



Kafli 3: Kynbætur og erfðatækni

Valdimar Ingi Gunnarsson, Fiskeldishópur AVS, Theódór Kristjánsson, Stofnfiskur hf. og Jónas Jónasson, Stofnfiskur hf.

Efnisyfirlit

3.1 Inngangur	25
3.1.1 Afmörkun verkefnis og markmið	25
3.1.2 Rannsókn- og þróunarstarf	25
3.2 Þorsstofnar	26
3.2.1 Þorsstofnar í Norður-Atlantshafi	26
3.2.2 Þorskur við Íslandi	26
3.2.3 Stofnasamanburður í eldistilraunum	27
3.3 Kynbætur	28
3.3.1 Grunnstofn	28
3.3.2 Arfgengi	28
3.3.3 Framkvæmd kynbóta	29
3.4 Kynbótaverkefni einstakra landa	30
3.4.1 Ísland	30
3.4.2 Noregur	32
3.4.3 Önnur lönd	33
3.5 Kynbótaframfarir og samkeppnishæfni	34
3.5.1 Erfðatækni og kynbætur	34
3.5.2 Kynbótaframfarir og arfgengi	35
3.5.3 Erfðabreyttir fiskar	36
3.6 SVÓT-greining	37
3.7 Heimildir	38

3.1 Inngangur

3.1.1 Afmörkun verkefnis og markmið

Almennt er talið að kynbætur geti skipt sköpum fyrir framtíð þorskeldis á Íslandi og að þær séu forsenda þess að þorskeldi á Íslandi verði samkeppnisfært við eldi í öðrum löndum. Markmið með þessari samantekt er að:

- Gefa yfirlit yfir stöðu þekkingar í kynbótum og erfðatækni.
- Gera grein fyrir rannsókn- og þróunarstarfi sem hefur verið stundað.
- Greina frá mögulegum kynbótaframförum fyrir þorskeldi.
- Meta styrkleika, veikleika, ógnanir og tækifæri í kynbótum á þorski á Íslandi.

Í þessari samantekt er gefið yfirlit yfir erfðarannsóknir á þorsstofnum og eldistilraunum þar sem ýmsir eiginleikar stofna eru bornir saman við staðlaðar aðstæður. Tekið er fyrir hvernig staðið er að vali á grunnstofni, gerð grein fyrir arfgengi þorsks m.t.t. mismunandi eiginleika og lýst framkvæmd kynbóta. Greint er frá framkvæmd og stöðu kynbótaverkefna í einstökum löndum. Jafnframt er fjallað um kynbótaframfarir og samkeppnishæfni og að lokum styrkleika, veikleika, ógnanir og tækifæri í kynbótum þorsks á Íslandi í samanburði við Noreg. Í kafla 2 er gerð grein fyrir umönnun á foreldrafiski, kreistingu og seiðaeldi. Um hugsanlegan skaða sem kynbættir eða erfðabreyttir fiskar geta valdið í náttúrunni er fjallað um í kafla 4.

3.1.2 Rannsókn- og þróunarstarf

Allt frá því að rannsókn- og þróunarstarf (R&D) í kynbótum á þorski hófst á Íslandi árið 2003 hafa sjö verkefni verið styrkt af AVS rannsóknasjóði í sjávarútvegi, Rannsóknamiðstöð Íslands og Tækniþróunar-sjóði (tafla 3.1). Flest verkefni hafa verið styrkt af AVS rannsóknasjóði í sjávarútvegi eða fimm talsins. Verkefni hafa m.a. falið í sér að byggja upp grunnstofn, þróa hermilíkan, hefja kynbætur, byggja upp erfðagreiningarsett fyrir þorsk, ásamt leit að erfðavísu.

Kynbætur eru langtímaverkefni og er því mikilvægt að þær búi við traustan fjárhagsgrundvöll. Þann 18. apríl 2006 tilkynnti Ríkisstjórn Íslands sérstakar aðgerðir til stuðnings fiskeldi sem meðal annars fælu í sér að árlega yrði veitt „25 milljónum króna til verkefnisins. Gerður yrði sérstakur samningur við fram-



Tafla 3.1. Yfirlit yfir íslensk rannsókn- og þróunarverkefni í kynbótum og erfðatækni á þorski (viðauki 1).

Tíma-bil	Heiti á verkefni	Styrktaraðilar
2003-2007	Kynbætur í þorskeldi og framleiðsla þorskseiða	AVS rannsóknasjóður í sjávarútvegi
2003-2004	Hermiþorskur - grunnstofn þorskkyrnótta	Rannsóknamiðstöð Íslands
2004-2007	Kynbætur og seiðældi fyrir þorskeldi	AVS rannsóknasjóður í sjávarútvegi
2004-2005	Stofngerð þorsks – áhrif erfða og umhverfis	AVS rannsóknasjóður í sjávarútvegi
2005-2006	Erfðagreiningasett fyrir þorsk	AVS rannsóknasjóður í sjávarútvegi
2006-2009	Kynbætur á þorski og seiðældi	AVS rannsóknasjóður í sjávarútvegi
2006-2009	Erfðir ljóslotu og kynþroska í þorski	Tækniþróunarsjóður

kvæmdaaðila kynbótaverkefnisins, þar sem m.a. yrðu sett skilyrði um vísindalegt framlag. Jafnframt yrði sett það skilyrði gagnvart fjárveitingu þessari að árlega skuli skilað fullnægjandi framvinduskýrslu til AVS sjóðsins“ (Fréttatilkynning frá Landbúnaðar-, sjávarútvegs- og iðnaðarráðuneyti, 18. apríl 2006).

3.2 Þorskstofnar

3.2.1 Þorskstofnar í Norður-Atlantshafi

Útbreiðslusvæði þorsks í vestanverðu Atlantshafi nær sunnan frá Hattershöfða við austurströnd Bandaríkjanna norður með strönd Labrador að eyinni Disko við Vestur-Grænland, þá um Ísland og

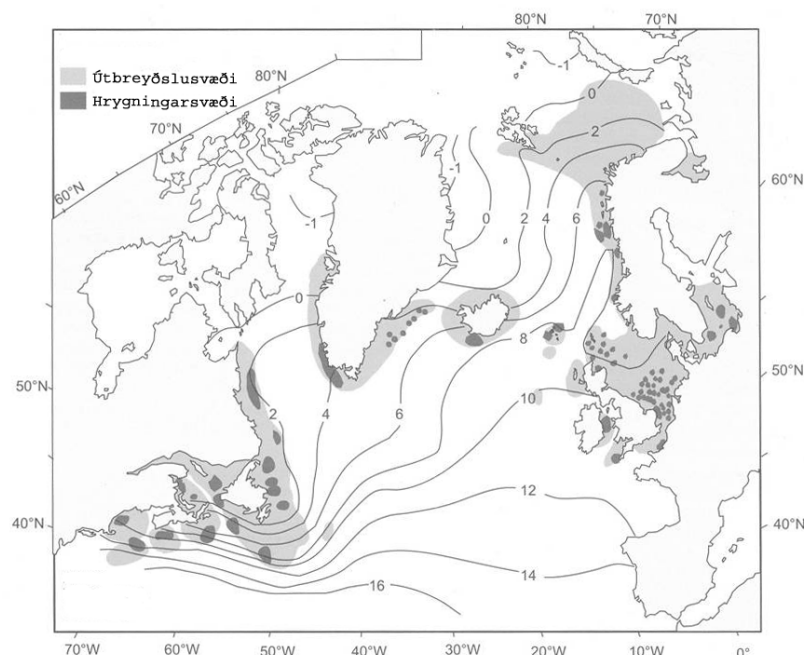
Svalbarða austur að strönd Novaya Semlya í Barentshafi (mynd 3.1). Þaðan nær útbreiðslusvæðið með austurströnd Atlantshafsins suður með strönd Noregs, um Eystrasalt og Norðursjó að Biscayaflóa. Yfirlit yfir rannsóknir á einstökum þorskstofnum og líffræði þeirra er m.a. að finna í nýlegu riti frá ICES (Brander 2005).

Rannsóknir á stofngerð þorskfiska beggja megin Atlantshafsins hafa sýnt að margir stofnar eða undirstofnar finnast á tiltölulega afmörkuðum svæðum (Albert Kjartansson Imsland & Ólöf D.B. Jónsdóttir 2003; O'Leary o.fl. 2007). Í hverju hafsvæði eru því einn eða fleiri þorskstofnar.

Í Noregi hafa farið fram umfangsmiklar stofnerfðafræðilegar rannsóknir á þorski. Fram hefur komið að þorskur í Barentshafi og í norskum fjörðum (strandþorskur) eru tveir aðskildir stofnar. Jafnframt hafa rannsóknir á hrygnandi þorski í fjörðum sýnt að strandþorskurinn skiptist í nokkra erfðafræðilega aðskilda undirstofna. Norðmenn hafa safnað miklu af lífsýnum úr strandþorski og þegar búið er að vinna öll þau sýni munu þau gefa góða mynd af erfðasamsetningu þorskstofna í norskum fjörðum. Gögnin munu síðan nýtast til að meta erfðafræðilegar breytingar á þorski í norskum fjörðum í framtíðinni (Fjalestad o.fl. 2006). Í nýlega birtri grein var sýnt fram á erfðafræðilegan mun á strandþorski frá fjörum svæðum í Noregi (Dahle o.fl. 2006). Afkomendur úr þessum stofnum verða síðan aldir við sambærilegar eldisaðstæður til að kanna enn frekar mun á milli undirstofna strandþorsksins (Fjalestad o.fl. 2006).

3.2.2 Þorskur við Ísland

Þorskstofninn við Ísland er talinn sjálfstæður stofn en hins vegar er talið að þorskur við Ísland sé samsettur úr mörgum undirstofnum. Þorskur hrygnir allt í kringum landið en megin hrygningin fer fram við Suðvesturlandið (Guðrún Marteinsdóttir o.fl. 2000). Rannsóknir á erfðasamsetningu þorsks sýna fram á erfðafræðilegan mun á milli hrygnandi þorsks við Suðvesturland (Loftstaðahraun, Reykjanesgrunn og Eyrabakkagrunn) í samanburði við hrygnandi þorsk við Suðurland (Kantur, landgrunnskantinum v/ Dyrhólaey) og Austfjarðadjúp. Jafnframt fannst erfðafræðilegur munur á milli hrygningarhópa á Loftstaðahrauni og á Kanti sem er í 80 km fjarlægð (Ólöf D.B. Jónsdóttir o.fl. 1999, 2001, 2002; Albert K. Imsland o.fl. 2004). Í nýrri rannsókn kom fram að þorskur við Ísland skiptist í tvo megin undirstofna, þ.e.a.s. við Suðvesturland og Norðausturland (Pampoulie o.fl. 2006b). Í eldri rannsókn var ályktað vegna lítillar



Mynd 3.1. Útbreiðsla þorsks (skyggð svæði) og hrygningarsvæði (dökkt skyggt svæði) og árlegt meðalhitastig á 100 mera dýpi í Norður Atlantshafi (Sundby 2000).



stofnaðgreiningar og hins háa genaflæðis teljist þorskur umhverfis Íslands til eins stofns, þó svo að hann leiti á ákveðin svæði til hrygningar á nokkrum stöðum við landið (Einar Árnason o.fl. 1992a,b, 2000). Skiptar skoðanir eru á meðal vísindamanna um nákvæmni þeirra aðferða sem notaðar hafa verið til þess að aðgreina þorskstofna (sjá t.d. Guðrún Marteinsdóttir o.fl. 2007). Hér er ekki lagt mat á það hvort og þá í hve miklu mæli finnast undirstofnar þorsks við Ísland en bent á að erfðafræðilegur munur á milli þorskstofna er minni en hjá laxastofnum (Bekkevold o.fl. 2006). Áframhaldandi rannsóknir á erfðafræðilegum muni á stofneiningum eða hrygningarhópum hér á landi eru nú stundaðar á vegum verkefnisins METACOD (www.hafro.is/metacod/).

Auk erfðafræðirannsókna hefur einnig verið notast við aðferðir sem byggja á flokkun þorsks út frá lögum og efnasamsetningu kvarna. Niðurstöðum kvarna- og erfðagreininga bar vel saman og í ljós kom að þorskar sem hrygndu á Norðurlandi voru marktækt frábrugðnir þeim sem hrygndu við Suðurland (Ingibjörg Jónsdóttir o.fl., 2006a,b). Einnig var marktækur munur á milli þorska sem hrygndu á mismunandi dýpi við Suðurland (Gróa Pétursdóttir o.fl., 2006; Ingibjörg Jónsdóttir o.fl., 2006a,b).

3.2.3 Stofnasamanburður í eldistilraunum

Í eldistilraunum þar sem bornir hafa verið saman þorskstofnar við staðlaðar aðstæður hefur kom fram munur í ýmsum eiginleikum. Þetta gerir kröfur um að aðlaga þurfi eldið að hverjum stofni fyrir sig (Brown o.fl. 2003).

