1993*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 205–214, & *Freyr 89*: 357–362.
94. Gudmundsson, B. & B. Thorsteinsson 1999. The

effect of wilting and ammonium tetraformiat (ATF) additive on big bale second cut grass fermentation and susequent lamb feeding intake and performance. Í: *Proceediongs of the XIIth International Silage Conference (July 5–9 Uppsala, Sweden)* (ritstj. T. Pauli). ISBN 91 576 5678 9, s. 183–184.

95. Guðmundur Hrafn Jóhannesson 1995. Afföll við geymslu rúllubagga. BS ritgerð við Búvísindadeild Bændaskólans á Hvanneyri, 24 s. + viðaukar.
96. Guðmundur Jónsson 1979. Vothey, verkun og fóðrun. Í: *Skrá um rannsóknir í landbúnaði, tilraunaniðurstöður 1900–1965*. Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 351–354 & 370–371.
97. Guðmundur Jónsson 1998. Heyverkun – vothey. Í: *Skrá um rannsóknir í landbúnaði, tilraunaniðurstöður 1965–1980*. Bændaskólinn á Hvanneyri, s. 418–424.
98. Gunnar Ólafsson 1979. Efnainnihald og meltanleiki ýmissa túngrasa á mismunandi þroskastigi. *Fjölrit RALA nr. 42*, 20 s.
99. Gunnar Ríkharðsson & Sigríður Bjarnadóttir 1999. Hálíngresi og vallarfoxgras handa mjólkurkúm. Í: *Ráðunautafundur 1999*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 192–199.
100. Gunnar Ríkharðsson & Einar Gestsson 1996. Hert loðnulýsi og fóðurkál fyrir mjólkurkýr. Í: *Ráðunautafundur 1996*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 218–232.
101. Gunnar Ríkharðsson & Einar Gestsson 1995. Grænfóður og þurrhey fyrir kýr á fyrsta mjaltaskeiði. Í: *Ráðunautafundur 1995*. Búnaðarfélag Íslands / Stéttarsamband bænda (Sameinuð bændasamtök) og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 128–139.
102. Hagþjónusta landbúnaðarins 1992. Áætlaður beinn kostnaður við heyframleiðslu sumarið 1992. *Freyr 88(17)*: 626.
103. Hagþjónusta landbúnaðarins 1992. Kostnaður við rúllubagga og hefðbundna bagga. *Freyr 88(17)*: 632–633.
104. Hagþjónusta landbúnaðarins 1999. Áætlaður beinn kostnaður við heyframleiðslu sumarið 1999. Dreifibréf til ráðunauta, 8 s.
105. Haigh, P.M., D.G. Chapple & T.L. Powell 1996. Effect of silage additives on big bale grass silage. *Grass and Forage Science 51*: 318–323.
106. Hall, J.L., T.J. Flowers & R.M. Roberts 1982. *Plant Cell Structure and Metalbolism*. 2. útg. Longman Group Limitied, 543 s.
107. Heinoen-Tanski, H., P. Leinonen, E.M.Niskanen, M.M. Mielonen, H. Räsänen, T. Valta, K. Rinne & E. Joki-Tokola 1998. Aeration improves the hygiene of cattle slurry and the quality of grass forage and silage. *Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil and Plant Sci. 48*: 212–221.
108. Jensen, H.L., E.J.N. Pedersen, E. Møller & E.B. Skovborg 1969. Ensilering I stak eller silo. *Tidsskrift for Planteavl 73(2)*: 180–202.
109. Jóhannes Sveinbjörnsson 2000. Hvað er fóðurgildi – um aðlögun að breyttum fóðurmatskerfum. Í: *Ráðunautafundur 2000*. Bændasamtök Íslands, Landbúnaðarháskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 149–157.
110. Jóhannes Sveinbjörnsson & Bragi Líndal Ólafsson 1999. Orkuþarfir sauðfjár og nautgripa í vexti með hliðsjón af mjólkurfóðureiningakerfi. Í: *Ráðunautafundur 1999*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 204–217.
