

Kynbótaskipulag fyrir íslenska kúastofninn með erfðamengjaúrvali

**Samanburður mögulegra kynbótakerfa með tilliti til erfðaframfara og
skyldleikaræktar**



Mars 2026

Ráðgjafarmiðstöð landbúnaðarins

Kynbótaskipulag fyrir íslenska kúastofninn með erfðamengjaúrvali -
Samanburður mögulegra kynbótakerfa með tilliti til erfðaframfara og
skyldleikaræktar

Óheimilt er að afrita skýrsluna á nokkurn hátt nema með leyfi rétthafa.

Forsíðumynd: Þórdís Þórarinsdóttir.

© Ráðgjafarmiðstöð landbúnaðarins, Ísland, 2026

Skýrsluhöfundar:

Þórdís Þórarinsdóttir verkefnisstjóri - RML

Jón Hjalti Eiríksson – LBHÍ

Guðmundur Jóhannesson - RML

Efnisyfirlit

Samantekt.....	1
Hugtakalisti	2
1 Formáli.....	3
2 Bakgrunnur	3
3 Aðferðir.....	6
3.1 Uppsetning sýndarstofns	6
3.2 Sviðsmyndir	7
3.2.1 Grunnkynbótakerfi.....	8
3.2.2 Kynbótakerfi með fjöldaegglosi og fósturvís aflutningum.....	10
3.2.3 Kynbótakerfi með kyngreindu sæði.....	10
3.2.4 Kynbótakerfi með heimanautum.....	10
3.3 Kjörerfðaframlög.....	11
3.4 Fjöldi arfgerðargreindra	12
3.5 Tölfræðileg úrvinnsla	13
4 Niðurstöður hermilíkana	13
4.1 Almennar niðurstöður	13
4.2 Nautanotkun	13
4.3 Kyngreint sæði	15
4.4 Fjöldaegglos og fósturvís aflutningar.....	16
4.5 Úrval með kjörerfðaframlögum	19
4.6 Fjöldi arfgerðargreindra nautkálfa	21
5 Umræður	23
5.1 Nautanotkun	23
5.2 Æxlunartækni	24
5.3 Takmarkanir	24
6 Hagkvæmt kynbótaskipulag.....	25

6.1	Fjöldaegglos og fósturvís aflutningar.....	25
6.2	Arfgerðargreiningar nautkálfa.....	29
7	Ályktanir	32
8	Heimildir.....	33
	Viðauki I.....	37

Samantekt

Fyrir lokaðan búfjárstofn eins og íslenska kúastofninn er mikilvægt að missa ekki niður erfðabreytileika og lágmarka skyldleikarækt á sama tíma og gildi hans sem framleiðslustofns er aukið með erfðaframtökum í mikilvægum eiginleikum. Gott kynbótastarf samvinnar þessa þætti þannig að eins mikil erfðaframtök og möguleg er næst án þess að ganga um of á erfðabreytileika. Með tilkomu erfðamengjakynbótamats breyttust forsendur kynbótaskipulags fyrir íslenska kúastofninn og því er eðlilegt að endurskoða skipulagið. Núna eru einnig í boði mikilvirkar aðferðir sem hafa víða verið notaðar í kynbótakerfum fyrir mjólkurkúr, svo sem kyngreining á sæði, fjöldaegglos og fósturvísaf lutningar, og úrval byggt á kjörerfðaframlögum, en þær aðferðir hafa að litlu leyti komist í notkun á Íslandi. Markmið þessa verkefnis var að finna heppilegt kynbótaskipulag, sem gefur sem mesta erfðaframtök en ásættanlega skyldleikaræktaraukningu, fyrir íslenska mjólkurkúakynið í ljósi nýrra aðferða. Til þess voru settar upp yfir hundrað sviðsmyndir í hermilíkani þar sem breytilegu þættirnir voru fjöldi sæðingana, notkun heimana, notkun fjöldaegglos og fósturvísaf lutninga, notkun kyngreinds sæðis og fjöldi arfgerðargreindra nautkálfa.

Niðurstöðurnar sýndu að notkun kyngreinds sæðis sem gefur kvígukálfa (X-sæði) á besta hluta kúnna/kvígnanna með minnkandi framboði nautkálfa undan góðum kúm/kvígum til að kaupa á sæðingastöð getur leitt til verulega minni erfðaframtök og aukinnar skyldleikaræktar. Þessu er hægt að mæta með því að nota sæði sem gefur nautkálfa (Y-sæði) eða hefðbundið sæði í allra bestu kúr/kvígum eða með því að láta bestu kvígurnar á hverjum tíma hafa fjöldaegglos og flytja úr þeim fósturvísu. Uppsetning á kerfisbundnum fjöldaegglosum og fósturvísaf lutningum getur aukið erfðaframtök í stofninum, sérstaklega ef kyngreint sæði er notað líka. Kostnaður við slíkt verkefni er þó allnokkur en miðað við grófa kostnaðaráætlun ætti skolun á 10 til 20 kvígum á ári að borga sig fyrir greinina. Val á sæðinganautum getur haft mikil áhrif á erfðaframtök og þróun skyldleikaræktar en með aðeins 10 nýjum nautum á sæðingastöð á ári verður kynbótakerfið ósjálfbært vegna óhóflegrar skyldleikaræktaraukningar. Val á 20 nautum á ári virðist aftur á móti halda skyldleikaræktaraukningu innan ásættanlegra marka. Best væri þó að nýta kjörerfðaframlög við val á nautum en enn vantar að skoða betur hvernig best er staðið að því.

Heimana notkun dregur úr erfðaframtökum í stofninum. Hún dregur aftur á móti líka úr skyldleikaræktaraukningu en fjölgun sæðingana er mun virkari leið til að draga úr skyldleikaræktaraukningu og hefur minni áhrif á erfðaframtök. Til að nýta kosti erfðamengjaúrvals þarf að arfgerðargreina hóp nautkálfa til að velja úr sæðingana en það

svarar þó varla kostnaði að arfgerðargreina fleiri en 500 nautkálfa á ári. Ef farið verður að velja verulegan hluta sæðingana úr kálfum tilkomnum með fósturvís aflutningum má fækka greiningum.

Niðurstöður þessa verkefnis gefa góðan leiðarvísi um hvernig er hægt að nýta tæknilausnir dagsins í dag, bæði með arfgerðargreiningum og æxlunartækni, til að ná sem mestri erfðafrámför í íslenskum mjólkurkúm á sama tíma og skyldleikarækt er haldið innan marka.

Hugtakalisti

EKM → Erfðamengjakynbótamat, erfðamat

FEFF → Fjöldaegglos og fósturvís aflutningar (e. MOET)

ΔG → Árlegar erfðafráfarir

ΔF → Skyldleikaræktaraukning á kynslóð

X-sæði → Sæði sem gefur kvígukálf

Y-sæði → Sæði sem gefur nautkálf

σ_a → Staðalfrávik samleggjandi erfða

Heimnaut → Naut sem er notað við náttúrulega þörun heima á búum

1 Formáli

Í þessari skýrslu er greint frá niðurstöðum úr rannsókn á heppilegu kynbótaskipulagi fyrir íslenska kúastofninn sem unnin var í samstarfi Ráðgjafarmiðstöðvar landbúnaðarins (RML), Árósháskóla, Landbúnaðarháskóla Íslands og VikingGenetics á árunum 2024 til 2026. Megnið af niðurstöðunum hefur áður birst í grein í vísindaritinu *Journal of Dairy Science* (Pórarinsdóttir o.fl., 2025) en hér er greint frá þeim niðurstöðum á íslensku auk þess að greint er frá niðurstöðum frekari greininga og ýmis hagnýt atriði varðandi kynbótakerfið og kostnað við það rædd. Auk höfunda þessarar skýrslu komu að verkefninu Huiming Liu lektor við Árósháskóla, Jörn Rind Thomasen verkefnastjóri hjá VikingGenetics, Egill Gautason lektor við Landbúnaðarháskóla Íslands og Höskuldur Jensson dýralæknir hjá Nautís og nautastöð BÍ.

2 Bakgrunnur

Íslenska kúakynið er lokaður og frekar fáliðaður búfjárstofn sem hefur hátt varðveislugildi vegna lítills skyldleika við aðra stofna (Gautason o.fl., 2020) en stendur ágætlega að vígi hvað varðar helstu erfðafræðilegu mælikvarða á skyldleikarækt og erfðabreytileika (Gautason o.fl., 2021). Íslenska kúakynið hefur þá sérstöðu meðal norrænna landkynja að vera meginframleiðslukyn í sínu landi. Það auðveldar það að halda uppi nægum fjölda gripa til að viðhalda heilbrigðum stofni en setur einnig ákveðna pressu á að kynið sé hagkvæmt framleiðslukyn og standi öðrum kynjum ekki langt að baki hvað varðar hagkvæmni (Jón Hjalti Eiríksson o.fl., 2024). Til þess að það takist þarf að tryggja sem mestar erfðaframfarir innan stofnsins á sama tíma og erfðafjölbreytni innan hans er viðhaldið.

Haustið 2022 var fyrst farið að reikna kynbótamat fyrir íslenska kúastofninn byggt á arfgerðargreiningum, svokallað erfðamengjakynbótamat (*e. genomic estimated breeding value; GEV*), einnig nefnt erfðamat, hér auðkennt með skammstöfuninni EKM. Það byggir á því að tengja arfgerðir á erfðamörkum sem auðvelt er að greina og eru dreifð um erfðamengið við þá eiginleika sem við höfum áhuga á í hópi gripa sem eru annað hvort með eigin mælingar eða mælingar afkvæma, svokölluðum viðmiðunarhóp. Með þessum tengingum er svo hægt að reikna þokkalega öruggt kynbótamat á ungum gripum með því að greina þessi sömu erfðamörk sem samanlagt geta gefið nokkuð öruggt kynbótamat fyrir gripinn (Meuwissen o.fl., 2001; VanRaden, 2008). Önnur leið til að horfa á hlutverk arfgerðanna í EKM er að sjá þær sem mat á raunskyldleika milli gripa, sem gefur þá nákvæmara mat á hversu stór hluti erfðamengis skyldra gripa er svipaður, heldur en

ættarnisskráningar einar og sér, en þær geta bara sagt til um líkur á sömu genasamsætum. Þá aðferð sem er notuð við EKM á Íslandi er auðveldara að skýra með þeirri nálgun, en það er aðferð yfirleitt skammstöfuð sem SS-GBLUP (*e. single step genomic BLUP*). Í SS-GBLUP er skyldleika byggðum á ættartölu og arfgerðargreiningum blandað saman þannig að skyldleiki allra gripa, bæði arfgerðargreindra og óarfgerðargreindra, er tekinn til greina í einni keyrslu með samsettu skyldleikafylki (Aguilar o.fl., 2010; Christensen & Lund, 2010; Legarra o.fl., 2014).

Í mjólkurkúakynjum hefur hagnýting EKM fyrst og fremst byggst á því að stytta kynslóðabilið fyrir feður með því að velja þá út frá EKM og setja þá í mikla notkun strax sem ungnaut (Schaeffer, 2006; Wiggans & Carrillo, 2022). Við upptöku EKM hér á landi var kynbótaskipulaginu breytt á sömu leið, þ.e. hætt var að geyma hluta sæðis úr nautum þar til þeir fengu afkvæmadóm, byggðan á frammistöðu dætra, þannig að naut sem eru valin á grundvelli EKM teljast fullprófuð og eru notuð bæði sem nauts- og kýrfeður. Nánari útfærsla þessa kynbótaskipulags hefur hingað til byggst á lærðum ágiskunum fremur en nákvæmum útreikningum. Atriði eins og hversu mörg naut á að taka inn á stöð á ári og hve marga kálfa þarf að arfgerðargreina til að ná hámarkserfðafrámför án þess að ganga á erfðafjölbreytni stofnsins hafa þannig ekki verið könnuð skipulega áður.

Nýjungar í æxlunartækni (*e. reproductive technology*) nautgripa síðustu áratugi hafa aukið möguleika á að hraða erfðafrámförum. Sæðingar með djúpfrystu nautasæði hafa fyrir löngu fest sig í sessi sem helsta aðferð við frjóvgun mjólkurkúa, a.m.k. í Evrópu og Norður-Ameríku. Með því móti er hægt að dreifa sæði úr bestu nautunum um allan heim, standi vilji til þess, og lítil takmörk á fjölda afkvæma sem hvert naut getur eignast. Tækni til að greina sæðið eftir því hvort sæðisfrumurnar bera X-litning eða Y-litning, og þannig hvers kyns kálfarnir sem úr því koma verða, er komin í reglubundna notkun í framsæknari mjólkurframleiðslulöndum og nýlega komin í notkun héraðs (Garner & Seidel, 2008; Guðmundur Jóhannesson, 2025). Með kyngreiningu sæðis er hægt að stjórna fjölda kvígukálfa og er hagnýtingin helst á þann veg að kvígur og betri hluti kúnna eiga kvígukálfa til ásetnings og lakari hlutinn er sæddur með sæði úr nautum af holdanautakynjum. Það getur leitt til aukins ágóða af búrekstrinum og aukinna erfðafrámfara, þó niðurstöður um báða þessa þætti séu ekki alveg á einn veg og fari nokkuð eftir aðstæðum og notkun annarrar tækni (Ettema o.fl., 2017; Thomasen o.fl., 2016; Wellmann o.fl., 2023).

Sæðingar með djúpfrystu sæði hafa verulega aukið fjölda afkvæma undan hverju nauti sem valið er en helmingurinn af erfðaefti næstu kynslóðar kemur alltaf frá mæðrunum. Í móðurleggnum er úrvalsstyrkurinn mun lægri þar sem hver kýr á almennt einungis einn kálf á ári. Til að auka úrvalsstyrk í kvenkyninu hefur notkun fjöldaeggloss og fósturvísaf lutninga (FEFF), (*e. multiple ovulation and embryo transfer, MOET*) rutt sér til rúms í nautgripærækt, einkum í mjólkurkúakynjum. Í stuttu máli felst tæknin í því að kallað er fram fjöldaegglos hjá kúm eða kvígum með hormónameðferð. Eftir sæðingu, sem ef allt fer að óskum hefur leitt til frjóvgunar nokkurra eggfrumna sem byrja þá að mynda fósturvísa, er fósturvísunum skolað úr leginu. Þá er hægt að koma þeim fyrir í öðrum kúm eða kvígum sem ganga með kálfana. Með þessu móti er hægt að fá hóp kálfa undan efnilegum kvígum strax á unga aldri og þannig auka áhrif þeirra á kynbótastarfið. Með EKM er hægt að velja kvígurnar sem eru skolaðar af nákvæmni og velja úr hópi afkvæma þeirra sem eykur erfðafrámför (Thomassen o.fl., 2016).

