



Hvalir í vistkerfi sjávar

Tekið saman fyrir

matvælaráðherra af Dr. Eddu Elísabetu Magnúsdóttur,
lektor í líffræði við Háskóla Íslands

Markmið

Hér verður gert grein fyrir hlutverki hvala í vistkerfum sjávar með áherslu á íslensk hafsvæði samkvæmt stöðu vísindalegrar þekkingar. Könnuð verða áhrif hvala á fæðustofna þeirra auk annarra fiskistofna. Einnig verður skoðuð sérstaklega staða þekkingar á framlagi hvala til hringrása ólífrænna efna innan vistkerfa svo sem í tengslum við næringarefnaflutning og kolefnisbindingu. Jafnframt verður leitað svara við áhrifum hvala í íslenskum sjávarvistkerfum út frá næringarþörf og afránsþrýstingi þeirra. Rýnt verður í þær aðferðir sem beitt hefur verið við greiningu á áhrifum hvala í vistkerfum þeirra og áreiðanleika slíkra mælinga. Auk þess verða skoðaðir þeir helstu álagsþættir sem ógna tilvist hvala víðsvegar um heiminn með sérstöku tilliti til þess álags sem loftslagshlýnun og aðrar athafnir mannsins hafa og munu halda áfram að hafa á hvali. Með þessari yfirferð er þannig leitast við að fá skýrari mynd af gildi hvala í vistkerfum sjávar við Ísland.

Meðal spurninga sem leitað verður svara við í þessari yfirferð eru:

- Hver eru áhrif hvala á stofnstærð helstu nytjafiska á Íslandsmiðum?
- Hvað þyrfti að veiða marga hvali til að hafa marktæk áhrif á stofnstærð helstu nytjafiska?
- Hvert er gildi hvala fyrir vistkerfi hafsins?
- Hver er kolefnisbinding hvala?
- Hver er fæða hvala?
- Hverjar eru helstu ógnirnar sem steðja að hvöllum

Efnisyfirlit

Markmið	2
1 Samantekt.....	4
1.1 Áhrif hvala á fiskistofna í íslenskri lögsögu.....	4
1.2 Áhrif hvalveiða á stofnstærð helstu nytjafiska	4
1.3 Gildi hvala í vistkerfum hafsins.....	4
1.4 Kolefnisbinding hvala	5
1.5 Ályktun.....	5
2 Mat á áhrifum hvala á fiskistofna	6
2.1 Áhrif breytinga á stofnstærðum hvala í vistkerfi hafsins.....	8
3 Hvalir í vistkerfum sjávar	10
3.1 Gildi hvala í vistkerfum sjávar.....	10
3.2 Ferðir hvala.....	12
3.3 Staða hvalastofna á heimsvísu	13
3.4 Hvalveiðar og staða hvalastofna við Ísland	16
3.4.1 Steypireyðar	17
3.4.2 Langreyðar	17
3.4.3 Hnúfubakar	17
3.4.4 Hrefnur	18
3.5 Hlutverk hvala í hringrásum ólífrænna efna í vistkerfum sjávar	19
3.6 Áætluð útlosun á köfnunarefni (N) í úrgangi hvala á íslenskum hafsvæðum	23
3.7 Hlutverk hvala í kolefnisbindingu sjávar.....	25
3.8 Helstu ógnir sem steðja að hvalategundum í dag	30
3.8.1 Skipaumferð	31
3.8.2 Hljóðmengun	31
3.8.3 Rusl og veiðarfæri.....	32
3.8.4 Sjúkdómar.....	32
4 Lokaorð.....	33
5 Þakkir	34
6 Heimildaskrá.....	34

1 Samantekt

1.1 Áhrif hvala á fiskistofna í íslenskri lögsögu

Ljóst er að íslensk hafsvæði eru ákaflega mikilvæg fjölda stórhvela og annara sjávarspendýra til vaxtar og viðhalds. Útbreiðsla stórhvelastofna nær þó langt út fyrir íslenska lögsögu og því einskorðast áhrif þeirra ekki einvörðungu við Ísland. Áhrif þeirra teygja sig vítt og breitt um Norður Atlantshafið og jafnvel víðar.