111. Keady, T.W.J., J.J. Murphy & D. Harrington 1996. The effects of ensiling on dry-matter intake and milk production by lactating dairy cattle given forage as the sole feed. *Grass and Forage Science 51*: 131–141.
112. Keady, T.W.J. & R.W.J. Steen 1996. Effects of applying a bacterial inoculant to silage immediately before feeding on silage intake, digestibility, degradability and rumen volatile fatty acid concentration in growing beef cattle. *Grass and Forage Science 51*: 155–162 .
113. Keady, T.W.J. & J.J. Murphy 1996. Effects of inoculant treatment on ryegrass silage fermentation, digestibility, rumen fermentation, intake and performance of lactating dairy cattle. *Grass and Forage Science 51*: 232–241.
114. Keady, T.W.J. & P. O´Kiely 1996. An evaluation of the effects of rate of nitrogen fertilization of grassland of silage fermentation, in-silo losses, effluent production and aerobic stability. *Grass and Forage Science 51*: 350–362.
115. Keady, T.W.J., J.J. Murphy & S. Fitzgerald 1995. The effects of level of nitrogen fertilizer application to silage swards on subsequent silage composition, intage and animal performance of lactating dairy cattle. *Animal Science 60*: 515.
116. Keady, T.W.J. & C.S. Mayne 1998. The effects of concentrade energy source on silage feeding behaviour and energy utilization by lactating dairy cows offered grass silages with differing intake characteristics. *Animal Science 67*: 225–236.
117. Kristján Óttar Eymundsson, Bjarni Guðmundsson, Björn Þorsteinsson & Jónatan Hermannsson 2001. Efnamagn og gerjunarhæfni byggkorns. Í: *Ráðunautafundur 2001*. Bændasamtök Íslands, Landbúnaðarháskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 310.
118. Kung, L., Jr., N.K. Ranjit, J.R. Robinson & R.C. Charley 1999. The effect of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of barley silage. Í: *Proceediongs of the XIIth International Silage Conference (July 5–9 Uppsala, Sweden)* (ritstj. T. Pauli). ISBN 91 576 5678 9.
119. Laufey Bjarnadóttir & Þóroddur Sveinsson 1999. Áhrif sláttutíma á fóðrunarvirði vallarfoxgrass. Í: *Ráðunautafundur 1999*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 164–173.
120. Lättemäe, P. 1997. Ensiling and evaluation of for-

age crops. Effects of harvesting strategy and use of additives to fresh-cut and wilted crops. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.
121. Lättemäe, P. & Sarand, R.J. 2000. Impact of technological factors on fermentation and quality of big bale silage. Í: *EGF 2000, Grassland Farming. Balancing Environmental and Economic Demands, Álaborg, Danmörku* (ritstj. K. Søegaard, C. Ohlson, J. Sehested & T. Kristensen). Grassland Science in Europe. Vol. 5, s. 22–24.
122. Lilja Guðrún Eyþórsdóttir & Bjarni Guðmundsson 1990. Reynsla bænda af verkun heys í rúlluböggum I. *Fjölrit Bændaskólans á Hvanneyri nr. 63*, 30 s.
123. Lilja Guðrún Eyþórsdóttir 1990. Reynsla af rúlluböggum. *Freyr 86(18)*: 668–670.
124. Lindgren, S., K. Pettersson, A. Jonsson, P. Lingvall & A. Kaspersson 1985. Silage inoculation, selected strains, temperature, wilting and practical application. *Swedish J. Agric. Res. 15*: 9–18.
125. Lindgren, S., K. Pettersson, A. Kaspersson, A. Jonsson & P. Lingvall 1985. Microbial dynamics during aerobic deterioration of silage. *J. Sci. Food Agric. 36*: 765–774.
126. Lindgren, S., A. Bromander & K. Pettersson 1988. Evaluation of silage additives using scale-model silos. *Swedish J. Agric. Res. 18*: 51–59.