Vöxtur

Tilraunaeldi á árgangi 2003 sýnir að ekki er marktækur vaxtarmunur hvort sem uppruna þorskseiðanna megir rekja til hafsvæðis við Kópasker eða við Suðurströndina. Eftir er að skoða hvort eldisþorskur sem var safnað 2004 og 2005 sé frábrugðinn því sem mælt hefur verið í eldisþorski frá 2003 (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006). Í öðrum rannsóknum eru þó dæmi um mun í vaxtarhraða á milli þorskstofna og arfgerða (hemóglóbín gerðir) þorsks (Albert K. Imsland og Ólöf D.B. Jónsdóttir 2002; Albert K. Imsland o. fl. 2007). Í nýlegri rannsókn fannst enginn munur í vexti hjá tveggja ára strandþorski og þorski úr Barentshafi (Kolstad o.fl. 2006a). Aftur á móti kom fram í eldri tilraun aðeins betri vöxtur hjá strandþorski (van der Meeren o.fl. 1994; Svåsand o.fl. 1996; Otterlei o.fl. 1999; van der Meeren og Jørstad 2001). Norski strandþorskurinn er samsettur úr mörgum undirstofnum og kann ástæða fyrir mismunandi niðurstaðna að vera sú að valdir hafa verið stofnar af mismunandi erfðafræðilegum uppruna í þessum tilraunum (Kolstad o.fl. 2006a). Í eldistilraunum á þorskseiðum í Kanada hafa fengist mismundi niðurstöður varðandi mun á vaxtarhraða milli þorskstofna (Purchase og Brown

2000, 2001; Wijekoon o.fl. 2003). Þó að niðurstöður séu mótsagnakenndar er ekki hægt að útiloka að þessi munur sé til staðar í einhverjum tilvikum. Mikill munur vaxtargetu innan fjölskyldna (kafla 3.3.2) gerir leit að þorskstofni með mikla vaxtargetu ekki að eins áhugaverðum kosti.

Kynþroski og hrygningartími

Við samanburð á norska strandþorskinum og þorski úr Barentshafi mældist lítilsháttar munur á hlutfalli kynþroska á tveggja ára fiski (Kolstad o.fl. 2006a). Hrygningartími er einnig mismunandi á milli stofna. Strandþorskur af syðsta svæðinu í Noregi hrygndi einum mánuði fyrr en þorskstofnar sem voru af svæðum fyrir norðan (Otterå o.fl. 2006).

Lögun

Lögun þorsks getur haft áhrif á nýtingu þar sem holdmeiri fiskar með minni haus gefa hærri flakanýtingu. Lögun þorsks ákvarðast af umhverfisþáttum og erfðum. Fundist hefur munur á milli stofna í þáttum eins og holdastuðli, dýpt búks, hausstærð og lengd sporðar (Svåsand o.fl. 1996; Purchase og Brown 2001; Marcil o.fl. 2006). Í þorski eru innnyfli hátt hlutafall af heildarþyngd. Þar sem lægra verð fæst fyrir innnyfli en hold (flak) er hagkvæmara að hlutfall þeirra sé lágt. Fram hefur komið í rannsóknum að það er bæði munur á milli stofna í lifrarstæð og hlutfalli kynkirtla (Svåsand o.fl. 1996).

Aðrir eiginleikar

Margir aðrir eiginleikar þorsks eru mikilvægir fyrir fiskeldi. Í því sambandi má nefna lifun en þar hefur komið fram að munur er á milli þorskstofna (van der Meeren o.fl. 1994). Í sýkingartilraunum með *Listonella anguillarum* mældist hærri lifun hjá norska strandþorskinum (14,2% lifun) en hjá Barentshafsþorskinum (8,6% lifun) (Kettunen og Fjalestad 2006). Það eru einnig vísbendingar um að þorskur sem lifir á jaðarsvæðum nyrst við Nýfundnaland framleiði meira af frostlegi en þorskur á suðlægari svæðum og ætti því að þola betur lágt sjávarhitastig (Goddard o.fl. 1999). Í Kanada hefur komið fram í rannsóknum að lýsing (ljósstyrkur) hefur mismundi áhrif á atferli, vöxt og lifun þorskstofna (Puvanendran og Brown 1998). Arfgerðir þorsks bregðast einnig mismunandi við ljóslotu. Ein arfgerðin óx best við stöðugt ljós og önnur við náttúrulega ljóslotu (Albert Kjartansson Imsland o.fl. 2005). Einnig er munur í fóðurnýtingu á milli stofna og arfgerða þorsks (Purchase og Brown 2001; Jordan o.fl. 2006).

Það virðist vera nokkur breytileiki á milli þorskstofna í eiginleikum sem eru mikilvægir fyrir þorsk sem eldisfisk. Innan stofna er einnig mikill munur og hefur verið sýnt fram á breytileika í mörgum þessara eiginleika á milli fjölskyldna (kafla 3.3.2).



Box 1. Nokkrar skilgreiningar í kynbótum.

Arfgengi (táknað h^2) er hlutfall breytileikans í stofninum sem stafar af því að einstaklingarnir bera mismunandi erfðavísa. Arfgengi getur verið frá 0,0 til 1,0.

BLUP, er líkan sem er notað til að reikna kynbóttagildi einstaklinga í kynbótakerfi.

Erfðafylgni er mælikvarði á það að hversu miklu leyti sömu eða tengdir erfðarvísar hafa áhrif á tvo eiginleika.

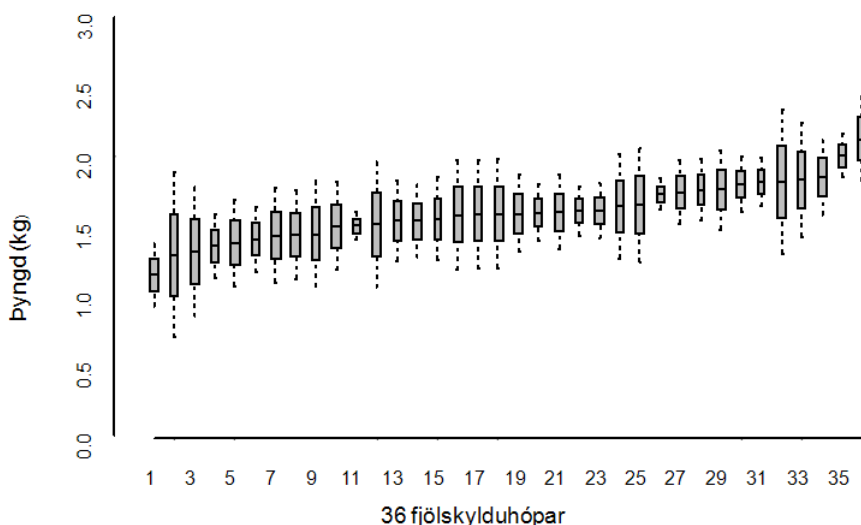
Grunnstofn, fyrsta skrefið í kynbótaáætlun er að safna erfðafni með vali á einstaklingum úr náttúrulegum stofnum til undaneldis og prófun afkvæma í eldi sem síðar myndar framtíðarklakstofn (úrvalshóp).

3.3 Kynbætur

3.3.1 Grunnstofn

Erfðabreytileiki mikilvægur

Fyrsta skrefið í kynbótaáætlun er að safna erfðafni sem myndar grunnstofn með vali á einstaklingum úr náttúrulegum stofnum til undaneldis og prófun afkvæma í eldi sem síðar mynda framtíðarklakstofn (úrvalshóp). Við myndun grunnstofns er lögð áhersla á að viðhalda erfðabreytileika og lágmarka skyldleikaræktun. Það geta verið efnahagsleg rök fyrir því að viðhalda nægilegum erfðabreytileika, þar sem kynbótamarkmið geta breyst og erfitt getur verið að sjá fyrir hvaða kröfur kaupendur gera eftir t.d. 10-20 ár. Kynbótastofn verður því að hafa nægan erfðabreytileika svo mögulegt sé að bregðast við breyttum kröfum markaðarins (Theódór Kristjánsson o.fl. 2004).



Mynd 3.2. Meðalþyngd 36 fjölskyldna af árgangi 2003 í desember 2005 gefið með einu staðalfrávik. Innan hvernar fjölskyldu eru að lágmarki þrír einstaklingar (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006).

Hermiporskur – grunnstofn þorskynbóta

Á vegum Stofnfisks í samstarfi við sérfræðinga í Háskóla Íslands var farið út í verkefnið „Hermiporskur – grunnstofn þorskynbóta“ sem hafði það að markmiði að hanna hermilíkan (stochastic simulation model) til ákvörðunartöku um samsetningu grunnstofns til framhaldskynbóta í þorskeldi (Theódór Kristjánsson 2005). Hér er átt við hversu marga einstaklinga á að taka úr hverjum tiltækum stofni, hvort og hvernig á að blanda þeim saman og hvernig á að velja einstaklinga úr fyrstu kynslóðum í grunnstofni. Allir þessir þættir skipta verulegu máli ef viðhalda á erfðabreytileika og lágmarka skyldleikaræktun sem er grundvallaratriði í öllu kynbótastarfi.

Að lágmarki 100 fjölskyldur í grunnstofni

Í rannsóknaverkefni Stofnfisks „Hermiporskur – grunnstofn þorskynbóta“ var hermilíkan notað til að vega og meta stærð grunnstofns (fjöldi hrygna og hænga ár hvert) með það að markmiði að hámarka kynbótaframför með sem lægstum tilkostnaði. Notaðir voru þekktir erfðastuðlar úr kynbótum í fiskeldi fyrir einn eða fleiri eiginleika (t.d. vaxtarhraða, aldur við kynþroska og fl.). Auk þess var tekið tillit til þróunar skyldleikaræktar (Theódór Kristjánsson 2005). Niðurstöður þess verkefnis sem unnið var á árunum 2003-2005 sýna að grunnstofn með meira en 100 fjölskyldum sé nægjanlegur til að viðhalda erfðabreytileika og halda skyldleikarækt innan við 1% á kynslóð (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006), sem er almenn viðmiðunarregla í kynbótum (Bijma og Wooliams 2000).

3.3.2 Arfgengi

Vöxtur

Fyrsta mat á arfgengi vaxtar í íslenska kynbótaverkefninu er 0,49 fyrir 0,1 kg eldisporsk og 0,34 fyrir 2 kg eldisporsk (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006). Mikill munur er á milli fjölskyldna og er u.þ.b. tvöfaldur munur á léttustu og þyngstu fjölskyldunni (mynd 3.2).

Í norski tilraun kom fram að arfgengi þorskseiða yfir 70 daga tímabil var 0,52 (Gjerde o.fl. 2004). Mælingar á arfgengi á stærri þorski (25-1200g) var 0,51 (Kolstad o.fl. 2006a), 0,62 við slátrun (1,9 og 2,4 kg) (Kolstad o.fl. 2006b). Töluvert lægra arfgengi fékkst í annarri norski tilraun eða 0,19-0,28 (tafla 3.2). Í Kanada hefur arfgengi mælt 0,5 fyrir þorskseiði



(Symonds o.fl. 2007).

Kynþroski

Arfgengi fyrir kynþroska á íslenskum þorski mældist 0,17 (Theódór Kristjánsson og Agnar Steinarsson 2007). Í norskri tilraun kom fram að arfgengi þorsks (700-1200g) fyrir kynþroska við tveggja ára aldur var 0,21 (Kolstad o.fl. 2006a), en aðeins 0,07 á þriðja ári (1,9 og 2,4 kg) (Kolstad o.fl. 2006b). Í annarri norskri tilraun mældist arfgengi 0,14 (tafla 3.2). Erfðafylgni á tíðni kynþroska og vaxtar er há ($r = 0,96$) eins og komið hefur fram í íslenskum rannsóknum. Þetta þýðir að mjög erfitt verður að velja gegn kynþroska og fyrir vexti samtímis (Theódór Kristjánsson og Agnar Steinarsson 2007).

Lifun og sjúkdómsþol

Í norskri tilraun með þorskseiði sem alin voru yfir 70 daga tímabil mældist engin munur í lifun á milli fjölskyldna (Gjerde o.fl. 2004). Aftur á móti var lifun eftir smit af bakteríunni *Listonella anguillarum* mismunandi á milli fjölskyldna, en arfgengi var tiltölulega lágt ($< 0,17$) (Kettunen o.fl. 2007). Í annarri norskri tilraun mældist arfgengi aftur á móti 0,24 (tafla 3.2)

Hlutfall afurða

Lágt arfgengi (0,06) hefur mælt í flakanýtingu á íslenskum eldisþorski (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006). Það er í takt við niðurstöður norskra rannsókna í arfgengi flakanýtingar og á hlutfalli hnakkastykkja (tafla 3.2). Lágt arfgengi (0,09) hefur einnig mælt í hlutfalli lifrar á íslenskum eldisþorski (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006). Mun herra arfgengi mældist í norskum eldisþorski eða 0,55 (tafla 3.2).

Útlitseinkenni

Í norskum rannsóknum hefur komið fram töluverður erfðabreytileiki í holdstuðli og hausstærð (tafla 3.2). Í eldi hafa mælt útlitsgallar á eldisþorski, en töluverður breytileiki hefur verið á milli fjölskyldna í hryggskekkju (0,27) (Kolstad o.fl. 2006a) og hausfettu (tafla 3.2). Erfðafylgni mældist 0,5 milli vaxtar og hryggskekkju (Kolstad o.fl. 2006a).