Áætluð neysla allra sjávarspendýra sem finnast innan íslenskrar lögsögu er talin um nífalt meiri en sjávarútvegurinn á Íslandi tekur. Aftur á móti neyta sjávarspendýr að langmestu leyti fæðu úr neðri þrepum vistkerfa sjávar, sem sjávarútvegurinn nýtir ekki eða í litlu magni, eins og átu og smærri uppsjávarfiska. Þrátt fyrir að neyta þessarar fæðu úr neðri þrepum fæðuvefsins hafa rannsóknir bent til þess að endurkoma hvala á tiltekin svæði geti eflt þessa fæðustofna, eins og átu. Því er skörun þessara sjávarspendýra við íslenskan sjávarútveg líklega lítil þar sem sjávarútvegurinn tekur langmestan hluta sjávarfangs úr efri þrepum fæðuvefsins. Aftur á móti er vöntun á rannsóknum sem kanna mögulegt álag á neðri þrep fæðuvefsins af völdum hvala.

Fiskveiðar Íslendinga fara að mestu leyti fram innan landgrunnins (< 500 m dýpi) og því má ætla að bein skörun sé helst við smærri sjávarspendýr eins og hnísur, höfrunga og seli, sem stunda sitt fæðunám ofar í fæðuvefnum, og að einhverju leyti við stærri strandhvali eins og hrefnur og hnúfubaka. Langreyðarstofninn í N-Atlantshafi tekur mestan lífmassa úr fæðuvefnum samanborið við önnur sjávarspendýr þar sem þær éta að mestu ljósátutegundir fyrir utan landgrunnið. Skörun á fæðuvali og fæðuöflunarsvæðum langreyða og flestra skíðishvala við íslenskan sjávarútveg er því óveruleg.

1.2 Áhrif hvalveiða á stofnstærð helstu nytjafiska

Stjórnun á stærð fiskistofna með hvalveiðum hefur mjög takmarkaðan vísindalegan rökstuðning, ef einhvern. Auk þess eru það stærri fiskar og aðrir afræningjar sem taka töluvert meira en hvalir af nytjategundum Íslendinga. Ábyrg fiskveiðistjórnun, þar sem notast er við vistkerfanálgun, er líklegri til árangurs.

Hlutfall hvala og sela, sem veidd eru innan íslenskrar lögsögu og annars staðar í Norðurhöfum og Barentshafi, er lágt samanborið við heildarfjölda sjávarspendýra á þessum svæðum eða um 0,12%. Má því ætla að þær veiðar hafi hverfandi áhrif á fiskistofna þessara svæða. Líklega þyrfti að margfalda veiðar á hvöllum við Ísland til að þær gætu haft mælanleg áhrif á fiskistofnana. Afar ólíklegt þykir að svo umfangsmiklar veiðar myndu leiða til marktækrar fjölgunar á efnahagslega mikilvægum fisktegundum í íslenskri lögsögu.

Frjósemi er lág hjá langlífum tegundum eins og skíðishvöllum þar sem kvendýrin eignast kálfa að jafnaði annað til þriðja hvert ár. Skíðishvalir eru jafnframt þéttleikaháðar tegundir sem þýðir að þeir eru háðir lágmarks þéttleika til að geta viðhaldið stofninum en þola ekki of mikinn þéttleika vegna innbyrðis samkeppni. Því er hröð offjölgun ólíklegri hjá slíkum tegundum. Þannig ýta hvalir frekar undir stöðugleika vistkerfa með því að draga úr miklum sveiflum í lífmassaframléiðslu á fæðusvæðum sínum.