127. Livingston, III, D.P. 1990. Fructan percipitaion from water/etanol extract of oats and barley. *Plant Physiol. 92*: 767–769.
128. Lundén Petterson, K. & S. Lindgren 1990. The influence of the carbohydrate fraction and additives on silage quality. *Grass and Forage Science 45(2)*: 223–233.
129. Marteinn Björnsson 1950. Farg á votheysgryfjur. *Freyr 45*: 105–107.
130. McDonald, P. 1981. *The Biochemistry of Silage*. John Wiley & Sons, 226 s.
131. McDonald, P., A.R. Henderson & S.J.E. Heron 1991. *The Biochemistry of Silage*. Chalcombe Publications, 340 s.
132. Miller, D.A. & C.A. Rotz 1995. Harvesting and storage. Í: *Forages. Vol. I. An Introduction to Grassland Agriculture*. 5. útg. Iowa State University Press, Ames, Iowa 50014, s. 163–174.
133. Nelson, C.J. 1995. Photosynthesis and carbon metalbolism. Í: *Forages. Vol. I. The Science of Grassland Agriculture*. Iowa State University Press, Ames, Iowa 50014, s. 31–43.
134. Noller, C.H. & J.W. Thomas 1985. Hay-crop silage, Í: *Forages. Vol. I. An Introduction to Grassland Agriculture*. 5. útg. Iowa State University Press, Ames, Iowa 50014, s. 517–527.
135. Nordang, L.Ö. 1990. Barley-fodder rape silage. I. Ensiling studies. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences 4* (ISSN 0801-5341), s. 145–162.
136. Nordang, L.Ö. 1990. Barley-fodder rape silage. II. Feeding experiments with bulls. *Norwegian Journal of Agricultal Sciences 4* (ISSN 0801-5341): 163–177.
137. Nordang, L.Ö. 1990. Barley-fodder rape silage. III. Feeding experiments with dairy cows. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences 4* (ISSN 0801-5341): 179–193.
138. Ohlson, C. 1996. Effects of silage additives, harvest date, and particle reduction on quality of wholecrop barley – 1996. Report to Biotal Limited, s. 1–16.
139. Ohlson, C. 1996. Effects of silage additives, harvest date, and particle reduction on quality of wholecrop barley – 1996. Report to Chr. Hansen BioSystems A/S, s. 1–13.
140. Ohlsson, C. & V.F. Kristensen 1996. Ensilering I rundballer – er det et alternativ til ensilering i almindelig silo. Kan teknikken for rundballeensilering forbedres? Temadag om “Grovfoder”, Herning. *SP rapport nr. 19*, s. 31–36.
141. O’Kiely, P. 2000. Conservation of unwilted and wilted grass treated with different additives and esiled in laboratory silos. Í: *EGF 2000, Grassland Farming. Balancing Environmental and Economic Demands, Álaborg, Danmörku* (ritstj. K. Søegaard, C. Ohlson, J. Sehested & T. Kristensen). Grassland Science in Europe. Vol. 5, s. 35–40.
142. Óttar Geirsson 1993. Turn, flatgryfja eða rúllubaggar. *Freyr 89(10)*: 396–397.
143. Pettersson, K. 1988. Ensiling of forages. Factors affecting silage fermentation and quality. Dissertation. *Sveriges lantbruksuniversitet, Institiute för husdjurens utfordring och vård. Rapport 179*, 45 s.
144. Pétur Gunnarsson 1956. Um votheysgerð. *Búnaðarritið 69*: 500–543.
145. Pétur Þór Jónasson 1987. Reynsla af votverkun rúllubagga. Í: *Ráðunautafundur 1987*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 99–108.
146. Pétur Þór Jónasson 1990. Þróun í heyöflun á árunum 1981–1989. *Freyr 86(17)*: 630–634.
147. Points, H.G. 1989. Fructans and cold stress. *J. Plant Physiol. 134*: 148–150.
148. Randby, Å. & I. Selmer-Olsen 1998. Rundballesurfôr uten eller med maursyrepreparat. *Bonde vennen nr. 30/31*, s. 12–14.
