

Nýsköpun & neytendur
Consumers & Products

Vinnsla & virðisaukning
Value Chain & Processing

Erfðir & eldi
Genetics & Aquaculture

Líftækni & lífefni
Biotechnology & Biomolecules

Mælingar & miðlun
Analysis & Consulting

Öryggi & umhverfi
Food Safety & Environment



Kvikasilfur og önnur óæskileg snefilefni í urriða úr Þingvallavatni

Jóhannes Sturlaugsson
Hrönn Ólína Jörundsdóttir
Franklín Georgsson
Helga Gunnlaugsdóttir

Öryggi og umhverfi

Skýrsla Matís 48-09
Desember 2009

ISSN 1670-7192

Kvikasilfur og önnur óæskileg snefilefni í urriða úr Þingvallavatni

MATÍS
Desember 2009

Jóhannes Sturlaugsson¹⁾
Hrönn Ólína Jörundsdóttir²⁾
Franklín Georgsson^{2,3)}
Helga Gunnlaugsdóttir²⁾

Laxfiskar, Hraðastaðir 1, 270 Mosfellsbær¹⁾

Matís, Vínlandsleið 12, 113 Reykjavík²⁾

Háskóli Íslands, Matvæla- og næringarfræðideild, Reykjavík³⁾



HÁSKÓLI ÍSLANDS





Titill / Title	Kvikasilfur og önnur óæskileg snefilefni í urriða úr Þingvallavatni / Mercury and other undesirable trace elements in brown trout (<i>Salmo trutta trutta</i> L.) from Lake Thingvallavatn		
Höfundar / Authors	Jóhannes Sturlaugsson, Hrönn Ólína Jörundsdóttir, Franklín Georgsson, Helga Gunnlaugsdóttir		
Skýrsla / Report no.	48-09	Útgáfudagur / Date:	Desember 2009
Verknr. / project no.	0619 - 1866		
Styrktaraðilar / funding:	Umhverfis- og orkusjóður Orkuveitu Reykjavíkur (UOOR), Matís ohf, Laxfiskar ehf		
Ágrip á íslensku:	Markmið verkefnisins var að afla upplýsinga um magn kvikasilfurs og annarra óæskilegra snefilefna í Þingvallauriðum með hliðsjón af stærð þeirra og forsögu með manneldissjónarmið að leiðarljósi. Í því markmiði fólst enn fremur að þeim niðurstöðum skyldi komið á framfæri við almenning sem og hagsmunaaðila á Þingvallasvæðinu. Rannsóknin var unnin í samvinnu Matís og Laxfiska. Samtals voru rannsakaðir 43 urriðar á stærðarbilinu 23-98 cm og 0,13-14 kg. Urriðarnir sem rannsóknin tók til voru veiddir á árunum 2002-2008. Fyrir nokkurn hluta þeirra lágu fyrir upplýsingar frá hefðbundnum merkingum. Auk þess voru tekin sýni af nokkrum fiskum sem höfðu forsögu sem var ítarlega skráð með mælitækjum m.t.t. atferlis þeirra og umhverfis. Niðurstöður þeirra athugana á atferlisvistfræði fiskanna sýndu að hluti þeirra sótti í að dvelja við heitar lindir sem renna í Þingvallavatn undan Nesjahrauninu. Líffræðilegir þættir fiskanna s.s. stærð, aldur, kyn, kynþroski o.fl. voru skráðir fyrir hvern einstakling og sýni tekin af holdinu og snefilefni greind. Niðurstöður snefilefnagreininga á holdi fiskanna sýna að töluverðar líkur eru á að fiskar sem eru lengri en 60 cm, innihaldi kvikasilfur í meira magni en leyfilegt er samkvæmt íslenskum og evrópskum reglugerðum (0,5 mg/kg kvikasilfur). Samkvæmt tilmælum Matvælastofnunar (MAST), sem er opinber eftirlitsaðili með matvælum á Íslandi, er ekki leyfilegt að selja fisk sem inniheldur meira magn kvikasilfurs en 0,5 mg/kg. Niðurstöður rannsóknarinnar sýndu að sterk fylgni var milli lengdar urriðans og magns kvikasilfurs í honum. Lífmögnun er líklegasta ástæðan fyrir háum styrk kvikasilfurs í urriðum úr Þingvallavatni sem verða venju fremur stórir og gamlir, þar sem styrkur kvikasilfurs eykst eftir því sem ofar dregur í fæðukeðjunni. Þingvallaurriðinn er efst í fæðukeðjunni þar sem hann étur mestan sinn aldur aðallega bleikju, fyrst og fremst murtu afbrigðið. Æskilegt er að frekari rannsóknir fari fram á þessu sviði til að fá mynd af uppruna kvikasilfurs í Þingvallaurriðanum og feril uppsöfnunar þess.		
Lykilorð á íslensku:	Kvikasilfur, Urriði, Þingvallavatn, Lífmögnun, Hámarksgildi, Lýðheilsa, Matvælaöryggi		



Summary in English:

The aim of the project was to study the occurrence and quantity of mercury as well as other undesirable trace elements in brown trout from Lake Thingvallavatn in relation to the fish size and their life history. Public health was the main issue of this study. The aim was also to disseminate the results to the public and all stakeholders. The study was carried out in co-operation of Matis and Salmon and Trout Research (Laxfiskar). In total, 43 brown trout individuals, 23 - 98 cm long and weighing 0,13 - 14 kg, were examined. The trout were caught during the years 2002 to 2008. Information from conventional tagging studies were available for some of the individuals. For six fish additional detailed results from studies on their behavior and corresponding environment was available, due to use of electronic tags (data storage tags and ultrasonic tags). These studies on the behavioral ecology of the trout showed that some of the individuals preferred areas where hot spring water runs into Lake Thingvallavatn at the Nesjahraun area. Individual were measured and examined in order to get information on their size, condition and life history. Flesh samples were taken from the fish for trace element analyses. The results of the study show that there is a positive linear relationship between the mercury concentration and the fish length. These analytical results showed that there is significant probability that fish that is 60 cm in length or larger, can contain mercury in quantity that exceeds the maximum allowed limit according to Icelandic and European regulations (0,5 mg/kg mercury). According to the Icelandic Food and Veterinary Authority (MAST), food products containing mercury in higher concentration than 0,5 mg/kg should not be sold or distributed. Biomagnification is presumed to be the cause for high concentration of mercury in the bigger and older brown trout from Lake Thingvallavatn as the results show that brown trout is a top predator in Lake Thingvallavatn and feeds mainly on charr (*Salvelinus alpinus* L.), especially the pelagic morph *murta*. Further research is needed on the origin of mercury in brown trout in Lake Thingvallavatn and on the route of the corresponding biomagnifications in the food chain of the lake.

English keywords:

Mercury, Brown trout, Lake Thingvallavatn, Biomagnification, Maximum levels, Public health, Food safety

Efnisyfirlit

Bls

1.	Inngangur	1
2.	Markmið	2
3.	Rannsóknasvæðið og veiðar.....	2
3.1.	Rannsóknasvæðið.....	2
3.2.	Veiðar á urriða til sýnatöku	5
4.	Efni og aðferðir úrvinnslu	6
4.1.	Úrvinnsla – Fiskifræðileg gögn.....	6
4.2.	Staðlar og efni - Snefilefnagreiningar	7
4.3.	Viðmiðunarsýni og gæðaeftirlit - Snefilefnagreiningar	7
4.4.	Aðferðarfræði - Snefilefnagreiningar	8
4.5.	Tækjaupplýsingar - Snefilefnagreiningar	9
5.	Niðurstöður og umræða.....	9
5.1.	Stærð, aldur og ástand urriðanna	9
5.2.	Forsaga urriðanna út frá merkingum	13
5.3.	Forsaga urriðanna með hliðsjón af æti og ætisvenjum.....	16
5.4.	Kvikasilfur og önnur snefilefni í fiskholdi Þingvallaurriða.....	18
5.5.	Neysla urriða úr Þingvallavatni.....	23
6.	Lokaorð.....	24
7.	Þakkarorð	24
	Heimildir	26

1. Inngangur

Matís og rannsóknafyrirtækið Laxfiskar framkvæmdu rannsókn á magni kvikasilfurs (Hg) í urriða úr Þingvallavatni. Rannsóknin hafði manneldissjónarmið að leiðarljósi og var framkvæmd til að draga upp mynd af magni kvikasilfurs í Þingvallaurriðum með hliðsjón af stærð þeirra og forsögu.

Sjávarfang og ferskvatnsfiskar eru þær fæðugerðir sem innihalda að jafnaði mest af kvikasilfri. Kvikasilfur er frumefni sem kemur einkum fyrir í náttúrunni sem steintegundin *sinnóber* (HgS = kvikasilfurssúlfíð, e. cinnabar). Ein helsta náttúrulega uppspretta kvikasilfurs er rakin til eldgosa og veðrunar bergs. Iðnaður og önnur mengandi starfsemi manna veldur einnig losun kvikasilfurs í andrúmsloft, höf og vötn. Kvikasilfur (Hg) er rokgjarnt og berst í gufuhvolfið á heitari svæðum og getur flust þannig langar vegalengdir og fallið niður á kaldari stöðum. Kvikasilfur getur borist með grunnvatnsstraumum inn á vatnasvið Þingvallavatns. Auk þess berst það þangað, eins og inn á önnur svæði, með regnvatni.

Örverur í seti og vatni umbreyta kvikasilfri í metýlkvikasilfur, sem er eittraðra en frumefnið sjálft. Þetta form kvikasilfurs safnast að einhverju leyti fyrir í öllum sjávardýrum og ferskvatnsfiskum (Bloom 1992, Porcella 1994) og styrkur eykst í lífverum eftir því sem ofar dregur í fæðukeðjunni. Hæstan styrk kvikasilfurs er jafnan að finna í ránfiskum sem eru efstir í fæðukeðjunni og í því meira magni sem þeir verða stærri og eldri (Boening 2000). Vegna þessa getur styrkur kvikasilfurs í stórum og gömlum ránfiski verið tugum þúsunda meiri en í vatninu sem hann syndir í.

Metýlkvikasilfur getur verið mjög eittrað, einkum fyrir þroska heilans. Faraldursfræðilegar rannsóknir hafa t.d. sýnt fram á að neikvæð tengsl eru milli magns metýlkvikasilfurs sem fóstur í móðurkviði er útsett fyrir og vitsmunalegs þroska þeirra eftir fæðingu (Amin-Zaki ofl. 1974; Harada ofl. 1995; Myers ofl. 2000). Kvikasilfureitrun á meðgöngu getur valdið áhrifum á taugakerfið, t.d. á vöðvaviðbrögð, vöðvaspennu og fínhyfingar barna (Steuerwald ofl. 2000, Grandjean 1997, Cordier ofl. 2002). Sömuleiðis hefur mikil neysla á fiski eða sjávarfangi á meðgöngu verið tengd þroskafrávikum meðal barna (Cohen ofl. 2005, Axelrad ofl. 2007).

Árið 2002 tók Ísland þátt í norrænni rannsókn þar sem magn kvikasilfurs í urriða úr Elliðavatni, Mývatni, Stóra-Fossvatni og Þingvallavatni var mælt (heimasíða Umhverfisstofnunar¹). Magn kvikasilfurs í fiski úr þessum vötnum var á bilinu 0,01 – 0,05 mg/kg, sem eru mjög lág gildi en samtals voru 40 fiskar mældir. Undantekning á þessu var hinsvegar stórríði úr Þingvallavatni (6 fiskar) en í honum mældist kvikasilfur á bilinu 0,2 – 0,9 mg/kg. Í þeim tilvikum var um að ræða 60 – 90 cm langan fisk sem var á bilinu 4 til 7 kg að þyngd (óbirt gögn Umhverfisstofnunar). Þessar niðurstöður voru m.a. ein af forsendum þess að Matís og Laxfiskar ehf lögðu upp með rannsókni á magni kvikasilfurs í Þingvallaurriða. Fyrri rannsóknir á styrk þungmálma, m.a. kvikasilfurs, blýs, kadmíns og arsens, í fjórum afbrigðum af bleikju (murtu, dvergbleikju, kuðungableikju og sílableikju) og urriða úr Þingvallavatni sýna að styrkur efnanna er lágur í Þingvallavatni, en í þessum rannsóknum var magn kvikasilfurs á bilinu 0,024 – 0,095 mg/kg votvigt. Þessar rannsóknir bentu til þess að nokkur munur væri á milli bleikjuafbrigða í styrk einstakra þungmálma, t.d. kvikasilfurs, kadmíum og arsens (Guðjón Atli Auðunsson 1995, Guðjón Atli Auðunsson 1996, Guðjón Atli Auðunsson 1997, Davíð Egilsson ofl. 1999).

Samkvæmt íslenskum reglugerðum (Reglugerð 697/2008) sem efnislega fylgja reglugerðum Evrópusambandsins má hámarksgildi kvikasilfurs í laxfiskum sem dreifa á eða selja sem matvæli ekki fara yfir 0,5 mg/kg, m.t.t. öryggis matvælanna fyrir heilsu neytenda. Magn kvikasilfurs í hluta

stórrurriða úr Þingvallavatni í fyrrgreindri rannsókn Umhverfisstofnunar er yfir þessum viðmiðunarmörkum.

Matvælaöryggisstofnun Sameinuðu þjóðanna, JECFA, hefur gert áhættumat vegna kvikasilfursmengunar í matvælum (WHO 2000). Matið er byggt á faraldursfræðilegum rannsóknum sem unnar hafa verið á svæðum þar sem fiskneysla er mikil og magn kvikasilfurs í fæðu hátt. Niðurstöður þessa mats gera ráð fyrir því að vikulegt hámarksmagn kvikasilfurs í fæðu megi samsvara 1,6 µg fyrir hvert kg af líkamsþyngd neytendanna innan viðkvæmasta hópsins, sem eru fóstur í móðurkviði og smábörn. Því þarf sérstaklega að gæta þess að barnshafandi konur og konur með börn á brjósti takmarki neyslu á matvælum sem líklegust eru til að innihalda hærra magn kvikasilfurs. Til þessa hóps teljast einnig konur á barneignaraldri sem hyggjast verða barnshafandi. Fyrir aðra hópa er talið óhætt að neyta sem svarar tvöföldu magni þessa hámarksgildis, eða sem svarar til 3,2 µg/kg líkamspunga/viku. Þegar tekið er tillit til þessara tilmæla er ráðlagður vikuskammtur af fiski með kvikasilfursinnihaldi upp á 0,9 mg/kg um 250 g að hámarki fyrir 70 kg einstakling. Það samsvarar um einni til tveimur máltíðum af fiski á viku sem inniheldur þetta mikið kvikasilfursmagn. Samskonar viðmið fyrir barnshafandi konur og konur með börn á brjósti væri því að þær skyldu ekki borða stórrurriða með kvikasilfursinnihald upp á 0,9 mg/kg oftar en 2-3 sinnum á ári (Sveriges Livsmedelsverk: Peterson-Grawé ofl. 2007, WHO 2000, WHO 2004, heimasíða Umhverfisstofnunar¹).

2. Markmið

Rannsóknin hafði það megin markmið að afla upplýsinga um magn kvikasilfurs í Þingvallaurriðum með hliðsjón af stærð þeirra og forsögu með manneldissjónarmið að leiðarljósi. Í því markmiði fólst ennfreður að þeim niðurstöðum skyldi komið á framfæri við almenning sem og hagsmunaaðila á Þingvallasvæðinu. Rannsókninni var ennfreður ætlað að skrásetja magn ýmissa annarra snefilefna í Þingvallaurriða samhliða magngreiningu á kvikasilfri. Einnig hafði rannsóknin það viðbótarmarkmið að afla upplýsinga um möguleg staðbundin áhrif af völdum affallsvatns frá Nesjavallavirkjun til hækkunar á magni kvikasilfurs og annarra ólífrænna snefilefna í urriða sem nýtir slóðina við Nesjahraunið. Til þess að ná viðbótarmarkmiðinu var einungis lagt upp með að skoða hvort áberandi munur fyndist á milli Nesjahraunssvæðisins og annarra veiðisvæða varðandi magn kvikasilfurs í urriða þar sem fjárhagur verkefnisins rúmaði ekki þá umfram sýnatöku sem þurft hefði til að framkvæma ítarlegan samanburð á milli svæða í þessu tilliti.

3. Rannsóknasvæðið og veiðar

3.1. Rannsóknasvæðið

Þingvallasvæðið tengist eldgosa- og sprungubeltinu sem liggur þvert yfir Ísland. Það er hluti flekaskila Atlantshafshryggjarins sem liggja norðan úr Íshafi og suður eftir öllu Atlantshafi. Frá því að síðustu ísöld lauk með tilheyrandi landmótun fyrir um 10 þúsund árum hefur eldvirkni leikið mikilvægt hlutverk í landmótun þessa svæðis, sem sjá má af því að 50% vatnasviðsins er hulið hrauni sem runnið hefur á þessu skeiði (Kristján Sæmundsson 2002).

Vettvangur rannsókna er stærsta náttúrulega stöðuvatn Íslands, Þingvallavatn, sem nær yfir 84 km² svæði og hefur að baki sér 1000 km² vatnasvið (Árni Snorrason 2002). Vatnið er í um 100 m hæð

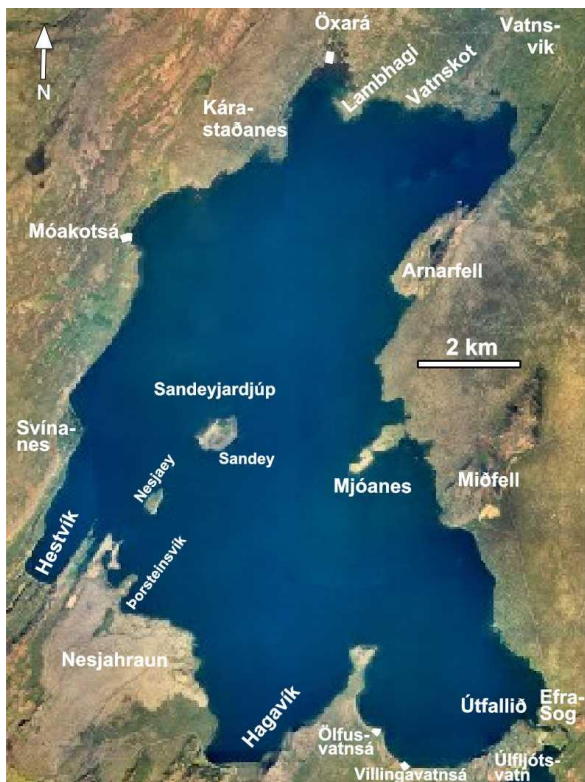
yfir sjávarmáli. Mesta dýpi er 114 m (Sandeyjardjúp), en meðaldýpi er 34 m (1. mynd). Rúmmál Þingvallavatns er tæplega 2900 milljón rúmmetrar (Sigurjón Rist 1990).