1.3 Gildi hvala í vistkerfum hafsins

Vegna stærðar sinnar hafa hvalir og önnur stór sjávardýr vistmótandi áhrif á umhverfi sitt. Í því felst fyrst og fremst að styrkja vistferla og stuðla að heilbrigði vistkerfa. Það getur m.a. orsakast af:

- Ferðalögum hvalanna og aðferðum við fæðuöflun, t.d. með róti á sjávarbotni eða rekstri á fæðutorfum upp að yfirborðinu, sem gerir öðrum dýrum kleift að nálgast annars óaðgengilega fæðu.
- Flutnings næringarefna upp að yfirborði sjávar með úrgangi sem eykur getu lífvera til ljóstíllífunar (og um leið kolefnisbindingar) og sem jafnframt nýtist smærri dýrum sem nærast á lífrænum leifum í úrgangi hvalanna.
- Flutningi á kolefni og næringu til sjávarbotns með hvalshræjum. Á líkamsleifum hvala myndast tímabundin vistkerfi er þau falla niður á sjávarbotninn. Í djúpsjó er jafnframt að finna lífverur hverra lífsferlar og lífshættir eru aðlagðir að aðgengi að hræjum stórra sjávardýra, líkt og hvala. Með hræjunum flyst talsvert magn næringar niður á hafsbötn þar sem framleiðsla á lífmassa er að jafnaði afar lítil.

Búsvæði stórhvela spanna gífurlega stór hafsvæði sem leiðir til þess að þau flytja næringu á milli úthafs- og strandsvæða, ýmist í formi úrgangs eða líkamsleifa. Þannig tengja hvalir vistkerfi með ferðum sínum. Hvalir geta haft töluverð áhrif á stýringu lífverustofna á lægri fæðuþrepum. Ef umtalsverð fækkun eða jafnvel hrun verður í stofnum hvala eða annarra stórra sjávardýra á slíkum svæðum eru möguleikar á að keðjuverkandi áhrifa verði vart niður eftir fæðuþrepunum. Færð hafa verið rök fyrir því innan vísindaheimsins að keðjuverkunin geti leitt til minnkunar á lífbreytileika svæðisins og í afköstum vistkerfisins í tilflutningi næringarefna sem og til kolefnisbindingar.

1.4 Kolefnisbinding hvala

Þær umfangsmiklu hvalveiðar sem stóðu yfir á 18. og 19. öld, sem og aðrar veiðar á sjávarlífverum, hafa leitt til verulegs samdráttar í fjölda og lífmassa stærri sjávardýra. Með hlutfallslegri aukningu á smærri tegundum í vistkerfi sjávar hefur lífmassaframleiðsla vistkerfa almennt dregist saman og þar af leiðandi skilvirkni í bindingu kolefnis. Langlíf og stór dýr eins og stórhveli byggja upp hlutfallslega meiri lífmassa en smærri dýr þar sem efnaskipti þeirra eru hægari, það leiðir til aukinnar uppsöfnunar kolefnis og annarra efna í skrokkum þeirra. Talið er að iðnaðarhvalveiðar sem hófust á 19. öld hafi fjarlægð um 17 milljón tonn af kolefni sem bundin voru í veiddum hvölum og að stórhvelastofnar heimsins hafi bundið um 9 milljónum tonnum meira af kolefni en áætlað er fyrir núlifandi stórhvelastofna. Vöntun er á rannsóknum og gögnum sem geta með meiri nákvæmni áætlað hvert hið beina og óbeina framlag hvala til kolefnisbindingar er, svo sem með virkjun lífferlisins, sem stuðlar að bindingu kolefnis í hafi, og bindingu kolefnis í gegnum ljóstíllífun fyrir tilstuðlan dreifingar á ólífrænni næringu.