Heimautanotkun hefur lengi verið meiri í íslenskri nautgripærækt en ráðlegt er og um 30% kálfa hafa um árabíl verið undan heimautum. Heimautanotkunin hefur dregið úr erfðafrámförum í stofninum samanborið við það sem væri hægt að ná ef allar kýr tækju þátt í sameiginlegri afkvæmarannsókn í kynbótaskipulagi með afkvæmarannsóknum (Sigurdsson & Jonmundsson, 2011). Forsendur fyrir þessu kunna að breytast með upptöku erfðamengjaúrvals. Erlendar rannsóknir á kynbótaskipulagi fyrir mjólkurkýr með erfðamengjaúrvali, með kyngreindu sæði eða með FEFF gera almennt ekki ráð fyrir heimautanotkun (Schaeffer, 2006; Thomassen o.fl., 2014, 2016) og því minna hægt að byggja á erlendum niðurstöðum fyrir íslenska stofninn en ella.

Val á grundvelli kjörerfðaframlaga (*e. optimum contribution selection*) er úrvalsaðferð sem byggir á því að veita saman kynbótamat einstaklinga og skyldleika þeirra við stofninn sem valið fer fram í (Meuwissen, 1997). Valið miðar þannig að því að viðhalda sem mestum erfðabreytileika og hægt er á meðan erfðafrámför er háværkuð. Aðferðin er sérlega fýsileg fyrir lokaða og litla erfðahópa með frekar miðstýrðu kynbótastarfi eins og íslenska kúakynið (Egill Gautason, 2016; Gautason o.fl., 2023).

Vegna allra þessara þátta þótti tímabært að fara í ítarlega skoðun á því hvaða skipulag og nýting á æxlunartæknilausnum gefur mesta erfðafrámför fyrir íslenska kúakynið á sama tíma og sjálfbærni þess er tryggð með því að forðast tap á erfðafjölbreytni. Helstu spurningar sem hér er leitað svara við eru:

- Hve marga nautkálfa ætti að kaupa á nautastöð á ári til notkunar í sæðingum?

- Borgar notkun fjöldaeggloss og fósturvísflutninga sig til að fá fleiri kálfa undan bestu kvígúnum fyrir kynbótakerfið?
- Hvaða áhrif hefur víðtæk notkun kyngreinds sæðis á kynbótakerfið?
- Hve marga nautkálfa þarf að arfgerðargreina til að velja nautkálfa inn á sæðingastöð?
- Hvaða áhrif hefur nautaval á grundvelli kjörerfðaframlaga á útkomu kynbótakerfisins?

3 Aðferðir

Aðferðafræðin sem þessi rannsókn byggir á er svokölluð slembihermun (*e. stochastic simulation*). Þannig var búinn til stofn í forritinu ADAM (Pedersen o.fl., 2009) sem líkist sem mest íslenska kúastofninum þar sem hver gripur verður til við þörun nauts og kýr/kvígu. Úr verður naut- eða kvígukálfur, sem hefur kynbóttagildi, eldist, er mældur, arfgerðargreindur, eignast afkvæmi og deyr eftir ákveðnum líkum og úrvalsskilyrðum sem eru sett. Með því að keyra slíkt úrval í ákveðinn tíma er hægt að sjá útkomu þess kynbótakerfis sem sett er upp, bæði varðandi erfðaframbör og skyldleikarækt. Mismunandi sviðsmyndir eru svo skoðaðar með því að breyta forsendum hermilíkansins. Með því að keyra hverja sviðsmynd oft og bera saman meðalútkomu má fá samanburð á útkomum mismunandi sviðsmynda sem lýsa mismunandi kynbótakerfum.

3.1 Uppsetning sýndarstofns

Stofninn sem búinn var til var með 18.000 kúm sem skiptust niður á 300 bú (60 kýr á hverju). Þetta er nokkuð minna en fjöldi kúa og búa á Íslandi í dag vegna þess að ekki eru öll bú virk í ræktunarstarfinu. Til einföldunar var gert ráð fyrir að hver kýr bæri einu sinni á ári, kvígur bæru í fyrsta sinn tveggja ára gamlar og naut gætu átt sínar fyrstu dætur þegar þau eru tveggja ára. Hermunin var síðan keyrð fyrir eitt ár í senn sem samanstóð þá af öllum helstu skrefum, þ.e. burði, mælingum, arfgerðargreiningum, öllum skrefum úrvals og þörun fyrir næsta ár.

Gert var ráð fyrir að kynbótamarkmiðið samanstæði af tveimur eiginleikum, einum með meðalhátt arfgengi (0,30) og einum með lágt arfgengi (0,04). Sá fyrri stóð þar fyrir framleiðslueiginleika og sá síðari fyrir frjósemis- eða heilsutengda eiginleika. Erfðafylgni á milli eiginleikanna var -0,20. Vægi eiginleikanna í samsettri heildareinkunn var 48% á eiginleikann með meðalhátt arfgengi og 52% á eiginleikann með lágt arfgengi. Báðir eiginleikarnir voru aðeins metnir í kúm eftir fyrsta burð. Í hermilíkaninu var EKM ekki

reiknað beint til að spara reiknigetu. Þess í stað var líkt eftir áhrifum EKM með aðferð að fyrirmynd Buch o.fl. (2012) og Dekkers o.fl. (2007). Í grófum dráttum byggist hún á því að vera með tvo viðbótareiginleika, báða með arfgengið 0,99 og erfðafylgnina 0,7 við hvorn hinna raunverulegu eiginleika. Mæling á svipgerð þessara sýndareiginleika hefur þá nokkurn veginn sömu áhrif og arfgerðargreining og útreikningur EKM fyrir eiginleikann með öryggi (*e. reliability*) 0,5. Allt val fór fram eftir samsettri kynbótaeinkunn fyrir eiginleikana tvo sem var reiknuð með fjölbreytulíkani sem innihélt bæði eiginleikana sjálfa og sýndararfgerðargreininguna með DMU5 forritinu úr DMU-forritapakkanum (Madsen & Jensen, 2018).

Reiknað var með náttúrulegum afföllum í stofninum og förgun vegna úrvals þannig að 15% gripa dattu út af handahófi á hverju ári. Því til viðbótar var öllum fimm ára kúm, þ.e. eftir að þær höfðu eignast þrjá kálfa, slátrað. Önnur förgun var vegna úrvals og verður lýst nánar fyrir hverja sviðsmynd hér á eftir.

3.2 Sviðsmyndir

Í meginhluta rannsóknarinnar voru 80 mismunandi sviðsmyndir settar upp og bornar saman. Tuttugu mismunandi kynbótakerfi, þ.e. samsetningar á notkun heimanauta, kyngreinds sæðis og FEFF, voru sett upp og innan hvers þeirra voru fjórir mismunandi möguleikar á vali sæðingana. Yfirlit yfir þessi 20 kynbótakerfi kemur fram í töflu 1 auk þess sem þeim er lýst nánar hér í næstu köflum. Til viðbótar við þessar 80 sviðsmyndir voru útgáfur af nokkrum sviðsmyndum með annan fjölda arfgerðargreindra nautkálfa hermdar.

Tafla 1 – Yfirlit yfir kynbótakerfi sem voru skoðuð í rannsókninni. Fyrir hverja útgáfu hér í töflunni voru sviðsmyndir þar sem valin voru 10, 20 eða 30 sæðinganaut á ári ásamt einni sviðsmynd þar sem nautin voru valin samkvæmt kjörerfðaframlögum.

Nafn	Gjafar (M) ¹	X-sæði	Heimanaut	Lýsing
Grunnur	0	Nei	Nei	S ² nautkálfar með hæsta EKM voru valdir í sæðingar. 60 kúr/kvígur með hæsta EKM innan hvers bús voru sæddar.
FEFF12	12	Nei	Nei	S nautkálfar með hæsta EKM voru valdir í sæðingar. M kvígur með hæsta EKM yfir öll bú notaðar í FEFF. Hver kvíga átti sex afkvæmi samtals úr tveimur sæðingum. 60 kúr/kvígur með hæsta EKM innan hvers bús voru sæddar.
FEFF25	25	Nei	Nei	
FEFF50	50	Nei	Nei	
Kyn	0	Já	Nei	S nautkálfar með hæsta EKM voru valdir í sæðingar. Þrjátíu bestu kúr/kvígur samkvæmt EKM voru sæddar

				með X-sæði og hinar 30 með Y-sæði eða sæði úr holdanautum.
KynY	0	Já	Nei	Kyn-kynbótakerfið með þeirri viðbót að tvær bestu kýr/kvígur á hverju búu samkvæmt EKM voru sæddar með Y-sæði.
KynFEFF12	12	Já	Nei	Kyn og FEFF kynbótakerfin settar saman.
KynFEFF25	25	Já	Nei	
KynFEFF50	50	Já	Nei	
HnÆtt	0	Nei	Já	S nautkálfar með hæsta EKM voru valdir í sæðingar. Á 70% búanna voru tveir bestu nautkálfnir samkvæmt æternismati valdir sem heimanaut og notaðir á kvígur innan 30 búa búahóps. 22 kvígur og 38 kýr með hæsta EKM voru sæddar eða haldið.
HnFEFF12	12	Nei	Já	FEFF- og HnÆtt-kynbótakerfin settar saman.
HnFEFF25	25	Nei	Já	
HnFEFF50	50	Nei	Já	
HnKyn	0	Já	Já	Kyn- og HnÆtt- kynbótakerfin settar saman.
HnKynY	0	Já	Já	KynY- og HnÆtt- kynbótakerfin settar saman.
HnKynFEFF12	12	Já	Já	HnFEFF- og HnKyn-kynbótakerfin settar saman.
HnKynFEFF25	25	Já	Já	
HnKynFEFF50	50	Já	Já	
Hn6Arf	0	Nei	Já	Eins og HnÆtt nema sex nautkálfar með hæsta æternismatið voru arfgerðargreindir ár hvert og heimanautin tvö valin á grunni hæsta EKM.
HnAlltArf	0	Nei	Já	Eins og HnÆtt nema 30 nautkálfar með hæsta æternismatið voru arfgerðargreindir ár hvert og heimanautin tvö valin á grunni hæsta EKM.

¹ Fjöldi kvígna sem er skolaður í fjöldaegglosi til fósturvísaf lutninga á hverju ári.

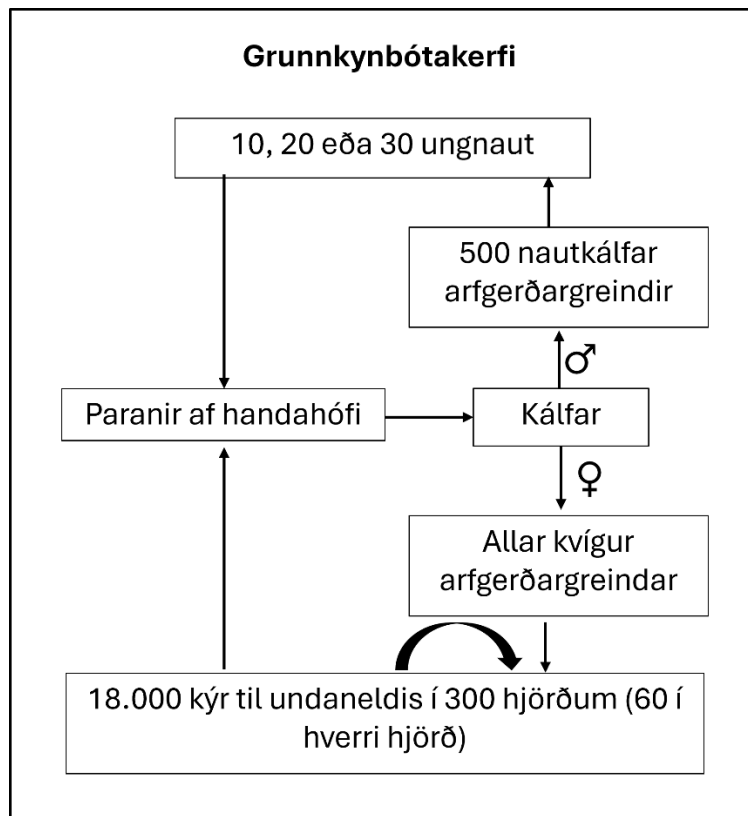
² S: Fjöldi valinna sæðingana, 10, 20, 30 eða valin með kjörerfðaframlögum.

3.2.1 Grunnkynbótakerfi

Hér nefnum við einfaldasta kynbótaskipulagið, þar sem ekki voru notuð heimanaut og engar æxlunartæknilausnir umfram hefðbundnar sæðingar notaðar, **grunnkynbótakerfi**. Því lýsum við hér nokkuð nákvæmlega og öðrum kynbótakerfum síðan sem frávikum eða viðbótum við grunninn. Meginskrefin á einu ári í grunnkynbótakerfinu sjást á mynd 1.

Af fæddum kálfum hvert ár voru allir kvígukálfar arfgerðargreindir strax. Eins árs gamlar eru kvígurnar tilbúnar til sæðingar ásamt öllum lifandi eldri kúm. Þær 60 kúr eða kvígur með hæsta EKM á hverju búi eru valdar til notkunar og sæddar en hinum (yfirleitt fáum) slátrað. Þær kúr og kvígur sem eru sæddar bera svo hver um sig einum kálfi árið eftir.

Af fæddum nautkálfum voru ár hvert 500 nautkálfar sem fengu hæsta kynbótamatið byggt á meðaltali foreldranna arfgerðargreindir. Af arfgerðargreindu kálfunum voru 10, 20 eða 30 þeirra með hæsta EKM valdir inn á nautastöð með þeim takmörkunum að í mesta lagi 10 hálfbræður voru valdir inn á hverju ári og að hámarki 20 hálfbræður undan sama nautinu í allt. Öll naut sem komu inn á stöð voru notuð að minnsta kosti í eitt ár. Því til viðbótar var besti þriðjungur nauta hvers árgangs samkvæmt EKM notaður eitt ár til viðbótar. Aukaárið var til að fá blöndun á milli árganga, fá kynslóðabil yfir tvö ár, sem er nær því sem það er í raun, og til að ná fram meiri notkun á bestu nautin sem er líklegt að gerist í raunheimum. Nautin voru alltaf notuð jafn mikið hvert ár og pörun var tilviljanakennd.



Mynd 1 - Myndræn útskýring á helstu skrefum grunnkynbótakerfisins.

3.2.2 Kynbótakerfi með fjöldaegglosi og fósturvísaf lutningum

Sviðsmyndir þar sem FEFF var notað í kynbótakerfinu (auðkenndar með **FEFF** í nafninu, sjá töflu 1) voru í flestu eins og grunnkynbótakerfið en því til viðbótar var sett upp kerfi þar sem bestu kvígurnar í hverjum árgangi samkvæmt EKM voru valdar úr öllum stofninum og notaðar í FEFF. Þrjár mismunandi útgáfur voru settar upp, með 12, 25 eða 50 skoluðum kvígum á ári. Gert var ráð fyrir að hver kvíga væri skoluð tvisvar og úr hvorri skolun kæmu þrír lifandi kálfar. Þannig urðu til sex kálfar undan hverri kvígu og gátu verið undan tveimur mismunandi nautum. Ekki var gert ráð fyrir færri kálfum undan öðrum kúm vegna meðgöngumæðra.