Úr Þingvallavatni renna um 100 m³/s. Innrennsli í Þingvallavatn er að mestu leyti komið frá grunnvatni (um 90 m³/s), en yfirborðsrennsli til vatnsins er um 5m³/s og úrkoma sem fellur á Þingvallavatn um 4m³/s (Árni Snorrason 2002). Uppruni grunnvatnsins er úrkoma sem fellur á vatnasviðið. Hluti úrkomunnar er strax gleypur af lekum jarðlögum vatnasviðsins og hluti hennar fellur á jökla en kemur síðar við sögu sem jökulbráð sem einnig rennur neðanjarðar til Þingvallavatns. Drjúgur hluti þess lindavatns sem streymir í Þingvallavatn er þannig komið alla leið norðan frá Langjökli og mestur hluti lindavatnsins streymir í Þingvallavatn neðan vatnsborðs þess þó svo að hluti þess velli fram í fjörum vatnsins og um opnar gjár sem að því liggja. Megnið af þessu grunnvatni rennur í Þingvallavatn norðanvert (um 50 m³/s) en grunnvatnsrennsli austan megin í vatnið er einnig umtalsvert (um 25m³/s). Hiti þessa lindavatns er á bilinu 2,7 °C og upp í ríflega 4 °C (Freysteinn Sigurðsson og Guttormur Sigbjarnarson 2002). Grunnvatnsrennsli sunnan vatns og vestan er dreifðara og minna að umfangi (um 15 m³/s), þannig hefur rennslið um Nesjahraun og Hagavíkurhraun verið áætlað um 2 m³/s. Lindavatnið sem sprettur fram undan Nesjahrauni er heitara en á öðrum svæðum og það ásamt efnainnihaldi þess vitnar til jarðhitaáhrifa. Það grunnvatn er að hluta til komið alla leið úr Langjökli eftir sprungum sem liggja mjög djúpt (mörg hundruð metra – fleiri kílómetra dýpi). Auk náttúrulegra linda fellur undan Nesjahrauninu grunnvatn sem komið er frá affallsvatni frá jarðgufuvirkjun Orkuveitu Reykjavíkur að Nesjavöllum (Zarandi 2007).

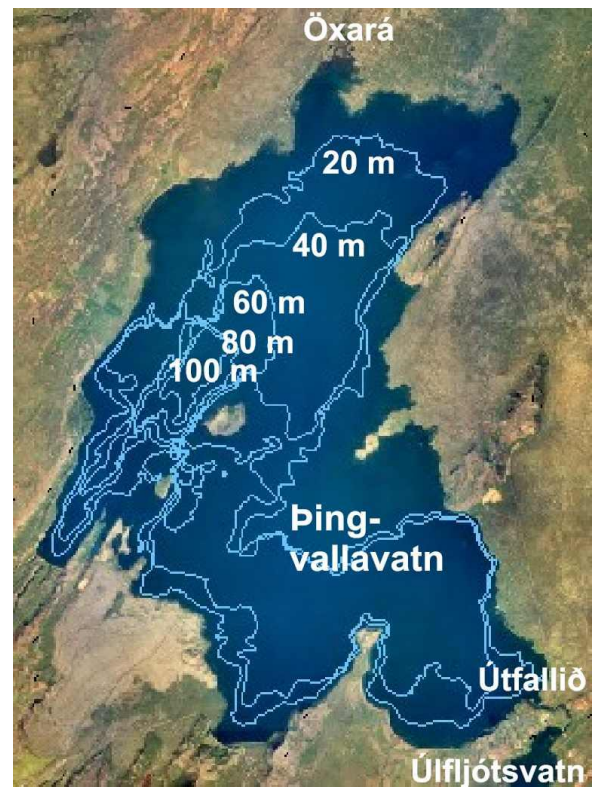
Í Þingvallavatni er að finna urriða sem til samans eru nefndir Þingvallaurriðar og teljast til s.k. stórrurriða, en þeir ná mikilli stærð vegna þess að þeir ná flestir fyrst kynþroska þegar þeir eru orðnir tiltölulega stórir og rosknir (Össur Skarphéðinsson 1996). Líferni Þingvallaurriða hefur verið sveipað dulúð fram á síðari ár því lífnaðarhættir urriðans voru ekki þekktir. Með nýrri rannsóknartækni sem byggir einkum á notkun rafeindafiskmerkja er hinsvegar gerlegt að kortleggja ferðir og hegðun urriðans í vatninu árið um kring (Jóhannes Sturlaugsson 2001 og 2005).

Á mynd 1 má sjá veiðisvæði urriðanna sem magngreiningarnar á kvikasilfursinnihaldi í fiskholdi byggðust á. Svæði 1-4 eru hin eiginlegu sýnatökusvæði, en á þeim voru veiddir 41 urriði af þeim 43 sem rannsakaðir voru (1. mynd). Hinir tveir voru veiddir á svæði 5 í útfalli Þingvallavatns, Efra-Sogi.

Hitafar Þingvallavatns er eðli málsins samkvæmt snar þáttur í lífi fiskanna sem vatnið nýta. Eins og mælingar úr Sandeyjardjúpi Þingvallavatns á 2. mynd sýna þá er mikil árstíðabrigði að finna á því búsvæði sem einkennir mestan hluta Þingvallavatns svo sem venja er í ferskvatni hérlandis. Hinsvegar sýnir sama mynd einnig þær öfgar sem er að finna í hitafari innan Þingvallavatns, þar sem mikils hita gætir á takmörkuðu svæði allra næst landi við Nesjahraun, sem veldur því að árstíðabrigði eru þar lítil m.t.t. vatnshitans (1. og 2. mynd).



A



B

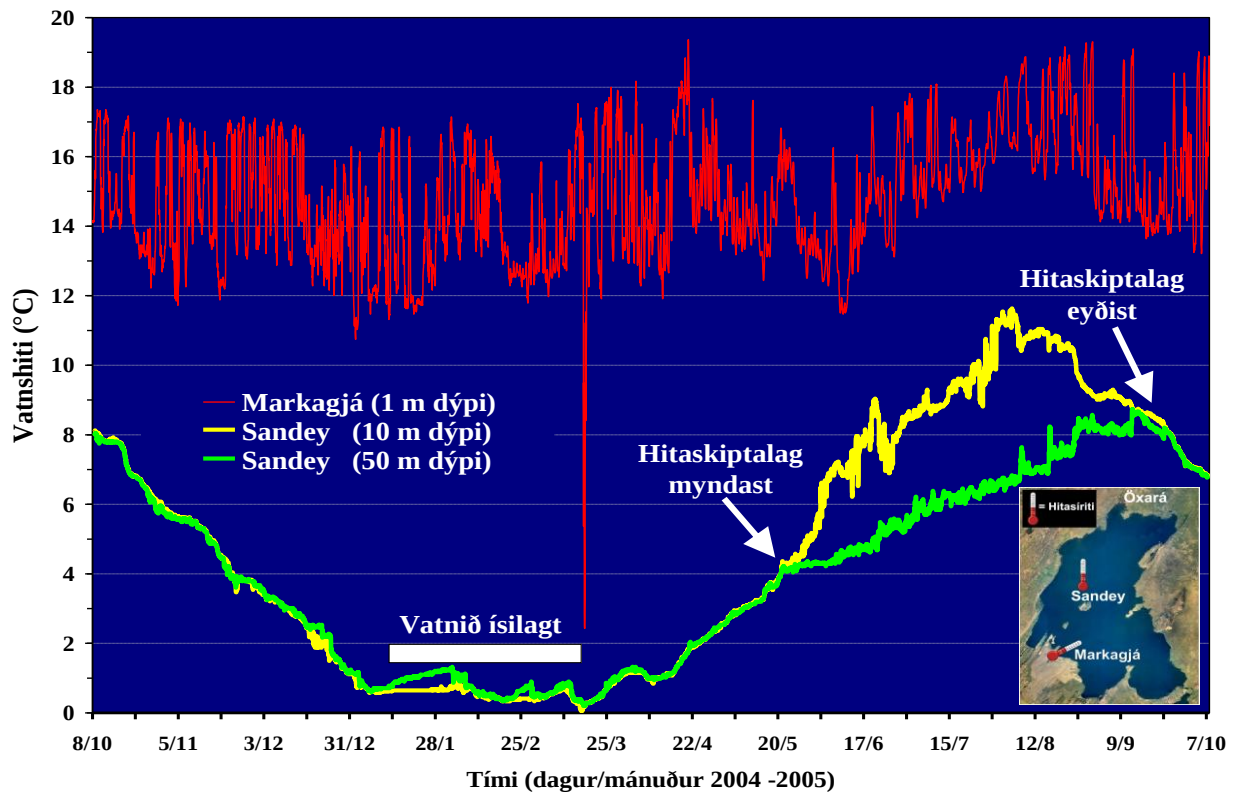


C



D

1. mynd. Loftmyndakort A sýnir Þingvallavatn ásamt ýmsum staðarheitum til viðmiðunar. Loftmyndakort B sýnir botndýpi Þingvallavatns með hliðsjón af jafndýptarlínunum yfir botndýpi, en dýpst er vatnið um 114 m. Loftmyndakort C sýnir veiðisvæði urriðanna sem kvikasilfur var magngreint úr. Á loftmyndakorti D er Nesjahraunssvæðið útlistað sérstaklega. Loftmyndirnar sem kortin eru grundvölluð á eru frá Loftmyndum ehf og dýptargögnin frá Orkustofnun.



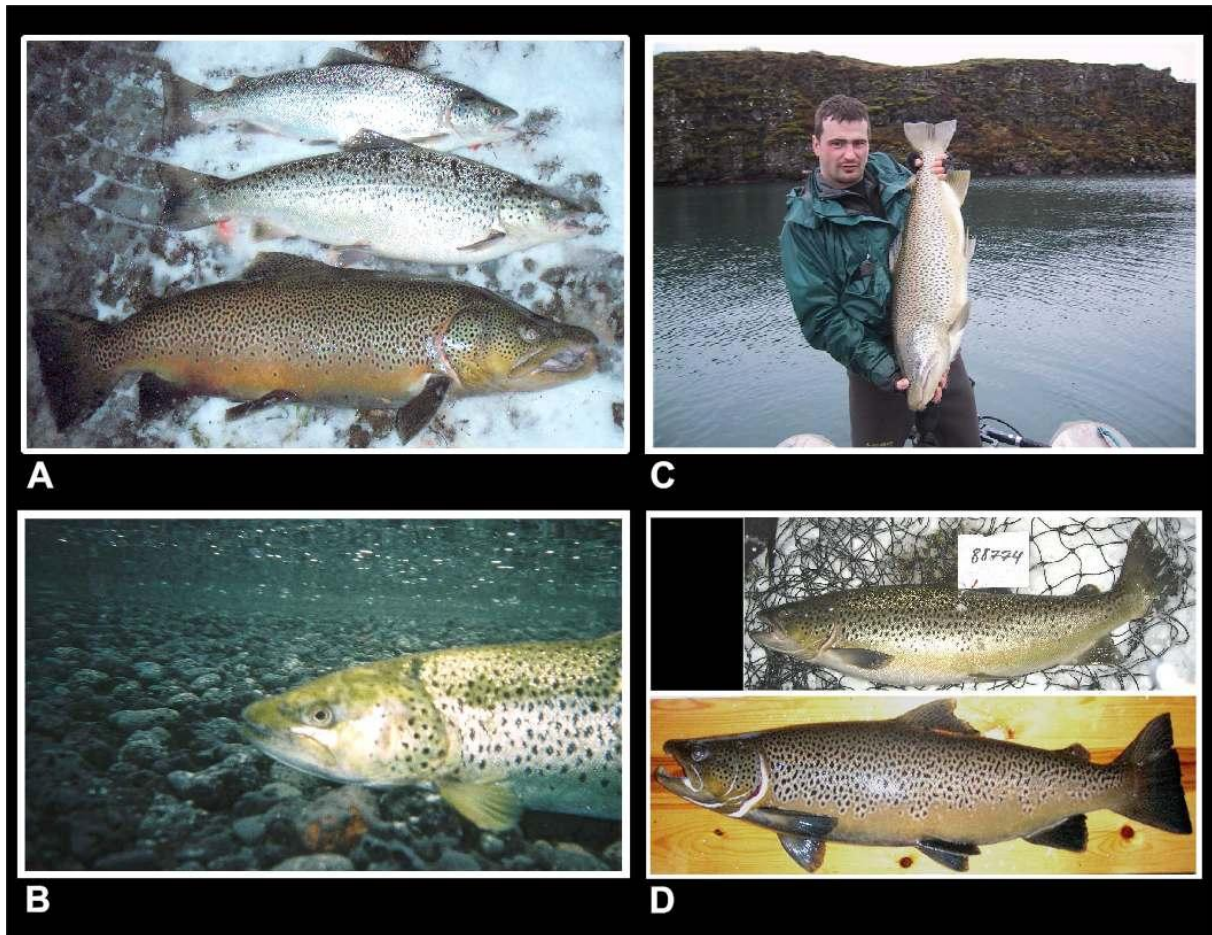
2. mynd. Hitafar í Þingvallavatni út frá síritandi mælingum tilgreindra mælistöðva. Myndin sýnir hitamælingar sem framkvæmdar voru með síritandi mælum á 1 klst fresti yfir 1 ár, fyrir tímabilið 8. október 2004 til 8. október 2005. Annarsvegar í Markagjá (á 1 m dýpi miðsvæðis) og hinsvegar í Sandeyjardjúpi (á 10m og 50m dýpi). Markagjá gengur út í Þorsteinsvík og er eitt þeirra fjörusvæða undan Nesjahrauninu þar sem umtalsvert magn af heitu lindavatni streymir fram undan hrauninu. Afstaða mælistöðva er sýnd á innfelldri mynd. Merkt er inn á myndina yfir hvaða tímabil vatnið var ísilagt. Ennfremur er tilgreint hvenær hitaskiptalag sumarsins tók að myndast í maí og hvenær það brotnaði upp og hvarf í september.

Heitt vatn frá starfsemi Nesjavallavirkjunar sem rennur undan Nesjahrauninu í Þingvallavatn ásamt náttúrulegum heitum lindum er af tvennum toga. Megnið af vatninu er upphaflega kalt lindavatn sem er hitað í gufuafllavirkjuninni og það sem ekki er nýtt fellur að hluta til Þingvallavatns einkum að sumrinu þegar hitaveituvatn er minna nýtt. Auk þess sem eitthvert magn af heitu vatni með annan uppruna rennur þessa sömu leið. Hitamælingar Laxfiska úr Markagjá sem sýndar eru á 2. mynd sýna ennfremur að á þessu eina ári sem þar er um að ræða er tilhneigingin sú að vatnshitinn sé að hækka að jafnaði. Þetta er í samræmi við niðurstöður mælinga á vatnshita á fjörusvæðum Nesjahrauns á vegum Orkuveitu Reykjavíkur yfir árabilið 2000-2006 sem sýndu að á þessu tímabili hækkaði vatnshitinn yfir tímabilið. Samkvæmt þessum rannsóknum var hæsta hitastig lindavatns þar sem það sprettur fram í Þingvallavatn við jaðar Nesjahrauns tæpar 29 °C (Zarandi 2007). Frá þessum tíma hefur orðið breyting til batnaðar því Orkuveitan betrubætti meðhöndlun á þessu umframvatni. Þar er fyrst og fremst um að ræða meiri niðurdælingu á því vatni, niður í jarðlög sem hafa ekki beinan samgang við yfirborðslogin. Strax árið 2007 voru þessar aðgerðir farnar að hafa áhrif til lækkunar á vatnshita á tilteknum fjörusvæðum Nesjahrauns (Zarandi 2007).

3.2. Veiðar á urriða til sýnatöku

Þingvallaurriðarnir sem voru magngreindir m.t.t. kvikasilfurs o.fl. snefilefna í fiskholdi var aflað í sértækum rannsóknaveiðum, sem og úr netaveiði bænda og frá stangveiði (3. mynd). Fiskum var safnað úr Þingvallavatni á árabilinu 2002 til 2008 og þar af komu sýni frá árunum 2002-2007 úr sýnasafni Laxfiska. Megin markmið rannsókna var að afla gagna um kvikasilfur í Þingvallaurriða út frá manneldissjónarmiðum. Því var lögð áhersla á að stærðardreifing fiskanna spannaði allt frá minnstu urriðunum til þeirra stærstu sem mögulega gætu lent á borðum neytenda. Einnig var

mikilvægt að afla sýnanna frá mörgum svæðum innan vatnsins til að fá mat á ástand í þessum efnum gegnamsneitt fyrir Þingvallaurriðann. Á sama hátt með vísun í mögulega hnappdreifingu í ástandi fiskanna í tíma og rúmi var það verkefninu til góða að sýnataka stóð yfir í nokkur ár.



3. mynd. Myndir af nokkrum urriðum úr þeim hópi sem kvikasilfur var magngreint úr í rannsókninni. Á mynd A má sjá 3 urriða sem veiddir voru á hrygningartíma undan Nesjahrauni í október 2008. Þar af eru tveir silfurslegnir geldfiskar sem voru 55 cm og 64 cm langir og dökkur rígvænn hængur í hrygningarbúningi, 88cm langur og 8,35 kg að þyngd, en á mynd B má sjá sama fisk fjórum og hálfu ári fyrr við sleppingu í Hagavíkinni í kjölfar merkingar. Þá var hann 45 cm langur og 0.98 kg þungur. Á mynd C er þyngsti urriði sem veiðst hefur í Þingvallavatni áratugum saman í höndum veiðimannsins Ólafs Guðmundssonar. Sá fiskur var 96 cm langur og 14 kg að þyngd. Síðasta myndin (D) sýnir hæng við merkingu undan Nesjahrauni í febrúar 2008 (efri myndin) og sama fisk við endurheimtu á riðstöðvunum í Öxará í október 2008. Sá fiskur veiddist síðan í net vestan megin í Þingvallavatni.