1.5 Ályktun

- Fæðunám langreyða og annara skíðishvala er að mestu leyti fengin úr neðri fæðuþrepum sjávar en stærstur hluti þess sjávarfangs sem veitt er við Íslandsstrendur kemur úr efri þrepum fæðuvefsins. Því hefur neysla skíðishvala á öðrum sjávarlífverum óveruleg áhrif á íslenskan sjávarútveg.
- Stjórnun á stærð fiskistofna með hvalveiðum hefur lítinn sem engan vísindalegan rökstuðning. Ábyrg fiskveiðistjórnun þar sem notast er við vistkerfanálgun er líklegri til árangurs.
- Hvalir hafa vistmótandi áhrif á umhverfi sitt, styrkja vistferla og stuðla að heilbrigði vistkerfa.
- Íslensk hafsvæði eru mikilvæg fyrir stofna stórhvela og annara sjávarspendýra til vaxtar og viðhalds. Því má halda því fram að ábyrgð Íslendinga sé töluverð gagnvart þessum stofnum.

2 Mat á áhrifum hvala á fiskistofna

Rannsóknir sem hafa kannað áhrif hvala á fiskistofna á síðastliðnum áratug hafa sýnt að með brotthvarfi hvala verður að mestu vart við óverulega breytingu á flestum fiskistofnum. Vistkerfalíkönin sem nýtt hafa verið í þessum rannsóknum hafa jafnvel sýnt fram á fækkun í tilteknum fiskistofnum, þá sérstaklega á hafsvæðum sem eru ekki frjósöm^[28-30]. Rannsóknirnar hafa nýtt fjölstofnalíkön (sjá dæmi um Ecopath í Viðauka 3) sem bjóða upp á flóknari vistkerfisnálgun en áður var hægt^[28-31]. Miðað við niðurstöður þeirra rannsókna sem hafa kannað þessi áhrif (og verða ræddar nánar í þessum kafla) þyrfti líklega að margfalda veiðar á hvöllum við Ísland til að þær gætu haft mælanleg áhrif á fiskistofnana. Þar sem veiddir hvalir við Ísland sækja fæðu sína neðarlega í fæðuvefinn^[8, 32] er afar óljóst hvort svo umfangsmiklar veiðar myndu leiða til fjölgunar á efnahagslega mikilvægum fiskitegundum í íslenskri lögsögu. Slíkar veiðar myndu öllu heldur ógna hvalastofnum verulega sem í kjölfarið gæti haft neikvæð áhrif í vistkerfum sjávar.