3.2.3 Kynbótakerfi með kyngreindu sæði

Í sviðsmyndum þar sem kyngreint sæði var notað í kynbótakerfinu (auðkenndar með **Kyn** í nafninu) en ekki með heimanautum var betri helmingur kvígna/kúa samkvæmt EKM sæddur með X-sæði, þ.e. gert var ráð fyrir 90% líkum á að kálfur undan þeim væri kvígukálfur. Í kynbótakerfum sem sameinuðu FEFF og kyngreint sæði (auðkennd með **KynFEFF**) var hefðbundið sæði notað í kvígurnar sem fóru í fjöldaegglos. Þar sem X-sæðið leiðir til umframfjölda kvígukálfa er ekki þörf á kvígukálfum frá lakari helmingi kúnna sem var sæddur. Fyrir þann hóp var miðað við að 10% líkur væru á kvígukálfi af mjólkurkúakyni, afgangurinn væru nautkálfar, sem getur þá staðið fyrir sviðsmyndir þar sem þessi hluti væri sæddur með sæði úr nautum af holdakyni.

Auk þeirra sviðsmynda með kyngreindu sæði sem hér hefur verið lýst voru búnar til sviðsmyndir þar sem tvær bestu kýrnar/kvígurnar samkvæmt EKM á hverju búi voru sæddar með Y-sæði, með 90% líkum á nautkálfi, en næstu 28 með X-sæði. Þessar sviðsmyndir eru auðkenndar með **KynY**.

3.2.4 Kynbótakerfi með heimanautum

Útgáfur af þeim kynbótakerfum sem hér hefur verið lýst þar sem heimanaut voru notuð á kvígur á 70% búanna voru settar upp. Því til viðbótar voru tvær útgáfur með viðbótararfgerðargreiningum til að velja heimanautin eftir. Þetta leiddi til þess að um 26% kálfanna voru undan heimanautum og 74% undan sæðingautum.

Vegna takmarkana í forritinu sem var notað voru heimanautin ekki notuð bara innan eigin búa heldur búahópa með 30 búum. Þannig var öllum 300 búunum skipt í 8 hópa. Fyrsti hópurinn var 90 bú sem notuðu sæðingar fyrir bæði kýr og kvígur. Hin 210 búin voru í 7 hópum, 30 bú í hverjum, og búin innan hvers hóps deildu heimanautum sem voru notuð af

handahófi innan hópans. Val heimanauta fór þannig fram að þegar búið var að velja sæðingana úr árganginum voru tvö bestu nautin samkvæmt kynbótamati (EKM ef svo vildi til að þau hafi verið arfgerðargreind, annars notað ætternismat) innan hvers bús valin sem heimanaut og svo notuð innan síns búahóps. Í sviðsmyndum með heimanautanotkun voru kýr og kvígur valdar hvorar í sínu lagi, þ.e. í stað þess að sæða 60 bestu kýr eða kvígur voru 38 bestu kýrnar sæddar og 22 bestu kvígurnar sæddar eða haldið, alltaf raðað samkvæmt EKM.

Einfaldasta kynbótakerfið með heimanautum (**HnÆtt**) byggði á grunnkynbótakerfinu að öðru leyti en því sem hefur verið lýst hér að ofan. Í annarri útgáfu, **Hn6Arf**, voru 6 bestu nautkálfnir samkvæmt ætternismati arfgerðargreindir til viðbótar við aðrar arfgerðargreiningar. Heimanautin voru síðan valin samkvæmt EKM eftir þessar arfgerðargreiningar. **HnAlltArf** var eins nema að 30 bestu nautkálfnir samkvæmt ætternismati voru arfgerðargreindir, sem sagt allir eða nánast allir.

Útgáfur kynbótakerfisins sem voru með bæði heimanaut og FEFF voru samsettar úr **HnÆtt** og viðeigandi FEFF-sviðsmynd og eru auðkenndar með **HnFEFF**. Útgáfur sem sameina heimanaut og kyngreint sæði eru auðkenndar með **HnKyn** eða **HnKynY** eftir því hvernig notkun kyngreinda sæðisins var háttað. Þar sem heimanautasviðsmyndirnar miða við að allar kvígur innan búa sem nota heimanaut fari undir heimanaut er notkun kyngreinds sæðis aðeins öðruvísi þegar heimanaut og kyngreint sæði fara saman. Þá er notað X-sæði í allar kvígur á þeim búum sem ekki nota heimanaut og í 17 bestu kýrnar samkvæmt EKM á öllum búum, en kýr sem raðast neðar eru sæddar með Y-sæði. Í **HnKynY** var þessu svipað farið nema með notkun á Y-sæði í 2 bestu kýrnar/kvígurnar á hverju búi eins og lýst er fyrir **KynY**. Samsetningar með heimanautum, kyngreindu sæði og FEFF eru auðkenndar með **HnKynFEFF** og samsettar úr viðeigandi einfaldari sviðsmyndum.

3.3 Kjörerfðaframlög

Þau kynbótakerfi sem lýst er í töflu 1 og í kafla 3.2 voru öll gerð í fjórum sviðsmyndum eftir því hvernig val nauta fór fram. Í þremur þeirra voru einfaldlega þeir nautkálfnar sem fengu hæsta EKM í hverjum árgangi eftir arfgerðargreiningu teknir á sæðingastöð og fjöldinn settur fastur í 10, 20 eða 30. Fjórða leiðin notaði úrval byggt á kjörerfðaframlögum. Við þá uppsetningu var reynt að horfa til þess hvernig væri hægt að nýta kjörerfðaframlög í kynbótakerfi sem hefur stjórn á vali nauta til notkunar en ekki hvernig þau eru notuð. Á bilinu 10 til 30 naut voru valin eftir kjörerfðaframlögum með áherslu á val sem stefnir að því að halda árlegri skyldleikaræktaraukningu í 1,0%. Við útreikning kjörerfðaframlaga var

forritið EVA (Henryon o.fl., 2015) notað ásamt ADAM. Til að auðvelda útreikningana stóðu aðeins 100 bestu nautin samkvæmt EKM til boða til úrvals og EVA fann bestu nautin meðal þeirra til að para við þær 510 lifandi kýr/kvígur sem voru með hæst EKM. Forritið gefur lista af pörunum þar sem nautin geta verið notuð misjafnlega mikið en aðeins listinn yfir naut sem voru valin var notaður til að líkja eftir raunverulegum aðstæðum þar sem bændum er frjálst að velja úr þeim nautum sem eru í boði á hverjum tíma. Paranir voru síðan samkvæmt slembivali og notkun eins og lýst er fyrir aðrar sviðsmyndir.

3.4 Fjöldi arfgerðargreindra

Til viðbótar við þessar 80 sviðsmyndir sem lýst var í fyrri kafla og er lýst í grein Þórdísar Þórarinsdóttur o.fl. (2025), voru prófaðar útgáfur nokkurra þeirra með öðrum fjölda arfgerðargreindra nautkálfa en 500 eins og var í flestum sviðsmyndum. Fyrir grunnkynbótakerfið með 20 völdum nautum voru prófaðir fjórir möguleikar til viðbótar, með 100, 300, 700 og 900 arfgerðargreindum nautkálfum. Fyrir nokkrar aðrar útgáfur kynbótakerfisins sem sjá má yfirlit yfir í töflu 2 voru sviðsmyndir með 300 og 700 arfgerðargreindum nautkálfum prófaðar. Samtals var 21 viðbótarsviðsmynd keyrð til að skoða áhrif af fjölda arfgerðargreindra nautkálfa.

<i>Tafla 2 - Sviðsmyndir sem voru prófaðar með mismunandi fjölda arfgerðargreindra nauta. Þau stig í fjölda nautkálfa sem voru prófuð eru auðkennd með X.</i>						
		Fjöldi arfgerðargreindra nautakálfa				
Kynbótakerfi	Fjöldi nauta	100	300	500	700	900
Grunnur	10		X	X	X	
Grunnur	20	X	X	X	X	X
Grunnur	30		X	X	X	
KynY	20		X	X	X	
FEFF25	20		X	X	X	
KynFEFF12	20		X	X	X	
KynFEFF25	20	X	X	X	X	
KynFEFF50	20		X	X	X	
HnÆtt	20		X	X	X	

3.5 Tölfræðileg úrvinnsla

Niðurstöður eru sýndar fyrir þróun skyldleikaræktar og erfðaframtara á síðustu 10 árunum af þeim 25 sem hermanirnar stóðu yfir. Hermanirnar voru endurteknaðar 100 sinnum og niðurstöðurnar sýna meðaltöl yfir allar endurtekningar. Aðhvarfsstuðlar fyrir árlegar erfðaframtara (ΔG) á heildareinkunn eiginleikanna tveggja og árlega skyldleikaræktaraukningu voru fengnir með því að reikna aðhvarf á hið sanna kynbóttagildi og skyldleikaræktarstuðul á fæðingarár innan hverrar endurtekningar. Árleg skyldleikaræktaraukning var reiknuð sem $1 - \exp(-\beta)$, þar sem β er halli aðhvarfsins af náttúrulega logranum af $1 - F$ á fæðingarár, þar sem F er skyldleikaræktarstuðullinn (Henryon o.fl. 2015). Skyldleikaræktaraukning á kynslóð (ΔF) var síðan reiknuð sem margfeldi kynslóðabilsins og árlegrar aukningar skyldleikaræktar innan endurtekningar. Að lokum var tekið meðaltal yfir 100 endurtekningar. Öll tölfræðileg úrvinnsla fór fram í R (útgáfa 4.4.2, R Core Team, 2024).

4 Niðurstöður hermilíkana

4.1 Almennar niðurstöður

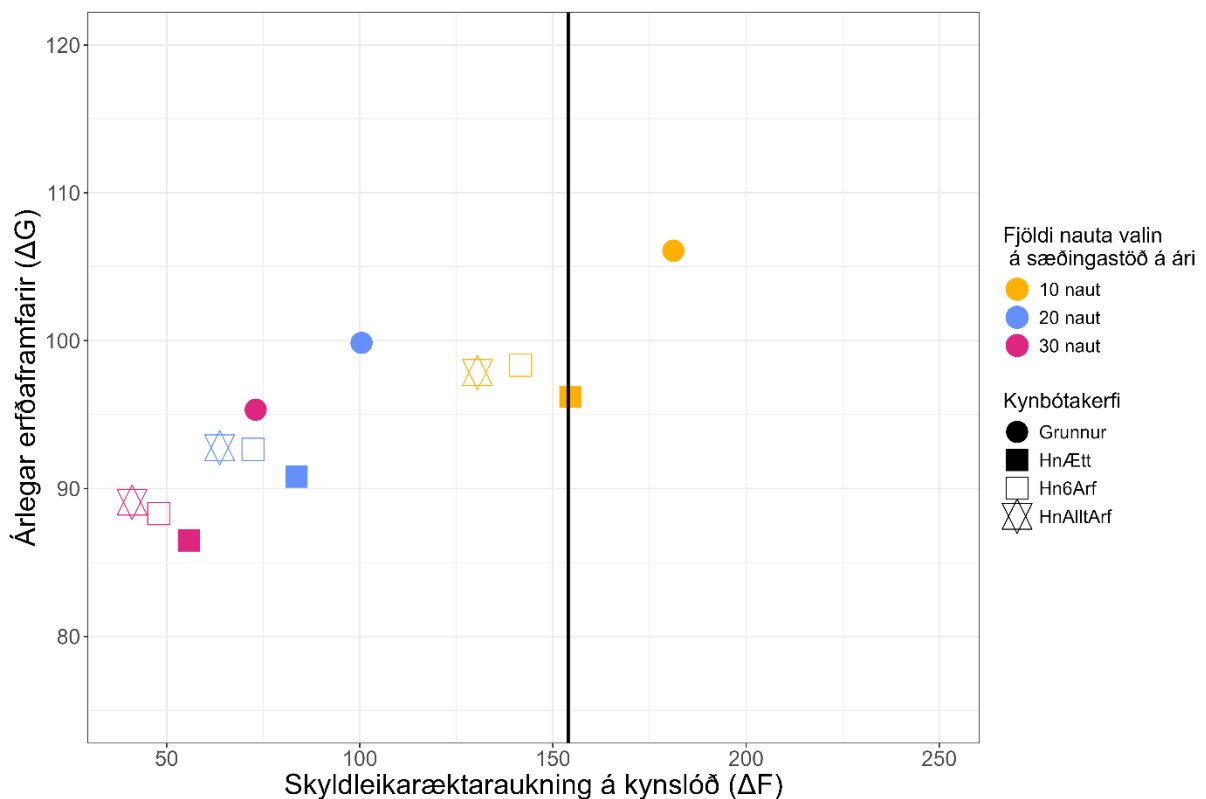
Erfðaframtara á samsetta kynbótamarkmiðinu (ΔG) var á bilinu 0,30 til 0,44 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) á ári, mest fyrir KynFEFF50 með 10 sæðinganautum en minnst fyrir Kyn með 30 nautilum. Aukning skyldleikaræktar á kynslóð (ΔF) var á bilinu 0,27% til 1,61%, mest fyrir Kyn með 10 sæðinganautum en minnst fyrir HnAlltArf með 30 sæðinganautum. Sá munur sem kom fram á milli sviðsmynda var í flestum tilfellum marktækur samkvæmt prófi Tukey's, en almennt var munur sem var innan við 0,0080 σ_a í árlegri erfðaframtara ekki marktækur ($p < 0,05$) og fyrir skyldleikaræktaraukningu var munur sem var innan við 0,035% ekki marktækur miðað við sömu mörk. Kynslóðabil var svipað í öllum sviðsmyndum, á bilinu 2,60 ár til 2,71 árs.

Til að auðvelda samanburð á milli sviðsmynda var grunnkynbótakerfið með 20 sæðinganautum haft sem viðmiðunarsviðsmynd. ΔG og ΔF fyrir allar sviðsmyndir voru stöðluð þannig að niðurstöður fyrir viðmiðunarsviðsmyndina urðu 100. Erfðaframtara í viðmiðunarsviðsmyndinni var 0,38 σ_a á ári og skyldleikaræktaraukning á kynslóð var 0,65%.

4.2 Nautanotkun

Skoðum fyrst einfaldar sviðsmyndir til að átta okkur á áhrifum af notkun nauta. Á mynd 2 má sjá samanburð á ΔG og ΔF sviðsmynda sem notuðu ekki æxlunartækni aðra en hefðbundnar

sæðingar. Þar sést greinilega að því færri sæðinganaút sem eru notuð, því meiri verður erfðaframtörun og meiri skyldleikarækt. Ef engin heimanaút eru notuð og aðeins 10 sæðinganaút á ári verður ΔF töluvert yfir 1,0% á kynslóð sem er óásættanlegt en með 20 eða 30 sæðinganaútum er skyldleikaræktaraukningin innan marka. Heimanaútanotkun minnkar hvort tveggja ΔG og ΔF . Þegar aðeins 10 sæðinganaút eru notuð ásamt heimanaútum verður skyldleikaræktaraukningin alveg á 1,0% línunni. Arfgerðargreiningar á mögulegum heimanaútum hækka ΔG lítillega og lækka ΔF en komast hvergi nærri því að ná til baka minnkaðri erfðaframtörun sem fylgir heimanaútanotkun. Fjölgun arfgerðargreininga til að velja heimanaút úr 6 nautkálfum á hverju bú á ári ($Hn6Arf$) yfir í að arfgerðargreina alla nautkálfa ($HnAlltArf$) hafði lítil áhrif á ΔG en ΔF minnkaði lítillega.