Erfða og umhverfissamspil

Á vegum Marine Breed AS var eldisþorskur alinn í kvíum í þremur fylkjum í Noregi til að kanna erfða og umhverfissamspil (tafla 3.3). Niðurstöður voru þær að erfða og umhverfissamspil er hátt ($r = 0,82-0,95$) í vexti milli þessara svæða, þ.e.a.s. miklar líkur voru á því að sama fjölskyldan hefði mestan vaxtarhraða óháð staðsetningu. Komist var að þeirri niðurstöðu að ekki væri þörf á sérstökum kynbótalínum fyrir svæði með mismunandi um-

Tafla 3.2. Meðaltal, besta og lakasta fjölskyldan ásamt arfgengi helstu eiginleika við fyrsta val hjá Marine Breed (Refstie 2007).

	Meðaltal	Besta fjölskyldan	Lakasta fjölskyldan	Arfgengi
Þyngd við merkingu (g)	24,5	40,9	16,5	0,28
Þyngd (kg)	1,2	1,57	0,81	0,19
Holdastuðull	1,3	1,12	1,49	0,41
Haus (%)	17,9	16,5	19,5	0,51
Búkur (%)	67,0	69,6	62,0	0,42
Flakanýting (%)	76,4	78,9	74,3	0,16
Hnakkastykki (%)	33,0	35,9	30,2	0,06
Hlutfall lifrar (%)	11,8	9,4	14,0	0,55
Kynþroski (%)	99,2	81,8	100	0,14
Lifun v/vibrósasýkingar (%)	48,7	100	5,3	0,24
Hausfetta/hryggskaði (%)	52,5	9,1	100	0,37
Þyngd við merkingu (g)	24,5	40,9	16,5	0,28

hverfisaðstæður þegar kynbætt væri fyrir vexti. Aftur á móti höfðu umhverfisþættir meiri áhrif á arfgengi hryggskekkju (Kolstad o.fl. 2006a,b; Kolstad 2007).

3.3.3 Framkvæmd kynbóta

Arfgengi og kynbótaframför

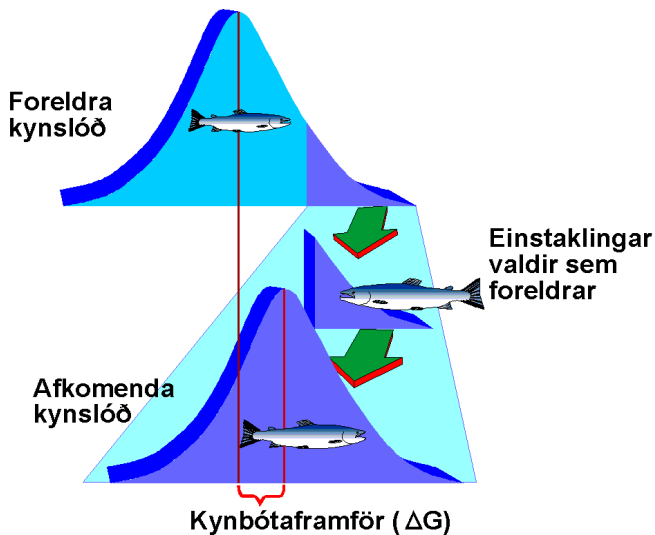
Forsenda framfara með kynbótum er að breytileika verðmætra eiginleika s.s. vaxtarhraða sé stjórnað af erfðum. Á mynd 3.3 er sýnt dæmi um svipfarsbreytileika í stærð jafngamalla fiska. Breytileiki í stærð er einkennandi fyrir alla fiskistofna þar sem einstaklingar innan árgangs vaxa mishratt. Þetta er hægt að nýta til kynbóta. Stærstu einstaklingar í hverjum árgangi eru valdir til undaneldis. Þessir einstaklingar gefa af sér hraðvaxnari afkvæmi en kynslóðin á undan. Breytingin er kölluð kynbótaframför (mynd 3.3).

Fjölskylduval og einstaklingsval

Til eru ýmsar útfærslur af kynbótakerfum en það sem mest hefur verið notað fyrir fiskeldi er blanda af einstaklingsvali (*mass selection*) og fjölskylduvali (*family selection*). Í kynbótakerfi sem byggist á einstaklingsvali er einstaklingur valinn eða honum hafnað á grundvelli þess hvernig hann stendur sig í eldi í samanburði við aðra einstaklinga í sömu eldiseiningu. Kosturinn við einstaklingsval er að aðferðin er einföld í notkun

Tafla 3.3. Áætlað arfgengi (staðalfrávik) við tveggja ára aldur fyrir vöxt, hryggskekkju og kynþroska eldisþorsks hjá Marine Breed AS í þremur fylkjum í Noregi (Kolstad o.fl. 2006a).

	Meðaltal	Nordland	Møre & Romsdal	Hordaland
Vöxtur	0,51(0,10)	0,47(0,13)	0,54(0,10)	0,68(0,12)
Hryggskekkja	0,27(0,07)	0,26(0,09)	0,38(0,09)	0,18(0,09)
Kynþroski	0,21(0,04)	0,29(0,10)		0,16(0,08)



Mynd 3.3. Myndræn framsetning af kynbótaframförum (Theódór Kristjánsson o.fl. 2004).

og hægt er að ná mikilli kynbótaframför í eiginleikum með hátt arfgengi eins og t.d. vexti. Helstu gallar einstaklingsvals sem kynbótaaðferðar er að hún felur í sér hættu á skyldleikarækt og þar með tapast erfðabreytileiki. Fjölskylduval er flóknari leið og útheimtir meiri kostnað, en hún felst í að búa til fjölskyldur (al- og hálf systkini). Þá eru fjölskyldur aldar í sér körum fram að merkingarstærð og allir einstaklingar í stofninum merktir. Þegar t.d. fiskar nálgast sláturstærð er merki hvers og eins lesið og allir lífseiginleikar skráðir sem velja á fyrir í kynbótastarfinu. Síðan er kynbótagildi hvers einstaklings reiknað með aðferðum kynbótafræðinnar sem kallast einstaklingslíkan (BLUP), þar sem kynbótagildi hvers einstaklings er reiknað, þar sem tekið er tillit til ágæti einstaklingsins sjálfs og allra ættingja hans í stofninum. Á grundvelli þessara útreikninga eru heilu fjölskyldurnar og einstaklingar innan þeirra valdar til undaneldis fyrir næstu kynslóð. Þetta er sú aðferð sem notuð er við kynbætur á laxi bæði hér á landi og í Noregi. Með fjölskylduvali er einnig hægt að kynbæta eiginleika sem aðeins verða metnir á dauðum einstaklingum svo sem holdgæði og sjúkdómaþol, þar sem systkini mældra einstaklinga eru notuð til undaneldis (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006).

DNA-ættarnisgreining

Þróaðar hafa verið aðferðir til að nota DNA erfðamörk til að ættgreina fiska (kaflí 3.5). Þá er tekið vefjasýni úr foreldrum og erfðamörk þeirra eingrúð. Með erfðagreiningu er síðan hægt að segja til um ætterni hvers einstaks seiðis/fisks, og þannig er hægt að búa til ættarskrá fyrir öll afkvæmi (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006). Með þessari aðferð þarf ekki að halda fjölskyldum aðskildum í eldinu. Meðal galla við þessa aðferð er að það er engan veginn víst að það náist jafn fjöldi úr hverri fjölskyldu vegna breytileika í lifun á milli fjöl-

skyldna (Nævdal o.fl. 2003). Til að draga úr þessum ókosti er hægt að blanda saman hefðbundnum fjölskylduaðferðum og DNA-ættarnisgreiningu og nýta kosti beggja aðferða. Þannig má hugsa sér að 50-100 einstaklingar úr hverri fjölskyldu verði merktir með PIT örmerkjum og síðan fluttir í kvíar ásamt öðrum seiðum. Við slátrun verða eiginleikar á merktum fiski metnir svo sem flakanýting, gæði, lifun, lifrarhlutfall, slóghlutfall og vöxtur. Í framhaldi mætti nota DNA-ættarnisgreiningu til að greina skyldleika við úrvalsfisk (Theódór Kristjánsson og Agnar Steinarsson 2007).

Ein eða fleiri kynbótalínur

Með tilliti til kynbóta fyrir auknum vaxtarhraða virðist ekki vera þörf á að hafa fleiri en eina kynbótalínu þar sem miklar líkur eru á því að sama fjölskyldan vaxi hraðast óháð umhverfisaðstæðum. Aðrar ástæður geta þó verið þess valdandi að æskilegt sé að vera með fleiri en eina kynbótalínu. Í því sambandi má nefna að kynbætt væri fyrir ákveðnum eiginleikum til að uppfylla eftirspurn frá markaði. Einnig geta umhverfissjónarmið verið þess valdandi að krafa verði gerð um að notaðir séu stofnar af svæðinu til kynbóta (Kolstad o.fl. 2006a,b).

3.4 Kynbótaverkefni einstakra landa

3.4.1 Ísland

Stofnun IceCod ehf.

Á árinu 2003 var stofnað félagið, IceCod ehf., um seiðaelði og kynbætur fyrir þorskeldi. Markmið félagsins er að framleiða kynbætt þorskseiði og tryggja kaupendum þeirra að það verði stöðugar framfarir í efnahagslega mikilvægum eiginleikum fyrir þorskeldi. Að félaginu standa Stofnfiskur hf., Hafrannsóknastofnunin, Fiskey ehf., Þorskur á Þurru Landi ehf., Hraðfrystihúsið-Gunnvör hf. og HB-Grandi hf. (Theódór Kristjánsson og Agnar Steinarsson 2007). Meginmarkmið kynbótaverkefnisins fyrstu þrjú árin voru þrenns konar (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006):

- Myndun grunnstofns þorskkyrnbóta með hrognasöfnun úr hrygningarþorski sem víðast við Ísland, og prófun í eldi 100 - 200 fjölskyldur á ári.
- Mat á arfgengi á mikilvægum eiginleikum s.s. vaxtarhraða, tíðni kynþroska, holdgæðum o.fl.
- Notkun á DNA aðferðum í þorskkyrnbótum.

Grunnstofn

Söfnun á klakþorski fyrir kynbótaverkefni IceCod ehf. hófst hér við land árið 2003 (Theódór Kristjánsson o.fl. 2004). Það byggði á því að einn hængur var notaður til að frjóvga hrogn frá tveimur hrygnum og þannig myndaðir al- og hálf systkinahópar. Klakfiskurinn var lengdar- og þyngdarmældur, kvörnum



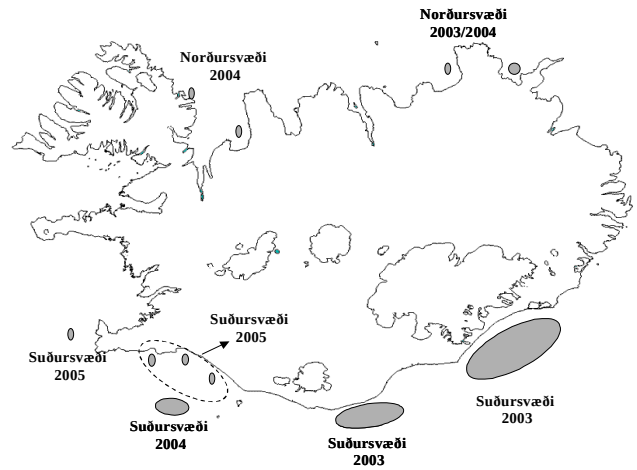
safnað og lífsýni tekin til DNA-raðgreiningar sem Prokaría annaðist (nú Matís ohf.). Hrognum frá hverri hrygnu var haldið aðskildum í litlum ílátum og þau flutt í Tilraunaeldisstöð Hafrannsóknastofnunarinnar þar sem eldið hefur farið fram. Árið 2003 var safnað hrognum úr 336 fjölskyldum, 206 árið 2004 og 156 árið 2005 (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006). Hrognum var safnað bæði við sunnan- og norðanvert landið, samtals á um 11 svæðum (mynd 3.4).

Framkvæmd kynbóta

Á mynd 3.5 er að finna skipulag þorskakynbóta hjá IceCod ehf. Ætla má að um 350 af um 700 fjölskyldum sem safnað var árin 2003-2005 nýtist í grunnstofn kynbóta. Þorskseiðum hefur verið komið fyrir í eldi í sjókvíum á Berufirði og í Ísafjarðardjúpi. Samstarfsaðilar IceCod ehf. eru HB Grandi hf. og Hraðfrystihúsið-Gunnvör hf. Úrvalsporskur af árgangi 2003 sem tekinn var úr Berufirði til kreistingar árið 2006 er fyrsti árgangur sem IceCod ehf. framleiddi til myndunar á grunnstofni í þorskakynbótum. Á sama tíma var tekinn úrvalsporskur af árgangi 2002 sem fangaður var sem 0-grúppa í Ísafjarðardjúpi haustið 2002 og síðan alinn í sjókvíum hjá Hraðfrystihúsinu-Gunnvöru hf. Úrvalsporskur sem tekinn er til kynbóta er fluttur í eldisstöð Stofnfisks hf. í Höfnum á Reykjanesi. Við komuna til Hafna er fiskurinn settur í kör, merktur og lífsýni tekin til DNA-ættarnisgreiningar. Þorskurinn er síðan handkreistur og notuð eru svil úr einum hængi til að frjóvga hrogn frá tveimur hrygnum. Að lokinni frjóvgun eru hrognin flutt til Tilraunaeldisstöðvar Hafrannsóknastofnunar að Stað við Grindavík (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006).