4. Efni og aðferðir úrvinnslu

4.1. Úrvinnsla – Fiskifræðileg gögn

Fiskum var safnað úr Þingvallavatni (2002 - 2008) og hver einstaklingur í sýnasafninu þyngdar- og lengdarmældur og kyn- og aldursgreindur. Aldur fiskanna var lesinn úr hreistri þeirra. Kynþroski var ákvarðaður við slægingu og magasýni tekið til að athuga hvert væri aðalæti fiskanna (fæðugerð með >50% af þyngd magainnihalds). Kynþroskastig fiskanna er ákvarðað með hefðbundnum hætti (Dahl 1943). Framsetning á kynþroska urriðanna hér er með þeim hætti að fiskunum er skipt í tvo hópa, geldfiska og hrygningarfiska. Holdastuðull (K) var reiknaður með formúlu 1:

$$K = \frac{\text{Þyngd}}{\text{Sýlingarlengd}^3} \cdot 100$$

þar sem þyngdin er í grömmum og lengdin í sentimetrum. Stuðullinn er mælikvarði á holdafar fiskisins (Bagenal og Tesch 1978). Holdsýni samanstóðu af holdi úr roðflettu hægra og vinstra flaki úr hverjum einstaklingi. Flökin úr hverjum einstaklingi voru sameinuð og einsleituð í hakkara og geymd í frysti þar til efnamælingar fóru fram. Hluti urriðanna sem notaðir voru til magngreiningar á kvikasilfri voru endurheimtir fiskar frá atferlisrannsóknnum Jóhannesar Sturlaugssonar. Þeir fiskar sem báru rafeindafiskmerki (5 stk) gáfu dýrmætar upplýsingar um svæðin sem fiskarnir nýttu og hegðun þeirra. Magngreiningar snefilefnanna byggðu einnig á sýnum af urriðum sem báru önnur fiskmerki (12 stk). Þar var um að ræða bæði útvortis einstaklingsmerki og innvortis merki frá hópmerkingum seiða (örmerki). Þessir fiskar veittu ýmsar gagnlegar upplýsingar til viðmiðunar, s.s. um dvalarstaði fiskanna við veiði og endurveiði, vöxt o.fl. Holdsýni voru nýtt til að magngreina ál (Al), arsen (As), kadmín (Cd), kvikasilfur (Hg) og blý (Pb) en auk þess var magn vatns og fitu greint með faggiltum efnagreiningaraðferðum í sýnunum. Lifur fiskanna var þyngdarmæld og tekin í sýni með möguleg framtíðarnot í huga.

Rafeindafiskmerkin sem notuð eru má flokka út frá virkni í tvær megin gerðir. Annarsvegar s.k. mælimerki og hinsvegar s.k. hljóðsendimerki. Báðar gerðirnar eru festar á bak fiskanna við hlið bakugga, sem gerir kleift að ná merkjunum af fiskunum án þess að aflífa þá. Flest merkin eru stillt þannig að þau starfi í 2-3 ár. Mælimerkin eru frá Stjörnu-Odda hf, en þau mæla og skrá á ákvörðuðum tímafresti upplýsingar um dýpið sem fiskarnir fara um og samhliða hitann á því dýpi. Því til viðbótar skrá sum merkjanna fleiri þætti s.s. varðandi líkamsstöðu fiskanna og áttina sem synt er í hverju sinni. Almennt eru merkin látin skrá á 10-60 mínútna fresti, en stundum örar fyrir tiltekna daga, allt niður í 5 sekúndna mælifrest. Mælimerkin þarf að endurheimta til að geta nýtt mæligögnin. Hljóðsendimerkin senda hljóðbylgjur þ.a.s. hvert merki hefur sína tilteknu tíðni sem einkennir fiskinn er merkið ber. Síritandi skráningardufl eru sett út á þau svæði sem til athugunar eru hverju sinni og hlusta þau eftir hljóðum frá sendimerkjunum sem fiskarnir bera. Þau skrá viðveru fiskanna þegar þeir eru innan skynjunarsviðsins sem eftir aðstæðum spannar á bilinu 600-1000 m radíus út frá duflunum.

4.2. Staðlar og efni - Snefilefnagreiningar

Notast var við afjónað vatn (18.2 MΩ/cm), vetnisperoxíð (H₂O₂) 30% frá Fluka, af hreinleikagráðunni TraceSelect og saltpéturssýru (HNO₃) 65% frá Merck af hreinleikagráðunni Suprapure. Allir staðlar (stök frumefni í lausn) voru keyptir frá Peak Performance og eru vottaðir staðlar (Certified Reference Standards).

4.3. Viðmiðunarsýni og gæðaeftirlit - Snefilefnagreiningar

Með hverri snefilefnakeyrslu voru keyrð viðmiðunarsýni með þekktan styrk kvikasilfurs (DORM-2) til að fylgjast með gæðum niðurstaðanna. Einnig tók Matís þátt í alþjóðlegri samanburðarrannsókn (Quality Assurance of Information for Marine Environmental Monitoring in Europe, QUASIMEME, (www.quasimeme.org)). Þessar niðurstöður eru sýndar í töflu 1.

Tafla 1. Niðurstöður gæðaeftirlits Matís (styrkur greininga í mg/kg).

Efni	CRM	Greining 1	Greining 2	Greining 3	Greining 4	Meðaltal	Uppgefið gildi	Z-Score*
Hg	QUASIMEME	0,48				0,48	0,59	-1,3
As	QUASIMEME	1,6				1,6	1,7	-0,60
Cd	QUASIMEME	140				140	160	-0,8
Hg	DORM-2	5,5	5,2	5,4	5,3	5,4	4,6	1,2
As	DORM-2	16	17	16	17	16	18	-0,73
Cd	DORM-2	0,041	0,040	0,038	0,035	0,039	0,043	-0,74

*Z-Score fyrir QUASIMEME er reiknað út frá öllum innsendum niðurstöðum fyrir hverja tilraun. Z-Score fyrir DORM-2 er reiknað út frá jöfnunni $Z\text{-Score} = (\text{Mælt gildi} - \text{Rétt gildi}) / (\text{Rétt gildi} * 0,125)$. $|Z| < 2$ er fullnægjandi, $2 < |Z| < 3$ er vafasamt og $|Z| > 3$ er ófullnægjandi.

Auk hefðbundinnar eftirfylgni rannsóknarvinnunnar til að tryggja réttar mæliniðurstöður snefilefnagreininganna þá var viðbótarmat lagt á marktækni mælinganna. Þetta var gert með þeim hætti að 3 urriðasýni til viðbótar voru greind hjá Matís og sömu sýni send til mælinga hjá norski faggiltri rannsóknarstofu (National Institute of Nutrition and Seafood Research, NIFES) sem notar sömu mæliaðferð (NMKL 186 2007). Einnig var sýnið úr alþjóðlegu samanburðarrannsókninni (QUASIMEME) sent með til þeirrar rannsóknarstofu. Niðurstöðurnar eru sýndar í töflu 2. Niðurstöðurnar frá NIFES eru gefnar upp með 25% óvissu (uppgæfið af NIFES).

Tafla 2. Kvikasilfur í urriða- og samanburðarsýnum greind bæði hjá Matís ohf og NIFES. Styrkurinn er finnst upp í mg/kg votvigt. Einnig er uppgæfið meðalgildi fyrir QUASIMEME sýni.

	Matis	S.D.	NIFES	Óvissa (25%)	Efri mörk	Neðri mörk
M-09-1340 Urriði	0,53	0,02	0,51	0,13	0,64	0,38
M-09-1342 Urriði	0,05	0,01	0,04	0,01	0,05	0,03
M-09-1350 Urriði	0,82	0,01	0,63	0,16	0,79	0,47
QUASIMEME sýni	0,48	0,03	0,65	0,16	0,81	0,49
QUASIMEME uppgæfið meðalgildi:	0,59					

Eins og kemur fram í töflu 2, þá er munur á milli niðurstaðna rannsóknarstofanna. Sá munur er hinsvegar í öllum tilvikum utan einu innan vikmarka. Þessi munur er hins vegar ekki óeðlilegur í snefilefnagreiningum og er ein helsta ástæða fyrir þátttöku rannsóknarstofa í samanburðarrannsóknum.

Í QUASIMEME samanburðarrannsókninni sem var framkvæmd vorið 2009, voru samþykkt 28% vikmörk frá uppgæfni meðaltalsgildi fyrir kvikasilfur sem þýðir að það er u.þ.b. 60% munur á rannsóknarstofunum með hæsta og lægsta leyfilega gildi.

Með sýnunum voru líka greind tóm sýni (blankar) til að fylgjast með mögulegri bakgrunnsmengun innan rannsóknarstofunnar og mengun sem gæti orsakast af meðhöndlun sýnanna. Greiningarmörk (limit of quantification, LOQ) voru skilgreind sem fjórum sinnum styrkurinn í tömu sýnunum.

Snefilefni í sýnunum voru magngreind frá 10 punkta staðalkúrfu. Ný staðalkúrfa var gerð daglega frá 1000 mg/L byrjunarlausn í 10% HNO₃ (v/v). Indíum (In) er notaður sem innri staðall (internal standard).

4.4. Aðferðarfræði - Snefilefnagreiningar

Aðferðin sem notuð var við niðurbrot sýnanna var byggð á (Sloth et al., 2005) og aðferðarlýsingu NMKL nr 186-2007 (www.nmkl.org) og bestuð miðað við aðstæður hjá Matís, s.s. örbylgjuofn (Mars5, CEM, North Carolina, USA) sem notaður er við niðurbrot sýnanna. Niðurbrotið var framkvæmt með aðstoð örbylgju. Hvert sýni var mælt frá grunni í þrísýni. Hvert þrísýni var 200 mg (nákvæmni upp á 0,1 mg) í þar til gerðar niðurbrotsbombur og bætt við 3 ml HNO₃ og 1.5 ml H₂O₂. Bombunum var því næst lokað og settar inn í örbylgjuofninn þar sem sýnin voru brotin niður. Að loknu niðurbroti voru sýnin færð yfir í 50 ml polypropylen rör og þynnt að 30 ml. Snefilefni í sýnunum voru því næst mæld með inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS).

Hitastigsforritið sem notað var við niðurbrot sýnanna í örbylgjuofninum er sett upp í töflu 3.

Tafla 3. Hitastigsforrit örbylgjuofns.

Stig	Afl W	%	Tími hitastigsaukningar mm:ss	Hámarks þrýstingur Psi	Hitastig °C	Hræring	Biðtími mm:ss
1	1600	100	15:00	800	200	Nei	10:00

4.5. Tækjaupplýsingar - Snefilefnagreiningar

Notast var við Agilent 7500ce ICP-MS (Agilent Technologies, California, USA) til að mæla snefilefnin í þingvallaurriðanum. Stillingar massagreinisins eru gefnar upp í töflu 4.

Tafla 4. Stillingar massagreinis (ICP-MS)

<i>ICP-MS stillingar</i>	
RF afl (W)	1500
Flæði sýna gass (L/min)	0.9
Flæði plasma gass (L/min)	12
Flæði viðbótargass (Auxiliary gas) (L/min)	0.17
Nebuliser	Micro mist
Spray klefi	Standard
Sample depth	8 cm
Keilur	Nikkel
Lens voltage (V)	-2 til 3 (tune)

5. Niðurstöður og umræða

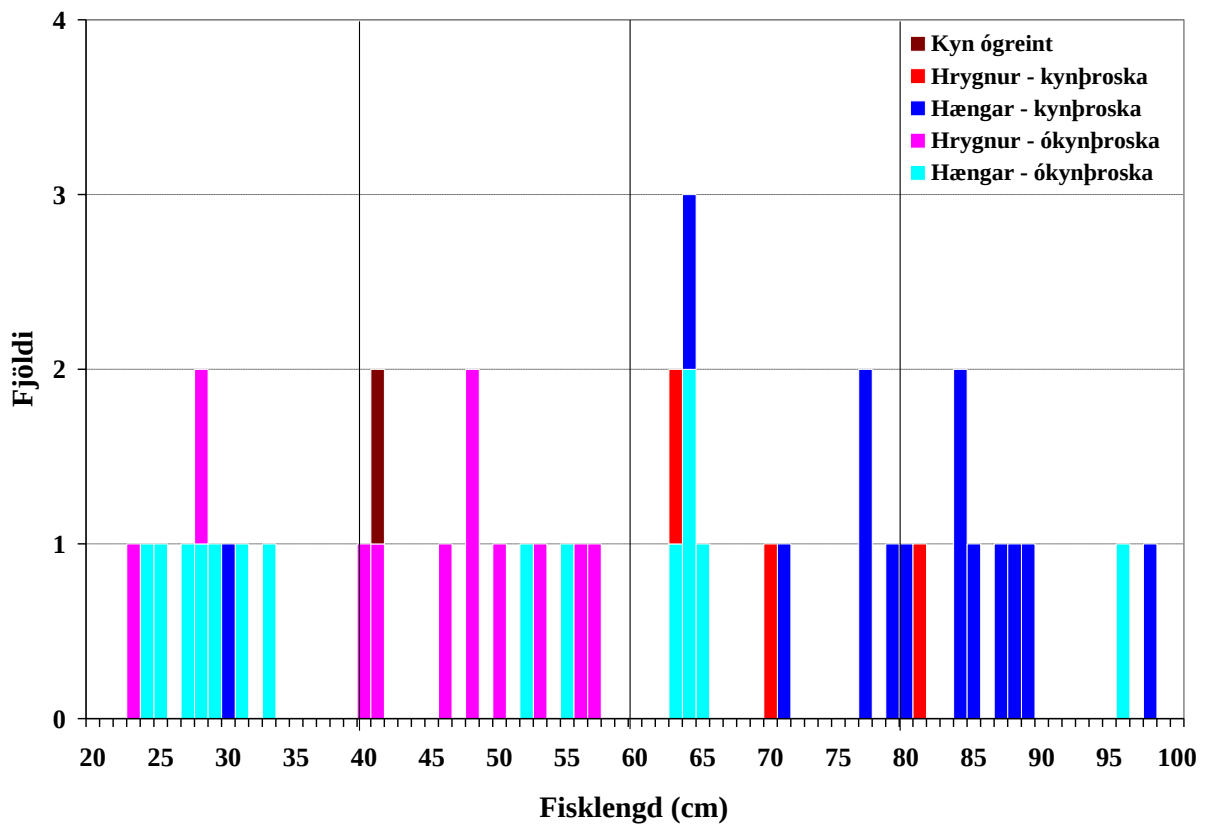
5.1. Stærð, aldur og ástand urriðanna

Í töflu 5 er að finna grunngögn yfir þingvallaurriðana sem notaðir voru til að magngreina kvikasilfur og fleiri snefilefni.