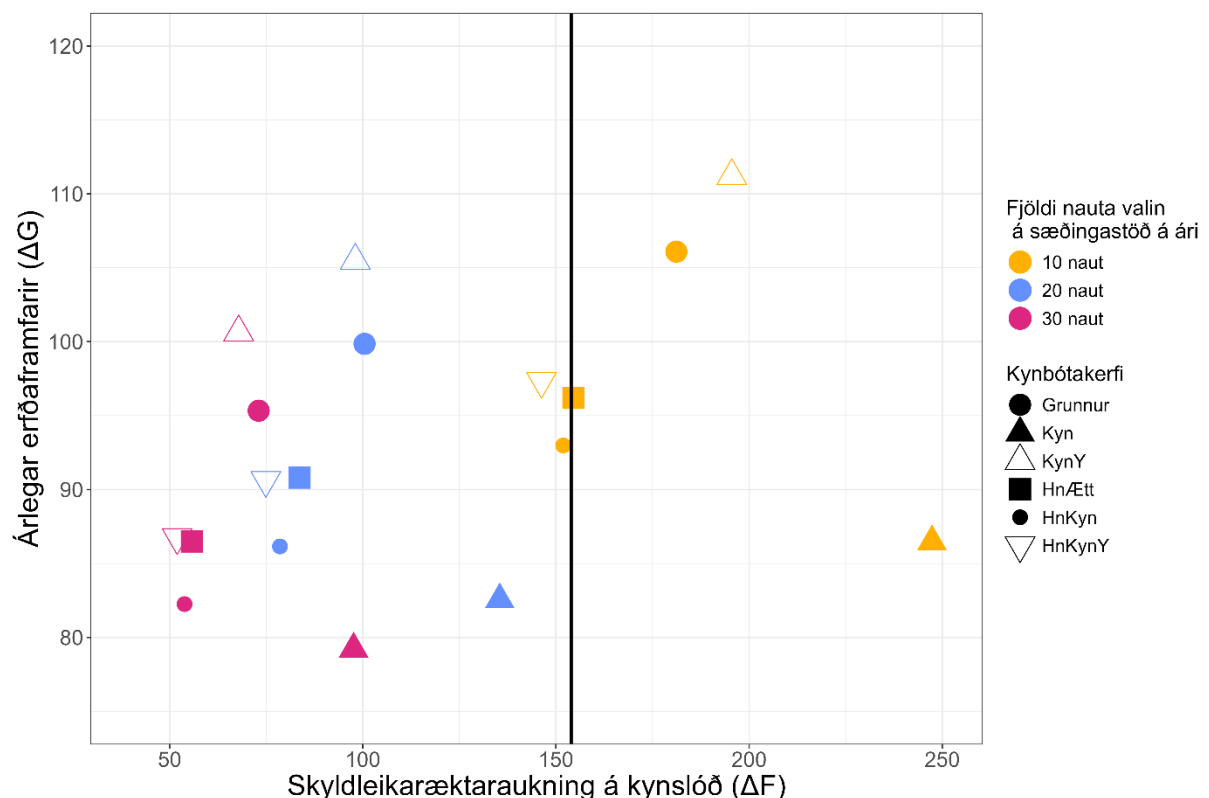


Mynd 2 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðaframtörunum (ΔG) og aukning á skyldleikarækt (ΔF) í sviðsmyndum þar sem hvorki var notað kyngreint sæði né fjöldaegglos og fósturvísaf lutningar. Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðaframtörun upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarækt á kynslóð. Svarta línan táknar 1,0% aukningu á skyldleikarækt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.

4.3 Kyngreint sæði

Mynd 3 sýnir samanburð nokkurra sviðsmynda þar sem kyngreint sæði var notað (X eða X og Y) án þess að nota FEFF auk grunnkynbótakerfisins og HnÆtt til viðmiðunar. Notkun X-sæðis á betri helming kúa og kvígna án þess að nota Y-sæði eða heimanaut (Kyn sviðsmyndir) hafði veruleg neikvæð áhrif á niðurstöðu kynbótakerfisins, bæði með verulega lægri ΔG miðað við grunnsviðsmyndirnar og aukinni skyldleikarækt. Kyn með 10 nautum var sú sviðsmynd sem sýndi hæst ΔF og Kyn með 30 naut var sú með lægsta ΔG .

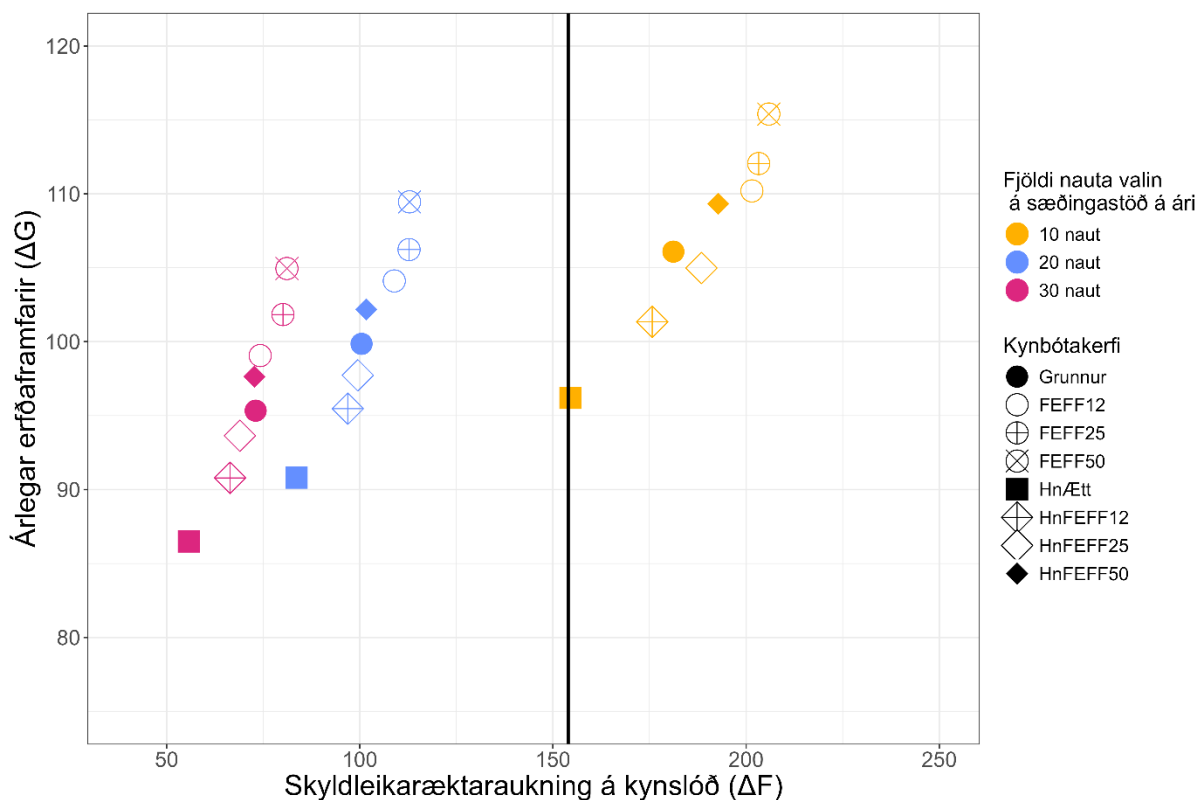
Heimanutnotkun dempaði neikvæð áhrif notkunar X-sæðis nokkuð, þannig var ΔF svipað fyrir HnÆtt- og HnKyn-sviðsmyndirnar en ΔG nokkuð lægri í HnKyn, en munurinn mun minni en á milli Grunnns og Kyns. Ef Y-sæði var notað í tvær bestu kýrnar samkvæmt EKM og X-sæði í þær sem voru þar fyrir neðan (KynY og HnKynY) voru áhrif kyngreinds sæðis á erfðafrámför aftur á móti jákvæð með 5-6% hækkun ΔG ef miðað var við grunnsviðsmyndirnar. Með heimanutnotkun dró úr ávinningi Y-sæðisins.



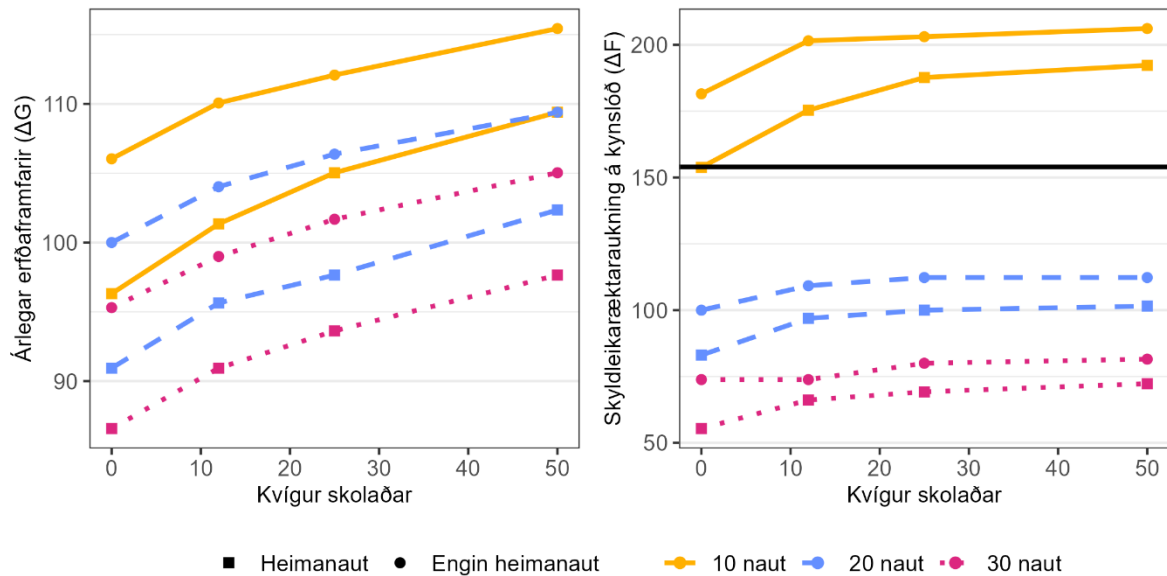
Mynd 3 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðafráförum (ΔG) og aukning á skyldleikarækt (ΔF) í sviðsmyndum þar sem kyngreint sæði var notað. Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðafrámför upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarækt á kynslóð. Svarta línan táknar 1,0% aukningu á skyldleikarækt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.

4.4 Fjöldaegglos og fósturvísaf lutningar

Mynd 4 sýnir samanburð erfðaframfara og skyldleikaræktar aukningar sviðsmynda með mismunandi notkun á FEFF þar sem kyngreint sæði er ekki notað. Mynd 5 sýnir svo áhrif þess á ΔG og ΔF að fjölga skoluðum kvígum. Notkun FEFF leiddi til herra ΔG óháð hvort tveggja heimanotnotkun og fjölda sæðingana og eftir því sem fleiri gjafar voru notaðir hækkaði ΔG . Hækkun ΔG fyrir hverja kvígu var mest þegar farið var úr engu FEFF upp í 12 kvígur skolaðar á ári. Áhrif FEFF á skyldleikarækt voru óljósari. Þegar 10 sæðinganaut voru valin á ári olli FEFF nokkurri hækkun á ΔF en áhrifin voru minni þegar fleiri sæðinganaut voru notuð. Fjölgun kvígna í FEFF umfram 12 á ári hafði lítil áhrif á ΔF . Þegar aðeins voru valin 10 sæðinganaut á ári, með og án heimanauta, fór ΔF yfir 1%.

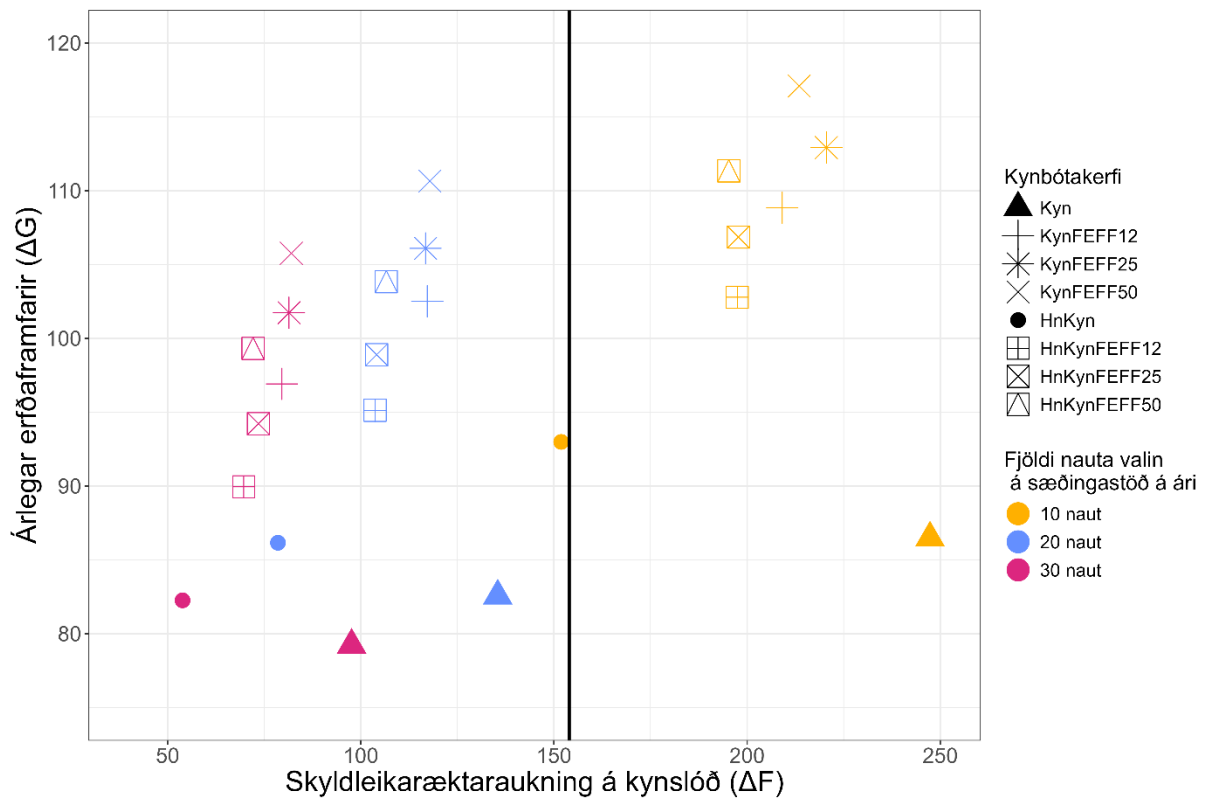


Mynd 4 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðaframförum (ΔG) og aukning á skyldleikarækt (ΔF) í sviðsmyndum þar sem fjöldaegglos og fósturvísaf lutningar (FEFF) voru notuð. Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðaframför upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarækt á kynslóð. Svarta línan táknar 1,0% aukningu á skyldleikarækt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.