Viðhalda erfðabreytileika

Gerður var samanburður á eldisporski úr Tilraunaeldisstöð Hafrannsóknastofnunar á Stað, árgangar 1996-2000, og villtum þorski af sama uppruna sem var veiddur 2002-2003 (Pampoulie o.fl. 2006a). Erfðabreytileiki eldisporsksins (mældur sem hlutfall arfblendni á stutt-röðum) mældist minni en hjá villta þorskinum og munurinn nam um 2% sem er eins og hjá tveimur landfræðilega aðskildum þorskstofnum. Ástæðan fyrir þessu er einfaldlega sú að þarna var um tilraunaeldi að ræða undan örfáum foreldrafiskum (founder affect). Í grunnstofni IceCod eru taldar vera 350 virkar fjölskyldur, en niðurstöður verkefnisins "Hermiþorskur" sýndu að grunnstofn með meira en 100 fjölskyldum er

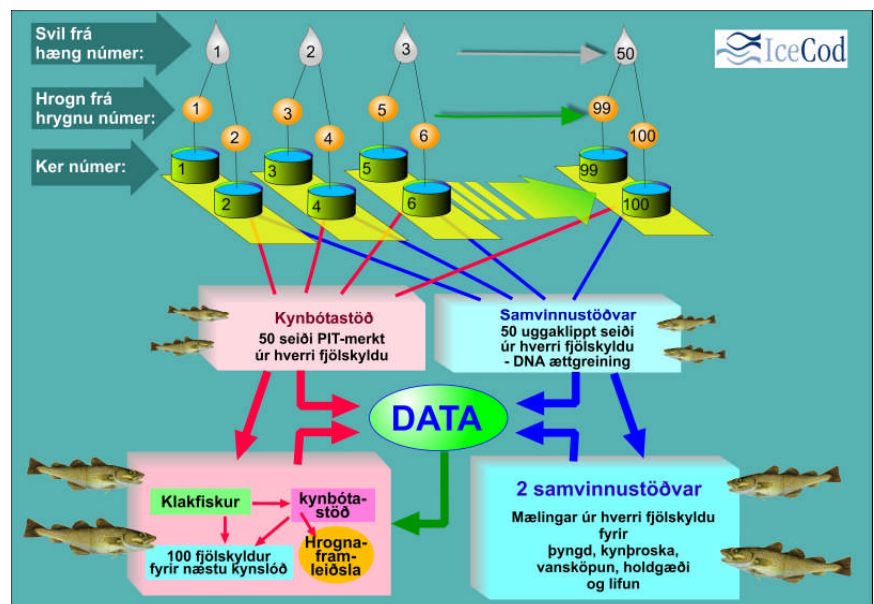


Mynd 3.4. Yfirlit yfir sýnatökustaði á hrygningarþorski árin 2003-2005 (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006).

nægjanlegur til að viðhalda erfðabreytileika og halda skyldleikarækt innan við 1% á kynslóð, sem er almenn viðmiðunarregla í kynbótum (Theódór Kristjánsson og Jónas Jónasson 2006).

Hjá IceCod ehf. var byrjað að safna fjölskyldum í grunnstofn árið 2003 og eiginlegar kynbætur á þorski byrja 2006 þar sem fjölskyldur voru valdar úr grunnstofni til áframhaldandi kynbóta byggt á ættarnisgreiningu og ættarskrá. Alls voru valdar 105 fjölskyldur til áframhaldandi kynbóta til að tryggja nægilegan erfðabreytileika.

Heildarerfðabreytileiki í stofni er samsettur úr erfðabreytileika sem myndast milli fjölskyldna og erfðabreytileika sem myndast innan fjölskyldu. Val úr grunnstofni hefur í för með sér minnkun í millifjölskyldu-erfðabreytileika (Bulmer effect, Bulmer 1971). Það hefur verið sýnt fram á að minnkun í erfðabreytileika vegna áhrifa Bulmers nær jafnvægi á



Mynd 3.5. Yfirlit yfir skipulag þorskakynbóta hjá IceCod ehf. (Teikning: Sumarliði Óskarsson).



Mynd 3.6. Kreisting á eldisþorski í eldisstöð Stofnfisks hf. í Höfnum. Til hægri sést Theódór Kristjánsson Stofnfiski hf. sjá um bókhald og pörunarskrá (Ljósmynd:Jónas Jónasson).



Mynd 3.7. Seiðaeldis- og kynbótastöð sem ríkisstyrkt kynbótaverkefnið í Norður-Noregi hefur til ráðstöfunar (www.fiskeriforskning.no).

tveimur til þremur kynslóðum (Hill 2000). Niðurstöður úr rannsóknaverkefninu Hermiþorskur sýna að minnkun í erfðabreytileika vaxtar vegna áhrifa Bulmers er 12-14% og nær jafnvægi á 3 kynslóðum.

Þá ber að hafa í huga að erfðabreytileiki metinn með DNA markerum s.s. stuttröðum er ekki talin örugg aðferð til að meta aukningu skyldleikaræktar í stofnum (Reed og Frankham 2001, Slate o.fl. 2004). Að halda ættarskrá er því öruggasta leiðin til að fylgjast með þróun skyldleikaræktar.

Gerðar hafa verðir ítarlegar rannsóknir á áhrifum aukningar í skyldleikarækt (ΔF) og nú er almennt miðað við að halda ΔF innan við 0,5% - 1,0% á kynslóð (Bijma og Wooliams 2000; FAO 2007). Við skipulag kynbóta hjá IceCod ehf. er miðað við að halda ΔF innan við 1,0%.

3.4.2 Noregur

Norska kynbótaverkefnið

Norsk stjórnvöld tóku þá ákvörðun að staðsetja kynbætur á þorski í Tromsø í Norður-Noregi og var Fiskeriforskning falið það hlutverk að sjá um verkefnið sem hófst árið 2002. Grunnstofn er myndaður

úr Barentshafsporski ásamt strandþorski sem hefur sinn uppruna bæði úr sunnanverðum og norðanverðum Noregi. Á árinu 2003 voru merktar 47 fjölskyldur, 77 fjölskyldur 2004, og 84 fjölskyldur árið 2005 (Fjalestad o.fl. 2006; Mortensen 2007). Kynbótaverkefnið er fjármagnað af norska sjávarútvegsráðuneytinu og var úthlutað 28 milljónum NOK (280 milljónir ÍSK) til verkefnisins árið 2005 og svipaðri styrkveitingu árið 2007. Til lengri tíma er gert ráð fyrir að atvinnugreinin taki yfir kynbótaverkefnið eins og gerst hefur með kynbætur á laxi í Noregi (Anon 2006a).

Í norska þorskeldiskynbótaverkefninu hafa nokkrar stefnumótandi ákvarðarnir verið teknar en þær eru (Fjalestad og Mortensen 2005):

- Styðjast við hefðbundnar aðferðir við kynbætur og nota bæði einstaklings- og fjölskylduval.
- Framleiða árlega 200 fjölskyldur.
- Kynbótamarkmið munu valin út frá efnahagslegu gildi einstakra erfðaeiginleika og arfgengi þeirra.
- Grunnstofn mun vera byggður upp af nokkrum þorskstofnum.
- Stuðst verður við erfðatekni ef sýnt verður fram á að það muni flýta kynbótaframförum (DNA-ætternisgreining, notkun erfðavísa í kynbótum).

Í kynbótastöðinni er hægt að halda aðskildum 300 fjölskyldum í körum (mynd 3.7). Þeir hafa einnig til ráðstöfunar sjókvíaeldisstöð fyrir matfiskeldið og koma jafnframt fyrir seiðum í einni sjókvíeldisstöð í Finnmark nyrst í Norður-Noregi og annarri eldisstöð í Hordaland í Vestur-Noregi. Til ráðstöfunar er jafnframt aðstaða til að framkvæma sjúkdómatilraunir og meta þannig sjúkdómaþol einstakra fjölskyldna (Mortensen 2007; www.fiskeriforskning.no).

Kynbótamarkmið eru að auka vöxt, sjúkdómaþol fyrir vibrósa og gæði, ásamt því að draga úr kynþroska og hausfettu og öðrum hryggsköðum. Fyrsta valið var framkvæmt árið 2006 úr um 110 fjölskyldum. Við fyrsta val var lögð áhersla á að auka vöxt og sjúkdómsþol gegn vibrósa. Stefnt er að því að bjóða hrogn til afhendingar yfir tímabilið marsmaí og með því að ljósastýra fiskinum einnig í maí-júní og desember. Á árinu 2007 verða til boða hrogn úr 3-4 ára þorski sem valdir hafa verið m.t.t. aukins vaxtar og meira sjúkdómaþols gegn vibrósa. Stefnt er að því að vera með um 200 fjölskyldur (Mortensen 2007; www.fiskeriforskning.no).

Kynbótaverkefni Marine Breed

Árið 2002 hóf Akvaforsk undirbúning að kynbótum með framleiðslu á um 50 fjölskyldum. Hér var um að ræða fimm ára verkefni (2001-2005) styrkt af norska rannsóknaráðinu. Verkefnið var undir verkefnisstjórn Akvaforsk og var unnið í samvinnu við Hafrann-



sóknastofnunina og NTNU háskólann (Gjerde o.fl. 2003). Við þessu verkefni tók síðan Marine Breed sem er hlutafélag og dótturfyrirtæki Akvaforsk Genetics Center AS sem er með fjölda kynbótaverkefna um allan heim. Kynbótamarkmið hjá Marine Breed eru eftirfarandi; auka vaxtarhraða, draga úr tíðni kynþroska, minnka hlutfall lifrar og hausfettu og annarra hryggskæða, auka sjúkdómapól, fóðurnýtingu, hlutfall búks og flakanýtingu (Rye 2005; www.marinebreed.no).

Grunnstofn er myndaður úr Barentshafsporski ásamt strandporski sem hefur sinn uppruna úr þremur fylkjum í Vestur- og Norður-Noregi. Fyrsta salan á kynbættum efniviði hófst árið 2005, seiði úr samtals 87 fjölskyldum. Ef vel gengur munu verða seld seiði úr öðru vali eða þriðju kynslóð haustið 2007. Frá og með 2008 er gert ráð fyrir að geta selt kynbætt þorsk-hrogn allt árið ef áætlanir ganga eftir (Refstie 2007; www.marinebreed.no).

Marine Breed er með höfuðstöðvar á Sunndalsøra, Møre og Romsdal í Vestur-Noregi. Fram að þessu hefur framleiðsla á hrognum og kynbótafiski verið í tilraunarstöðvum í eigu Akvaforsk á Averøy og Sunndalsøra. Frá og með 2008 er gert ráð fyrir að framleiðsla hroгна fari fram í fiskeldisstöðvum og hefur m.a. verið gerður samningur við Havlandet Marin Yngel og Codfarmes um framleiðslu og sölu á kynbættum efniviði frá Marine Breed. Jafnframt hefur verið gerður samningur við Codfarmers sem felur m.a. í sér umönnun með klakfiski og að Marine Breed sjái um að kynbæta þorsk sem er aðlagður að umhverfisaðstæðum í Norður-Noregi (www.marinebreed.no).

3.4.3 Önnur lönd

Kanada

Árið 2005 hófust tvö kynbótaverkefni, annað á Nýfundnalandi (2005-2009) og hitt í New Brunswick fylki (2005-2008) (Anon 2007; www.codgene.ca). Á árinu 2006 hófst verkefnið „Atlantic Cod Genomics and Broodstock Development Program“ (Anon 2007; www.codgene.ca). Verkefnið samanstendur af erfðafræðirannsóknunum sem eiga að styðja við kynbótaverkefnið. Grunnstofn er upprunninn af tveimur svæðum, Nýfundnalandi/Labrador og New Brunswick/New Hampshire. Söfnun hroгна hófst árið 2006 og var safnað um 200 fjölskyldum. Framleiðslan fer fram í St. Andrews Biological Station sem er undir kanadísku hafrannsóknastofnuninni og Ocean Sciences Centre (www.osc.mun.ca) á Nýfundnalandi. Ætlunin er að hafa tvær kynbótalínur, eina fyrir Nýfundaland og aðra fyrir New Brunswick. Þá eiginleika sem á að skoða er munur á milli fjölskyldna í vaxtarhraða, kynþroska, heilbrigði, þoli við lágu súrefnisinnihaldi, háum sjávarhita, lifun, hráefnisgæði og flakanýtingu. Kynbæta á m.a. fyrir meiri vexti, auknum

Box 2. Nokkrar skilgreiningar í erfðatækni.

Arfgerð er safn allra gena í frumum einstaklings. Arfgerðin er þannig allt það sem einstaklingur hefur erfð frá foreldrum sínum.

Erfðatækni er líftækni þar sem unnið er með erfðaeftirbúnaði, DNA.

Erfðamörk eru ákveðnir staðir eða DNA raðir, sem eru á einhvern hátt greinanlegar.

Endurteknar stuttraðir er erfðamark sem notað er til að greina arfgerð einstaklinga.

Erfðabreyttar lífverur, yfirleitt átt við að viðbótar genum úr sömu eða úr öðrum tegundum er bætt inn í erfðamengi fiskisins. Koma má framandi genum inn með að sprauta DNA inn í frjóvguð hrogn.