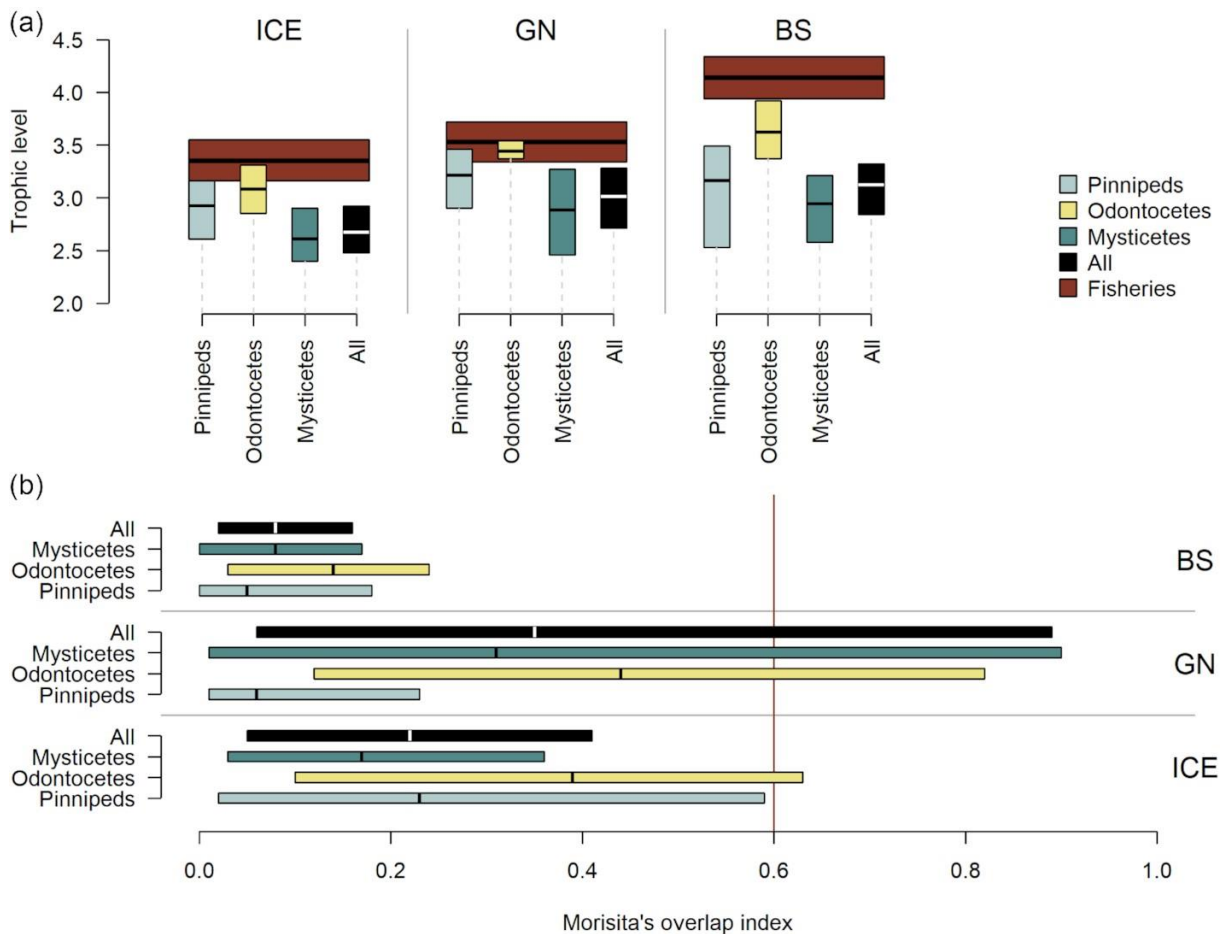
Mat á áhrifum hvala eða annarra afræningja á tiltekna tegundir neðar í fæðuvefnum kallar á vistkerfisnálgun í líkanagerð¹ þar sem tekið er tillit til fjölda tegunda á ólíkum fæðuprepum^[33]. Það sem flækir líkanagerðir af þessum toga er að samband tveggja tegunda getur verið beint eða óbeint. Beint samband er sem dæmi samband afræningja og bráðar þar sem engar aðrar tegundir koma á milli. Með óbeinu sambandi er átt við einhverjar tvær tegundir sem eru aðskildar milli nokkurra fæðuprepa og aðrar tegundir brúa bilið á milli þeirra. Möguleikar á óbeinum áhrifum einnar tegundar á aðra geta því verið ótalmargar^[34]. Dæmi um óbein áhrif einnar tegundar á aðra eru takmarkanir í aðgengi að fæðu. Þau áhrif verða til dæmis vegna samkeppni um fæðuna en einnig vegna hættu á afráni sem leiðir þá til þess að önnur tegund forðast að nýta sömu fæðulendur og mögulegur afræningi. Samband afræningja og bráðar er aftur skýrt dæmi um bein áhrif í gegnum afrán en slíkt samband hefur vissulega áhrif í gegnum allan fæðuvefinn þar sem afránið hefur áhrif á ýmsa ferla innan fæðuvefsins^[33]. Mikilvægir áhrifaþættir innan vistkerfanna eru flutningur lífvera á orku og næringarefnum og öðrum efnem (t.d. í úrgangi) lóðrétt og lárétt um vistkerfin^[33]. Stór og langlíf sjávardýr, eins og hvalir, eru þar mjög afkastamikil. Kolefnisbinding stórra afræningja er svo falin í þessum ferlum, þ.e. binding í eigin skrokkum þar til þeir drepast og falla til botns auk örvunar á frumframleiðslu í gegnum næringarefnaflutning á líftíma þeirra^[24, 35]. Þessa þætti þarf að taka tillit til eftir fremsta megni í líkönum þar sem áhrif tegundar á vistkerfin eru könnuð.