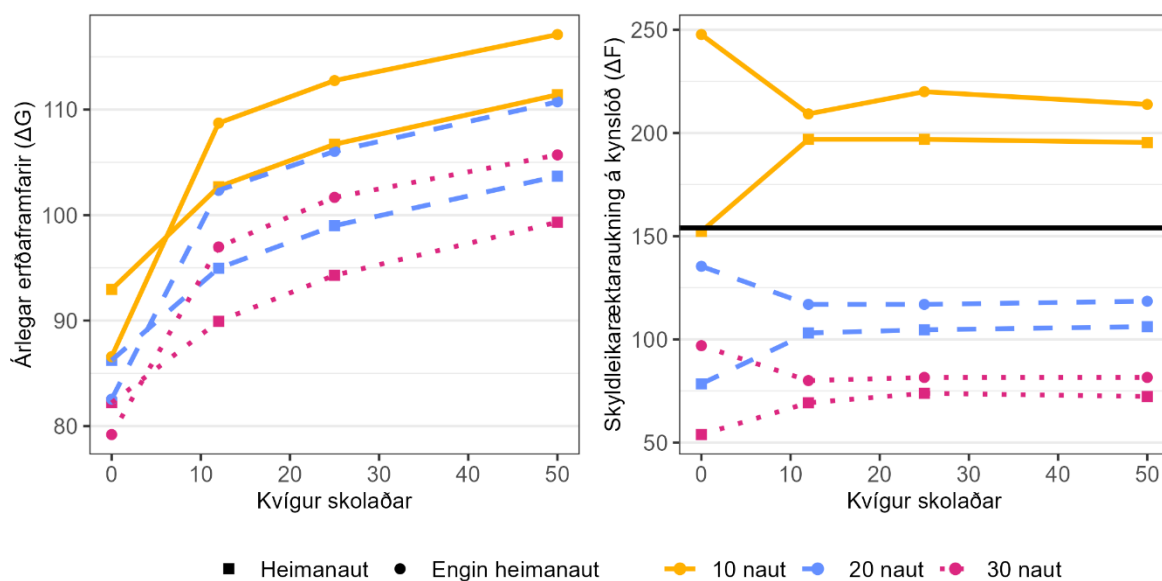


Mynd 5 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðafrámörum (ΔG) og aukning á skyldleikarækt (ΔF) í sviðsmyndum FEF12, FEF25, FEF50, HnFEF12, HnFEF25, HnFEF50 ásamt Grunni og HnÆtt til samanburðar (0 kvígur skolaðar). Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðafrámör upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarækt á kynslóð. Svarta línan táknar 1,0% aukningu á skyldleikarækt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.

Myndir 6 og 7 sýna áhrif FEF þegar kyngreint sæði (X-sæði) var einnig notað. Í þeim sviðsmyndum kom einnig fram áberandi hækkun ΔG með FEF, sama hvaða nautafjöldi var valinn á sæðingastöð og hvort heimantaut voru til staðar eða ekki. Í öllum sviðsmyndum var mesta aukning á ΔG þegar farið var úr því að skola engar kvígur (Kyn og HnKyn) yfir í að skola 12 (KynFEF12 og HnKynFEF12). Á mynd 4 hér að ofan sást að þegar X-sæði var eingöngu notað var ΔG hærri í sviðsmyndum með heimantautum en í sviðsmyndum þar sem þau voru ekki notuð. Hins vegar breyttist þetta þegar bæði FEF og X-sæði var notað en þá varð ΔG hærri í sviðsmyndum án heimantauta. Án heimantauta lækkaði ΔF þegar skolaðar kvígur fóru úr 0 í 12 en ΔF hækkaði með heimantautum. Frekari fjölgun á skoluðum kvígum hafði lítil áhrif ΔF í öllum sviðsmyndum.



Mynd 6 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðaframförum (ΔG) og aukning á skyldleikarækt (ΔF) í sviðsmyndum þar sem kyngreint sæði (Kyn) ásamt fjöldaegglosi og fósturvísaf lutningum (FEFF) var notað. Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðaframför upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarækt á kynslóð. Svarta línan táknar 1,0% aukningu á skyldleikarækt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.



Mynd 7 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðaframtíðum (ΔG) og aukning á skyldleikarætt (ΔF) í sviðsmyndum KynFEFF12, KynFEFF25, KynFEFF50, HnKynFEFF12, HnKynFEFF25, HnKynFEFF50 ásamt Kyn og HnKyn til samanburðar (0 kvígur skolaðar). Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðaframtíð upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarætt á kynslóð. Svarta línan táknar 1,0% aukningu á skyldleikarætt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.

4.5 Úrval með kjörerfðaframlögum

Í töflu 3 má sjá hve mörg sæðinganaut voru valin hvert ár þegar EVA valdi á bilinu 10 til 30 naut samkvæmt kjörerfðaframlögum fyrir 10 síðustu endurtekningar hermunarinnar (þessar upplýsingar voru ekki vistaðar fyrir fleiri endurtekningar fyrir mistök). Í þessum endurtekningum fór fjöldinn aldrei upp í 30 naut en í nokkrum tilfellum niður í 10 naut.

Meðaltalið var oftast nærri 20 sæðinganautum á ári. Þó EVA væri stillt á að stefna að $\Delta F = 1,0\%$ varð útkoma allra sviðsmynda með kjörerfðaframlögum minni

skyldleikarættaraukning, með ΔF á bilinu 0,32% til 0,56%. Samanburður á sviðsmyndum

sem byggja á kjörerfðaframlögum og sviðsmyndum með sömu notkun æxlunartækni en með 20 sæðinganaut valin (mynd 8) sýnir í flestum tilfellum heldur lægri ΔG með

kjörerfðaframlögum, en sá munur var oft ekki marktækur. Undantekning er að Kyn-

kynbótakerfið þar sem ΔG var 14% hærra með kjörerfðaframlögum. Notkun

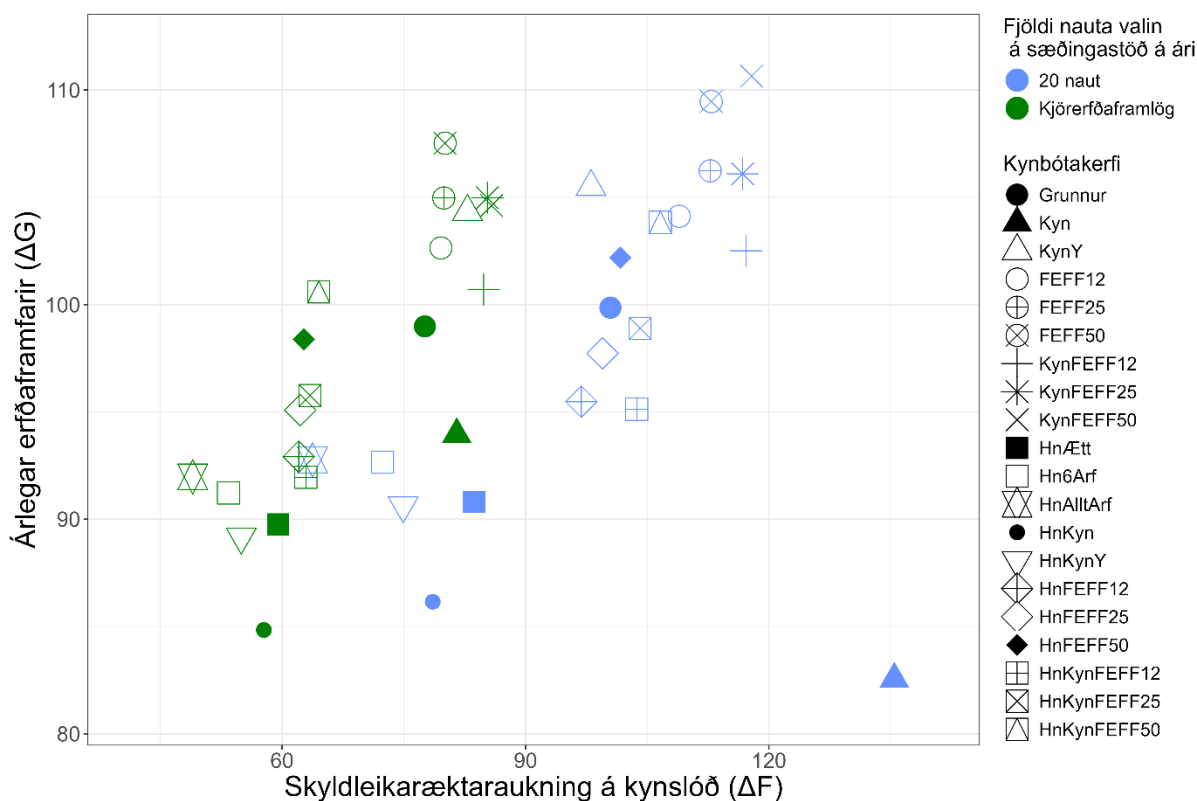
kjörerfðaframlaga kemur aftur á móti mun betur út hvað varðar skyldleikarætt, með 16 til

40% lægra ΔF heldur en þegar 20 bestu nautin eru valin samkvæmt EKM, við samanburð

innan kynbótakerfa.

Tafla 3 - Fjöldi sæðingana sem voru valin á hverju ári með kjörerfðaframlögum.

Kynbótakerfi	Fjöldi valinna sæðingana			
	Fæst/Min	Flest/Max	Meðaltal	St.frv.
Grunnur	10	26	18,5	3,5
FEFF12	11	25	18,5	3,0
FEFF25	12	27	18,9	2,8
FEFF50	12	26	18,8	2,9
Kyn	10	27	16,7	3,1
KynY	10	25	17,2	3,1
KynFEFF12	10	25	17,7	2,8
KynFEFF25	10	24	17,9	2,5
KynFEFF50	11	26	18,3	2,8
HnÆtt	16	24	19,6	2,2
HnFEFF12	16	26	21,3	2,3
HnFEFF25	17	28	21,6	2,4
HnFEFF50	16	28	22,6	2,2
HnKyn	11	24	19,0	2,8
HnKynY	13	25	18,9	2,6
HnKynFEFF12	15	27	21,4	2,7
HnKynFEFF25	16	28	22,1	2,4
HnKynFEFF50	17	28	22,9	2,4
Hn6Arf	12	25	18,5	2,7
HnAlltArf	10	27	18,2	3,0

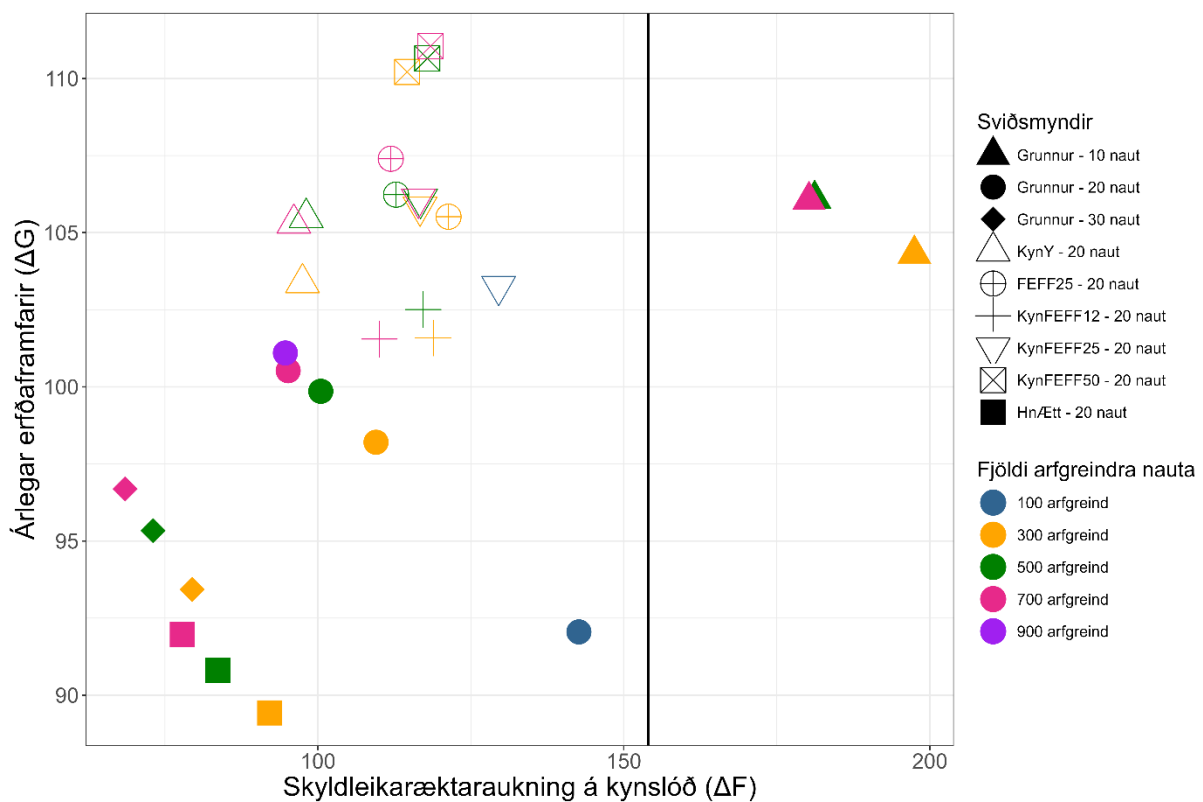


Mynd 8 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðaframtörum (ΔG) og aukning á skyldleikarækt (ΔF) í sviðsmyndum þar sem kjörerfðaframlög voru notuð borið saman við þegar 20 sæðinganaut voru valin samkvæmt EKM. Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðaframtör upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarækt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.