Genatjáning, aðeins hluti gena er virkur í hverri frumu á hverjum tíma. Þannig má segja að sérhver fruma lífverunnar geymi uppskrift að allri lífverunni, en mismunandi tjáning gena ræður því hvernig frumurnar sérhæfa sig: ein verður taugafruma, önnur fruma í auga o.s.frv.

Magnbundinn erfðavísir er tengsl milli erfðamarka við ákveðna svipfarseiginleika. Við einangrun á magnbundnum erfðavísirum er leitað að DNA erfðamerki sem tengist svæði á DNA sem hefur áhrif á svipfarseiginleika s.s. vöxt.

gæðum og heilbrigði fiskisins (Symonds o.fl. 2007; www.codgene.ca).

Bretland

Hafinn er undirbúningur að kynbótum hjá Machrihanish Marine Farms (www.machrihanishmarinefarm.co.uk) sem er í eigu háskólans í Stirling og Marine Farms sem er alþjóðlegt fyrirtæki í fiskeldi (Marine Farms 2007). Fyrsta framleiðsla af þorskseiðum í stöðinni á vegum þessara aðila hófst árið 2002 (Annual report 2003). Öðugleikar hafa verið í kynbótastarfinu vegna slakra hrognagæða. Aftur á móti í þeim tilvikum sem hrogn frá kynbættum eldisþroski eru af fullnægjandi gæðum koma þorskseiði betur út í eldi en seiði af villtum þorski. Þeir hafa þróað DNA-ætternisgreiningu sem notuð er í kynbótastarfinu (Annual report 2006). Gert er ráð fyrir að fyrstu hrogn úr kynbættum efniviði komi frá stöðinni árið 2008 (Dykes 2007).

Færeyjar

Nú er hafið þriggja ára (2007-2009) kynbótaverkefni þar sem notaðir eru tveir stofnar af þorski, annar af Færeyska landgrunninu og hinn af Færeyjabanka. Miklar vonir eru bundnar við þorsk af Færeyjabanka þar sem fram hefur komið í eldistilraunum að hann virðist vaxa hraðar en þorskur af Færeyska landgrunninu. Verkefnið er hjá Fiskaaling (www.fiskaaling.fo) en á árinu 2006 voru þar 70 þorskar af Færeyjabanka og 50 af Færeyska landgrunninu. Framkvæma á erfðarannsókn á þessum



tveimur stofnum og framleiða minnst 10 erfðamörk til nota í kynbótaverkefninu. Framleiða á minnst 30 fjölskyldur af hvorum stofni og fylgjast með vexti, kynþroska og afföllum í eldi (Dahle 2006).

3.5 Kynbótaframfarir og samkeppnishæfni

3.5.1 Erfðatækni og kynbætur

Þróunarvinna á Íslandi

Verkefnið „Erfðagreiningasett fyrir þorsk“ var styrkt af AVS sjóðnum. Markmið verkefnisins var að þróa ný erfðagreiningasett byggð á endurteknum DNA stuttröðum (microsatellites) úr þorski. Í fyrsta lagi er þar um að ræða, 10 erfðamarka sett til nota í kynbótastarfi á þorski og í öðru lagi 20 erfðamarka sett til upprunagreiningar á villtum þorski. Verkefnið er undir verkefnisstjórn Prokaria, líftæknideild Matís ohf. Í erfðaeftni (DNA) allra dýra eru endurteknar stuttraðir (microsatellites) sem ekki hafa neinn þekktan tilgang. Breytileiki finnst á milli einstaklinga í þessum stuttröðum sem nýtist vel til rannsókna á skyldleika. Þessar endurteknu stuttraðir eru kölluð erfðamörk. Búið var að lýsa 24 slíkum erfðamörkum í þorski þegar þetta verkefni hófst (2005). Það er þó ekki gefið að erfðamörkin séu nýtileg þegar rannsaka á mikinn fjölda sýna. Í ljós kom að aðeins fjögur þessara erfðamarka nýttust í þeim tilgangi (www.av.s.is, frétt 17.07.2007).

Í verkefninu var hluti af erfðamengi þorsksins raðgreindur. Alls voru 7000 raðgreiningar gerðar í þessum tilgangi. Þar sem hentugar stuttraðir fundust voru hönnuð erfðamörk sem prófuð voru á úrtaki af þorskum. Í verkefninu voru 118 erfðamörk prófuð. Það tókst að búa til mörg nothæf erfðamörk og voru 19 þeirra sett saman í tvö greiningarsett. Annað greiningarsettið er með 10 erfðamörk sem búið er að prófa á mikinn fjölda þorsksýna. Hitt settið er með 9 erfðamörkum en eitt þeirra datt út á seinni stigum í þróuninni. Að auki eru mörg nothæf erfðamörk til hjá Matís (Prokaria) sem ekki eru komin inn í greiningarsett en sem hægt er að nota sem stök erfðamörk (www.av.s.is, frétt 17.07.2007).

Verkefnið „Erfðir ljóslotu og kynþroska í þorski“ er undir verkefnisstjórn Prokaria og styrkt af Tækniþróunarsjóð. Markmiðið er að kanna hver er þáttur erfða í svörun þorsksins við breytingum á ljóslotu, í tímasetningu kynþroska og aukningu á vaxtarhraða. Könnuð verður mismunandi afbrigði tveggja vaxtar gena við svipgerð vaxtar, tímasetningu kynþroska og svörun við ljóslotu. Skoðað verður hver er þáttur arfgerðar í svörun við ljóslotu og hver er þáttur arfgerðar í tímasetningu kynþroska. Kannað verður hvort líkamsstærð, þyngd og ótímabær kynþroski tengist. Verkefnið hófst á árinu 2006 og líkur árið 2009 (viðauki 1). Afrakstur verkefnisins veður m.a. að grunnur verður lagður að rannsóknum að magn-



bundum erfðavísu (Quantitative Trait Locus eða QTL) (Guðmundur Óli Hreggviðsson 2006).

Magnbundnir erfðavísar

Nytsemi magnbundinna erfðavísa í kynbótum er aðallega fólgin í því að flýta kynbótaframförum. Fundin eru tengsl á milli erfðamarka við ákveðna svipfarseiginleika. Við einangrun á magnbundnum erfðavísu er leitað að erfðamerki sem tengist svæði á DNA sem hefur áhrif á svipfarsbreytileika t.d. vöxt. Einn magnbundinn erfðavísir skýrir þó ekki nema hluta af svipfarsbreytileika og oft stjórnað ákveðnir svipfarseiginleikar af mörgum genum sem krefst mikillar vinnu að skilgreina. Við kynbætur er síðan leitað að magnbundnum erfðavísu hjá hópi fiska sem hafa mestan vaxtarhraða og valdir úr þeir fiskar sem innihalda þessa erfðavísa (marker-assisted selection (MAS)). Með þessu móti er hægt að flýta kynbótaframförum og þá sérstaklega fyrir þá eiginleika sem hafa lágt arfgengi (Nævdal o.fl. 2003; Liu og Cordes 2004). Fyrir þorsk er leit að magnbundnum erfðavísu rétt að hefjast en fyrir laxfiska (regnbogasilung, lax og bleikju) hafa fundist nokkrir magnbundnir erfðavísar, s.s. fyrir hitapoli, vexti og hrygningartíma. Í dag er ekkert af stærri kynbóta-verkefnunum að nota magnbundna erfðavísa. Þessi tækni er bæði notuð við kynbætur á plöntum og húsdýrum (Chistiakov o.fl. 2006).

Á síðustu 15 árum hefur miklum fjármunum og tíma verið varið í rannsóknir á sameindaerfðafræðilegum aðferðum í kynbótum. Hefur megin áherslan verið lögð á magnbundna erfðavísa og MAS. Í upphafi var því haldið fram að sameindaerfðafræðilegar aðferðir myndu jafnvel leysa af hólmi hefðbundnar aðferðir í kynbótum eins og t.d. BLUP. Síðan hefur mjög dregið úr væntingum þar sem ennþá eru afar fá dæmi um að þessar aðferðir hafi komið að notum í landbúnaði. Erfðaframfarir í landbúnaði síðustu 15 ára hafa nær eingöngu orðið vegna hefðbundinna aðferða í kynbótum (Misztal, 2006). Hver framtíðin verður í notkun sameindafræðilegra aðferða í kynbótum er erfitt að spá, en nú er í auknum mæli beint sjónum að rannsóknum á genatjáningu (Walsh og Henderson, 2004).

Þróunarvinna í Noregi

Á árinu 2003 var lögð fram tillaga um framkvæmd erfðatæknirannsókna fyrir þorsk í Noregi. Þar var m.a. lagt til að framkvæma heildarraðgreiningu á erfðamengi þorsks og leit að magnbundnum erfðavísu (Torrissen 2003). Komið var á fót verkefninu Codgen undir verkefnisstjórn Hafrannsóknastofnunar til að leysa ákveðin viðfangsefni innan umhverfismála, fiskeldis og fiskveiða. Verkefnið er unnið í samvinnu við innlendar og erlendar rannsóknastofnanir. Fljótlega voru upphaflegar tillögur endurskoðaðar og var bent á að erfðarannsóknir á þorski væru komnar stutt á veg og því lagt til að hefja



ekki strax vinnu við heildarraðgreiningu á erfðamengi þorsks. Fyrst í stað er m.a. lagt til að unnið verði við að finna erfðamörk, magnbundna erfðavísa og útbúa langraða-genasafn (BAC-library) (Anon 2004a; www.fishgen.no). Frá árinu 2004 hefur Codgen verkefnið verið fjármagnað af norska sjávarútvegstráðuneytinu (Torrissen 2007).

Árið 2006 samanstóð Codgen verkefnið af þremur undirverkefnum; a) Kortlagningu á erfðaeftni þorsks, b) Kynþroska þorsks c) Ónæmisfræði þorsks. Töluverður árangur hefur náðst og mörg gen sem eru mikilvæg fyrir kynþroska hafa verið kortlögð. Gert er ráð fyrir að nota þessa þekkingu við framleiðslu á geldum fiski, stjórna kynþroska með ljósum og til að bæta hrognagæði (Anon 2006a). Fram að þessu hafa rannsóknir á fisksjúkdómum snúist um að finna magnbundna erfðavísa fyrir víbróveiki (Fjalestad o.fl. 2006). Norðmenn hafa einnig þróað erfðagreiningarsett fyrir þorsk (Anon 2006b).

Seinnihluta ársins 2006 var komið á sérstöku samstarfsverkefni fyrir þorsk og lax sem hefur fengið heitið „Genofisk“ og er hluti af FUGU erfðafræðiverkefni styrktu af norska rannsóknaráðinu. Í verkefninu tekur þátt fjöldi stofnanna og háskóla í Noregi og eru nú allar erfðarannsóknir sjávarfiska styrktar af norska rannsóknaráðinu að finna á einum stað. Fimm samstarfsverkefni með styrkveitingar upp á samtals 53 milljónir NOK (530 milljónir ÍSK) eru kjarni í Genofisk. Stjórn Genofisk á m.a. að vera FUGU stjórninni til ráðgjafar um erfðatæknirannsóknir, auk alþjóðlegs hóps sérfræðinga (FUGU 2007; Nilsen 2007).

Norska hafrannsóknastofnunin er í samvinnu við fjölda aðila innanlands og erlendis í erfðarannsóknunum á þorski. Í innlendum verkefnum sem eru starfrækt í dag er stofnunin þáttakandi í Genofisk og Codgen. Erlendir samstarfsaðilar eru kanadíska erfðafræðiverkefnið fyrir þorsk og Háskólinn í Utrecht í Þýskalandi. Unnið er að því að koma á fót rannsóknasetri fyrir erfðarannsóknir á sjávardýrum „Norsk Marint Genomsenter“ (Torrissen 2007).

Þróunarvinna í Kanada

Árið 2006 hófst kanadíska erfðafræðiverkefni fyrir þorsk „Atlantic Cod Genomics and Broodstock Development Program“ (Anon 2007; www.codgene.ca). Samhliða kynbótaverkefninu er ætlunin að heildarraðgreina erfðamengi þorsks og leita að magnbundnum erfðavísam. Verkefnið hefur til ráðstöfunar um 13 milljónir Kanadadali (um 750 milljónir ÍSK) árin 2006-2008 (www.codgene.ca). Þetta verkefni er hluti af einu stærra verkefni „Genome Atlantic“ (<http://genomeatlantic.ca>). Þróunarvinna fyrir þorsk er undir forustu Huntsman Marine Science Centre (www.huntsmanmarine.ca) og The Atlantic Genome Centre (<http://tagc.ca>).

Erfðamörk verða notuð til að útbúa erfðagreiningarsett fyrir þorsk og einnig til að finna magnbundna erfðavísa sem síðan verða notaðir í kynbótaverkefninu s.s. til að auka sjúkdóma- og hitaþol (Browman o.fl. 2007; www.codgene.ca). Að verkefninu kemur fjöldi háskóla, stofnanna og auk fyrirtækja í þorskeldi sem eru Cook Aquaculture (www.cookeaquaculture.com), Northern Aquaculture (www.northernaquaculture.ca) og Great Bay Aquaculture (www.greatbayaquaculture.com).