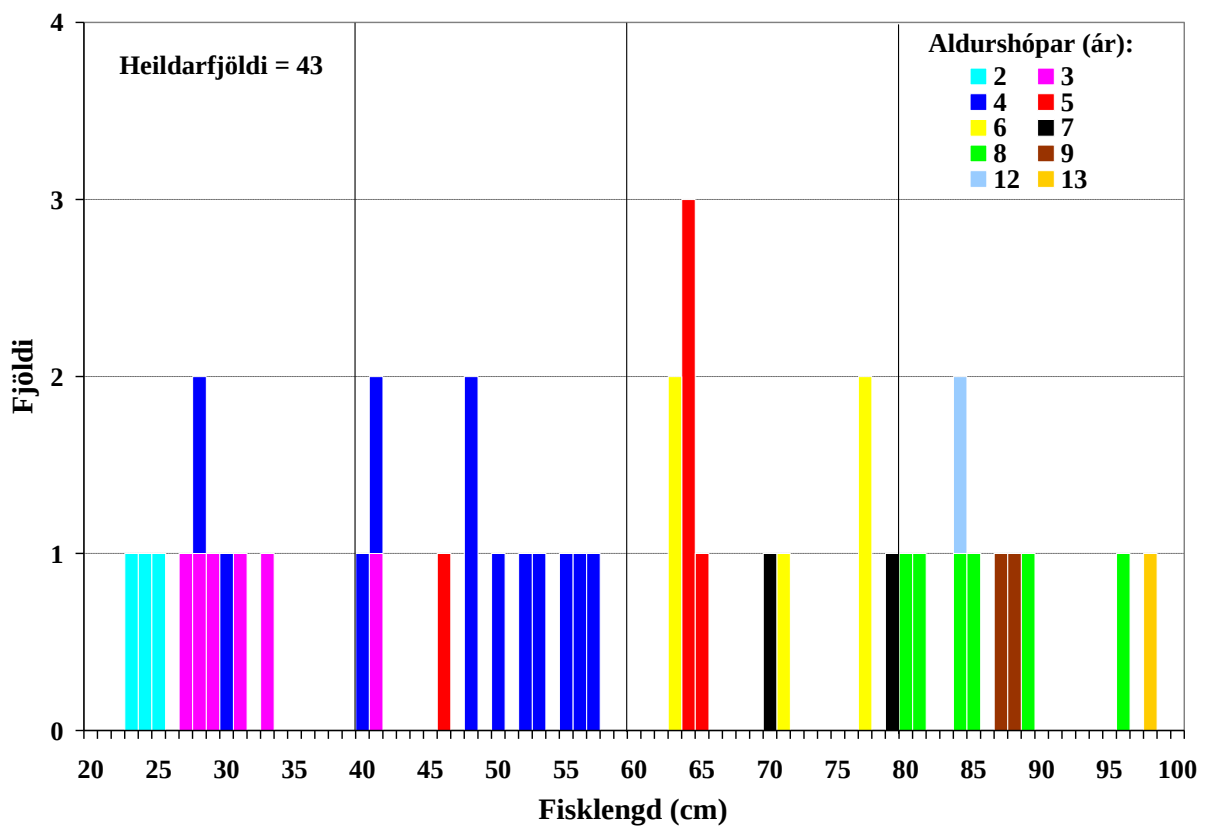
Upplýsingar um fiskana, veiðistað þeirra og veiðitíma														Upplýsingar um forsögu merktra fiska			
RNR	Lengd (cm)	Þyngd (g)	Holda- stuðull (K)	Kyn ^{a)}	Kyn- þroski ^{b)}	Aldur (ár)	Aðal- fæða ^{c)}	Vatn (%)	Fita (%)	Lifur (g)	Veiðitími (mán. og ár)	Veiðisvæði (nafn)	Veiði- svæði (nr)	Merkur (X)	Sleppiár - einst-merking ^{d)}	Sleppi- staður ^{e)}	Sleppiár - hópmerking ^{f)}
1	88,0	8349	1,23	1	H	9	0	74,6	3,2	113,2	okt. '08	Nesjahraunssvæði	3	X	2004	4	
2	77,0	6630	1,45	1	H	6	0	73,1	5,9	96,0	okt. '06	Efra-Sog	5	X			2000
3	50,0	1800	1,44	2	G	4	1	74,0	3,6	30,3	okt. '08	Nesjahraunssvæði	3				
4	57,2	2709	1,45	2	G	4	0	70,4	7,1	47,4	okt. '08	Nesjahraunssvæði	3				
5	63,0	2986	1,19	2	H	6	0	75,8	3,4	50,8	okt. '08	Nesjahraunssvæði	3				
6	54,8	2124	1,29	1	G	4	0	69,1	8,2	32,5	okt. '08	Nesjahraunssvæði	3				
7	63,5	4064	1,59	1	G	5	0	69,1	9,2	87,5	okt. '08	Nesjahraunssvæði	3	X			2003
8	62,5	4168	1,71	1	G	6	1	69,0	8,0	65,9	nóv. '08	Nesjahraunssvæði	3	X	2007	3	
9	64,0	3851	1,47	1	G	5	0	70,7	6,9	45,6	nóv. '08	Nesjahraunssvæði	3	X			2003
10	52,0	2677	1,90	1	G	4	0	69,3	8,7	23,9	nóv. '08	Nesjahraunssvæði	3				
11	76,8	5181	1,14	1	H	6	0	73,2	6,8	104,8	nóv. '08	Vestursvæði	2	X	2008	3 ^{g)}	
12	85,0	4642	0,76	1	H	8	0	85,3	0,2	68,7	sumar '08	Vestursvæði	2				
13	98,0	10500	1,12	1	H	13	---	72,2	6,7	---	ágúst '08	Vestursvæði	2				
14	87,0	9500	1,44	1	H	9	1	72,8	2,7	---	maí '07	Norðursvæði	1				
15	56,0	2594	1,48	2	G	4	1	71,7	7,3	52,4	Haust '08	Vestursvæði	2				
16	48,0	1621	1,47	2	G	4	1	72,3	6,2	36,1	Haust '08	Vestursvæði	2				
17	47,5	1458	1,36	2	G	4	1	74,3	4,8	25,1	Haust '08	Vestursvæði	2				
18	52,5	2077	1,44	2	G	4	1	72,1	5,7	40,7	Haust '08	Vestursvæði	2				
19	24,5	133	0,90	1	G	2	2	---	---	2,0	Haust '08	Vestursvæði	2				
20	23,2	128	1,03	2	G	2	1	---	---	1,4	Haust '08	Vestursvæði	2				
21	70,1	4550	1,32	2	H	7	0	74,8	2,5	93,8	maí '02	Nesjahraunssvæði	3	X	2001	3	
22	84,0	8000	1,35	1	H	12	1	79,8	0,2	76,8	júlí '03	Norðursvæði	1	X	2000	1	
23	96,0	14000	1,58	1	G	8	0	70,7	4,7	147,9	apríl '04	Norðursvæði	1				
24	84,0	7825	1,32	1	H	8	0	73,1	6,6	115,4	sept. '02	Norðursvæði	1	X	2001	1	
25	45,5	1028	1,09	2	G	5	0	76,2	2,2	19,3	ágúst '08	Suðursvæði	4				
26	64,0	3221	1,23	1	H	5	0	73,9	4,6	45,6	sept. '08	Norðursvæði	1				
27	71,0	5625	1,57	1	H	6	1	71,0	7,7	130,4	ágúst '08	Suðursvæði	4	X			2002
28	80,8	5400	1,02	2	H	8	0	78,4	0,8	---	júlí '02	Norðursvæði	1	X	2001	1	
29	79,0	6380	1,29	1	H	7	---	72,7	5,5	---	sumar '08	Norðursvæði	1				
30	89,0	9885	1,40	1	H	8	---	71,2	6,9	87,3	sept. '07	Norðursvæði	1	X	2007	1	
31	64,5	3495	1,30	1	G	5	0	72,9	5,1	57,5	ágúst '08	Suðursvæði	4				
32	80,1	6170	1,20	1	H	8	0	76,3	2,1	---	maí '08	Efra-Sog	5	X	2007	5	2000
33	40,5	1090	1,64	2	G	4	1	70,0	7,6	14,3	júlí '04	Nesjahraunssvæði	3	X	2003	3	
34	40,3	870	1,33	2	G	4	0	77,7	0,7	17,8	júlí '04	Nesjahraunssvæði	3	X		3	2000
35	40,5	720	1,08	---	G	3	0	75,8	3,0	---	des. '04	Vestursvæði	2	X	2004	4	
36	33,1	520	1,43	1	G	3	0	81,2	1,2	7,7	okt. '04	Suðursvæði	4				
37	30,4	360	1,28	1	H	4	2	81,4	0,4	3,7	okt. '05	Norðursvæði	1				
38	27,5	200	0,96	2	G	4	0	82,5	0,2	2,2	apríl '05	Suðursvæði	4	X			2001
39	27,9	220	1,01	1	G	3	0	---	---	2,6	okt. '04	Suðursvæði	4				
40	23,5	165	1,27	1	G	2	1	---	---	2,4	júlí '04	Suðursvæði	4				
42	29,1	310	1,26	1	G	3	0	66,7	10,9	3,1	ágúst '03	Suðursvæði	4				
43	26,8	210	1,09	1	G	3	1	---	---	1,8	ágúst '03	Suðursvæði	4				
44	30,6	390	1,36	1	G	3	0	---	---	8,1	nóv. '04	Suðursvæði	4				

Tafla 5. Upplýsingar um Þingvallaurriðana sem veiðdir voru og notaðir til snefilefnamælinga. Raðnúmer hvers einstaklings eru tiltekin (RNR), ásamt stærð fiskanna og annarra líffræðilegra þátta. Einnig er magainnihald tilgreint, þ.e. hvort maginn er tómur eða með æti og þá hvort aðalætið (>50%) er bleikja (murta) eða annað æti (var, hornsíli, hrogn og skordýr). Gefið er upp hvenær og á hvaða svæði fiskurinn var veiddur. Að endingu eru týndar til upplýsingar um forsögu þeirra fiska sem báru merki. Annarsvegar um fiska sem merktir voru innan vatnasviðsins (hvenær og hvar), en þeir voru á aldrinum 3ja-9 ára við merkingu. Hinsvegar yfir sleppiár örmerktra seiða frá sleppingum Landsvirkjunar á sumargömlum (0+) urriðaseiðum undan hrygningarfiski úr Öxará.

- a)** 1= Hængur, 2 = Hrygna
b) H = Hrygningarfiskur, G = Geldfiskur
c) 1 = Fiskur, 2 = Annað, 0 = Tómur
d) 3-9+ ára fiskar við einstaklingsmerkingu innan vatnasviðsins
e) Númer veiðisvæðis
f) 0+ ára seiði, merkt í seiðaeldisstöð.
g) Á milli merkingu og sleppingu á svæði 3 og endurheimtu á svæði 2 veiddist fiskurinn í rannsóknaveiðum Laxfiska á riðum í Öxará

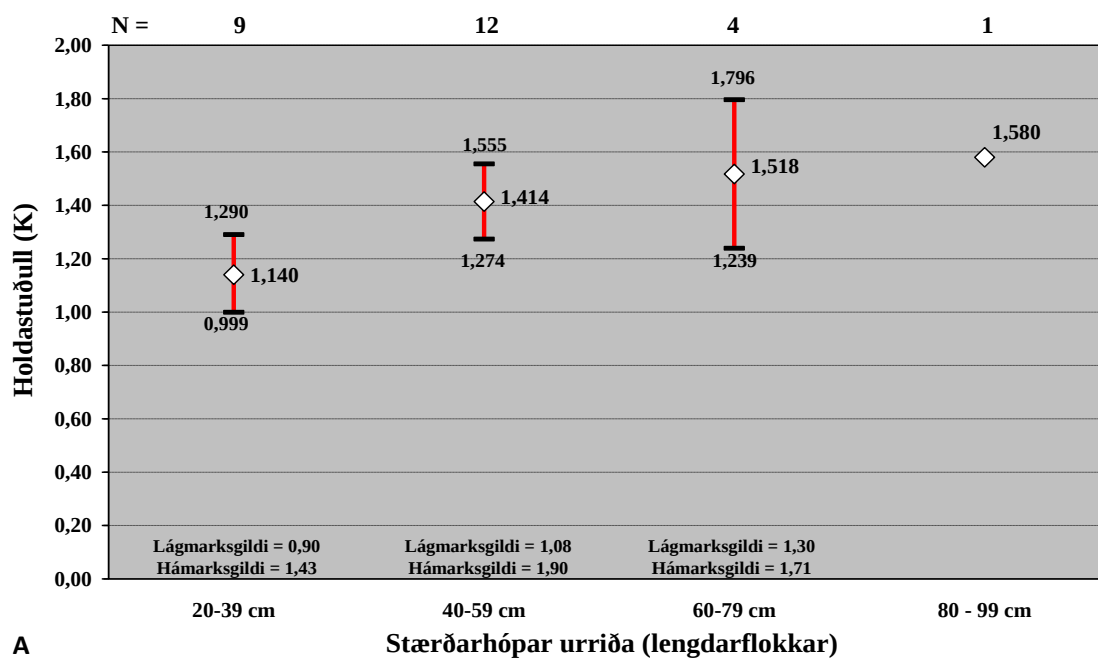


4. mynd. Lengd þingvallaurriða sem notaðir voru til að magngreina kvikasilfur með hliðsjón af kyni þeirra og kynþroska.

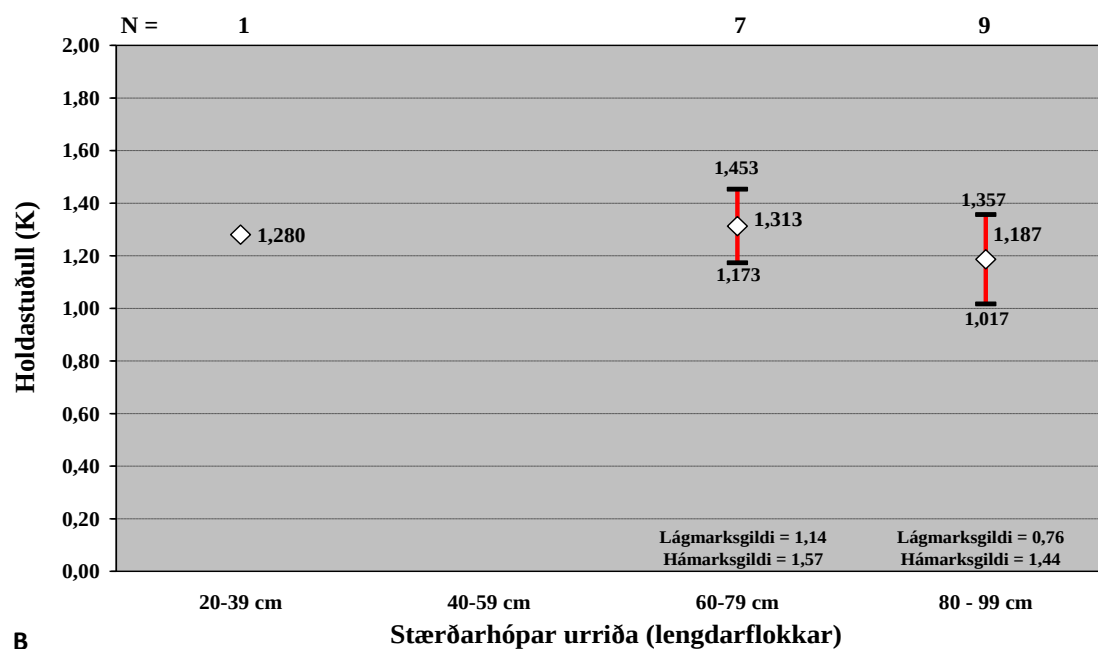


5. mynd. Lengd þingvallaurriða sem notaðir voru til að magngreina kvikasilfur með hliðsjón af aldri þeirra.

Liffræðilegir þættir fiskanna sem rannsakaðir voru eru teknir saman í yfirlitsmyndum 4 og 5. Á þeim myndum er lengd þingvallaurriðanna höfð til hliðsjónar þegar kyn þeirra og kynþroski (4. mynd) sem og aldur (5. mynd) er útlistað. Geldfiskarnir eru fiskar sem voru/verða ekki í hrygningarhæfu ástandi á árinu sem þeir veiðast og í flestum tilfellum eru það fiskar sem hafa aldrei hrygnt (4. mynd). Hrygningarfiskarnir eru hinsvegar þeir fiskar sem voru/verða hrygnandi innan ársins sem þeir veiðast (4. mynd). Í flestum tilfellum hrygna urriðarnir árlega eftir að þeir byrja að hrygna en það er þó ekki algilt því nokkuð er um að sumir þeirra hrygni annað hvert ár og ennþá fleiri að aðrir taki upp á því á sínum efri árum (Jóhannes Sturlaugsson 2005 og 2007). Á mynd 6 er að finna upplýsingar um holdafar urriðanna með hliðsjón af stærðarhópum og því hvort um var að ræða geldfiska eða hrygningarfiska.



A



B

6. Mynd. Mynd A sýnir holdastuðul geldfiska með hliðsjón af stærðarhópunum sem unnið var með. Gefið er meðaltal mælinga fyrir hvern stærðarhóp og 95% öryggismörk á það. Ennfremur eru lágmarks- og hámarksgildi tiltekin fyrir hvern stærðarhóp þar sem fjöldi fiskanna gefur tilefni til þess. Fjöldi fiska (N) að baki hverjum stærðarhópi er tilgreindur. Mynd B sýnir á sambærilegan hátt holdafar hrygningarfiska.

5.2. Forsaga urriðanna út frá merkingum

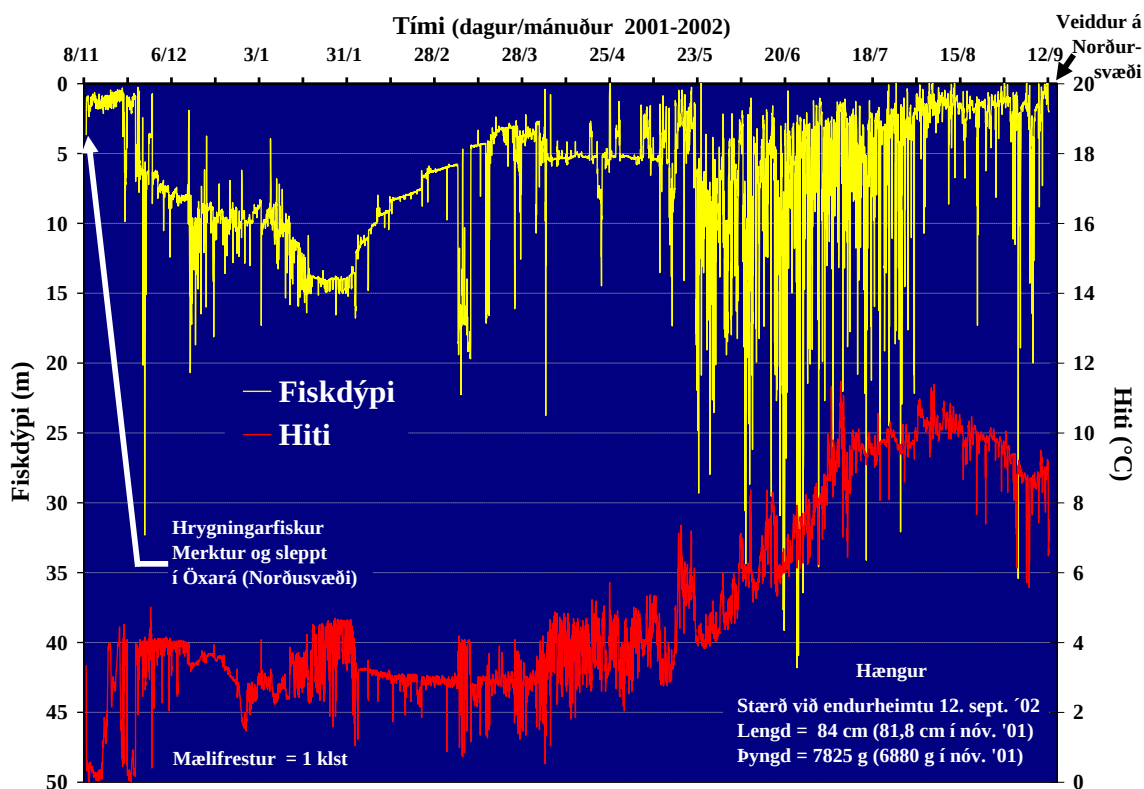
Eins og sést í töflu 5. þá eru til ýmsar upplýsingar um 17 af þeim 43 fiskum sem sýni voru tekin af til magngreiningar á kvikasilfri og öðrum snefilefnum, frá merkingum á þeim fiski. Þær upplýsingar nýtast á mismunandi hátt við túlkun niðurstaðna og gagna þess verkefnis sem hér er til umfjöllunar. Nokkrir fiskanna báru rafeindafiskmerki af gerð mælimerkja og sumir þeirra voru einnig með hljóðsendimerki. Í þeim tilfellum var bæði hægt að fá nána innsýn í ferðir þeirra og hegðun, þ.m.t. hvaða svæði þeir nýttu sér og yfir ætisarferli þeirra. Slík viðmið þessara fiska ásamt slíku ítarefni frá þeim fjölmörgu öðrum urriðum sem borið hafa slík merki í rannsóknum Laxfiska veita sérlega gagnlega innsýn í þá undirliggjandi þætti sem ráða vexti og ástandi Þingvallaurriða, þ.m.t. með hliðsjón af þeim svæðum þar sem urriðum var safnað til sýnatöku til magngreiningar á kvikasilfri (Jóhannes Sturlaugsson 2005 og 2007). Auk ítarlega upplýsinga frá rafeindafiskmerkjum þá fengust einnig viðmiðunargögn frá þeim urriðum í úrtakinu sem báru hefðbundin merki. Slíkar upplýsingar veita m.a. ákveðna innsýn í dvalarstaði fiskanna við veiði og endurveiði. Í tilfellum örmerktra fiska sem runnir eru frá sleppingum seiða undan Öxarárfiski á vegum Landsvirkjunar (Magnús Jóhannsson o.fl. 2005), þá fékkst staðfesting á niðurstöðum hreisturlesturs varðandi aldur þeirra fiska.