4.6 Fjöldi arfgerðargreindra nautkálfa

Mynd 9 sýnir samanburð ΔG og ΔF með breytilegum fjölda arfgerðargreindra nautkálfa. Fyrir viðmiðunarsviðsmyndina eru 5 stig af fjölda arfgerðargreindra kálfa. Með einungis 100 arfgerðargreindum nautkálfa lækkaði ΔG um 8% miðað við 500 arfgerðargreind naut, en lækkunin var 2% ef farið var niður í 300 arfgerðargreindra nautkálfa. Fjölgun arfgerðargreindra nautkálfa umfram 500 hækkaði ΔG aðeins lítillega. Fækkun arfgerðargreindra nautkálfa hafði einnig neikvæð áhrif á þróun skyldleikaræktar, með 43% hærra ΔF þegar aðeins 100 nautkálfar voru arfgerðargreindir samanborið við viðmiðunarsviðsmyndina með 500 arfgerðargreindum. Fækkun niður í 300 úr 500 jók ΔF um 8% á meðan fjölgun upp í 700 eða 900 arfgerðargreindra nautkálfa minnkaði skyldleikarækt um 5%. Grunnkynbótakerfi með annan fjölda sæðinganauta sem og HnÆtt sýndu svipað mynstur þegar fjöldi arfgerðargreindra nautkálfa var breytt, með þeirri undantekningu þó að fjölgun

arfgerðargreininga umfram 500 hafði lítil eða engin áhrif ef einungis 10 sæðinganaut voru valin á ári. Í KynY sviðsmyndunum með 20 sæðinganaut var nánast enginn munur eftir því hvort 500 eða 700 nautkálfa voru arfgerðargreindir en fækkun arfgerðargreininga niður í 300 dró lítillega úr erfðaframtölum. Í sviðsmyndum með FEFF hafði breyting á fjölda arfgerðargreindra nautkálfa á bilinu 300 til 700 lítil áhrif á hvort tveggja, ΔG og ΔF . Fyrir FEFF25 með 20 sæðinganaut var einnig prófað að fækka arfgerðargreindum nautkálfum niður í 100 sem lækkaði ΔG og jók ΔF samanborið við 300 eða fleiri arfgerðargreinda nautkálfa.



Mynd 9 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðaframtölum (ΔG) og aukning á skyldleikarækt (ΔF) þar sem bornar eru saman sviðsmyndir með breytilegum fjölda arfgerðargreindra nautkálfa. Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðaframtöl upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarækt á kynslóð. Svarta línan táknar 1% aukningu á skyldleikarækt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.

5 Umræður

5.1 Nautanotkun

Mjög skýrt er af niðurstöðunum að fjöldi sæðingana hefur áhrif á útkomu kynbótaskipulagsins þannig að því færri naut, því hærra ΔG og hærra ΔF . Þetta er þáttur sem nokkuð auðvelt er að breyta í kerfinu og þannig hægt að stilla fjölda sæðingana þannig að ΔF sé á ásættanlegum stað en með eins mikilli ΔG og mögulegt er. Miðað við niðurstöðurnar hefur heimanautanotkun og notkun æxlunartækni einnig áhrif á ΔF og það fer því nokkuð eftir öðrum þáttum kynbótakerfisins hvaða fjöldi sæðingana er heppilegastur. Þó sýndi fjölþátta aðhvarfsgreining á niðurstöðum þessarar hermíranssóknar sem sagt er frá í grein Þórarinsdóttur og fleiri (2025), að fara mætti niður í 15 sæðingana á ári í bestu (m.t.t. ΔG) sviðsmyndunum óháð heimanautanotkun án þess að fara upp fyrir 1,0% ΔF . Með jafn einangrað kyn og hið íslenska (Gautason o.fl., 2020) og vegna varúðarsjónarmiða gæti þó verið ástæða til að miða við minni skyldleikaræktaraukningu fyrir íslenska stofninn.

Enn betra en að velja fastan fjölda bestu sæðingana samkvæmt EKM væri að nýta kjörerfðaframlög við valið. Niðurstöðurnar sýna að ná má hærri ΔG miðað við sama ΔF ef nautin eru valin með þeim hætti. Hvernig framkvæmdin á því nákvæmlega væri krefst nánari skoðunar. Uppsetningin hér gerir ráð fyrir að geta valið einu sinni á ári úr arfgerðargreindum nautkálfum frá síðastliðnu ári, þegar í reynd þarf að velja kálfana mun oftast en það. Eins getur verið ástæða til að nýta aðferðina við önnur úrvalsskref, svo sem við val kvígna til skolunar og við val á nautkálfum til arfgerðargreiningar.

Niðurstöðurnar sýna að heimanautanotkun dregur úr ΔG (mynd 2). Aftur á móti dregur hún líka úr ΔF . Samanburður á sviðsmyndum með heimanautanotkun við sambærilegar sviðsmyndir nema án heimanauta og með fleiri sæðingana (t.d. HnÆtt með 20 sæðingana borið saman við grunnkynbótakerfið með 30 sæðingana) sýnir aftur á móti að með því að fjölga sæðingana má draga meira úr ΔF með minni minnkun á erfðafrámför en með notkun heimanauta. Arfgerðargreiningar á nautkálfum sem mögulega á að velja sem heimanaut (Hn6Arf og HnAlltArf) höfðu jákvæð áhrif en fóru hvergi nálægt því að vinna til baka neikvæð áhrif heimanautanotkunar á kynbótakerfið í heild.

Í því kynbótakerfi með afkvæmarannsóknum sem hér var fyrir upptöku erfðamengjaúrvals var löngu vitað að heimanautanotkun takmarkaði erfðafrámför í kerfinu (Sigurdsson & Jonmundsson, 2011). Heimanautanotkun hefur samt haldist á svipuðu róli síðustu áratugi þannig að ekki er víst að niðurstöður þessa verkefnis um heimanaut breyti nokkru þar um.

Mögulega eykur framboðið á kyngreindu sæði áhuga á sæðingum kvígna þar sem helst er mælt með að nota X-sæði á kvígur, bæði vegna þess að þær halda almennt betur en kýr og eru að jafnaði með hæsta kynbótagildið.

5.2 Æxlunartækni

Greinilegt er að skipulögð notkun FEFF er til þess fallin að auka erfðaframtök í stofninum, einkum þegar X-sæði er notað. Það er í samræmi við fyrri niðurstöður sem hafa sýnt að notkun æxlunartækni svo sem FEFF og kyngreinds sæðis spilar vel saman við arfgerðargreiningar á kvígum (Thomasen o.fl., 2016) sem var alltaf til staðar í okkar líkönum. Kyn-kynbótakerfið, þar sem eingöngu var notað X-sæði í bestu kýrnar og kvígurnar, en hvorki Y-sæði né FEFF, kom mjög illa út. Ástæðan liggur væntanlega í skorti á nautkálfum til að velja sem sæðingana þegar ávallt eru 90% líkur á kvígukálfi hjá betri helmingi kúa og kvígna. Svipaðar erlendar rannsóknir hafa sýnt jákvæð áhrif af notkun á kyngreindu sæði (Bérodier o.fl., 2019; Thomasen o.fl., 2016) en áhrifin eru mjög háð öðrum þáttum kynbótakerfisins, hvort heldur sem er notkun Y-sæðis í allra besta hluta kvígna/kúa í hópnum eða FEFF (þar sem var notað hefðbundið sæði) en það leiðir til þess að undan bestu kvígunum/kúnum koma nautkálfar sem er þá hægt að velja úr sæðingana, sem bætir til muna útkomu kynbótakerfisins samanborið við Kyn sviðsmyndirnar. Einnig væri mögulegt að nota hefðbundið sæði á bestu kýrnar og kvígurnar í kynbótakerfi svipuðu KynY, en þá þyrfti væntanlega heldur fleiri kýr/kvígur í þeim hópnum en voru í Y-hópnum. Möguleiki á aukinni erfðaframtökum er þó ekki meginástæðan fyrir notkun á kyngreindu sæði þar sem það getur haft jákvæð áhrif á afkomu búna t.d. með meiri tekjum af nautkálfum og umframkvígukálfum með notkun á sæði af holdakynjum (Ettema o.fl., 2017).

5.3 Takmarkanir

Þó reynt hafi verið að gera hermílkönin sem raunsæjust fyrir aðstæður innan íslenska kúastofnsins er vissulega margt gert til einföldunar í þessum líkönum sem getur haft þau áhrif að niðurstöður í raunheiminum verði aðrar en hér fæst út. Þar má nefna að búin eru misstór, naut geta verið misjafnlega vinsæl, gert var ráð fyrir frekar stuttum endingartíma kúa, hermílkanið gerir ráð fyrir að allar kýr beri árlega og val fer allt fram úr heilum árgöngum. Aðferðafræðin og forritið sem voru notuð er þó hvort tveggja þrautreynt (Buch o.fl., 2012; Pedersen o.fl., 2009; Thomasen o.fl., 2020) og ætti að gefa eins góðan samanburð á sviðsmyndum og hægt er án þess að gera tilraunir með stofninn sjálfan sem er óraunhæft í reynd.

Notkun heimanauta var atriði sem sett var upp í þessari rannsókn en það hefur lítið verið gert áður í svipuðum hermírannskómum. Hún var þó töluvert einfölduð frá því sem gerist í raunheimum. Með því að hafa nautin notuð innan hóps búa var reynt að líkja eftir því að nautin geta farið á milli bæja en í raunheimum er notkun heimanauta oft bundin við eitt eða mjög fá bú. Heimanautanotkun innan búa gæti hækkað skyldleikaræktarstuðulinn eitthvað frá þeirri uppsetningu sem hér var notuð en ætti síður að hafa áhrif á tap á erfðafjölbreytni í stofninum í heild.

Öryggi þess kynbótamats sem valið er eftir, í þessu tilfalli EKM, hefur áhrif á erfðafrámför í stofninum. Það öryggi sem gert var ráð fyrir byggir ekki á nákvæmum rannsóknnum á öryggi í íslenska stofninum enda má búast við eitthvað herra öryggi eftir því sem viðmiðunarhópurinn sem erfðamengjaspáin byggir á stækkar.

6 Hagkvæmt kynbótaskipulag

6.1 Fjöldaegglos og fósturvísaf lutningar

Niðurstöður hermílikananna í kafla 4 sýna að meiri notkun æxlunartækni, einkum FEF, og auknar arfgerðargreiningar leiða til meiri erfðafrámfara. Þetta eru aftur á móti aðferðir sem fela í sér kostnað. Þann kostnað er hægt að líta á sem fjárfestingu sem þarf að skila sér til baka með hagkvæmari kúabúskap.

Til að átta okkur á hvernig mismunur í erfðafrámför skilar sér í hagkvæmni í kúabúskap er helst hægt að vinna með upplýsingar úr mati á hagrænni heildareinkunn (Jón Hjalti Eiríksson & Julie Clasen, 2025; Jón Hjalti Eiríksson & Kári Gautason, 2019). Samkvæmt þeim útreikningum er virði eins stigs þeirrar heildareinkunnar 6.700 kr. á stig á kú á ári, eða um 28.600 kr. á staðalfrávik. Ef við gerum ráð fyrir að samsetti eiginleikinn sem unnið er með í hermílkönunum samsvari þeirri heildareinkunn sem unnið er með í kynbótastarfinu, en stefnt var að því við uppsetningu líkansins, getum við sett verðmiða á þann mun í erfðafrámför sem kemur fram á milli sviðsmynda. Miðað við 25.400 kýr á landinu (fjöldi árskúa 2025 samkvæmt niðurstöðum skýrsluhalds) myndi aukin erfðafrámför um eitt σ_a þýða árlega hagræðingu upp á 728 milljónir. Miðað við ΔG úr viðmiðunarsviðsmyndinni (0,38 σ_a) væri 274 milljóna árlegt hagræði af erfðafrámförinni þar. Munurinn á sviðsmyndinni sem gefur mesta og minnsta erfðafrámför gerir um 104 milljóna mun á ágóða kynbótastarfsins.

Með samanburði á sviðsmyndum er hægt að fá nokkra hugmynd um hverju fjárfestingu í kynbótastarfi, svo sem eins og FEF eða arfgerðargreiningum í stórum stíl skilar. Þetta er

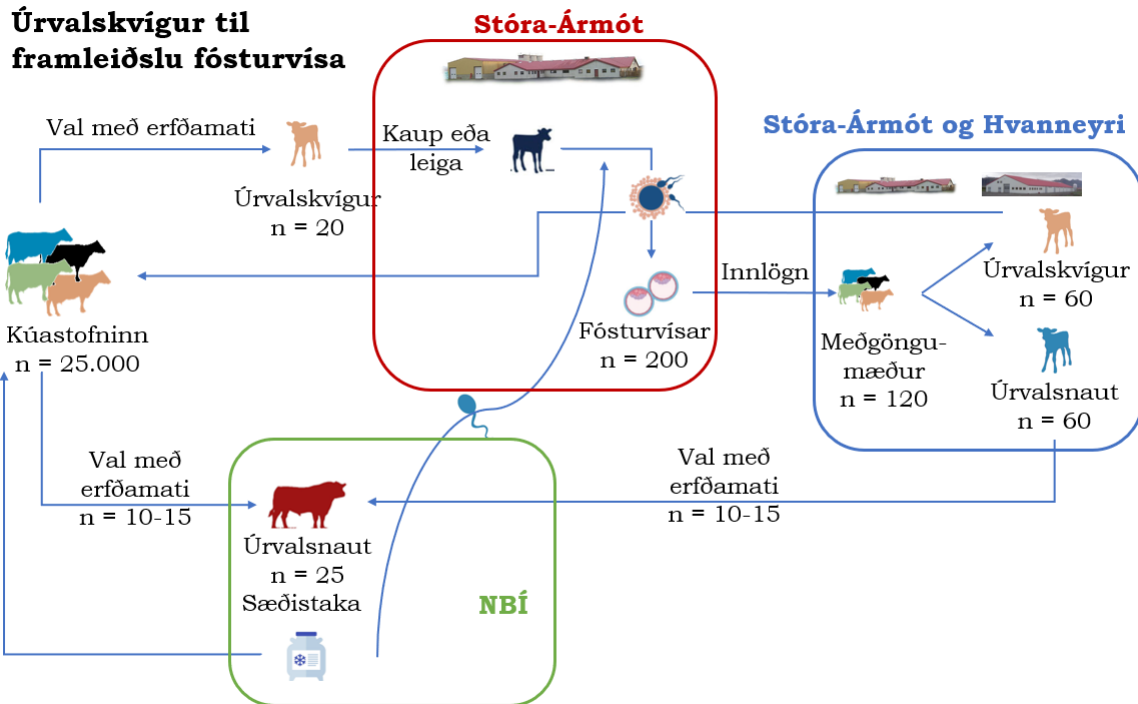
reyndar ekki mjög nákvæmur samanburður, bæði var mat á gildi σ_a ekki mikil nákvæmnisvísindi og einhver ónákvæmni er í metinni erfðaframtöl sem hefur mikil áhrif á niðurstöðuna. Þessi samanburður er þannig fyrst og fremst til að átta sig á stærðargráðum í samanburði ágóða og kostnaðar við kynbótakerfin. Ágóði af notkun kyngreinds sæðis kemur á annan hátt inn í rekstur búanna en einvörðungu með áhrifum á erfðaframtöl þannig að hagkvæmni kyngreiningarinnar verður ekki skoðuð hér.