149. Randby, Å. & I. Selmer-Olsen 1999. Formic acid treated or untreated roundbale grass silage for steers and dairy cows. Í: *NJF Kongres Rapport, Ås 28. juni – 1. juli 1999*, s. 276–277.
150. Randby, Å.T. 2000. The effect of some acid-based additives applied to wet grass crops under various ensiling conditions. *Grass and Forage Science 5*: 289–299.
151. Ríkharð Brynjólfsson 1996. Áhrif áburðartíma, áburðarmagns og sláttutíma á uppskeru og efnamagn túngrasa. Í: *Ráðunautafundur 1996*. Bændasamtök Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 113–123.
152. Rúnar Ingi Hjartarson 1993. Samanburður á verkunarkostnaði háar og grænfóðurs. BS ritgerð við Búvísindadeild Bændaskólans á Hvanneyri. 28 s. + viðauki.
153. Ruxton, G.D. & G.J. Gibson 1995. A mathematical model of the aerobic deterioration of big-bale si-

lage and its implication for the growth of Listeria. *Grass and Forage Science 50*: 331–344.
154. Seal, D.R., A.R. Henderson, K.O. Petterson & J.F. Lowe 1986. The effect of addition of sugar and inoculation with two commercial inoculants on the fermentation of lucerne silage in laboratory silos. *Grass and Forage Science 41*: 61–70.
155. Selmer-Olsen Ingvar 2000. GrasAAT® silage additives, documented effects. Skýrsla frá Hydro Agri Norge, 22 s.
156. Siegfried, R., H. Rückermann & G. Stumpf 1984. Eine HPLC-Methode zur Bestimmung Organischer Säuren in Silagen. *Landwirtsch. forschung 37*: 298–304.
157. Sigríður Bjarnadóttir 1998. Þurrhey af 1. slætti og há í rúllum handa mjólkurkúm. Í: *Ráðunautafundur 1998*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 68–77.
158. Sigríður Jónsdóttir 1991. Samanburður á tveim heyverkunaraðferðum. BSc-ritgerð við Búvísindadeild Bændaskólans á Hvanneyri, 71 s.
159. Sigríður Jónsdóttir & Bjarni Guðmundsson 1992. Samanburður á heyverkunaraðferðum – súgþurrkað hey og hey úr rúllum handa ám. *Freyr 88(23)*: 916–920.
160. Sigþór Pétursson 1999. *Lífefnafræði*. Háskólinn Akureyri, 271 s.
161. Skjervheum, K. 1991. Prøving av rundballepresser. Fylgirit með erindi á NJF námstefnu nr. 201 á Hótel Örk 24.–25. október 1991, 8 s.
162. Steen, R.W.J., F.J. Gordon, L.E.R. Dawson, R.S. Park, C.S. Mayne, R.E. Agnew, D.J. Kilpatrick & M.G. Porter 1998. Factors affecting the intake of grass silage by cattle and prediction of silage intake. *Animal Science 66*: 115–127.
163. Steen, R.W.J. & W.A. McIlmoyle 1985. The effects of frequency of harvesting grass for silage on the intake and performance of beef calle. *Grass and Forage Science 40*: 341–347.
164. Stefán Aðalsteinsson, Stefán Jónsson & Pétur Gunnarsson 1960. Áhrif fergingar á verkun votheys. *Rit landbúnaðardeildar Atvinnudeildar Háskólans A13*, 35 s.
165. Sveinn Sveinsson 1877. Um grasrækt og heyannir. Í: *Andvari*. Rit Hins Íslenska Þjóðvinafélags. Fjórða ár, s. 121–161.
166. Thorsteinsson, B., B. Gudmundsson & R. Brynjolfsson 1996. Grass carbohydrates and silage quality. Í: *Proceedings of the XI International Silage Conference, Aberystwyth* (ritstj. Jones o.fl.). (ISBN 0 7084 0573 8), s. 50–51.