Niðurstöður frá fiskum sem að báru einstaklingsmerki (hefðbundin eða rafeindamerki) sýndu að fiskarnir voru ýmist endurveiddir á sama veiðisvæði og þeir voru merktir á eða innan annarra veiðisvæða. Rafeindafiskmerkin gáfu stundum einnig upplýsingar um ferðir fiskanna á milli svæða, þ.m.t. umræddra veiðisvæða enda þótt fiskarnir væru endurveiddir á sama svæði og þeir voru merktir á. Þegar einstaklingsgögn frá merktum urriðum sem rannsakaðir voru til magngreininga á kvikasilfri eru skoðuð nánar kemur á daginn að megin mynstrið í ferðum urriðanna og hegðun sem og í vexti þeirra og aldri, kemur heim og saman við þá megin mynd sem tekist hefur að afla um lífshætti Þingvallaurriða í atferlirannsóknum Laxfiska (Jóhannes Sturlaugsson 2005 og 2007).

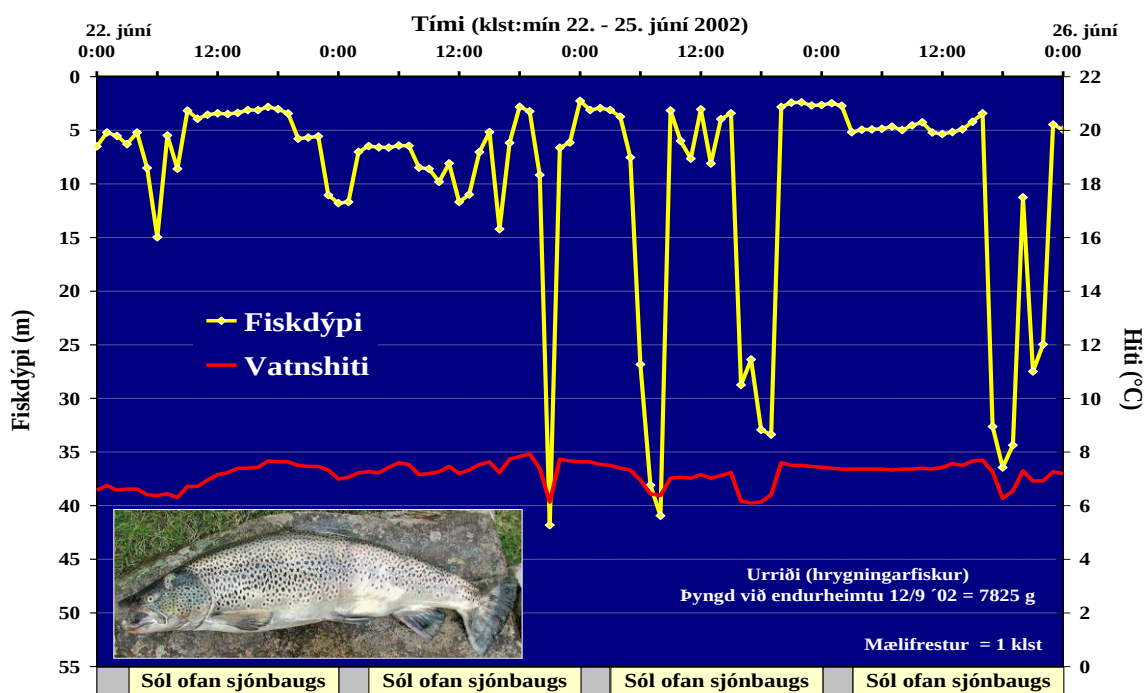
Hér að aftan verða sýnd dæmi frá skráningum mælimerkja yfir hegðun urriða og umhverfi þeirra. Enda þótt um sé að ræða gögn frá einstaklingum þá eru megin mynstrin í hegðun þeirra dæmigerð fyrir þau skeið innan ársins sem til umfjöllunar eru (ætisgöngur, hrygningargöngur, veturseta). Þau dæmi voru valin til að sýna í senn hegðun sem er dæmigerð fyrir Þingvallaurriða almennt með hliðsjón af lífsskeiði fiskanna (7. og 8. mynd) og um leið til að sýna hegðun sem er dæmigerð fyrir urriða sem nýta heitu lindasvæðin undan Nesjahrauni á samfelldari máta en meðbræður þeirra (9. mynd).

Á 7. mynd gefur að líta tímatengdan feril yfir ferðir hrygningarurriða af stærri gerðinni. Sá fiskur sýnir dæmigerða hegðun innan ársins fyrir flesta fiska á því reki. Í kjölfar hrygningar aflar hann sér ætis þar til hann hefur vetursetu upp úr áramótum. Fiskurinn hefst síðan lítið að fram á vorið þar sem hann hefur vetursetu við lindir í norðanverðu vatninu. Um vorið hefst síðan ætisgangan sem felur í sér reglubundnar ferðir á milli dýptarlaga þegar kemur fram á sumar. Þetta er nokkuð sem endurspeglar sambærilegar ferðir murtunnar (Nunnallee og Jón Kristjánsson 1982; Pétur M. Jónasson 2002), þar sem hún eltist við helstu bráð sína, svifkrabbana. Til að gefa gleggri innsýn í ferðir urriðanna á milli dýptarlaga þegar þeir eltast við murtu sýnir mynd 7B fjögurra daga ítarlegt mæliskeið frá ferðum urriðans. Murtan sem er helsta æti stórrurriðans heldur sig að jafnaði dýpra þegar sól er ofan sjónbaugs en færir sig síðan nær yfirborði þegar sól er gengin til viðar, þó svo að skilin séu lítil á þeim tíma sumars er mynd 7B sýnir. Skráningar stöðva á sendingum hljóðsendimerkis sem fiskurinn bar einnig staðfesti ennfreður að hann dvaldi megnið af sumrinu í norðanverðu vatninu, en algengara er að stórvaxnir hrygningarfiskar á borð við þennan nýti sér einkum víðáttumikið miðsvæði Þingvallavatns þegar líður á sumarið.

Skráningar á ferðum geldfisks eru útlistaðar á 8. mynd sem m.a. sýnir hvernig ætisöflunaratferlið kúvendir er haustar þegar þessi tiltölulega smái urriði hefur „dagróðra“ niður á dýpri mið af kappi.

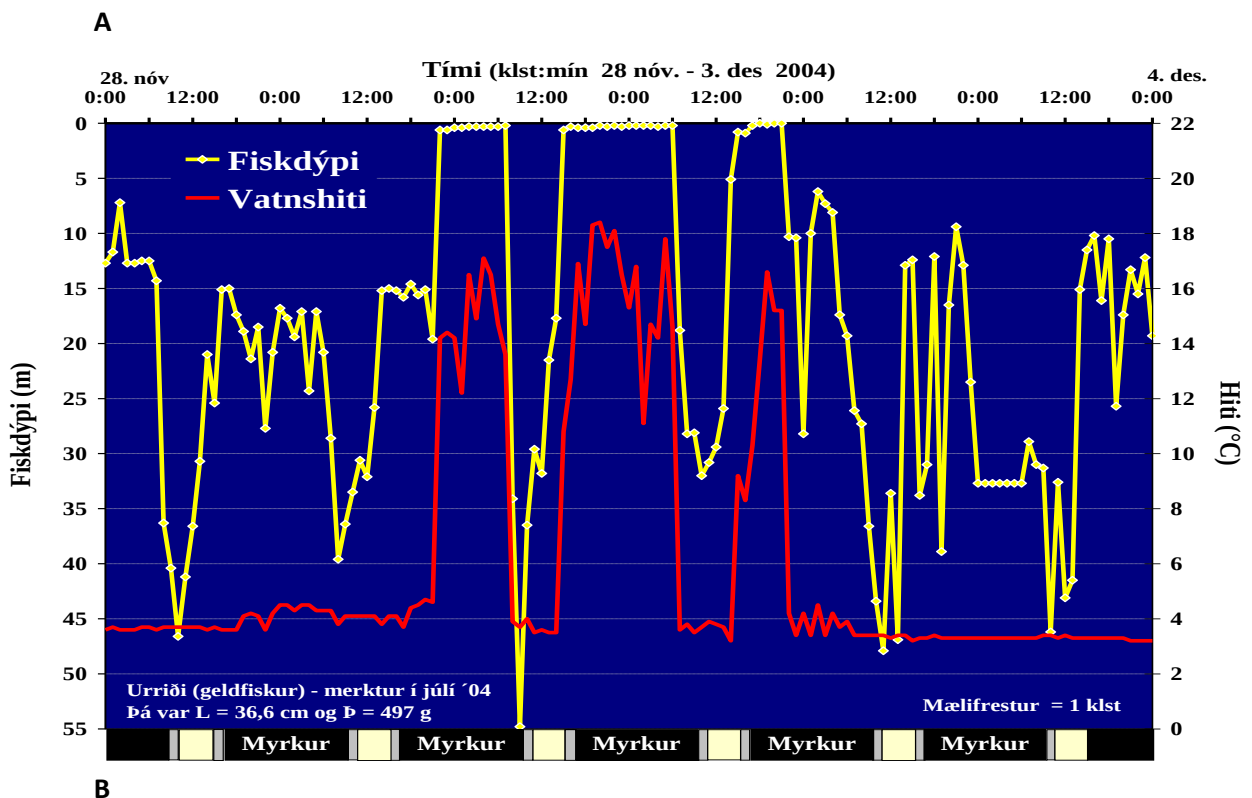
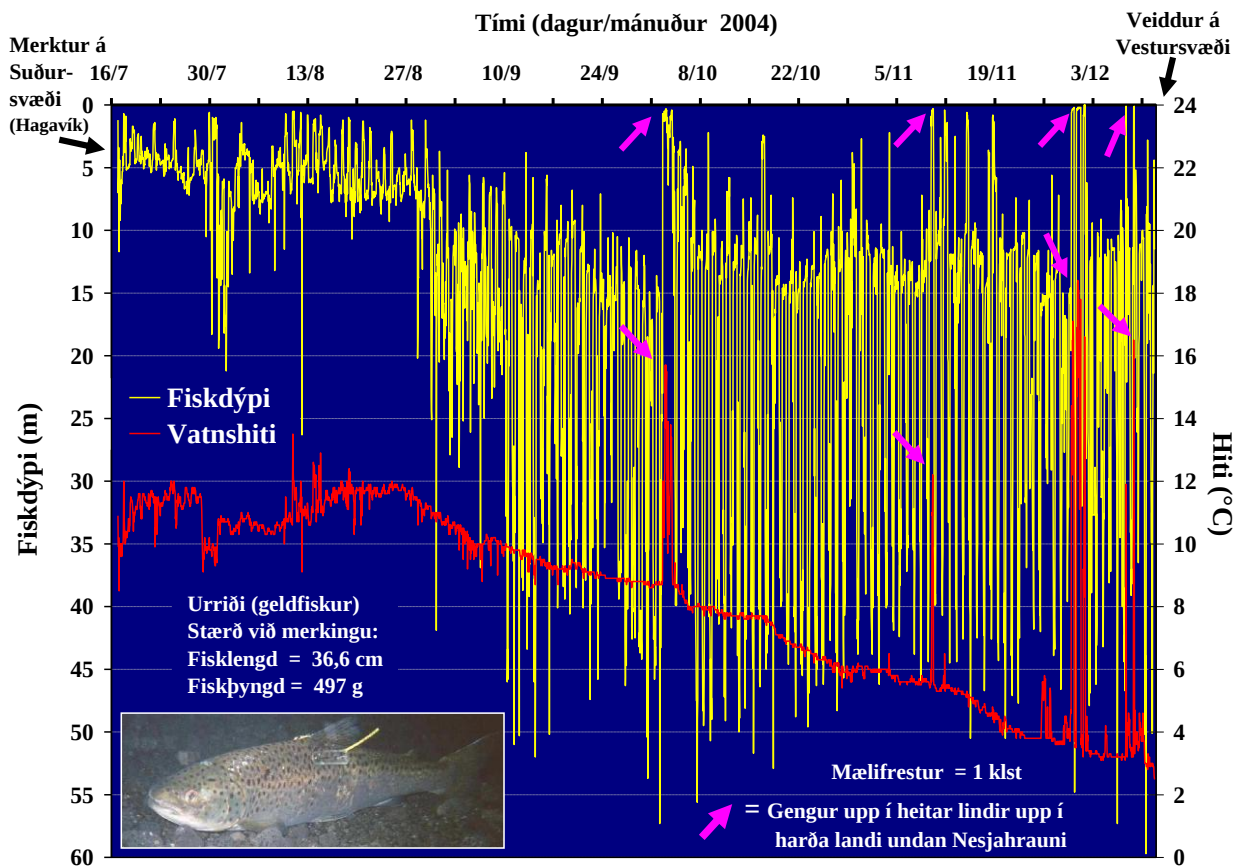


A



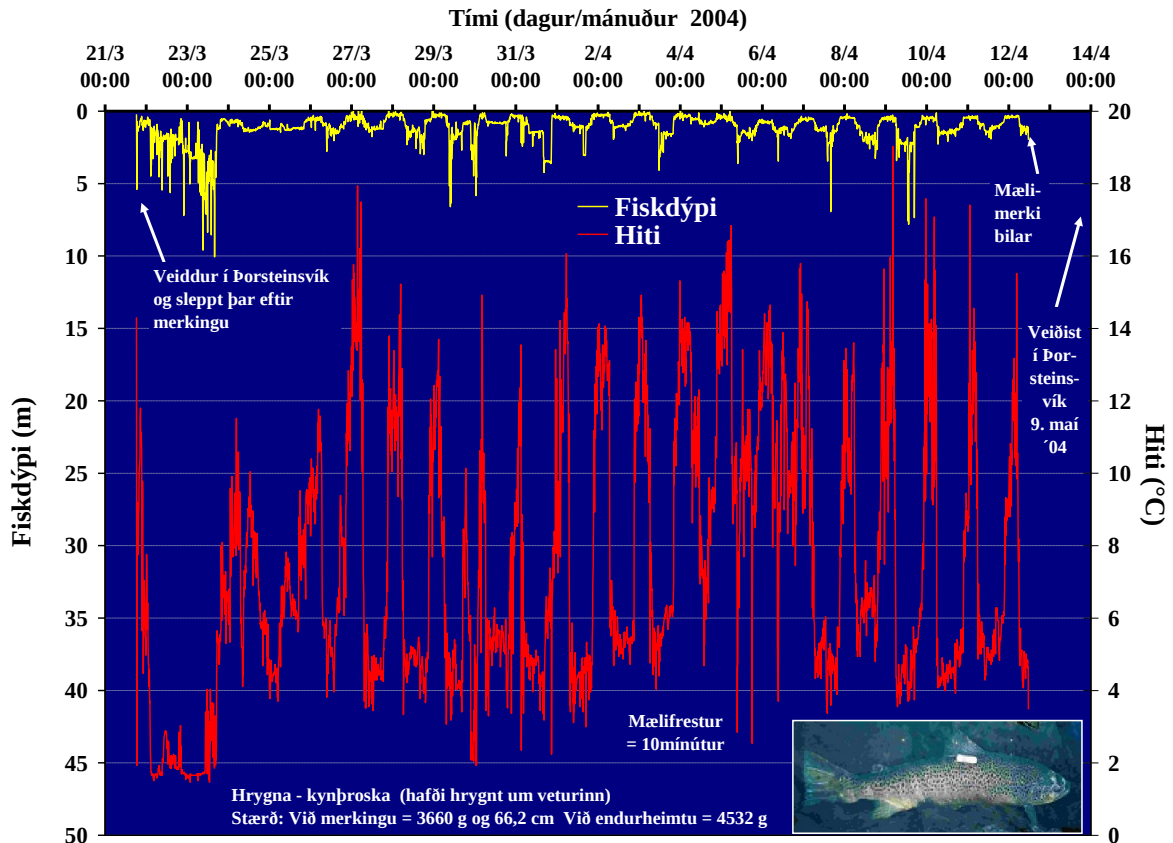
B

7. Mynd. Mæliferlar yfir fiskdýpi og tilsvarende hita frá ferðum urriðahængs sem veiddur var við hrygningu 2001 í Öxará, mælimerktur og sleppt aftur í ána. (A). Myndin sýnir vel þann mun sem er á hegðun hjá dæmigerðum stórrurriðum yfir vetursetu (des/jan-mars/apríl) samanborið við ætisgöngur og hrygningargöngur þess utan. Á neðri myndinni (B) er fjögurra daga mæliskeið frá ferðum urriðans sýnt sérstaklega til að gefa gleggri innsýn í ferðir urriðanna á milli dýptarlaga þegar þeir eltast við murtuna. Murtan, helsta æti stórrurriðans heldur sig að jafnaði dýpra þegar sól er ofan sjónbaugs en færir sig almennt nær yfirborði þegar sól er gengin til víðar, þó svo að skilin séu lítil á þeim tíma sumars er mynd B sýnir (skammvinnt næturhúm). Innfellda ljósmyndin á mynd B sýnir urriðann í kjölfar endurheimtu. Urriðinn bar úrvinnsluraðnúmerið (RNR) 24 (sjá töflu 5).