Tafla 4 sýnir hversu mikill ávinningur vegna aukinna erfðaframtöla ætti að skapast af skipulagðri notkun FEFF með mismunandi umfangi, umreiknaður yfir í ágóða fyrir mjólkurframleiðsluna í heild. Þegar hvorki kyngreint sæði né heimanaut eru notuð gefur kynbótaskipulag með 12 skoluðum kvígum um 12 milljónir árlega, sem er þá hámarksupphæð sem mætti verja í FEFF á ári til að sú aðferð geti talist ábatasöm fjárfesting fyrir íslenska nautgriparækt. Það jafngildir tæpri milljón á hverja kvígu sem er skoluð. Aukið umfang FEFF skilar meiri ávinningi en það sem fæst út á hverja kvígu minnkar. Fjölgunin frá 25 kvígum til 50 skilar u.þ.b. 350 þúsundum á hverja kvígu sem bætt er við á því bili. Sé horft til sviðsmynda með kyngreint sæði en ekki heimanaut er mjög mikill ávinningur metinn af notkun FEFF. Þar þarf að hafa í huga að samanburðurinn er við Kyn-kynbótakerfið sem kom sérstaklega illa út. Hluta þess ágóða sem hér er tengdur FEFF má ná með annarri notkun á kyngreindu sæði, KynY eða öðru áþekku. Ávinningurinn við að fjölga kvígum umfram 12 er töluvert minni fyrir hverja kvígu, en þó meiri en þegar kyngreint sæði er ekki notað. Þegar heimanaut eru notuð er ávinningur af FEFF af sömu stærðargráðu og þegar heimanaut eru ekki notuð og mestur ávinningur af fyrstu 12 kvígum.

Tafla 4 - Ávinningur af árlegri aukinni erfðaframsför með skipulagðri notkun fjöldaeggloss og fósturvís aflutninga (FEFF), í samanburði við kynbótaskipulag án FEFF eða skipulag með færri kvígum. Niðurstöðurnar eru fyrir sviðsmyndir með 20 sæðinganautum.

Kynbótaskipulag	Ávinningur af FEFF (þús. kr.)	Ávinningur af hverri skolaðri kvígu (þús. kr.)	Ávinningur af hverri skolaðri viðbótarkvígu (þús. kr.)	Ávinningur á hvern kálf (þús. kr.)
FEFF12	11.663	972	972	163
FEFF25	17.468	699	446	116
FEFF50	26.309	526	354	88
KynFEFF12	54.654	4.555	4.555	759
KynFEFF25	64.474	2.579	755	430
KynFEFF50	76.953	1.539	499	257
HnFEFF12	12.779	1.065	1.065	177
HnFEFF25	18.956	758	475	126
HnFEFF50	31.172	623	489	104
HnKynFEFF12	24.567	2.047	2.047	341
HnKynFEFF25	34.889	1.396	794	233
HnKynFEFF50	48.428	969	542	161

Töluverður kostnaður fylgir skolun og innlögn fósturvísa umfram hefðbundnar sæðingar. Til að reyna að áætla hve mikill sá kostnaður væri er hér reiknað með að farin yrði sú leið að velja og kaupa 20 úrvalskvígur á grunni EKM. Þær yrðu keyptar ungar og fluttar að Stóra-Ármóti þar sem þær yrðu aldar til kynþroska. Þá væru skolaðir úr þeim fósturvísar. Reiknað er með að skola þyrfti hverja kvígu tvisvar sinnum sem gæfi til jafnaðar 12 fósturvísa úr hverri kvígu eða samtals 240 fósturvísa á ári. Þessir fósturvísar yrðu frystir sem gæfi þann möguleika að setja þá upp án þess að samstillja þyrfti fósturmæðurnar, þ.e. innlögn fósturvísanna færi fram á náttúrulegu beiðsli og kæmi í reynd í stað sæðingar. Reiknað er með að hjarðirnar á Stóra-Ármóti og Hvanneyri yrðu notaðar sem fósturmæður, um 120 kýr og fanghlutfall yrði 40%. Mynd 10 sýnir sjónrænt hvernig þetta skipulag myndi ganga fyrir sig.



Mynd 10 - Tillaga að skipulagi íslensks kynbótakerfis með fjöldaegglosum og fósturvís aflutningum.

Mikilvægt er að gera sér nokkra grein fyrir hvað slíkt skipulag gæti kostað. Hér er því gerð tilraun til þess að reikna hvað hver fæddur kálfur myndi kosta en auðvitað eru allar tölur háðar mörgum óvissuþáttum og verða því að skoðast með fyrirvara. Í töflu 5 er reiknað með að teknir yrðu samtals 240 fósturvísar á ári og við skolun væru 5 kvígur skolaðar á sama tíma. Kostnaður á hvern fósturvísi er hér áætlaður upp á 51.883 kr og kostnaður á hvern fæddan kálf 129.708 kr.

Tafla 5 – Áætlaður kostnaður á ári vegna skipulegrar notkunar á FEFF í íslensku kynbótastarfi.

Kostnaðarliður	Fjöldi/ein.	Einingaverð kr.	Upphæð alls kr.
Keyptar kvígur	20	200.000	4.000.000
Uppeldi	20	150.000	3.000.000
Fósturvísaskolun			
- Laun sérfræðings	64	11.500	736.000
- Laun aðstoðarmanns	64	6.000	384.000
- Lyf	20	46.000	920.000
- Köfnunarefni	20	7.600	152.000
Uppsetning/innlögn			
- Laun	240	11.500	2.760.000
- Ferðakostnaður			500.000
Samtals			12.452.000
Kostnaður á hvern fósturvísi			51.883
Kostnaður á hvern fæddan kálf			129.708

Samanburður á kostnaðinum á fæddan kálf í töflu 5 og ávinningnum af hverjum kálfi í töflu 4 bendir til þessa að það myndi borga sig í einhverjum tilfellum að setja upp slíkt kerfi. Ef ekki er notað kyngreint sæði vantar aðeins upp á að FEFF borgi sig miðað við 25 kvígur en ef miðað er við 12 kvígur borgar það sig. Með kyngreindu sæði er ávinningurinn metinn meiri og þá borgar FEFF sig miðað við þær forsendur sem voru gefnar hér, óháð fjölda skolaðra kvígna miðað við að kostnaðurinn á kálf sé sá sami.

Með tilliti til þeirra forsenda sem voru gefnar hér er því líklegt að það að taka 10 til 20 bestu kvígurnar samkvæmt EKM á hverju ári í fósturvísaskolun, og þannig fá 60 til 120 kálfa úr FEFF, borgi sig fyrir nautgriparæktina í heild. Ef notkun á kyngreindu sæði verður mikil myndi ávinningurinn verða meiri og skola mætti fleiri kvígur en þá er spurning um hve mikil aðstaða er til staðar. Hvort ávinningur verður í raun fer þó eftir raunkostnaði og árangri í skolun og uppsetningu sem kemur í ljós ef aðferðin verður reynd.

6.2 Arfgerðargreiningar nautkálfa

Arfgerðargreiningar er annar þáttur sem kostar fjármuni í kynbótastarfinu og á að skila sér sem erfðafrámför. Arfgerðargreiningar á kvígum eru fyrst og fremst til að byggja upp

viðmiðunarhóp til að stuðla að öruggu EKM. Hermilíkanið gerði ráð fyrir að öryggið væri það sama óháð fjölda arfgerðargreininga og þess vegna gátum við ekki metið áhrifin af fjölda arfgerðargreindra kvígukálfa. Rannsókn á því myndi krefjast sannprófunarrannsóknar á öryggi kynbótamatsins sem verður ágætlega fært að gera þegar við höfum nokkra árganga af kúm sem eru nánast allar arfgerðargreindar. Aftur á móti koma arfgerðargreiningar á nautkálfum fram í úrvalsstyrk við val á sæðinganutum og þar af leiðandi í erfðaframtölum.

Tafla 6 sýnir hvernig breytingar í fjölda arfgerðargreininga í grunnkynbótakerfinu með 20 sæðinganutum hefur áhrif á ágóða af erfðaframtölum. Ágóða á hvern arfgerðargreindan kálf er hægt að bera saman við kostnaðinn við sýnatöku og arfgerðargreiningu. Breytingin frá 100 til 300 arfgerðargreindra nautkálfa gefur 84 þúsund í ávinning á hvern kálf og fjölgun úr 300 í 500 gefur 23 þúsund á kálf. Þetta er í báðum tilvikum mun meiri ágóði en sem nemur kostnaði við sýnatöku og greiningu sem er nálægt 7.000 kr. á kálf. Það að fara yfir 500 nautkálfa í þessari sviðsmynd gefur innan við 10 þúsund í ágóða á hvern kálf sem er lítið meira en kostnaðurinn, og ólíklegt til að borga sig í raun ef tekið er tillit til óþæginda fyrir bændur af því að láta greina kálfana og bíða eftir niðurstöðunni.

Tafla 6 - Breytingar á ágóða af erfðaframtölum með breytingu á fjölda arfgerðargreindra nautkálfa í grunnkynbótakerfinu með 20 sæðinganutum.

Fjöldun arfgerðargreininga	Ágóði þús. kr.	Ágóði á nautkálf þús. kr.
100 → 300	16.850	84
300 → 500	4.526	23
500 → 700	1.829	9
700 → 900	1.577	8

Tafla 7 sýnir hvaða áhrif breyting á fjölda arfgerðargreindra nautkálfa hefur á erfðaframtölum umreiknaða sem ágóða fyrir mjólkurframleiðsluna í heild. Af þeim sviðsmyndum sem þar eru sýndar var bara ein, KynFEFF25 með 20 sæðinganutum, þar sem prófað var að fara niður í 100 arfgerðargreindra kálfa. Fjölgunin úr þeim fjölda upp í 300 var sú breyting sem gaf mestan ávinning, 35 þúsund á hvern kálf. Miðað við niðurstöðurnar fyrir HnÆtt, sem er trúlega það skipulag sem er næst því sem hefur verið notað frá upptöku erfðamengjaúrvalsins, ætti að arfgerðargreina 500 frekar en 300 kálfa ef kostnaður við arfgerðargreiningu er undir 19 þúsund krónum en mætti fara upp í 700 ef kostnaðurinn er undir 16 þúsund. Ef tekin er

upp notkun á kyngreindu sæði og FEFF er lítið sem ekkert að græða á fjölgun arfgerðargreininga umfram 300, nema helst ef aðeins eru 12 kvígur skolaðar.

Tafla 7 - Ágóði af fjölgun arfgerðargreindra nautkálfa í nokkrum sviðsmyndum, ýmist heildaráhrif af fjölgun um 200 kálfa eða á hvern kálf á því bili.

Kynbótakerfi	Fjöldi sæðingana	Fjöldun arfgerðargreindra	Ágóði þús. kr.	Ágóði á greindan nautkálf þús. kr.
Grunnur	10	300 → 500	4.878	24
		500 → 700	-112	-1
Grunnur	30	300 → 500	5.219	26
		500 → 700	3.717	19
HnÆtt	20	300 → 500	3.780	19
		500 → 700	3.196	16
FEFF25	20	300 → 500	1.959	10
		500 → 700	3.189	16
KynFEFF12	20	300 → 500	2.528	13
		500 → 700	-2.624	-13
KynFEFF25	20	100 → 300	7.045	35
		300 → 500	702	4
		500 → 700	6	0
KynFEFF50	20	300 → 500	1.194	6
		500 → 700	1.102	6
KynY	20	300 → 500	5.796	29
		500 → 700	-510	-3

Til viðbótar hermilíkaninu með mismunandi fjölda arfgerðargreindra nautkálfa, var í mars 2024 gerð tilraun til að nota raungögn til að finna út hversu marga nautkálfa þarf að arfgerðargreina til að finna þá bestu samkvæmt EKM sem væru þá valdir sem sæðinganaut. Þar sem langflestir kvígukálfar eru arfgerðargreindir var hægt að skoða endurröðun kvígukálfa í kynbótamati fyrir og eftir arfgerðargreiningar til að álykta um hversu mikið röðun kálfa samkvæmt kynbótamati breytist við arfgerðargreiningu. Tilraunahópurinn voru arfgreindir íslenskir kvígukálfar undan sæðinganautum fæddar árið 2023 (n = 5662).

Niðurstöðurnar voru að til þess að finna efstu 10, 20 og 30 gripina samkvæmt EKM-heildareinkunn þurfti að arfgreina 374, 1272 og 1646 gripi, byggt á mati foreldra. Miðað við þessar tölur þyrfti að arfgerðargreina yfir 1000 nautkálfa til að vera nokkuð viss um að finna 20 bestu nautkálfa. Aftur á móti þýðir það ekki að það sé nauðsynlegt, það að missa af einhverjum kálfum hefur ekki úrslitaáhrif á útkomu kynbótastarfsins. Annað atriði varðandi túlkun niðurstaðnanna er að einungis 9,8% kálfanna áttu arfgerðargreindar mæður. Fylgni á milli heildarkynbótaeinkunnar fyrir og eftir arfgerðargreiningar hjá kálfum sem áttu arfgerðargreinda móður var 0,72 en fylgnin var 0,63 hjá kálfum undan óarfgerðargreindum mæðrum. Með stækkandi hlutfalli kúa með arfgerðargreiningu má þannig búast við að röðun nauta breytist minna við arfgerðargreiningu á útreikning á EKM þannig að minni líkur verði á að arfgerðargreina þurfi mjög marga kálfa til að finna þá bestu sem sæðinganaut.

7 Ályktanir

Byggt á niðurstöðum þeirra rannsókna og útreikninga sem hér voru kynntir, væri skynsamlegt fyrir íslenska nautgriparækt að:

- Velja u.þ.b. 20 sæðinganaut til notkunar á ári úr hópi arfgerðargreindra nautkálfa.
- Vinna að upptöku kjörframlagaúrvals við nautaval og mögulega fleiri úrvalsstig innan stofnsins.
- Stefna að arfgerðargreiningu u.þ.b. 500 nautkálfa á ári til að velja sæðinganaut. Þeim má fækka ef stór hluti sæðinganauta fer að koma úr skipulagðri notkun fjöldaeggloss og fósturvísaf lutninga í hópi bestu kvígna í stofninum á hverjum tíma.
- Draga úr notkun heimanauta.
- Taka upp til prófunar skipulagða notkun fjöldaeggloss og fósturvísaf lutninga þar sem 10-20 bestu kvígur landsins verði skolaðar ár hvert. Þetta er sérstaklega mikilvægt ef notkun á X-sæði verður víðtæk. Að öðrum kosti þarf að stjórna notkun kyngreinds sæðis þannig að einhver hópur nauta komi undan bestu kúnum, svo sem með notkun Y-sæðis eða hefðbundins sæðis fyrir nautsmæður.