Árið 1997 kom út íslensk rannsókn þar sem gerð var tilraun til að meta áhrif afráns hvala á loðnu og þorsk (*Gadus morhua*) á íslenskum hafsvæðum^[36]. Í rannsókninni var notast við svokallað einstofna líkan til að meta stofnstærð þorsks fram í tímann. Einnig var notast við hrátt fjölstofnalíkan til að áætla óbein áhrif hvala á þorsk við Ísland í gegnum afrán á loðnu. Auk þess voru metin áhrifin af afráni hvala á þorsk á stofnstærð rækju (*Pandalus borealis*), en rækjan er mikilvæg fæðutegund þorsks. Meginniðurstöður rannsóknarinnar bentu til þess að ef hvalastofnar væru alfarið fjarlægðir úr vistkerfi sjávar umhverfis Ísland mætti áætla, þó með mikilli óvissu, að þorskafli Íslendinga gæti aukist um 20%. Ekki fannst mikil breyting á stofnstærð loðnunnar með eða án hvala og rækjustofninn stækkaði með tilvist hvala, enda nærast þeir að jafnaði ekki á rækjum. Höfundar greinarinnar voru meðvitaðir um þá miklu óvissu sem í gögnunum fólst enda var fjölstofnalíkanið einfalt og fjölmargar breytur sem voru óþekktar stærðir á þessum tíma og þurfti að áætla. Frá þeim tíma sem líkanið var hannað hefur aðferðafræðin við stofnstærðarmat og bein og óbein áhrif milli tegunda þróast umtalsvert. Nú er almennt stuðst við vistkerfislíkön^[37-40] sem taka tillit til mun fleiri þátta en hin einföldu líkön sem notast var við í íslensku rannsókninni^[36].

Nýleg rannsókn á samanlögðum áhrifum fiskveiða og afráns allra sjávarspendýra samanlagt á fiskistofna í Norðurhöfum og Barentshafi^[8] benti til að samkeppni milli sjávarspendýra og fiskveiða

¹ Ecosystem modelling approach

væri mest milli tannhvala og sjávarútvegs og að selir fylgdu þar þétt á eftir tannhvölum. Samkeppni sjávarspendýra og fiskveiða reyndist mest í Grænlandshafi af þeim svæðum sem voru könnuð en minnst í Barentshafi. Á íslenskum hafsvæðum reyndist mesta skörun fiskveiða vera við tannhvali og seli en ef fæðunám allra sjávarspendýranna var tekið saman var samkeppni við fiskveiðar á Íslandi vel undir þeim mörkum sem teljast tölfræðilega marktæk skörun (Mynd 1). Rannsóknirnar sýndu fram á að ef tekið er meðaltal af þeim fæðuprepum sem sjávarspendýr og sjávarútvegur veiða úr, veiðir sjávarútvegur marktækt hærra upp fæðuvefinn en sjávarspendýr^[8].