167. Bændaskólinn á Hvanneyri 1989. Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1988. *Fjölrit Bændaskólans á Hvanneyri nr. 59*, s. 13–16.
168. Bændaskólinn á Hvanneyri 1990. Tilraunaskýrsla Bændaskólans á Hvanneyri 1989. *Fjölrit Bændaskólans á Hvanneyri nr. 60*, s. 15–23.
169. Tryggvi Eiríksson 1984. Verkun í rúlluböggum. Í: *Ráðunautafundur 1984*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 180–181.
170. Van Soest, P.J. & L.P.H. Jones 1986. Effect of silica in forages upon digestability. *Journal of Dairy Sciense*: 1644–1648.
171. Vipond, J.E., A.J. Duncan, D. Turner, L. Goddyn & G.W. Horgan 1998. Effects of feeding ensiled kale (*Brasica oleracea*) on the performance of finishing lambs. *Grass and Forage Science 53*: 346–352.
172. Woolford, M.K. 1984. *The Silage Fermentation*. Marcel Dekker Inc., New York, 350 s.
173. Wright, D.A., F.J. Gordon, R.W.J. Steen & D.C. Patterson 2000. Factors influencing the response in intake of silage and animal performance after wilting of grass: a rewiew. *Grass and Forage Science 55*: 1–13.
174. Zastawny, J., B. Wróbel & H. Krzywiec 2000. Effect of harvest and ensilage technology of meadow sward on quality of silage. Í: *EGF 2000, Grassland Farming. Balancing Environmental and Economic Demands, Álaborg, Danmörku* (ritstj. K. Søegaard, C. Ohlson, J. Sehested & T. Kristensen). Grassland Science in Europe. Vol. 5, s. 41–43.
175. Þóroddur Sveinsson & Gunnar Ríkharðsson 1991. Nýting og arðsemi grænfóðurræktar. *Freyr 87*: 295–306.
176. Þóroddur Sveinsson & Gunnar Ríkharðsson 1991. Nýting og arðsemi grænfóðurræktar. Í: *Ráðunautafundur 1991*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 26–43.
177. Þóroddur Sveinsson 1992. Nýting og uppskera grænfóðurs í tveimur hreppum í Eyjafirði. Í: *Skýrsla um starfssemi Rannsóknastofnunar landbúnaðarins 1990–1991, Fjölrit RALA nr. 155*, s. 36.
178. Þóroddur Sveinsson 1993. Rúlluverkað hey í Eyjafirði. Reynsla bænda í utanverðri Eyjafjarðarsýslu af rúlluverkuðu heyi. *Freyr 89(5)*: 175–180.
179. Þóroddur Sveinsson 1994. Verkun heys í rúlluböggum. Í: *Ráðunautafundur 1994*. Búnaðarfélag Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 220–228.
180. Þóroddur Sveinsson & Bjarni E. Guðleifsson 1996. Gerjun í rúlluheyi. Í: *Ráðunautafundur 1996*. Bændasamtök Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 143–156.
181. Þóroddur Sveinsson 1997. Einært rýgresi til sláttar og beitar. Í: *Ráðunautafundur 1997*. Bændasamtök Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 152–164.
182. Þóroddur Sveinsson & Bjarni E. Guðleifsson 1997. Geymsluþol rúllubagga. Í: *Ráðunautafundur 1997*. Bændasamtök Íslands og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 195–203.
183. Þóroddur Sveinsson 1997. Sprettuferill og nýting einærs rýgresis. *Freyr 93*: 198–206.
184. Þóroddur Sveinsson 1997. Hve mikið fóður er í rúllunum? *Freyr 93*: 288–289.
185. Þóroddur Sveinsson & Bjarni E. Guðleifsson 1999. Niðurbrot kolvetna og gerjun í rúlluheyi. Í: *Ráðunautafundur 1999*. Bændasamtök Íslands, Bændaskólinn á Hvanneyri og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, s. 151–163.