8. mynd. Mælifærlar yfir fiskdýpi og tilsvareandi hita frá ferðum urriða (geldfisks) sem veiddur var í Hagavík og mælimerktur í júlí 2004 (innfelld mynd frá sleppingu) og að lokum veiddur aftur í net norðan við Hestvík veturinn eftir (A). Myndin sýnir vel hvenær ætisöflunaratferlið breytist um mánaðarmót ágúst og sept. Þá byrjar urriðinn daglegar ferðir niður í dýpri lög vatnsins að deginum og fer m.a. það djúpt að rekja mátti ferðir hans inn á Sandeyjardjúp. Einnig sést á hitaskráningunum að fiskurinn hefur nokkrum sinnum dvalið skammta stund þ.s. heita lindarvatnsins gætur undan Nesjahrauninu. Mynd B sýnir skráningar frá 6 daga tímabili (nóv.-des). Á þeim tíma gekk urriðinn 3 daga upp að fjörusvæði Nesjahraunsins og dvelur þar í húmi og myrkri svo sem sjá má af háum hitanum og dýpi hans. Urriðinn bar í úrvinnslunni raðnúmerið (RNR) 35 (sjá töflu 5).

Þekking á því hvernig urriðinn nýtir sér strandsvæði Nesjahraunsins þar sem innstreymi heitra linda nýtur við er nauðsynleg til þess að átta sig á því hvort að urriðum og öðrum fiski sem nýta mikið það svæði geti hugsanlega verið hættara við uppsöfnun á kvikasilfri en þeim fiskum sem nýta fyrst og fremst önnur svæði (sjá umfjöllun í kafla 5.4)). Fiskurinn að baki mæligögnunum á 9. mynd var ekki í hópi þeirra fiska sem rannsakaðir voru m.t.t. magngreiningar á snefilefnunum sem hér eru til umræðu. En gögnin eru sett fram hér til viðmiðunar vegna þess hve mælingarnar gefa góða innsýn í það hvernig fiskar undan Nesjahrauni hafa orðið uppvisir að því nýta þetta svæði með tilheyrandi afnotum af hitaskotnu vatninu næst ströndinni. Auk þess sem fiskurinn sýnir ótvírætt hve hraður vöxtur fiska á þessari slóð getur verið því hann vex úr 3,66 kg í kg í 4,53 kg á 7 vikum (9. mynd).



9. mynd. Mæliferlar yfir fiskdýpi og tilsvarende hita frá ferðum mælimerktrar hrygnu frá merkingu í mars 2004 í Þorsteinsvík fram að endurveiði í Þorsteinsvík 9. maí 2004. Fiskurinn dvelur allt tímabilið hluta sólarhringsins við heitar lindir sem spretta fram undan Nesjahrauninu, þ.e.a.s. á tímabilinu frá kvöldi fram á morgun. Stærð fisksins við merkingu og endurveiði er tilgreind og sést þar vel hve fiskurinn vex gríðarlega við þessar aðstæður á þeim fáu vikum sem um er að ræða. Innfellda ljósmyndin sýnir urriðann við sleppingu.

5.3. Forsaga urriðanna með hliðsjón af æti og ætisvenjum

Í rannsóknum Laxfiska á Þingvallaurriðanum undanfarin ár hefur verið safnað upplýsingum um ætisöflun Þingvallaurriða. Urriðinn stundar sjálfrán í Öxaránni þar sem algengt er á haustin að urriðaseiði og gelgjuurriðar éti bæði eigin hrogn og seiði. Einn slíkur gelgjuhængur sem tekinn var í Öxaránni (raðnúmer 37) reyndist með úttroðinn maga af hrognum (tafla 5). Slíkt sjálfrán urriðahrogn og urriðaseiða er ekki mikilvirkt en er engu að síður dæmi um fæðuvistfræðileg tengsl sem gæti leitt til uppsöfnunar á kvikasilfri í afræningjanum. Í Þingvallavatni var murtan mikilvæg fæða hjá stórrurriðum þ.m.t. uppvaxandi fiski sem fer að éta murtuna um leið og hann hefur stærð til (Hilmar Malmquist og Jóhannes Sturlaugsson 2002; Jóhannes Sturlaugsson 2007). Þar er um mikilvirk fæðuvistfræðileg tengsl að ræða sem eru burðarásinn í þeirri uppsöfnun

kvikasilfurs í Þingvallaurriða sem fjallað er um í kafla 5.4, þó svo að hornsíli komi aðeins við sögu, einkum sem fæða hjá smærri geldfiski.

Í þessari rannsókn var ákveðið að halda öllum magasýnum úr urriðunum til haga svo fá mætti fram forsögu fiskanna m.t.t. þess hvað þeir voru að éta skömmu áður en þeir voru veiddir (sjá upplýsingar um magainnihald í töflu 5). Þær upplýsingar eru góðar svo langt sem þær ná m.t.t. tíðni aðalfæðu fiskanna. Hinsvegar er ekki hægt að skoða gögnin heildstætt með hliðsjón af eiginlegri virkni fiskanna í ætisöflun, því að forsaga veiða á fiskunum sem nýttir voru í rannsókninni var misjöfn. Dæmi um slíkt eru fiskar úr netaveiði sem stundum lágu nokkurn tíma í netum fyrir vitjun sem gæti hafa leitt til þess að þeir hafi verið búnir að melta æti sitt þegar þeim var landað. Niðurstöður athuganna á æti fiskanna sem hér eru til umfjöllunar sýndu að skömmu fyrir andlátið var murtan mikilvægasta æti þeirra. Með hliðsjón af þessu og í ljósi gagna frá rafeindafiskmerkjum sem tiltæk eru fyrir fiska úr rannsókninni og fjallað var um í kafla 5.2 þá er ljóst að athuganir á magainnihaldi Þingvallaurriða ásamt því hegðunarmynstri sem skráð hefur verið fyrir urriða á ætisgöngu, sýna að murtan er ráðandi æti hjá Þingvallaurriðum sem eru stærri en 40 cm. Fæðuathuganir sýna að murta er einnig mikilvægt æti hjá urriðum sem eru 20-40 cm að lengd.

Urriðinn étur murtur á öllum aldri, allt frá smáum sumargömlum murtum til fullvaxinnar murtu. Rannsóknir á murtu sýna að þær verða allt að 23 cm að lengd og allt upp í 11 ára (Sigurður Snorrason o.fl. 2002). Þingvallaurriðinn étur gjarnan nokkrar murtur yfir daginn þegar mest virkni er í ætisöflun hans. Þingvallaurriðarnir verða gjarnan margra ára gamlir (5. mynd) og ná oft 10-12 ára aldri og hafa síðustu árin fundist allt upp í 16 ára gamlir (Jóhannes Sturlaugsson og Hilmar Malmquist, 2009 í prentun). Því er hægt að færa sterk rök fyrir því að megin ástæðan fyrir uppsöfnun á kvikasilfri í fiskholdi hjá Þingvallaurriðum sé tilkomin vegna afráns þeirra á murtu.

Þegar litið er á fiskana sem standa að baki snefilefnagreiningum rannsóknarinnar þá verður að ætla miðað við fyrirbyggjandi heimildir að þekkingin á forsögu þeirra sé einsdæmi. Ítarlegar upplýsingar um dreifingu fiskanna í Þingvallavatni, hegðun þeirra og ýmsa lífssögulega þætti eru fólgnar í gögnum runnum frá merkingum. Því til viðbótar gáfu athuganir á æti sömu urriða mikilvæga staðfestingu á miklu dálæti urriðans á murtu til matar (tafla 5). Allar þessar upplýsingar gefa tækifæri til að eyða óvissu er kemur við sögu forsendna og túlkunaratriða og gefur enn fremur tækifæri til að skoða á haldbetri hátt en ella væri hægt, orsakasamhengið sem stendur að baki niðurstöðunum.

5.4. Kvikasilfur og önnur snefilefni í fiskholdi Þingvallaurriða

Snefilefnin ál (Al), arsen (As), kadmín (Cd), kvikasilfur (Hg) og blý (Pb) voru mæld í urriðasýnunum. Niðurstöðurnar eru sýndar í töflu 7 í mg/kg votvigt. Sýni voru brotin niður og mæld í þrísýni. 10% óvissa er í uppgefnum styrk.

Tafla 7. Niðurstöður snefilefnagreininga í urriða úr Þingvallavatni. Niðurstöðurnar eru gefnar upp í mg/kg votvigt og óvissa er 10% í uppgefnum styrk. RNR er hlaupandi raðnúmer sýna og n.d. stendur fyrir „not detected“ eða „fyrir neðan greiningarmörk“.

RNR	Al ^a	As ^b	Cd ^c	Hg	Pb ^d	RNR	Al ^a	As ^b	Cd ^c	Hg	Pb ^d
1	0,11	0,024	n.d.	0,93	0,001	23	0,20	0,013	n.d.	0,54	n.d.
2	0,083	n.d.	n.d.	0,56	0,002	24	0,19	0,023	n.d.	0,41	n.d.
3	0,099	0,037	n.d.	0,22	0,007	25	0,15	0,030	n.d.	0,19	n.d.
4	0,19	0,030	n.d.	0,56	0,014	26	0,56	0,014	n.d.	0,38	n.d.
5	0,13	0,001	n.d.	0,70	n.d.	27	0,16	0,011	n.d.	0,74	n.d.
6	0,13	0,012	n.d.	0,48	n.d.	28	n.d.	0,026	n.d.	0,75	n.d.
7	0,086	0,015	n.d.	0,48	n.d.	29	n.d.	0,027	n.d.	0,49	0,002
8	0,058	0,014	n.d.	0,44	n.d.	30	0,21	0,010	n.d.	0,67	n.d.
9	0,19	0,003	n.d.	0,44	0,007	31	0,19	0,006	n.d.	0,48	n.d.
10	0,17	0,027	n.d.	0,51	n.d.	32	0,19	0,011	n.d.	0,75	n.d.
11	0,21	0,008	n.d.	0,53	0,005	33	0,11	0,086	n.d.	0,06	n.d.
12	0,13	n.d.	n.d.	0,82	0,025	34	0,41	0,060	0,001	0,42	0,001
13	0,25	0,029	n.d.	1,0	n.d.	35	0,11	0,014	n.d.	0,12	n.d.
14	0,21	0,021	n.d.	0,74	n.d.	36	0,89	0,020	n.d.	0,071	n.d.
15	0,15	0,027	n.d.	0,44	n.d.	37	0,82	0,016	0,003	0,046	0,002
16	0,11	0,033	n.d.	0,24	n.d.	38	0,72	0,15	n.d.	0,11	n.d.
17	0,21	0,012	n.d.	0,31	n.d.	39	2,5	1,1	n.d.	0,13	0,004
18	0,20	0,015	n.d.	0,30	n.d.	40	2,3	0,006	0,003	0,042	0,003
19	0,67	0,009	n.d.	0,024	n.d.	42	0,18	0,004	n.d.	0,041	0,001
20	1,0	0,023	n.d.	0,044	0,004	43	n.d.	0,024	n.d.	0,030	0,004
21	0,16	0,028	n.d.	0,43	n.d.	44	0,42	0,29	n.d.	0,041	n.d.
22	0,16	0,015	0,003	0,42	0,002						

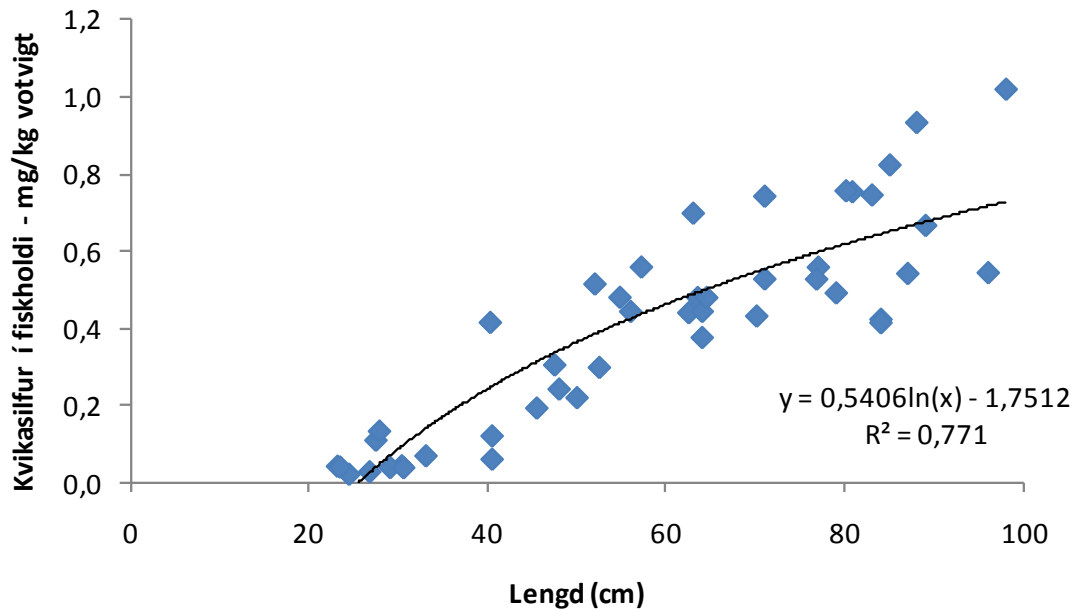
a) Greiningarmörk fyrir Al = 0,01 mg/kg

b) Greiningarmörk fyrir As = 0,001 mg/kg

c) Greiningarmörk fyrir Cd = 0,001 mg/kg

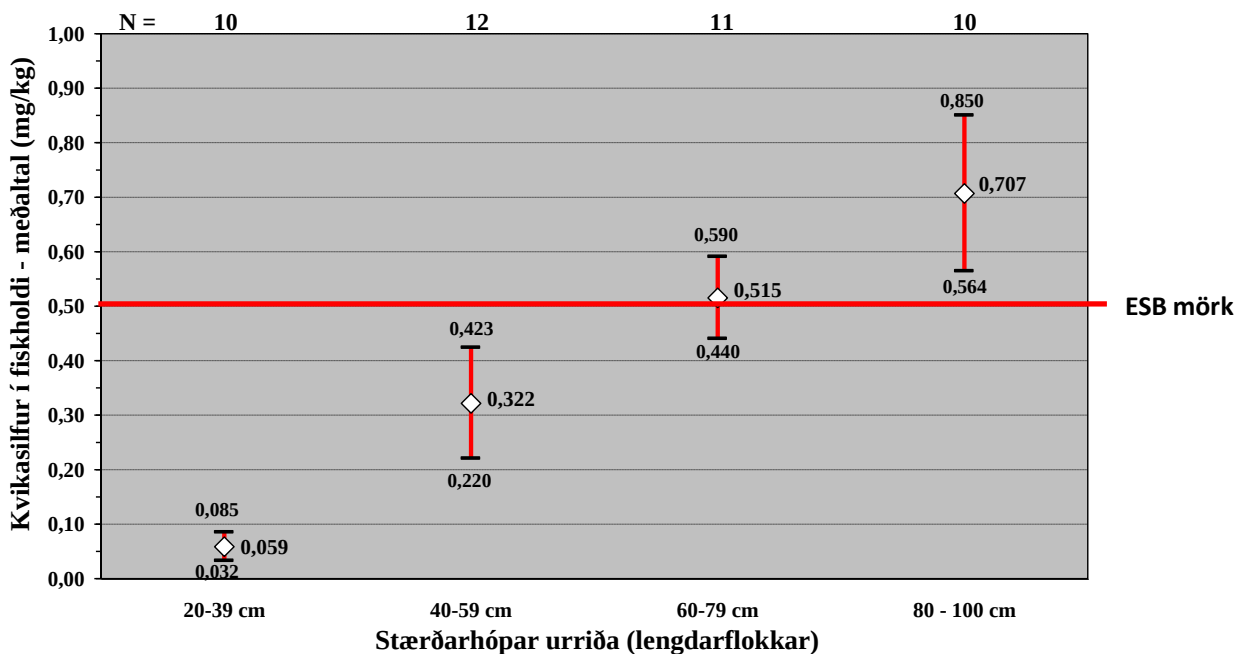
d) Greiningarmörk fyrir Pb = 0,001 mg/kg

Lógarítmísk fylgni er á milli lengda urriðanna og kvikasilfursmagns á votvigt eins og sýnt er á mynd 10, en það er vel þekkt að sterk fylgni er þar á milli fyrir kvikasilfur í fiski. Hinsvegar er lítil fylgni á milli fiskstærða og annarra snefilefna í holdi fiskanna sem mældir voru. Þó virðist veik neikvæð exponential fylgni vera á milli álstyrks og lengdar ($R^2 = 0,31$).



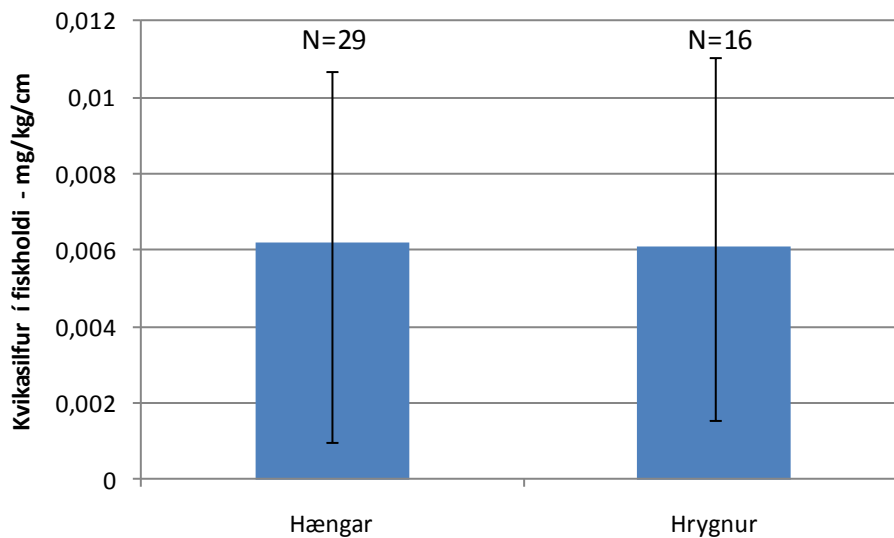
10. mynd. Fylgni milli lengdar urriðanna og kvikasilfursmagns í holdi þeirra.