Mynd 1. Vísbendingar um mögulega skörun á nýtingu auðlinda milli sjávarspendýra (sela, skíðishvala og tannhvala) og útgerða í Norðurhöfum (GN = Grænlandshaf, ICE = Íslandshaf og landgrunnsbrún Íslands) og Barentshafi (BS). Þýðing á enskum heitum: Pinnipeds = hreifadýr (selir); Odontocetes = tannhvalir; Mysticetes = skíðishvalir. Myndin er fengin frá Mette Skern-Mauritzen og féll. ^[8] og birt með leyfi höfundar (Attribution 4.0 International (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)

Lífmassi sjávarspendýra er um þrefalt meiri innan íslenskrar lögsögu samanborið við Grænland og Barentshaf^[8] sem bendir til hversu mikilvægt það hafsvæði er fyrir viðkomu hvala- og selategunda. Það leiðir vissulega til þess að heildarfæðunám þeirra samanlagt er meira innan íslenskrar lögsögu en samanburðarsvæða (Grænlandshaf og Barentshaf)^[8]. Talið er að öll sjávarspendýr innan íslenskrar lögsögu neyti um nífalt meiri lífmassa en sjávarútvegurinn á Íslandi veiðir^[8]. Þar eru það skíðishvalirnir sem eru afkastamestir vegna stærðar sinnar og hlutfallslega mikils lífmassa. Sú fæða kemur þó að langmestu úr neðri þrepum fæðuvefsins sem sjávarútvegurinn nýtir ekki eða lítið (Mynd 1). Hafa ber í huga þegar svona tölur eru bornar upp að stofnar sjávarspendýra umhverfis Ísland og í Norður Atlantshafi eru flestir umtalsvert smærri í dag en fyrir tíma atvinnu hval- og selaveiða^[4, 16, 41-44], því

hefur náttúrulegt burðarþol fyrir sjávarspendýrum bæði á heimsvísu og umhverfis Ísland verið mikið. Þó er ekki hægt að fullyrða að svo stöddu hvort og þá að hvaða marki umhverfisbreytingar og athafnir mannsins hafa dregið úr því burðarþoli.

Efnaskiptahraði stórhvela er hlutfallslega lítill sem leiðir til mikillar uppbyggingar lífmassa og þar af leiðandi uppsöfnunar kolefnis og annara steinefna í skrokkum þeirra^[45-47]. Hver einstaklingur í stofnum staðbundinna smærri dýra eins og sela og smærri hvala neytir aftur á móti meira vegna hlutfallslega hærri efnaskiptahraða^[8]. Sú ályktun byggir á að efnaskiptahraði hryggdýra telst vera í veldinu $\frac{3}{4}$ af líkamsmassa einstaklings, lækkar því hlutfallslegur efnaskiptahraði með stærð og er því hærri í smærri dýrum^[45-47]. Enn vantar mikið upp á haldbær gögn um stofnstærðir og neyslu fjölmargra sjávarspendýra^[8]. Þó ættu niðurstöður rannsóknarinnar sem koma fram á Mynd 1 að gefa nokkuð áreiðanlega samantekt um skörun sjávarspendýra við fiskveiðar mannsins^[8]. Það ber vissulega að taka samantektir á borð við þessa með einhverjum fyrirvara þar sem tölur eru teknar saman frá mjög stóru hafsvæði sem spannar fjölmörg búsvæði. Sem dæmi eru fiskveiðar Íslendinga hvað mestar innan landgrunnis (< 500 m dýpi)^[48] og því má ætla að skörun við strandhvali eins og hnísur (*Phocoena phocoena*) og smærri höfrunga (*Delphinidae*), en einnig hrefnur (*Balaenoptera acutorostrata*) og hnúfubaka (*Megaptera novaeangliae*) sé líklegri á slíkum svæðum. Þó svo langreyðar (*Balaenoptera physalus*) taki mestan lífmassa úr fæðuvefnum neyta þær að mestu ljósátutegunda úti fyrir landgrunnið. Vöntun er á rannsóknum sem greina samkeppnisáhrif milli hvala og annara lífvera sem einnig leita sér fæðu neðarlega í fæðuvefnum. Slíkar upplýsingar yrðu ákaflega gagnlegar til að auka áráðanleika í mati á áhrifum hvala innan íslenskrar lögsögu og annarsstaðar. Í sérstökum tilfellum þar sem mikinn lífmassa ákveðinnar fæðugerðar hvala er að finna á afmörkuðu svæði geta hvalir neytt hlutfallslega mikils af viðkomandi stofni. Slíkt getur átt við þar sem síld er í vetrardvala innan fjarða eins og í Noregi^[49] og við Alaska^[50], þar getur álagið á tiltekna síldarstofna orðið mikið í afmarkaðan tíma (sjá nánar í kafla 2.1).