8 Heimildir

- Aguilar, I., Misztal, I., Johnson, D. L., Legarra, A., Tsuruta, S., & Lawlor, T. J. (2010). Hot topic: A unified approach to utilize phenotypic, full pedigree, and genomic information for genetic evaluation of Holstein final score. *Journal of Dairy Science*, *93*(2), 743–752. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2730>
- Bérodier, M., Brochard, M., Boichard, D., Dezetter, C., Bareille, N., & Ducrocq, V. (2019). Use of sexed semen and female genotyping affects genetic and economic outcomes of Montbéliarde dairy herds depending on the farming system considered. *Journal of Dairy Science*, *102*(11), 10073–10087. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16041>
- Buch, L. H., Sørensen, M. K., Berg, P., Pedersen, L. D., & Sørensen, A. C. (2012). Genomic selection strategies in dairy cattle: Strong positive interaction between use of genotypic information and intensive use of young bulls on genetic gain. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, *129*(2), 138–151. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2011.00947.x>
- Christensen, O. F., & Lund, M. S. (2010). Genomic prediction when some animals are not genotyped. *Genetics Selection Evolution*, *42*, 2. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-42-2>
- Dekkers, J. C. M. (2007). Prediction of response to marker-assisted and genomic selection using selection index theory. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, *124*(6), 331–341. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2007.00701.x>
- Egill Gautason. (2016). *Kjörrerföðuframlög íslenskra sæðinganauta* [Óútgefin BS ritgerð]. <https://skemman.is/bitstream/1946/25073/1/BS%20Egill%20Gautason.pdf>
- Ettema, J. F., Thomasen, J. R., Hjortø, L., Kargo, M., Østergaard, S., & Sørensen, A. C. (2017). Economic opportunities for using sexed semen and semen of beef bulls in dairy herds. *Journal of Dairy Science*, *100*(5), 4161–4171. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11333>
- Garner, D. L., & Seidel, G. E. (2008). History of commercializing sexed semen for cattle. *Theriogenology*, *69*(7), 886–895. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.01.006>
- Gautason, E., Sahana, G., Guldbrandtsen, B., & Berg, P. (2023). Impact of kinship matrices on genetic gain and inbreeding with optimum contribution selection in a genomic

- dairy cattle breeding program. *Genetics Selection Evolution*, 55, 48.
<https://doi.org/10.1186/s12711-023-00826-x>
- Gautason, E., Schönherz, A. A., Sahana, G., & Gulbrandtsen, B. (2020). Relationship of Icelandic cattle with Northern and Western European cattle breeds, admixture and population structure. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*, 69(1–2), 25–38. <https://doi.org/10.1080/09064702.2019.1699951>
- Gautason, E., Schönherz, A. A., Sahana, G., & Gulbrandtsen, B. (2021). Genomic inbreeding and selection signatures in the local dairy breed Icelandic Cattle. *Animal Genetics*, 52(3), 251–262. <https://doi.org/10.1111/age.13058>
- Guðmundur Jóhannesson. (2025, 25. september). Kyngreint sæði komið í notkun. *Bændablaðið*, 31(16), 48–49.
- Henryon, M., Ostersen, T., Ask, B., Sørensen, A. C., & Berg, P. (2015). Most of the long-term genetic gain from optimum-contribution selection can be realised with restrictions imposed during optimisation. *Genetics Selection Evolution*, 47, 21.
<https://doi.org/10.1186/s12711-015-0107-7>
- Jón Hjalti Eiríksson & Julie Clasen. (2025). *Endurskoðun heildareinkunnar kynbótamats fyrir íslenskar mjólkurkýr* (Rit LbhÍ nr. 183, 34 bls.). Landbúnaðarháskóli Íslands.
https://branda.lbhi.is/utgefid_efni/Rit_Lbh%C3%AD_183.pdf
- Jón Hjalti Eiríksson & Kári Gautason. (2019). *Hagrænt vægi eiginleika í nautgriparækt* (109 bls.). Ráðgjafarmiðstöð landbúnaðarins.
- Jón Hjalti Eiríksson, Þóroddur Sveinsson, Julie Clasen, Jóhannes Sveinbjörnsson, & Daði Már Kristófersson. (2024). *Samanburður á rekstrarhagkvæmni mjólkurframleiðslu á Íslandi með íslenskum og erlendum mjólkurkúakynjum* (Rit LbhÍ nr 174, 57 bls.).
https://branda.lbhi.is/utgefid_efni/Rit_LbhI_174.pdf
- Legarra, A., Christensen, O. F., Aguilar, I., & Misztal, I. (2014). Single Step, a general approach for genomic selection. *Livestock Science, Genomics Applied to Livestock Production*, 166, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.04.029>
- Madsen, P., & Jensen, J. (2018). *DMU, A package of Analysing Multivariate Mixed Models*.
- Meuwissen, T. H. E. (1997). Maximizing the response of selection with a predefined rate of inbreeding. *Journal of Animal Science*, 75, 934–940.

- Meuwissen, T. H., Hayes, B. J., & Goddard, M. E. (2001). Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *Genetics*, *157*(4), 1819–1829.
- Pedersen, L. D., Sørensen, A. C., Henryon, M., Ansari-Mahyari, S., & Berg, P. (2009). ADAM: A computer program to simulate selective breeding schemes for animals. *Livestock Science*, *121*(2), 343–344. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.06.028>
- Schaeffer, L. R. (2006). Strategy for applying genome-wide selection in dairy cattle. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, *123*(4), 218–223. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2006.00595.x>
- Sigurdsson, A., & Jonmundsson, J. V. (2011). Genetic potential of Icelandic dairy cattle. *Icelandic Agricultural Sciences*, *24*, 55–64.
- Thomasen, J. R., Egger-Danner, C., Willam, A., Guldbbrandtsen, B., Lund, M. S., & Sørensen, A. C. (2014). Genomic selection strategies in a small dairy cattle population evaluated for genetic gain and profit. *Journal of Dairy Science*, *97*(1), 458–470. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6599>
- Thomasen, J. R., Liu, H., & Sørensen, A. C. (2020). Genotyping more cows increases genetic gain and reduces rate of true inbreeding in a dairy cattle breeding scheme using female reproductive technologies. *Journal of Dairy Science*, *103*(1), 597–606. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16974>
- Thomasen, J. R., Willam, A., Egger-Danner, C., & Sørensen, A. C. (2016). Reproductive technologies combine well with genomic selection in dairy breeding programs. *Journal of Dairy Science*, *99*(2), 1331–1340. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9437>
- VanRaden, P. M. (2008). Efficient Methods to Compute Genomic Predictions. *Journal of Dairy Science*, *91*(11), 4414–4423. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0980>
- Wellmann, R., Rolfes, A., Rensing, S., & Bennewitz, J. (2023). The economic benefit of herd genotyping and using sexed semen for pure and beef-on-dairy breeding in dairy herds. *Journal of Dairy Science*, *107*(5), 2983–2998. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23297>
- Wiggans, G. R., & Carrillo, J. A. (2022). Genomic selection in United States dairy cattle. *Frontiers in Genetics*, *13*, 994466.
- Pórarinsdóttir, Þ., Eiríksson, J. H., Gautason, E., Thomasen, J. R., & Liu, H. (2025). Evaluating genomic breeding programs for a small dairy cattle population with

widespread use of private bulls. *Journal of Dairy Science*, 108(11), 12450–12462.
<https://doi.org/10.3168/jds.2025-26592>

Viðauki I

Tafla 8 - Árlegar erfðaframlög (ΔG) í staðalfráviki samleggjandi erfða (σ_a) og aukning á skyldleikarækt á kynslóð (ΔF) fyrir 80 sviðsmyndir.

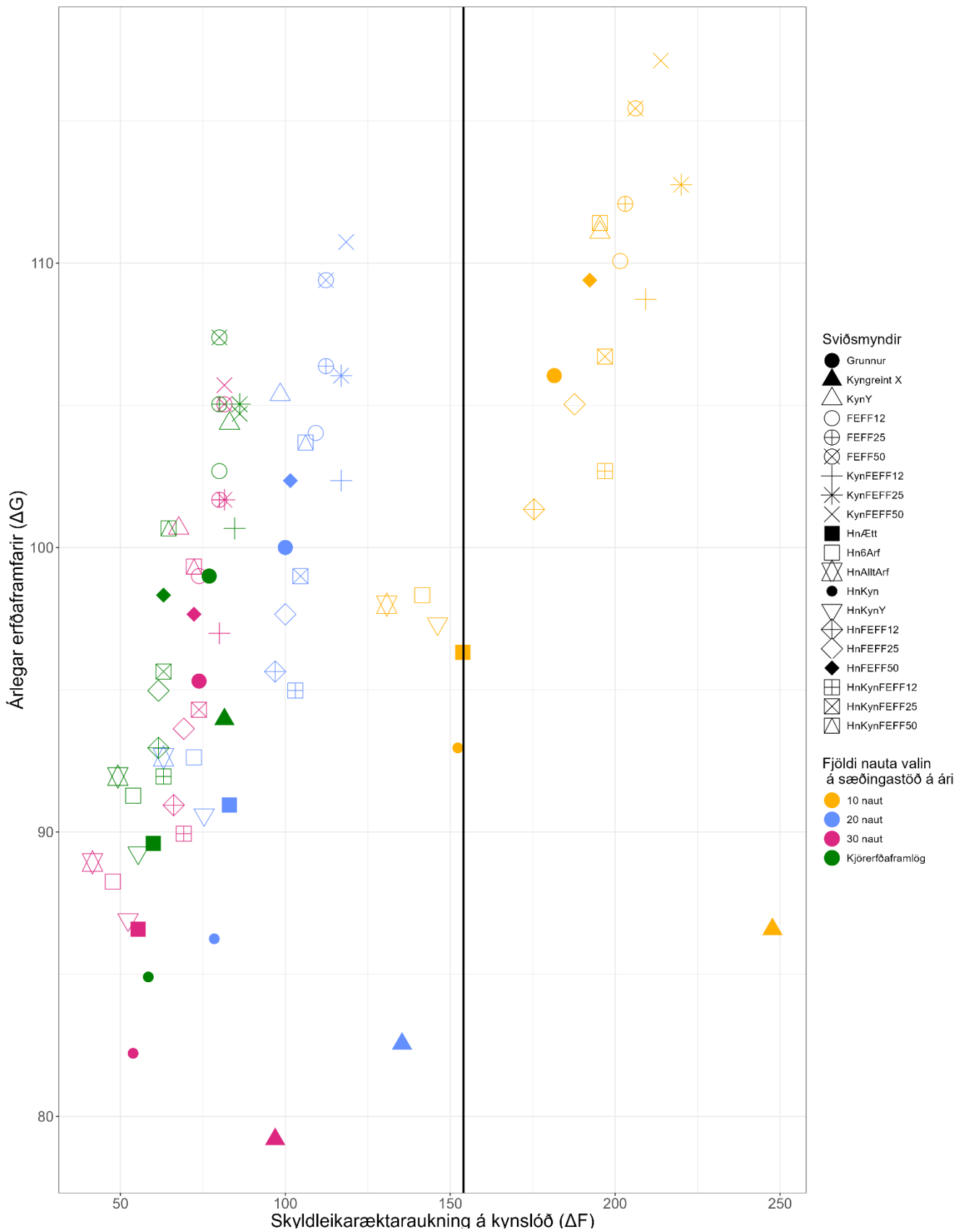
Kynbótakerfi	10 Sæðinganaut		20 Sæðinganaut		30 Sæðinganaut		Kjörefrðaframlög	
	ΔG	ΔF (%)	ΔG	ΔF (%)	ΔG	ΔF (%)	ΔG	ΔF (%)
Grunnur	0,40	1,18	0,38	0,65	0,36	0,48	0,37	0,50
FEFF12	0,41	1,31	0,39	0,71	0,37	0,48	0,39	0,52
FEFF25	0,42	1,32	0,40	0,73	0,38	0,52	0,40	0,52
FEFF50	0,43	1,34	0,41	0,73	0,40	0,53	0,40	0,52
Kyn	0,33	1,61	0,31	0,88	0,30	0,63	0,35	0,53
KynY	0,42	1,27	0,40	0,64	0,38	0,44	0,39	0,54
KynFEFF12	0,41	1,36	0,39	0,76	0,37	0,52	0,38	0,55
KynFEFF25	0,42	1,43	0,40	0,76	0,38	0,53	0,40	0,56
KynFEFF50	0,44	1,39	0,42	0,77	0,40	0,53	0,39	0,56
HnÆtt	0,36	1,00	0,34	0,54	0,33	0,36	0,34	0,39
HnFEFF12	0,38	1,14	0,36	0,63	0,34	0,43	0,35	0,40
HnFEFF25	0,40	1,22	0,37	0,65	0,35	0,45	0,36	0,40
HnFEFF50	0,41	1,25	0,39	0,66	0,37	0,47	0,37	0,41
HnKyn	0,35	0,99	0,32	0,51	0,31	0,35	0,32	0,38
HnKynY	0,37	0,95	0,34	0,49	0,33	0,34	0,34	0,36
HnKynFEFF12	0,39	1,28	0,36	0,67	0,34	0,45	0,35	0,41
HnKynFEFF25	0,40	1,28	0,37	0,68	0,36	0,48	0,36	0,41
HnKynFEFF50	0,42	1,27	0,39	0,69	0,37	0,47	0,38	0,42
Hn6Arf	0,37	0,92	0,35	0,47	0,33	0,31	0,34	0,35
HnAlltArf	0,37	0,85	0,35	0,41	0,33	0,27	0,35	0,32

Tafla 9 – Aukning á árlegum erfðaframtörum (ΔG) í sviðsmyndum þar sem bornar eru saman sviðsmyndir með breytilegum fjölda arfgerðargreindra nautkálfa.

Kynbótakerfi	Fjöldi sæðingana	Fjöldi arfgerðargreindra nautkálfa				
		100	300	500	700	900
Grunnur	10		0,39	0,40	0,40	
Grunnur	20	0,35	0,37	0,38	0,38	0,38
Grunnur	30		0,35	0,36	0,36	
KynY	20		0,39	0,40	0,40	
FEFF25	20		0,40	0,40	0,40	
KynFEFF12	20		0,38	0,39	0,38	
KynFEFF25	20	0,39	0,40	0,40	0,40	
KynFEFF50	20		0,41	0,42	0,42	
HnÆtt	20		0,34	0,34	0,35	

Tafla 10 – Aukning á skyldleikarækt á kynslóð í % (ΔF) í sviðsmyndum þar sem bornar eru saman sviðsmyndir með breytilegum fjölda arfgerðargreindra nautkálfa.

Kynbótakerfi	Fjöldi sæðingana	Fjöldi arfgerðargreindra nautkálfa				
		100	300	500	700	900
Grunnur	10		1,28	1,18	1,17	
Grunnur	20	0,93	0,71	0,65	0,62	0,62
Grunnur	30		0,52	0,47	0,45	
KynY	20		0,63	0,64	0,62	
FEFF25	20		0,79	0,73	0,73	
KynFEFF12	20		0,77	0,76	0,72	
KynFEFF25	20	0,84	0,76	0,76	0,76	
KynFEFF50	20		0,74	0,77	0,77	
HnÆtt	20		0,60	0,54	0,51	



Mynd 11 - Hlutfallsleg aukning á árlegum erfðaframförum (ΔG) og aukning á skyldleikarækt (ΔF) í 80 sviðsmyndum. Hér er ΔG stöðluð þannig að 100 samsvarar árlegri erfðaframför upp á 0,38 staðalfrávik samleggjandi erfða (σ_a) og ΔF staðlað þannig að 100 samsvarar 0,65% aukningu í skyldleikarækt á kynslóð. Svarta línan táknar 1,0% aukningu á skyldleikarækt á kynslóð. Grunnur 20 naut er viðmiðunarsviðsmynd.