Við frekari úrvinnslu gagna þá var urriðunum skipt upp í eftirfarandi 4 lengdarflokka: 20-39 cm, 40-59 cm, 60-79 cm og 80-100 cm. Tölfræðilegar prófanir voru gerðar á því hvort munur væri á styrk kvikasilfurs í fiskholdi urriða og sýndu þær að kvikasilfur óx stigvaxandi með aukinni stærð fiskanna sem endurspegladist í tölfræðilega marktækum mun á magni kvikasilfurs í urriðunum í þeim fjórum stærðarhópum sem lagðir voru til grundvallar í rannsókninni. Niðurstaða þess samanburðar er sett fram á 11. mynd og þar sést glögglega að þegar þingvallaurriðar eru orðnir lengri en 60 cm þá eru töluverðar líkur á að því að þeir innihaldi kvikasilfur sem er hærra en leyfileg mörk fyrir matvæli sem má dreifa og selja kveða á um (0,5 mg/kg votvigt) (EC reglugerð 2006, Reglugerð 697/2008).



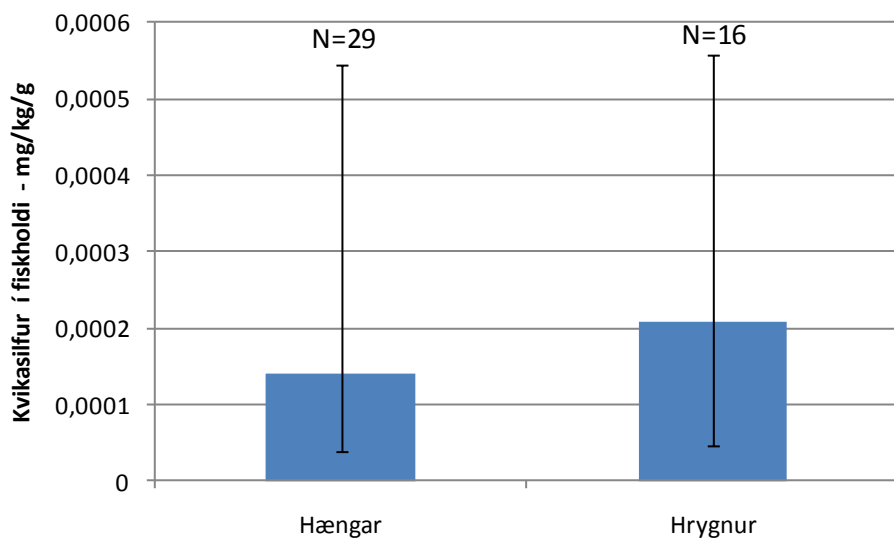
11. mynd. Meðaltalsstyrkur kvikasilfurs í fiskholdi þingvallaurriða fyrir 4 stærðarhópa. Gefið er meðaltal mælinga fyrir hvern stærðarhóp og 95% öryggismörk á það. Fjöldi fiska (N) að baki hverjum stærðarhópi er tilgreindur. Inn á myndina eru merkt með rauðri línu þau mörk í kvikasilfursstyrk sem matvæli sem ætluð eru til dreifingu og sölu vegna mannelis mega ekki fara yfir skv. löggjöf Evrópusambandsins sem íslenskar reglur miðast við (EC reglugerð, 2006).

Fylgni milli kyns fiskanna og kvikasilfursstyrks er sýndur á 12. mynd.



12. mynd. Meðalstyrkur kvikasilfurs, ásamt sviði (e: range) í holdi þingvallaurriða með hliðsjón af kyni og lengd.

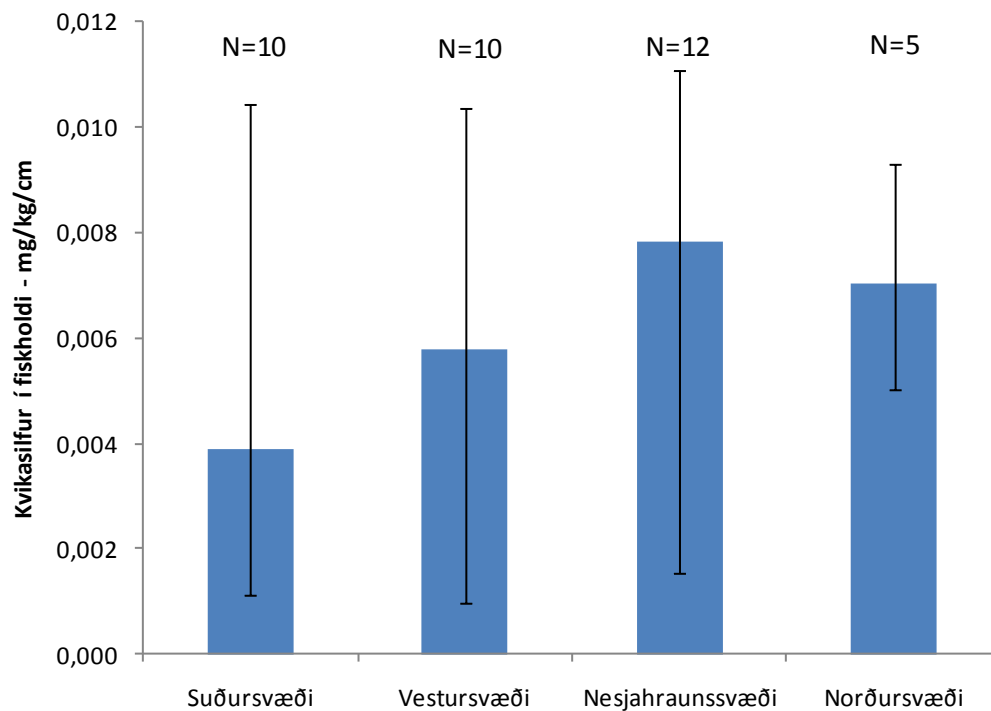
Þegar leiðrétt hefur verið fyrir lengdarmun fiskanna er engan mun að finna í kvikasilfursstyrk milli hænga og hrygna.



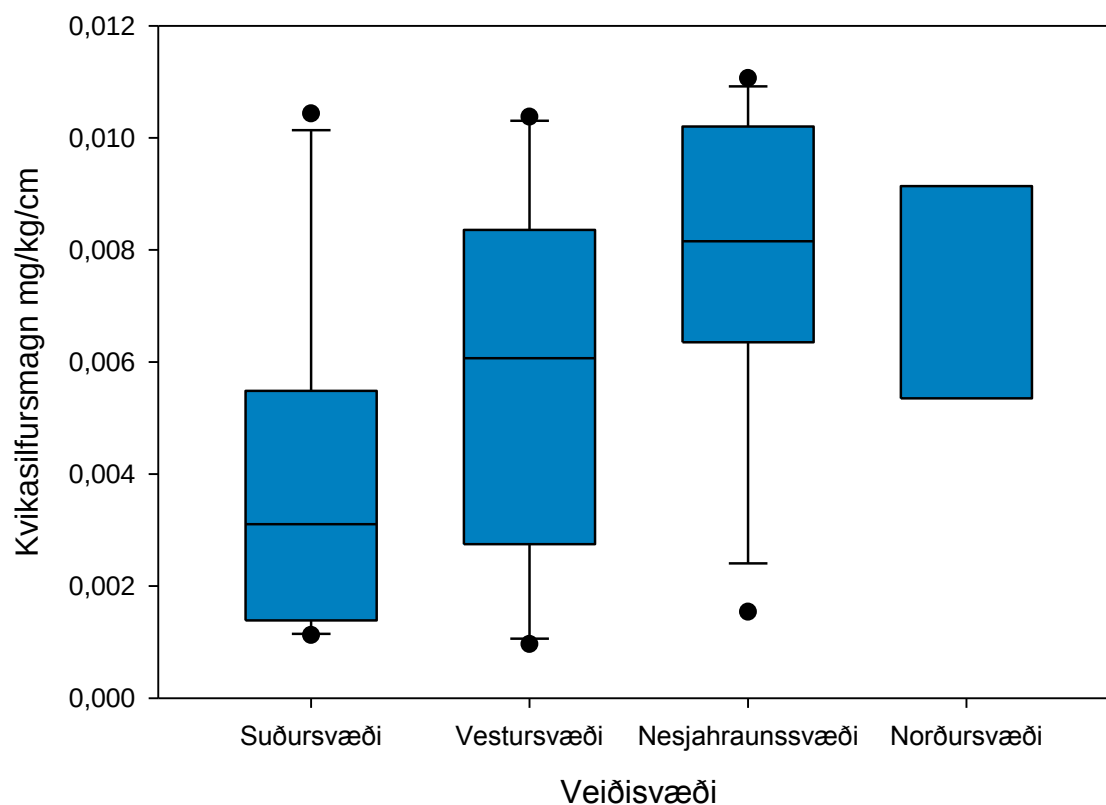
13. mynd. Meðalstyrkur kvikasilfurs, ásamt sviði, í holdi þingvallaurriða með hliðsjón af kyni og þyngd.

Mynd 13 sýnir samanburð milli kynjanna og kvikasilfursstyrks þegar leiðrétt hefur verið fyrir þyngd fiska. Samkvæmt t-prófi er tölfræðilega marktækur munur á kvikasilfursstyrk milli kynja ef leiðrétt hefur verið fyrir þyngd ($P = 0,025$), en hrygnurnar eru að meðaltali mun léttari ($\bar{x} = 2667$ g) en hængarnir ($\bar{x} = 4516$ g). Einnig er munur á meðallengd m.t.t. kyns fiskanna en ekki eins mikill, hrygnur að meðaltali 52,6 cm og hængar 62,5 cm.

Til þess að varpa ljósi á viðbótarmarkmið rannsóknarinnar varðandi hvort munur sé á magni kvikasilfurs í urriða sem veiddur er á Nesjahraunssvæðinu og annarra veiðisvæða var einnig skoðað hvort marktækur munur væri í magni kvikasilfurs í urriða á mismunandi veiðisvæðum (14. og 15. mynd).



14. mynd. Fylgni milli kvikasilfursstyrks urriða og veiðistaðar þeirra. Leiðrétt hefur verið fyrir lengd fiska.



15. mynd. Box and whiskers mynd fyrir kvikasilfursmagn í urriða frá mismunandi veiðisvæðum í Þingvallavatni. Leiðrétt hefur verið fyrir lengd fiska.

Niðurstöðurnar sýndu að sá breytileiki sem fannst í innihaldi kvikasilfurs í holdi urriða m.t.t. svæðanna sem þeir voru veiddir á, var almennt ekki tölfræðilega marktækur, nema tölfræðilega marktækur munur er á kvikasilfursstyrk í urriðum frá Nesjahraunssvæðinu og urriðum frá Suðursvæðinu ($P=0,024$) skv. einhliða ANOVA prófi sem og bæði Holm-Sidak post hoc prófi og Rank

prófi. Munurinn sem fannst í kvikasilfursmagni urriða á þessum tveimur svæðum er vísbending um að þarna geti verið um svæðabundinn mun að ræða sem rétt væri að athuga nánar. Hins vegar reyndust urriðar af Norður- og Vestursvæði ekki marktækt frábrugðnir urriðum af Nesjahraunssvæðinu varðandi kvikasilfursinnihald. Gagnasöfnun rannsóknarinnar byggði fyrst og fremst á því að gera marktæka athugun á kvikasilfursmagni urriða með hliðsjón af stærðarhópum. Gögnin voru síðan einnig nýtt til að varpa ljósi á viðbótarmarkmið rannsóknarinnar og því var kvikasilfursmagn urriða á mismunandi veiðisvæðum borið saman, þó svo að úrtak hvers veiðisvæðis væri lítið og breytileiki þeirra fiska talsverður. Sá samanburður sýndi að Nesjahraunssvæðið skar sig ekki frá öðrum svæðum með afgerandi hætti, en gögnin gáfu ekki færi á nánari samanburði.

Fyrirliggjandi gögn frá rannsóknum í Þingvallavatni benda ekki til þess að kvikasilfur berist alla jafnan með heitu affallsvatni frá jarðvarmavirkjuninni á Nesjavöllum niður á strandsvæði Nesjahrauns eða jafnvel með áfalli frá gufu orkuversins á það svæði eða önnur við vatnið. Hins vegar er eðlilegt að velta því fyrir sér hvort sá há vatnshiti sem er að finna með ströndum Nesjahrauns geti hugsanlega leitt óbeint til þess að urriðum sem nýta Nesjahraunssvæðið sé til lengri tíma lítið hættara við uppsöfnun á kvikasilfri heldur en urriðum á öðrum svæðum. Hér er einungis um vangaveltur að ræða sem eru settar fram til umhugsunar ekki síst fyrir þá sem aðila sem mögulega ráðast síðar meir í nánari samanburðarathuganir á uppsöfnun kvikasilfurs í fiski og öðrum lífverum á Nesjahraunssvæðinu og öðrum svæðum Þingvallavatns. Ef við víkjum að möguleikum þess að hár vatnshiti við Nesjahraun skapi aðstæður sem óbeint geta varðað uppsöfnun kvikasilfurs þá er hugsanlegt að aukinn vatnshiti örvi virkni örvera m.t.t. umbreytingu þeirra á kvikasilfri í metýl-kvikasilfur. Einnig er eðlilegt að velta fyrir sér sérstöðu urriðanna sem nýta þetta svæði, með hliðsjón af möguleikum þeirra umfram urriða á öðrum svæðum til ætisöflunar og vaxtar. Þannig hafa urriðar við Nesjahraun orðið uppvísir að því að éta af kappi yfir köldustu vetrarmánuðina vegna þess að hitinn gefur þeim möguleika á að melta á þeim tíma og vegna þess að murtuna mun seint þrjóta þá geta þeir með þessu móti stundað ætisöflun árið um kring með tilheyrandi vaxtarmöguleikum. Þessi mikla virkni fiskanna á ársgrundvelli hraðar líkamsvextinum sem og almennum efnaskiptum samanbörð við þá urriða sem dvelja við köldu lindirnar að vetrinum. Í ljósi þess má íhuga hvort slíkum fiski sé hættara við að safna hraðar upp kvikasilfri en fiskum sem lifa hæglátara lífi m.t.t. vaxtar og efnaskipta. Heillavænlegt er til framtíðar lítið að vakta áfram svæðið undan Nesjahrauni m.t.t. hitafars, efnainnihalds vatnsins sem og viðgangs fiska og annarra lífvera þar.

Tafla 8 sýnir ýmis meðaltöl yfir fiskana m.t.t. svæðanna sem þeir voru veiddir á.

Tafla 8. Meðalgildi yfir fisklengd, fiskþyngd og fitu í fiskholdi, miðað við veiðisvæði. Hlutfallið (g/cm) er reiknað sem þyngd/lengd.

	Lengd cm	Þyngd g	Hlutfall g/cm	Aldur (spönn)	Fita %
Suðursvæði	41,5	1709	41,2	2-6	4,5
Vestursvæði	55,2	2905	52,6	2-13	5,1
Nesjahraunssvæði	58,8	3270	55,6	4-9	5,8
Norðursvæði	84,6	8216	97,2	4-12	2,8

Rannsóknin staðfestir fyrri niðurstöður er byggðu á snefilefnagreiningu á 6 urriðum úr Þingvallavatni (heimasíða Umhverfisstofnunar¹) um að líkur eru á að styrkur kvikasilfurs sé yfir settum viðmiðunargildum í Þingvallaurriða sem er yfir 60 cm að lengd. Rannsóknin sem hér er til umfjöllunar hefur það umfram fyrri magngreiningar á kvikasilfri úr Þingvallaurriða að hún var sett upp með það að leiðarljósi að greina snefilefnin úr urriðum af öllum þeim fiskstærðum sem vænta má að geti verið

nýttar til manneldis úr Þingvallavatni og náði þessi rannsókn yfir urriða sem eru á bilinu 20 – 100 cm að lengd. Vegna þess var hægt að setja gögnin fram heildstætt fyrir 4 stærðarhópa með að lágmarki 10 einstaklingum í hverjum hóp. Þetta gerði kleift að afla marktækra niðurstaðna varðandi kvikasilfursinnihald Þingvallaurriða á stærðarbilinu 20-100 cm.

Háan styrk kvikasilfurs í stórvöxnum Þingvallaurriða má líklega fyrst og fremst rekja til lifnaðarháttanna Þingvallaurriðans og helsta ætis hans murtunnar. Enda er kvikasilfur almennt að finna í litlum mæli í ferskvatnsfiskum á Íslandi (Guðjón Atli Auðunsson 1995, Guðjón Atli Auðunsson 1996, Guðjón Atli Auðunsson 1997, Davíð Egilsson ofl. 1999). Uppsöfnun kvikasilfursins í fiskunum verður svo mikil sem raun ber vitni vegna þess að urriðarnir ná að jafnaði í senn miklum líkamsburðum og langri ævi sem leiðir til þess að þeir innbyrða mikið af bleikju. Þar er fyrst og fremst um að ræða bleikjuafbrigðið murtu. Þessi fæðuvistfræðilegu tengsl með urriðann og murtuna í aðalhlutverkum standa líklega að baki þeirri uppsöfnun kvikasilfurs í fiskholdi stórvaxinna Þingvallaurriða. Frekari rannsóknir eru æskilegar til að skoða feril lífmögnunarinnar sem um leið myndi sannreyna umrætt vægi hennar með afgerandi hætti. Í upphaflegri rannsóknaráætlun til UOOR var ráðgert að rannsaka einnig hornsíli og mismunandi bleikjuafbrigði til að meta kvikasilfursmögnun upp fæðukeðjuna og bera Nesjahraunssvæðið þannig saman við önnur svæði Þingvallavatns. Þær upplýsingar hefðu gefið góða mynd af lífmögnun kvikasilfurs í Þingvallavatni. En þar sem styrkfjárhæð UOOR til verkefnisins var minni en helmingur þess styrkfjár sem upphafleg umsókn til sjóðsins hafði ráðgert, þá reyndist nauðsynlegt fella burtu þá gagnaöflun sem hefði varpað ljósi á þessa þætti.