Genbankar og aðgengi upplýsinga

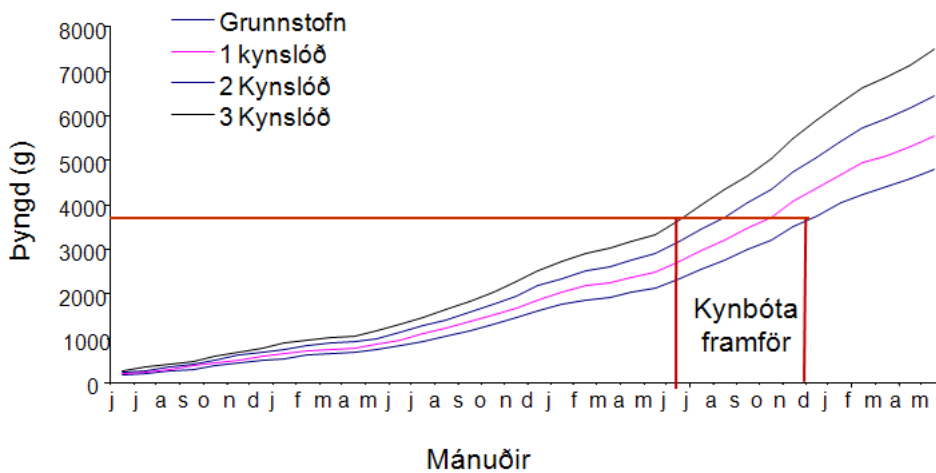
Niðurstöður raðgreininga á erfðamengi þorsks er m.a. vistaðar í fjölda alþjóðlega genabanka s.s. National Center for Biotechnology Information (www.ncbi.nlm.nih.gov) sem eru aðgengilegir öllum. Þó að raðgreining erfðamengis þorsks sé krefjandi er það mun meiri vinna að finna virkni eða hlutverk hvers erfðaeftnis (Nilsen 2007). Hægt er að sækja mikið magn upplýsinga í genabanka en það er þó ljóst að verðmætustu upplýsingarnar verða ekki birtar. Hluti af þessum upplýsingum hefur þó verið birtur s.s. niðurstöður kortlagningar á erfðamörkum sem m.a. er notuð við foreldragreiningu í norsku kynbótaverkefni og á jafnframt að vera grunnur að þróun að magnbundnum erfðavísam (Delghandi o.fl. 2003; Goetz o.fl. 2006; Wesmajervi o.fl. 2006; Steinvik o.fl. 2006a,b). Einnig hafa verið birtar niðurstöður rannsókna um erfðaeftni sem geta verið mikilvægar fyrir virkni ósérhæfða ónæmiskerfisins (Seppola o.fl. 2007). Ein vísindagrein hefur verið birt um níu erfðamörk í íslenskum þorski (Klara Björk Jakobsdóttir o.fl. 2005).

3.5.2 Kynbótaframfarir

Kynbótaframfarir og ætliðabil

Í fjölda kynbótaverkefna hefur verið sýnt fram á að hægt er að ná verulegum framförum á mikilvægum eiginleikum eldisfiska með kynbótum (Dunham o.fl. 2001). Kynbætur á þorski hér á landi lofa góðu og náðu kynbætt eldisseiði af árgangi 2006 (fyrsta val) 30% meiri vexti en villt þorskseiði (30-40 g). Of snemmt er þó að segja til um hvort að þessi munur haldi sér að sláturstærð (Theódór Kristjánsson og Agnar Steinarsson 2007). Algengt er að kynbótaframfarir fyrir vöxt sé 10-15% á milli kynslóða (Gjedrem 2000).

Bæði hér á landi og í Noregi er ætliðabilið við kynbætur á þorski þrjú ár. Bent hefur verið á að með því að stytta ætliðabilið niður í tvö ár megi auka kynbótaframfarir verulega. Þá er ekki valinn undaneldisfiskur m.t.t. kynþroska (Stefán Aðalsteinsson 1990). Vaxtarhraði er meiri hjá samkeppnislöndum (kafla 5) og með kynbótum á næstu árum verður fljótlega hægt að ná eldisþorski upp í markaðsstærð á innan við tveimur árum þegar framleiddur er smár fiskur (3-4 kg). Vegna lægri sjávarhita hér á landi eru fleiri ár í



Mynd 3.8. Myndin sýnir styttingu í eldistíma miðað 16 % kynbótaframför í vexti og sjávarhita í Ísafjarðardjúpi Theódór Kristjánsson 2006).

að þetta markmið náist. Ef samkeppnislönd taka þá ákvörðun að stytta ætliðabilið úr þremur árum í tvö munu kynbætur þar skila meiri framförum. Hér á landi er möguleiki að stytta ætliðabilið og ná klakþorski upp í hæfilega stærð með því að ala kynbóta-fiskinn við kjörhita í strandeldi. Ef farin verður sú leið að kynbæta ekki fyrir kynþroska og gelda allan fisk sem seldur er í matfiskeldi er í raun hægt að stytta ætliðabilið niður í eitt til tvö ár eða þegar fiskurinn verður fyrst kynþroska. Aðrir þættir geta þó hugsanlega komið í veg fyrir að hægt sé að fara þessa leið eins og léleg hrognagæði hjá smáum hrygnum.

Hermilíkan Stofnfisks

Í hermilíkani Stofnfisks var lagt mat á kynbótaframfarir út frá stærð grunnstofns og erfðastuðlum. Hermilíkanið var látið líkja samtímis eftir kynbótaframförum í vaxtaraukningu og lækkuu í tíðni kynþroska í 9 kynslóðir. Sett voru upphafsskilyrði um þróun í skyldleikarækt, arfgengi, erfðafylgni og valaðferðum. Alls voru prófaðar 40 mismunandi útfærslur miðað við mismunandi stærð grunnstofns og fjölda fjölskyldna. Kynbótaframfarir í vaxtaraukningu voru síðan umreiknaðar í styttingu á eldistíma miðað við sjávarhita og birt vaxtarlíkan fyrir íslenskan þorsk. Hermilíkanið gefur mjög góða mynd af kynbótaframförum í fiskeldi sé það borið saman við gagnasafn Stofnfisks og reynslutölur úr fiskeldi (Theódór Kristjánsson 2005). Niðurstöður í aukningu vaxtarhraða eru þær að miðað við 16% kynbótaframfarir í vexti styttest eldistíminn um 2 mánuði á milli kynslóða (mynd 3.8).

Hraðari kynbótaframfarir með DNA-ættgreiningu

Með því að samnýta hefðbundnar kynbætur og DNA-ættgreiningu má flýta framgangi kynbóta (Nævdal o.fl. 2003; Chistiakov o.fl. 2006). Hermun á kynbótakerfi sem byggir á blöndu af DNA-

ættgreiningu og hefðbundnum merkingum sýnir að auka má úrvalsstyrk verulega. Takmörkun á þeirri aðferð sem byggir eingöngu á merkingum er að það er háð tilviljun (slembni) hvort að einstaklingur með mestu vaxtargetu innan hvernar fjölskyldu er merktur. Hins vegar gefa merkingar gott mat á meðaltal og röðun hvernar fjölskyldu. Ef tekið er dæmi um sjókví með 100.000 þorskum og að baki séu 100 fjölskyldur þannig að innan hvernar fjölskyldu eru þá

1.000 einstaklingar. Gert er ráð fyrir að 50-100 einstaklingar verði merktir úr hverri fjölskyldu með PIT-merkjum og síðan fluttir í kvíar með öðrum seiðum. Við slátrun yrðu eiginleikar á merktum fiski metnir, svo sem flakanýting, gæði, lifun, lifrarhlutfall, slóghlutfall og vöxtur. Þessir eiginleikar yrðu síðan vegnir saman og fjölskyldum raðað upp eftir einkunnum. Mikill breytileiki í mikilvægum eiginleikum eldisþorsks skiptir miklu máli til að ná fram miklum kynbótaframförum. Á mynd 3.9 má sjá að mesti breytileiki eða stærsta staðalfrávik er þegar notað er DNA ættgreining ásamt hefðbundinni merkingu og má því vænta mestu kynbótaframfaranna. Hér er t.d. hægt að taka stærstu 250–500 einstaklingana (miðað við 100.000 í kví yrði það 0,25% – 0,50% úrvalsstyrkur) og ættgreiningu þá með DNA. Þeir einstaklingar sem kæmu úr bestu fjölskyldunum yrðu nýttir auk merktra einstaklinga (Theódór Kristjánsson og Agnar Steinarsson 2007).

3.5.3 Erfðabreyttir fiskar

Þegar rætt er um erfðabreytingar á fiskum er yfirleitt átt við að viðbótargenum úr sömu eða úr öðrum tegundum sé bætt inn í erfðamengi fiskisins. Koma má framandi genum inn með því að sprauta DNA inn í frjóvuguð hrogn (Jakob K. Kristjánsson o.fl. 2004). Aukinn áhugi er á að nota erfðabreytta fiska í fiskeldi. Yfir 20 fisktegundir hafa verið erfðabreyttar í rannsóknarskyni og í því sambandi má nefna Atlantshafslax og regnbogasilung (Beardmore og Porte 2003). Með því að erfðabreyta fiski er hægt að auka vöxt, efnaskiptahraða og frost- og sjúkdómaþol fiskisins (Zbikowska 2003) svo nokkuð sé nefnt. Ekki liggja fyrir upplýsingar um að þorskur hafi verið erfðabreyttur.

Öflugt rannsóknar- og þróunarstarf hefur verið stundað allt frá árinu 1985 þegar fyrsta vísindagreinin um erfðabreyttan fisk var birt. Tilraunir hafa yfirleitt verið framkvæmdar í rannsóknastöðvum. Í Kína hafa



verið gerðar tilraunir með eldi á erfðabreyttum vatnakarpa í stórum tjörnum, 1,7 hektara hver. Þar hefur náðst 55-80% betri vöxtur og fódurstuðull 1,1 á móti 1,35 hjá venjulegum vatnakarpa (Fu o.fl. 2005). Árið 2005 hafði ekki verið gefin heimild á notkun erfðabreyttra fiska í fiskeldi í neinu landi. Aftur á móti er notkun á erfðabreyttum plöntum orðin algeng í landbúnaði (Logar og Pollock 2005; Fu o.fl. 2005). ORF Líftækni nýtir t.d. þessa tækni við framleiðslu á sér-virkum próteinum fyrir læknisrannsóknir, lyf og iðnað með fræjum byggplöntunna (www.orf.is).

Aqua Bounty Technologies (www.aquabounty.com) hefur sótt heimild til Bandaríska matvælaeftirlitsins (FDA) um sölu á erfðabreyttum laxi fyrir Bandaríkjamarkað. Sótt er um heimild til notkunar á ákveðnum genum sem gera það mögulegt að framleiða erfðabreyttan lax á helmingi styttri tíma en eftir hefðbundnum leiðum (Fish Farming International 2006). Viss andstaða er gegn notkun erfðabreyttra lífvera í fiskeldi m.a. út frá umhverfissjónarmiði (kaflí 4). Samtök fiskeldismanna í Evrópu hafa tekið þá afstöðu að mæla ekki með notkun erfðabreyttra lífvera í fiskeldi. Engu að síður geta rannsóknir verið mikilvægar í þróun matvælaframleiðslu í heiminum í framtíðinni. Samtökin munu endurskoða afstöðu sína ef þróunin verður jákvæð með tilliti til afstöðu neytenda, öryggi matvæla og áhrif erfðabreyttra lífvera á umhverfið (FEAP, ártal vantar).

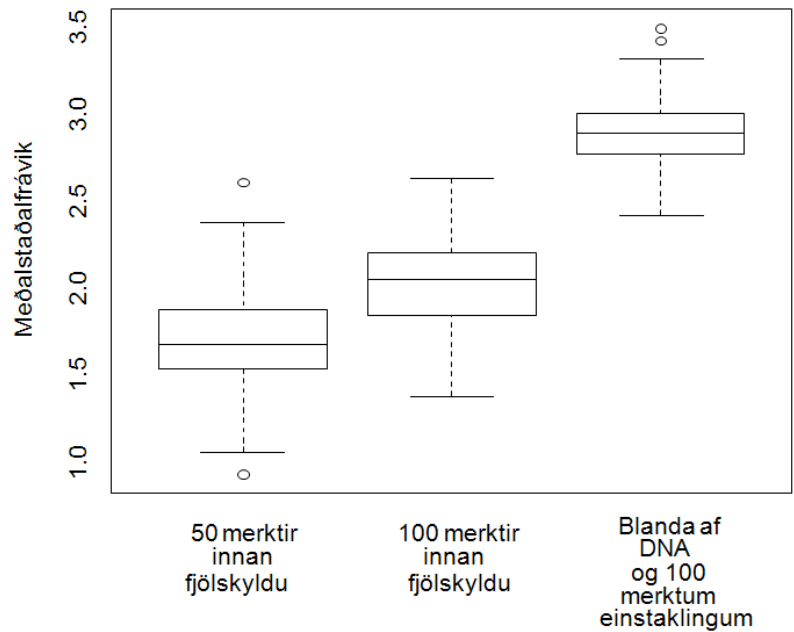
3.6 SVÓT-greining

Styrkleikar

Söfnun á grunnstofni hófst hér á landi árið 2003 og eiginlegar kynbætur hófust árið 2006. Við erum því komnir lengra í kynbótastarfinu en flest samkeppnislöndin, nema hugsanlega Norðmenn. Í upphafi kynbótaverkefnis IceCod höfðu starfsmenn bæði reynslu innan seiðaeldis og kynbóta. Ríkisstyrkt kynbótaverkefni Norðmanna þurfti í mun meira mæli að byggja á starfsmönnum sem höfðu ekki sambærilega reynslu og þeir starfsmenn sem hafa komið að kynbótaverkefni IceCod. Aftur á móti byggði Marine Breed í Noregi í upphafi síns kynbótaverkefnis á áratuga langri reynslu Akvaforsk í kynbótum.