Fyrri rannsóknir í Þingvallavatni hafa sýnt lágan styrk kvikasilfurs í vatnabobba, síkjamara og í fiskholdi bleikju. Áðurnefndar mælingar á kvikasilfri í bleikju í Þingvallavatni sýndu reyndar einnig forvitnilegan mun í styrk kvikasilfurs m.t.t. þess um hvaða bleikjuafbrigði var að ræða. Þannig var magn kvikasilfurs helmingi minna í dvergbleikju og kuðungableikju miðað við það magn sem fannst í murtu og sílableikju. Nokkuð sem hefur líklega með mismunandi megin æti og um leið ætisöflunarsérhæfingu þessara fiska að gera. Erlendar rannsóknir á bleikjum sem stunda fiskiát í stöðuvötnum þar sem kvikasilfur í umhverfinu er lágt sýna slíka uppsöfnun (Rognerud o.fl., 2002). Í sömu rannsókn var gildi kvikasilfurs mun lægra í holdi bleikja og urriða sem átu fyrst og fremst hryggleysingja (Rognerud o.fl., 2002). Hátt kvikasilfur í stórvöxnum Þingvallaurriða og sambærilegum ránfiskum eru góð dæmi um það hve lífmögnun kvikasilfurs getur haft mikil áhrif í vötnum þar sem lagskipting fæðukeðjunnar býður upp á slíkt og fiskiæturnar ráða ríkjum í efsta hluta fæðukeðjunnar.

Til viðbótar ofansögðu þá má geta þess að í kynningu á niðurstöðum rannsókna sem eru á lokastigi er tóku til mælinga á styrk kvikasilfurs í 12 stöðuvötnum hérlendis kom fram að styrkur kvikasilfurs var lágur í urriðum úr flestum vatnanna að frátöldum Þingvallavatni, Skorradalavatni, Baulárvallavatni og Hraunsfjarðarvatni á Snæfellsnesi (mbl.is, 29/7, 2009). Ályktun þeirra rannsókna á fæðuvistfræðilegum orsökum þessa mismunar ber saman við niðurstöður þeirra rannsókna sem hér hafa verið kynntar.

5.5. Neysla urriða úr Þingvallavatni

Hámarksgildi kvikasilfurs í laxfiskum samkvæmt íslenskum og evrópskum reglugerðum er 0,5 mg/kg (EC Directive 188/2006, Reglugerð 697/2008) og samkvæmt þeim reglugerðum má ekki dreifa eða selja matvæli sem innihalda kvikasilfur í hærri styrk en hámarksgildið segir til um þar sem slík matvæli geta verið skaðleg heilsu neytenda. Þegar farið er eftir viðmiðum á heimasíðu Umhverfisstofnunar og litið til fisks sem væri með kvikasilfurmagn í hærri kantinum (0,9 mg kvikasilfurs/kg) þá myndi ráðlagður hámarks vikuskammtur af slíkum fiski vera 250 g fyrir 70 kg einstakling sem ekki væri í

áhættuhópi. Það samsvarar um einni til tveimur máltíðum af þeim fiski á viku. Fyrir barnshafandi konur og konur með börn á brjósti væri hinsvegar mælt með að borða ekki fisk með hátt kvikasilfursmagn oftar en 2-3 ári, (heimasíða Umhverfisstofnunar¹). Í þessu sambandi er rétt að geta leiðbeinandi reglna norskra yfirvalda í fæðuöryggismálum m.t.t. kvikasilfurs í urriða og fleiri ferskvatnsfiskum. Þar er fólk hvatt til að ganga mun lengra í varúð sinni gagnvart neyslu á ferskvatnsfiski (fiskiaetum) en þau leiðbeinandi viðmið sem tíunduð hafa verið hér (<http://www.environment.no>).

Magn kvikasilfurs í Þingvallaurriða í þeirri rannsókn sem hér er til umfjöllunar er á bilinu 0,02 - 1,0 mg/kg. Niðurstöður rannsóknarinnar sýna að urriði úr Þingvallavatni sem er lengri en 60 cm er líklegur til að innihalda kvikasilfursmagn sem er meira en það sem leyfileg viðmiðunarmörk um matvæli til dreifingar og sölu gera ráð fyrir. Réttast þótti að nota fisklengdina þar sem hvað auðveldast er fyrir veiðimenn að mæla lengdina þegar fiskurinn er veiddur, einnig vegna þess að það er vel þekkt staðreynd að sterk fylgni er milli lengdar og kvikasilfursmagns í fiski. En fiskþyngdin sem sambærileg væri fyrir þessi 60 cm viðmiðunarmörk er u.þ.b. 3 kg. Í sambandi við veiðar á stórrurriða þá er nauðsynlegt að geta þess að urriði sem hefur náð 60 cm að lengd er þá þegar eða í næstu framtíð mikilvægur þátttakandi í hrygningunni. Þeir fiskar skipta því miklu fyrir vöxt og viðgang urriðanna í Þingvallavatni. Því fer vel á því að sleppa Þingvallaurriðum sem náð hafa 60 cm lengd.

Nauðsynlegt er að undirstrika það sérstaklega hve mikilvægt það er að einstaklingar í ákveðnum áhættuhópum, eins og barnshafandi konur og konur með börn á brjósti og jafnvel konur á barneignaraldri, fari varlega í neyslu á matvöru sem inniheldur kvikasilfur í hærri styrk en leyfilegt er (WHO 2004).

6. Lokaorð

Niðurstöður rannsóknarinnar hafa skilað mikilvægum upplýsingum um styrk kvikasilfurs í Þingvallaurriða. Mikilvægustu niðurstöðurnar í því sambandi kynntu Matís og Laxfiskar í maí 2009 á opnum kynningarfundum og einnig á vefsvæðum og í fjölmiðlum fyrir almenningi og veiðimönnum. Þannig var fólki gert kleift strax í upphafi árlegs veiðitímabils að taka tillit til hagnýtra upplýsinga sem rannsóknin skilaði og taka mið af þeim við tilhögun sína á veiðum á Þingvallaurriða og neyslu á þeim fiski. Með gerð þessarar skýrslu er lokið við að koma á framfæri niðurstöðum rannsóknarinnar á heilsteyptan hátt og um leið hefur kynningarhluta markmiðanna að fullu verið náð.

Greiningar á snefilefnum í fiski sem nýttur er til matar er eitt af þeim grundvallatriðum sem framkvæma þarf með vöktun á tilteknu árabili til að fylgjast með mögulegum breytingum á efnainnihaldi matfiska. Slík vöktun ætti að vera sjálfgefin í Þingvallavatni. Einnig væri æskilegt að kortleggja uppsöfnun kvikasilfurs í fæðukeðju Þingvallavatns og tilheyrandi orsakasamhengi með því að framkvæma nákvæma rannsókn á fæðukeðju Þingvallavatns í þessu tilliti, frá lægstu þrepum til urriðanna og annarra afræningja sem tróna í efstu þrepum fæðukeðjunnar.

7. Þakkarorð

Margir aðilar hafa greitt götu rannsókna. Styrkfé til rannsókna fékkst úr Umhverfis- og orkurannsóknasjóði Orkuveitu Reykjavíkur. Leyfi til rannsókna gáfu Þjóðgarðurinn á Þingvöllum (Þingvallanefnd) og aðrir veiðiréttarhafar. Fyrirliggjandi gögn Laxfiska/Jóhannesar Sturlaugssonar voru nýtt til að byggja undir rannsóknina, m.a. gögn frá atferlissrannsóknum og vatnshitamælingum. Liðveislu við sýnatöku veittu að segja má allir bændur við vatnið og ýmsir stangveiðimenn. Við hæfi er

að minnast sérstaklega einstakrar hjálpsemi Egils Guðmundssonar í Króki, þess mikla áhugamanns um Þingvallaurriðann sem féll frá áður en verkefninu lauk. Framlag stangveiðimannanna Ólafs Guðmundssonar, Elmars Eggertssonar og Jóns Ögmundssonar er einnig rétt að geta sérstaklega. Sumarliði Óskarsson hjá Lax- og silungsveiðisviði Fiskistofa útvegaði upplýsingar um þá örmerktu urriða sem veiddust. Þuríður Ragnarsdóttur hjálpaði við sýnaundirbúning. Loftmyndagögn af Þingvallavatnssvæðinu sem eru grundvöllur loftmyndakortanna eru frá Loftmyndum ehf. Öllum þessum aðilum eru færðar bestu þakkir fyrir samstarfið.

Heimildir

- Amin-Zaki, L., Elhassani, S.B., Majeed, M.A., Clarkson, T.W., Doherty, R.A. and M.R. Greenwood; Intrauterine methylmercury poisoning in Iraq. *Pediatrics*, 54 (1974) 597-595.
- Axelrad, D.A., Bellinger, D.C., Ryan, L.M., Woodruff, T.J. 2007. Dose-response relationship of prenatal mercury exposure and IQ: An integrative analysis of epidemiologic data. *Environ. Health Persp.* 115: 609-615.
- Árni Snorrason. 2002. Vatnafar á vatnasviði Þingvallavatns. Bls 110-119. Í: Þingvallavatn - Undraheimur í mótun (ritstj. Pétur M. Jónasson og Páll Hersteinsson) Mál og menning, Reykjavík 2002: 110-119.
- Bagenal, T. B. og F. W. Tesch. 1978. Age and growth. Í: T. Bagenal (ritstj.), Methods for assessment of fish production in fresh waters, s: 101-136.
- Bloom, N.S. 1992. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49: 1010-1017.
- Boening, D.W. 2000. Ecological effects, transport, and fate of mercury: A general review. *Chemosphere*, 40: 1335-1351.
- Cohen, J.T., Bellinger, D.C. and B.A. Shaywitz (2005) A quantitative analysis of prenatal methyl mercury exposure and cognitive development. *Am. J. Prev. Med.*, 29, 353 – 365.
- Cordier, S., Garel, M., Mandereau, L., Morcel, H., Doineau, P., Gosme-Seguret, S., Josse, D., White, R., Amiel-Tison, C. 2002. Neurodevelopmental investigations among methylmercury-exposed children in French Guiana. *Environ. Res.* 89: 1-11.
- Dahl, K. 1943. Ørret og ørretvann . J. W. Cappelens Forlag. Oslo. 182 bls.
- Davidson, P.W., Myers, G.J. Cox, C., Axtell, C., Shamlaye, C., Sloane-Reeves, J., Cernichiari, E., Needham, L., Choi, A., Wang, Y., Berlin, M., Clarkson, T.W. 1998, Effects of prenatal and postnatal methylmercury exposure from fish consumption on neurodevelopment. *J. Am. Med. Assoc.* 280: 701-707.
- Davidson, P.W., Myers, G.J., Weiss, B. 2004. Mercury exposure and child development outcomes. *Pediatrics*. 113: 1023-1029.
- Davíð Egilsson, Elísabet D. Ólafsdóttir, Eva Yngvadóttir, Helga Halldórsdóttir, Flosi Hrafn Sigurðsson, Gunnar Steinn Jónsson, Helgi Jensson, Karl Gunnarsson, Sigurður A. Þráinsson, Andri Stefánsson, Hallgrímur Daði Indriðason, Hreinn Hjartarson, Jóhanna Thorlacius, Kristín Ólafsdóttir, Sigurður R. Gíslason og Jörundur Svavarsson. 1999. Mælingar á mengandi efnum á og við Ísland. Niðurstöður vöktunarmælinga. Starfshópur um mengunarmælingar. Reykjavík. 138 bls.
- European Commission Regulation 2006, No 1881/2006, Setting of maximum levels for certain contaminants in foodstuffs.
- Freysteinn Sigurðsson og Guttormur Sigbjarnarson. 2002. Grunnvatnið til Þingvallavatns. Bls 120-135. Í: Þingvallavatn - Undraheimur í mótun (ritstj. Pétur M. Jónasson og Páll Hersteinsson) Mál og menning, Reykjavík 2002: 120-135.
- Grandjean, P. 1997. Mercurial uncertainties in environmental health. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 837: 239-45.

- Guðjón Atli Auðunsson. 1995. Könnun á snefilmálmum í lífríki Þingvallavatns. Skýrsla RF 94.
- Guðjón Atli Auðunsson. 1996. Könnun II á snefilefnum í lífríki Þingvallavatns. Skýrsla RF 128.
- Guðjón Atli Auðunsson. 1997. Könnun á ólífrænum og klórlífrænum snefilefnum í vistkerfi Þingvallavatns. Sýnataka 1994-1996. Skýrsla RF 97.
- Harada, M.; Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution; *Crit. Rev. Toxicol.*, 25 (1995) 1-24.
- Heimasíða Umhverfisstofnunar¹ : <http://www.ust.is/Adofinni/Frettir/nr/4942>
- Heimasíða Umhverfisstofnunar² : http://www.ust.is/media/skyrslur2002/AMSUM_k10_Stoduvotn.pdf
- Hilmar J. Malmquist og Jóhannes Sturlaugsson. 2002. Urriði í Þingvallavatni, bls 197-202. Í: Þingvallavatn - Undraheimur í mótun (ritstjórar Pétur M Jónasson og Páll Hersteinsson). Mál og menning, Reykjavík. 303 bls.
- Jóhannes Sturlaugsson og Hilmar J. Malmquist. 2010. Brown trout in Lake Thingvallavatn. Í: Life in the lake (ritstjórar Pétur M. Jónasson og Páll Hersteinsson). (í prentun).
- Jóhannes Sturlaugsson. 2001. Atferlisvistfræði Þingvallaurriða. Veiðimaðurinn. 165: 58-60.
- Jóhannes Sturlaugsson. 2005. Rannsóknir á atferlisvistfræði Þingvallaurriða - Greinagerð. Laxfiskar ehf. 10 bls.
- Jóhannes Sturlaugsson. 2007. Rannsóknir á atferlisvistfræði Þingvallaurriða – Dæmi um niðurstöður. Laxfiskar ehf. 17 bls.
- Kristján Sæmundsson. 2002. Jarðfræði Þingvallavatns og vatnasviðs þess. Bls 40-63. Í: Þingvallavatn - Undraheimur í mótun (ritstj. Pétur M. Jónasson og Páll Hersteinsson). Mál og menning, Reykjavík 2002: 40- 63.
- Magnús Jóhannsson, Benóný Jónsson og Ingi Rúnar Jónsson. 2005. Seiðarannsóknir í Öxará, Ölfusvatnsá, Villingavatnsá, Þingvallavatni og Efra-Sogi ásamt urriðarannsóknum í Þingvallavatni árið 2005. VMST-S/05005. 17 bls.
- Myers, G.J. and Davidson, P.W.; Does methylmercury have a role in causing developmental disabilities in children?; *Environ. Health Perspect.*, 108 (2000) 413-420.
- mbl.is, 2009, Hverfandi líkur á tengslum jarðvarmanýtingar og kvikasilfurs í urriða. http://www.mbl.is/mm/frettir/innlent/2009/07/07/telur_vidvaranir_ordum_auknar/. 7. júní, 2009.
- Nunnallee, E.P. og Jón Kristjánsson. 1978. Hydroacoustic assessment of the lake Thingvallavatn and lake Skorradalvatn populations. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir. 10: 141-155.
- Pétur M. Jónasson. 2002. Vistkerfið í heild. Bls 240-247. Í: Þingvallavatn - Undraheimur í mótun (ritstj. Pétur M. Jónasson og Páll Hersteinsson). Mál og menning, Reykjavík 2002: 240-247.
- Petersson- Grawè, K., Concha, G. og Ankarberg, E. 2007. Riskvärdering av metylkvicksilver i fisk. SLV skýrsla 10-2007, Stokkhólmur, Svíþjóð.
- Porcella, D. 1994. Mercury in the environment: Biogeochemistry. In: C.J. Watras and J.W. Huckabee, Editors, Mercury Pollution: Integration and Synthesis, CRC Press, Boca Raton, FL. 3-19.

Quality Assurance of Information for Marine Environmental Monitoring in Europe (QUASIMEME), www.quasimeme.org

Reglugerð um gildistöku tiltekinna gerða Evrópusambandsins um aðskotaefni í matvælum, 697/2008. Reglugerð Framkvæmdastjórnarinnar (EB) nr 78/2005.

Rognerud, S., Grimalt, J.O., Rosseland, B.O., Fernandes, P., Hofer, R., Lackner, R., Lauritzen, B., Lie, L., Massabuau, J.C. og Ribes, A. 2002. Mercury and Organochlorine contamination in brown trout (*Salmo Trutta*) and arctic charr (*Salvelinus alpinus*) from high mountain lakes in Europe and the Svalbard archipelago. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 2: 209-232.

Sigurður S. Snorrason, Hilmar J. Malmquist og Skúli Skúlason. 2002. Bleikjan, bls 179-196. Í: Þingvallavatn - Undraheimur í mótun (ritstjórar Pétur M. Jónasson og Páll Hersteinsson). Mál og menning, Reykjavík. 303 bls.

Sigurjón Rist. 1990. Vatns er þörf. Bókaútgáfa Menningarsjóðs. Reykjavík. 248 s.

Sloth, J.J., Julshamn, K., Lundebye, A.K. 2005. Total arsenic and inorganic arsenic content in norwegian fish feed products. *Aquaculture Nutrition* 11: 61-66

Sveriges Livsmedelsverk, www.slv.se.

Steuerwald, U., Weihe, P., Jorgensen, P.J., Bjerve, K., Brock, J., Heinzow, B., Budtz-Jorgensen, E., Grandjean, P. 2000. Maternal seafood diet, methyl mercury exposure, and neonatal neurologic function. *J. Pediatr.* 136: 599-605.

The Commission of the European Communities, Commission Regulation (EC) no 1831/2003 setting maximum levels of certain contaminants in foodstuff.

World Health Organization (WHO). 2000. WHO Food additive series: Methylmercury. International Programme on Chemical Safety. 44, <http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v44jec13.htm>

World Health Organization (WHO). 2004. Methylmercury. Sixty-first meeting of Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives and Contaminants. Safety evaluation of certain Food Additives and Contaminants. Food Additives Series, 52. World Health Organization, Geneva.

www.nmkl.org: Aðferðarlýsing NMKL nr 186-2007. Trace elements –As, Cd, Hg, Pb and other elements. Determination by ICP-MS after pressure digestion.

Zarandi, S. S., M., M. 2007. Waste water disposal at the Nesjavellir geothermal power plant, apparent problems and possible solutions. United Nations University. Geothermal training programme. Report 13. 25 bls.

Össur Skarphéðinsson. 1996. Urriðadans. Mál og menning, Reykjavík. 296 bls.