Veikleikar

Ríkissjóður Íslands hefur lagt verulega fjármuni í kynbótaverkefni IceCod og þannig tryggt þessu verkefni farsælan framgang. Þrátt fyrir það er mun meira fjármagn lagt í kynbætur og erfðatækni í Noregi sem



Mynd 3.9. Niðurstöður úr hermun sem sýnir meðaltalstaðalfrávik bestu 5 einstaklinga úr 1.000 einstaklinga fjölskyldu miðað við mismunandi fjölda merktra fiska og DNA ætternisgreiningu (Theódór Kristjánsson og Agnar Steinarsson 2007).

getur gefið þeim ákveðið forskot ef þeim tekst að nýta vel þá fjármuni sem þeir hafa til ráðstöfunar. Í Noregi er einnig öflugara rannsóknaumhverfi m.t.t. fjölda vísindamanna.

Ógnanir

Miklar framfarir eru í R&D starfi innan erfðatækni og við framleiðslu á erfðabreyttum fiskum. Ein ógnunin fyrir íslenskt þorskeldi er að samkeppnislönd nái miklum framförum í mikilvægum eldiseiginleikum með erfðatækni. Í Noregi og Kanada hafa miklir fjármunir verið settir til erfðatæknirannsókna og ef vel tekst til er hætt á að það takist að framleiða eldisþorsk sem er betur aðlagður til eldis en íslenski eldisþorskurinn. Í Kanada (www.aquabounty.com) er unnið R&D starf með erfðabreytta fiska. Fram að þessu hefur ekki verið veitt heimild til eldis á erfðabreyttum fiskum en til lengri tíma er ekki hægt að útiloka að notkun þeirra verði heimiluð.

Tækifæri

Tækifærin liggja í að auka kynbótaframfarir fram yfir það sem gerist í Noregi eða í öðrum samkeppnislöndum, annað hvort með að bæta hefðbundnar kynbóttaaðferðir eða með hjálp erfðatækni.

3.7 Heimildir

- Albert Kjartansson Imsland, & Ólöf D.A. Jónsdóttir 2002. Is there a genetic basis to growth in Atlantic cod? *Fish and Fisheries* 3:36-52.
- Albert Kjartansson Imsland & Ólöf D.B. Jónsdóttir 2003. Linking population genetics and growth of Atlantic cod. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 13: 1-26.
- Albert Kjartansson Imsland, Ólöf D.B. Jónsdóttir & Anna K. Daniélsdóttir 2004. Nuclear DNA RFLP variation among



Tafla 3.2. Styrkleikar, veikleikar, ógnanir og tækifæri í kynbótum á þorski á Íslandi í samanburði við Noreg.

Styrkleikar	Veikleikar
- Búið að byggja upp grunnstofn og kynbætur hafnar. - Innan IceCod var í upphafi kynbótaverkefnisins bæði reynsla innan seiðaeldis og kynbóta.	Minna lagt í kynbætur á Íslandi, jafnframt er öflugra rannsóknarumhverfi í Noregi.
Ógnanir	Tækifæri
Að samkeppnislönd nái miklum framförum í mikilvægum eldiseiginleikum með erfðatækni.	Auka kynbótaframfarir fram yfir það sem gerist í Noregi eða öðrum samkeppnislöndum.

Atlantic cod in south and south-east Icelandic waters. *Fisheries Research* 67: 227-233.

Albert Kjartansson Imsland, Foss, A., Folkvord, A., Stefansson, S.O. & Jonassen T.M. 2005. Genotypic response to photoperiod treatment in Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Aquaculture* 250: 525-532.

Albert Kjartansson Imsland, Foss, A., Nævdal, G., Johansen, T., Stefansson, S.O. & Jonassen, T.M. 2007. New haemoglobin genotypes in Atlantic cod, *Gadus morhua*: possible relation with growth. *Comparative Biochemistry and Physiology* 147A: 955-960.

Annal report 2003. Institute of Aquaculture – Annal Report 2001-2002. University of Sterling. 29 p. (www.aquaculture.stir.ac.uk/annreps/AR_01-02.pdf).

Annal report 2006. Institute of Aquaculture – Annal Report 2004-2005. University of Sterling. 33 p. (www.aquaculture.stir.ac.uk/annreps/AR_04-05.pdf).

Anon 2004a. Report – Evaluation of the idea to use cod as a species for genome sequencing and functional genomic studies in Norway. 12 pp (www.forskningsradet.no/servlet/Satellite?ssbinary=true&blobcol=urlvedleggfil&blobheader=application%2Fpdf&blobkey=id&blobtable=Vedlegg&blobwhere=1099340120927).

Anon 2006a. Stortingsproposisjoner nr. 1 (2006–2007). For busjettåret 2007. Fiskeri- og kystdepartementet.

Anon 2006b. Plan for koordinert satsing på torsk. Oppdrett og fangstbasert akvakultur. Innvasjon Norge, Norges forskningsråd og næringen. 2001-2010. Oppdatert april 2006. *Innvasjon Norge – rapport nr. 2*. 49 s.

Anon 2007. Canadian aquaculture - R&D Review. (www.aquacultureassociation.ca/RandD/R&D-2007.pdf).

Beardmore, J.A. & Porte, J.S. 2003. Genetically modified organisms and aquaculture. *FAO Fisheries Circular* No. 989. 35 p.

Bijma, P. & Woolliams, J.A., 2000. Prediction of rates of inbreeding in populations selected on best linear unbiased prediction of breeding value. *Genetics* 156:361– 373

Bowman, S., Higgins, B., Stone, C., Kozera, C. Curtis, B.A., Bussey, J.T., Kimball, J., Symonds, J. & Johnson, S.C. 2007. Generation of genomics resources for Atlantic cod (*Gadus morhua*): Progress and plans. *Bulletin of the Aquaculture Association of Canada* 105-3: 24-30.

Bekkevold, D., Hansen, M. M. & Nielsen, E. E. 2006. Genetic impact of gadioid culture on wild fish populations: predictions, lessons from salmonids, and possibilities for minimizing adverse effects. *ICES Journal of Marine Science* 63: 198-208.

Brown, J.A., Minkoff, G. & Puvanendran, V., 2003. Larviculture of Atlantic cod (*Gadus morhua*): progress, protocols and problems. *Aquaculture* 227: 357–372.

Brander, K. (eds.) 2005. Spawning and life history information for North Atlantic cod stocks Prepared by the ICES/ GLOBEC Working Group on Cod and Climate Change. Prepared by the ICES/GLOBEC Working Group on Cod and Climate Change *ICES Cooperative Research Report*

Collectives No. 274. 162 p.

Bulmer, M. G. 1971. The effect of selection on genetic variability. *Amer. Nat.* 105: 201–211

Chistiakov, D.A. Hellemans, B. & Volckaert, F.A.M. 2006. Microsatellites and their genomic distribution, evolution, function and applications: A review with special reference to fish genetics. *Aquaculture* 255: 1–29.

Dahle, G. 2006. Application for grant regarding R&D and innovation (www.fiskaaling.no/documents/00005.doc).

Dahle, G., Jørstad, K. E., Rusaas, H. E., and Ottera, H. 2006. Genetic characteristics of broodstock collected from four Norwegian coastal cod (*Gadus morhua*) populations. *ICES Journal of Marine Science* 63: 209-215.

Delghandi M., Mortensen A. & Westgaard J.I. 2003. Simultaneous analysis of six microsatellite markers in Atlantic cod (*Gadus morhua*): a novel multiplex assay system for use in selective breeding studies. *Marine Biotechnology* 5:141–148.

Dunham, R.A., Majumdar, K., Hallerman, E., Bartley, D., Mair, G., Hulata, G., Liu, Z., Pongthana, N., Bakos, J., Penman, D., Gupta, M., Rothlisberg, P. & Hoerstgen-Schwark, G. 2001. Review of the status of aquaculture genetics. In, Subasinghe, R.P., Bueno, P., Phillips, M.J., Hough, C., McGladdery, S.E. & Arthur, J.R. (ritstj.). *Aquaculture in the Third Millennium. Technical Proceedings of the Conference on Aquaculture in the Third Millennium*, Bangkok, Thailand, 20-25 February 2000. bls. 137-166. NACA, Bangkok and FAO, Rome.

Dykes, A. 2007. Scotland's Machrihanish cod hatchery. *Hatchery International* 8(4): 25-27.

Einar Árnason, Snæbjörn Pálsson & Aðalgeir Arason 1992. Gene flow and lack of population differentiation in Atlantic cod, *Gadus morhua* L., from Iceland, and comparison of cod from Norway and Newfoundland. *Journal of Fish Biology* 40: 751-770.

Einar Árnason, Snæbjörn Pálsson, Aðalgeir Arason & Vilhjálmur Þorsteinsson 1992b. Stofngerð þorsks (*Gadus morhua*) við Ísland og víðar metin með breytileika í DNA orkukorna (mtDNA). *Líffræðistofnun Háskólans. Rit nr. 33*. 51 bls.

Einar Árnason, Petersen, P.H., K. Kristinsson, H. Sigurgíslason & Snæbjörn Pálsson 2000. Mitochondrial cytochrome *b* DNA sequence variation of Atlantic cod from Iceland and Greenland. *Journal of Fish Biology* 56: 409-430.

Fish Farming International 2006. FDA gives transgenic salmon approval. *Fish Farming International* 33(12): 3.

Fjalestad, K.T. & Mortensen, A. 2005. Avlsarbeid. I, Otterå, H., Taranger G.L. & Borthen, J. (red.). *Oppdrett av torsk – næring med fremtid*. Norsk Fiskeoppdrett AS. s. 49-61.

Fjalestad, K.T., Fevolden, S.-E., Jørstad, K. & Olsen, I. 2006. Avl og genetikk – nye arter. I, Thomassen, M., Gudding, R., Norberg, B. & Jørgensen, L. (red.). *Havbruksforskning: Fra merd til mat*. Norges forskningsråd. s. 270-285.

FAO 2007. The Domestic Animal Diversity Network (DAD-Net)). Sjá: <http://www.fao.org/dad-is>

FEAP (The Federation of European Aquaculture Producers), ártal vantar). A code of conduct for European aquaculture.



- (www.aquamedia.org/FileLibrary/6/FEAP%20Code%20of%20Conduct.pdf).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2007. *State of world aquaculture: 2006*. FAO Fisheries technical paper No. 500, 145pp.
- Fu, C., Hu, W., Wang, Y. & Zhu, Z. 2005. Developments in transgenic fish in the People's Republic of China. *Rev. sci. tech. off. int. Epiz.* 24 (1): 299-307.
- FUGU 2007. Årsrapport 2006 for FUGE. Forskningsrådet. (www.forskningsradet.no/servlet/Satellite?blobcol=urldata-&blobheader=application%2Fpdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1177090527723&ssbinary=true)
- Gjedrem, T. 2000. Genetic improvement of cold-water fish species. *Aquaculture Research* 31:25-33.
- Gjerde B., Terjesen B.F., Barr Y., Lein I. & Thorland I. 2003. Stor arvelg variasjon i vekstevne hos torsk. *Norsk fiskeoppdrett* 28: 40-41.
- Gjerde B., Terjesen B.F., Barr Y., Lein I. & Thorland I. 2004. Genetic variation for juvenile growth and survival in Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Aquaculture* 236: 167-177.
- Goddard, S.V., Kao, M.H. & Fletcher, G.L. 1999. Population differences in antifreeze production cycles of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) reflect adaptations to overwintering environment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56: 1991-1999.
- Goetz, F. W., McCauley, L., Goetz, G. W. & Norberg, B. 2006. Using global genome approaches to address problems in cod mariculture. *ICES Journal of Marine Science* 63: 393-399.
- Gróa Pétursdóttir, Begg, G., & Guðrún Marteinsdóttir 2006. Discrimination between Icelandic cod (*Gadus morhua* L.) populations from adjacent spawning areas based on otolith growth and shape. *Fisheries Research* 80:182-189.
- Guðmundur Óli Hreggviðsson 2006. Erfðir ljóslotu og kynþroski í þorski. Þorskeldiskarfan – Ráðstefna um fjögur ný þorskeldisverkefni við Ísafjarðardjúp í fundarsal Þróunarseturs Vestfjarða, 21. Júní 2006.
- Guðrún Marteinsdóttir, Björn Gunnarsson & Suthers, I. M. 2000. Spatial variation in hatch date distributions and origin of pelagic juvenile cod in Icelandic waters. *ICES Journal of Marine Science* 57:1184-1197.
- Guðrún Marteinsdóttir, Heiðrún Guðmundsdóttir, Sigurður Guðjónsson, Anna K. Daniélsdóttir, Þóroddur F. Þóroddsson & Leó A. Guðmundsson 2007. Lokaskýrsla vegna AVS verkefnisins: Áhrif eldis á umhverfi og villta stofna. Háskóli Íslands, Umhverfisstofnun, Veidimálastofnun, Hafrannsóknastofnunin og Skipulagsstofnun. 34 bls.
- Hill W. G. 2000. Maintenance of quantitative genetic variation in animal breeding programmes. *Livestock Production Science* 63: 99-109.
- Ingibjörg G. Jónsdóttir, Campana, S. & Guðrún Marteinsdóttir 2006a. Otolith shape and temporal stability spawning groups of Icelandic cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science* 63: 1501-1512.
- Ingibjörg G. Jónsdóttir, Campana, S. & Guðrún Marteinsdóttir 2006b. Stock structure of Icelandic cod (*Gadus morhua*) based on otolith chemistry. *Journal of Fish Biology* 69 (Supplement C): 136-150.
- Jakob K. Kristjánsson, Sigríður Hjörleifsdóttir & Guðmundur Óli Hreggviðsson 2004. Erfðatækni til nota við kynbætur. Fræðing landbúnaðarins 2004 s. 187-190.
- Jordan, A.D., Lampe, J.F., Grisdale-Helland, B., Helland, S.J., Shearer, K.D. & Steffensen, J.F. 2006. Growth of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) with different haemoglobin subtypes when kept near their temperature preferenda. *Aquaculture* 257: 44-52.
- Liu, Z.J. & Cordes, J.F. 2004. Review: DNA marker technologies and their applications in aquaculture genetics. *Aquaculture* 238:1-37.
- Logar, N. & Pollock, L.K. 2005. Transgenic fish: is a new policy framework necessary for a new technology? *Environmental Science & Policy* 8: 17-27.
- Kettunen, A. & Fjalestad, K.T. 2006. Resistance to vibriosis in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.): First challenge test results. *Aquaculture* 258: 263-269.
- Kettunen, A., Serenius, T. & Fjalestad, K.T. 2007. Three statistical approaches for genetic analysis of disease resistance to vibriosis in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Journal of Animal Science* 85: 305-313.
- Klara Björg Jakobsdóttir, Þóra Dögg Jörundsdóttir, Sigurlaug Skírnisdóttir, Sigríður Hjörleifsdóttir, Guðmundur Ó. Hreggviðsson, Anna Kristín Daniélsdóttir & Christophe Pampoulie. 2006. Nine new polymorphic microsatellite loci for the amplification of archived otolith DNA of Atlantic cod, *Gadus morhua* L. *Molecular Ecology Notes* 6: 337-339.
- Kolstad, K. 2007. Det genetiske grunnlaget for effektiv avl på torsk er dokumentert. Havbruk – en næring i vekst. Faktaart (www.forskningsradet.no/havbruk). 3 s.
- Kolstad, K., Thorland, I., Refstie, T. & Gjerde, B. 2006a. Body weight, sexual maturity, and spinal deformity in strains and families of Atlantic cod (*Gadus morhua*) at two years of age at different locations along the Norwegian coast. *ICES Journal of Marine Science* 63: 246-252.
- Kolstad K., Thorland, I., Refstie, T. & Gjerde, B. 2006b. Genetic variation and genotype by location interaction in body weight, spinal deformity and sexual maturity in Atlantic cod (*Gadus morhua*) reared at different locations off Norway. *Aquaculture* 259: 66-73.
- Marcil, J., Swain, D.P. & Hutchings, J.A. 2006. Genetic and environmental components of phenotypic variation in body shape among populations of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Biological Journal of the Linnean Society* 88: 351-365.
- Marine Farm 2007. Annual Report 2006. Marine Farms ASA. 36 pp. (www.marinefarms.com/files/Finacial%20Info/mafa_-_annual_report_2006.pdf).
- Mortensen, A. 2007. Nasjonalt avlsprogram for torsk. Foredrag på Nettverkmøte "Sats på torsk". 14. – 16. februar 2007. Scandic City Hotel, Bergen.
- Miszal I., 2006. Challenges of application of marker assisted selection – a review. *Animal Science Papers and Reports*. 24 (1): 5-10
- Nilsen, F. 2007. Genom og genomforskning – Kva er dette? Dahl, E., Hansen, P.K., Haug, T., Karlsen, Ø., (red.) 2007. Kyst og havbruk 2007. *Fisken og havet*, særnr. 2–2007:180-182.
- Nævdal, G., Fevolden, S.-E., Hansen, M.M., & Vangan, O. 2003. Muligheter og problemer knyttet til alvsarbeid på aktuelle marine arter i oppdrett. Norges forskningsråd. 52 s.
- O'Leary, D.B., Coughlan, J., Dillane, E., Maccarthy, T.V. & Cross, T.T. 2007. Microsatellite variation in cod *Gadus morhua* throughout its geographic range. *Journal of Fish Biology* 70 (Supplement C): 310-335
- Ólöf D.A. Jónsdóttir, Albert K. Imsland, Anna K. Daniélsdóttir, Vilhjálmur Þorsteinsson & Nævdal, G. 1999. Genetic differentiation among Atlantic cod in Icelandic waters: synaptophysin (Syp I) and haemoglobin (Hb I) variation. *Journal of Fish Biology* 54: 1259-1274.
- Ólöf D.B. Jónsdóttir, Anna K. Daniélsdóttir & Nævdal, G. 2001. Genetic differentiation among Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) in Icelandic waters: temporal stability. *ICES Journal of Marine Science* 58: 114-122.
- Ólöf D.B. Jónsdóttir, Albert K. Imsland, Anna K. Daniélsdóttir & Guðrún Marteinsdóttir 2002. Genetic heterogeneity and growth properties of different genotypes of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) at two spawning sites off south Iceland. *Fisheries Research* 55: 37-47.
- Otterlei, E., Nyhammer, G., Folkvord, A. & Stefansson, S. O.



1999. Temperature and size-dependent growth of larval and early juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*): a comparative study of Norwegian coastal cod and northeast Arctic cod. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56: 2099-2111.
- Otterå, H., Agnalt, A.-L. & Jørstad, K. E. 2006. Differences in spawning time of captive Atlantic cod from four regions of Norway, kept under identical conditions. *ICES Journal of Marine Science* 63: 216-223.
- Pampoulie, C., Þóra Dögg Jörundsdóttir, Agnar Steinarrson, Gróa Pétursdóttir, Magnús Örn Stefánsson & Anna Kristín Daniëlsdóttir 2006a. Genetic comparison of experimental farmed strains and wild Icelandic populations of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Aquaculture* 261: 556-564.
- Pampoulie, C., Ruzzante, D. E., Chosson, V. Þóra Jörundsdóttir, Taylor, L., Vilhjálmur Þorsteinsson, Anna K. Daniëlsdóttir & Guðrún Marteinsdóttir 2006b. The genetic structure of Atlantic cod (*Gadus morhua*) around Iceland: insight from microsatellites, the *Pan I* locus, and tagging experiments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63: 2660-2674.
- Purchase, C.F. & Brown, J.A. 2000. Interpopulation differences in growth rates and food conversion efficiencies of young Grand Banks and Gulf of Maine Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences* 57: 2223-2229.
- Purchase, C.F. & Brown, J.A. 2001. Stock-specific changes in growth rates, food conversion efficiencies, and energy allocation in response to temperature change in juvenile Atlantic cod. *Journal of Fish Biology* 58:36-52.
- Puvanendran, V. & Brown, J.A. 1998. Effect of light intensity on the foraging and growth of Atlantic cod larvae: interpopulation difference? *Marine Ecology Progress Series* 167: 207-214.
- Reed, H. D. Frankham F. 2001. How closely correlated are molecular and quantitative measures of genetic variation? A meta-analysis. *Evolution* 55(6):1095-1103.
- Refstie, T. 2007. Status/informasjon om avlsarbeidet i torskoppdrett. Marine Breed as. Foredrag på Nettverkmøte "Sats på torsk". 14. - 16. februar 2007. Scandic City Hotel, Bergen.
- Rye, M. 2005. MarineBreed AS offers genetically improved material to the cod farming industry. MarineBreed AS / Akvaforsk Genetics Center AS. Lecture on the conference Cod Farming in Nordic Countries. Nordica hotel, 6.-8. sept. 2005.
- Seppola, M., Stenvik, J., Steiro, K., Solstad, T., Robertsen, B. & Jensen, I., 2007. Sequence and expression analysis of an interferon stimulated gene (ISG15) from Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Developmental and Comparative Immunology* 31: 156-171.
- Slate, J., David, P., Dodds, K.G., Veenvliet, B.A., Glass, B.C., Broad, T.E. & McEwan 2004. Understanding the relationship between the inbreeding coefficient and multilocus heterozygosity: Theoretical expectations and empirical data. *Heredity* 93: 255-265
- Stefán Aðalsteinsson 1990. Kynbætur á eldislaxi. *Eldisfréttir* 6 (3): 9-11.
- Stenvik J., Wesmajervi M.S., Damsgård B. & Delghandi M. 2006a. Genotyping of pantophysin I (Pan I) of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) by allele-specific PCR. *Molecular Ecology Notes* 6: 272-275.
- Stenvik J., Wesmajervi M.S., Falestad, K.T., Damsgård B. & Delghandi M. 2006b. Development of 25 gene-associated microsatellite markers of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Molecular Ecology Notes* 6: 1105-1107.
- Svåsand, T., Jørstad, K.E., Otterå, H. & Kjesbu, O.S. 1996. Differences in growth performance between Arcto-Norwegian and Norwegian coastal cod reared under identical conditions. *Journal of Fish Biology* 49:108-119.
- Sundby, S. 2000. Recruitment of Atlantic cod stocks in relation to temperature and advection of copepods populations. *Sarsia* 85: 277-298.
- Symonds, J., Garber, A., Puvanendran, V., Robinson, A., Neil, S., Trippel, E., Walker, S., Boyce, D., Gamperl, K., Lush, L., Nardi, G., Powell, F., Walsh, A. & Bowman, S. 2007. Family-based Atlantic cod (*Gadus morhua*) broodstock development. *Bulletin of the Aquaculture Association of Canada*. 105-3: 39-46.
- Theódór Kristjánsson 2005. Hermiþorskur - grunnstofn þorsk-kynbóta - rannsóknarverkefni lokið. Fréttir á vef RANNÍS þann 24. maí (www.rannis.is/sjodir/rannsoknasjodur/rannsoknsjodur--frettasida/nr/594/).
- Theódór Kristjánsson 2006. IceCod - Kynbætur og seiðaelði. Erindi flutt á aðalfundi Landssambands fiskeldisstöðva 23. maí 2006. (www.lfh.is/documents/IceCod2006Theodor.pdf).
- Theódór Kristjánsson & Jónas Jónasson 2006. Kynbótaverkefni IceCod ehf. fyrir þorskeldi. Niðurstöður fyrstu þriggja ára. Lokaskýrsla til AVS rannsóknasjóðs í sjávarútvegi. 29. bls.
- Theódór Kristjánsson & Agnar Steinarrson 2007. Kynbætur og seiðaelði. Framvinduskýrsla til AVS sjóðsins. 25 bls.
- Theódór Kristjánsson, Jónas Jónasson, Snorri Gunnarsson & Vigfús Jóhannsson 2004. Þorskeldiskynbætur á Íslandi. Í: Björn Björnsson & Valdimar Ingi Gunnarsson (ritstj.), Þorskeldi á Íslandi. Hafrannsóknastofnunin. *Fjölrit* 111: 175-182.
- Torrissen, O. 2003. CodGen: Genetic mapping and Functional biology in Atlantic cod. (www.fishgen.no/_data/page/5358/CodGen.pdf).
- Torrissen, O. 2007. Internasjontalt samarbeid på forskning på torsk. Foredrag på Nettverkmøte "Sats på torsk". 14. - 16. februar 2007. Scandic City Hotel, Bergen
- van der Meeren, T. & Jørstad, K.E. 2001. Growth and survival of Arcto-Norwegian and Norwegian coastal cod larvae (*Gadus morhua* L.) reared together in mesocosms under different light regimes. *Aquaculture Research* 32:549-563.
- van der Meeren, T., Jørstad, K.E., Solemdal, P. & Kjesbu, O.S. 1994. Growth and survival of cod larvae (*Gadus morhua* L.): comparative enclosure studies of Northeast Arctic cod and coastal cod from western Norway. *ICES Journal of Marine Science Symp.* 198:633-645.
- Walsh B. & Henderson D. 2004. Microarrays and beyond: What potential do current and future genomics tools have for breeders? *Journal of Animal Science* 82 (E. Suppl.): E292-E299.
- Wesmajervi, M.S., Westgaard, J.-I. & Delghandi, M. 2006. Evaluation of a novel pentaplex microsatellite marker system for paternity studies in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Aquaculture Research* 37: 1195-1201.
- Wijekoon, M.P.A., Puvanendran, V. & Brown, J.A. 2003. Interpopulation difference in growth of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) - Implication for broodstock development. *Aquaculture Association of Canada Special Publications* nr.6: 21-23.
- Zbikowska, H.M. 2003. Fish can be first - advances in fish transgenesis for commercial applications. *Transgenic Research* 12: 379-389.