Það hlutfall hvala og sela sem veiddir eru í Norðurhöfum og Barentshafi er lágt, samanborið við heildarfjölda sjávarspendýra á þessum svæðum í dag, eða um 0,12%^[8] og má því ætla að þær veiðar hafi lítil áhrif á stærðir fiskistofna. Þegar litið er til þess sem hér hefur komið fram er ákaflega langsótt að réttlæta hvalveiðar með þeim rökum að þær efli fiskistofna. Til þess að hvalveiðar geti haft mælanleg áhrif á fiskistofna þyrfti líklega að margfalda veiðarnar sem gæti þá ýtt hvalastofnum aftur á barm útrýmingar. Þær aðgerðir myndu jafnframt ekki nægja til að tryggja stöðugan eða aukinn afla fyrir sjávarútveginn. Mikilvægara er að aðlaga fiskveiðistjórnun þar sem tekið er mið af heildaráhrifum hvala og annarra rándýra í vistkerfum sjávar, bæði hvað varðar afrán og þau áhrif sem tengjast vistmótun og næringarefnaflutningi. Ljóst er að íslensk hafsvæði eru ákaflega mikilvæg fjölda stórhvela og annara sjávarspendýra til vaxtar og viðhalds. Útbreiðsla stórhvelastofna nær þó langt út fyrir íslenska lögsögu og því einkorðast áhrif þeirra ekki aðeins við Ísland. Áhrif þeirra teygja sig vítt og breitt um Norður Atlantshafið^[28-30, 51].

2.1 Áhrif breytinga á stofnstærðum hvala í vistkerfi hafsins

Eins og fram hefur komið er ákaflega erfitt að áætla áhrif stækkandi eða minnkandi hvalastofna á stofna annarra sjávardýra með góðri nákvæmni. Sjávarspendýr og önnur dýr sem tróna ofarlega í fæðukeðjunni verða þess sjaldnast valdandi að fæðustofnar þeirra hrynji af völdum afráns. Aftur á móti getur minnkun í stofnum sjávarspendýra dregið úr endurheimt fæðustofna, t.d. þar sem ofveiði á þeim hefur verið mikil^[52, 53]. Sjávarspendýr eru sérlega næm fyrir breytingum í vistkerfum sínum eins og breytingu á útbreiðslu fæðu vegna hlýnunar sjávar og breytinga á hafstraumum sem og aðgengi að búsvæðum. Slíkar breytingar geta dregið verulega úr tækifærum sjávarspendýra til vaxtar og viðhalds og gert þau enn viðkvæmari í samkeppni við manninn um auðlindir^[54-56].

Hvalir - þá sérstaklega stórhveli - eru langlífar tegundir sem eignast fá afkvæmi í einu og sjaldan, eru háð lágmarks þéttleika til að geta viðhaldið stofninum en þola ekki of mikinn þéttleika vegna innbyrðis samkeppni (þéttleikaháð)^[57]. Þegar hvalastofnar stækka og nálgast burðarþol svæða sinna er sennilegt að líkamsástand og frjósemi fari þverrandi, líkur á að kálfar lifi fyrsta árið minnka einnig verulega eins og er þekkt hjá tegundum með sambærilegt lífsmynstur^[58-60]. Við þannig aðstæður getur stofninn sveiflast örlítið upp og niður fyrir burðarþol svæðis síns þar til hann nær meiri stöðugleika^[57]. Slíkar hægvaxta tegundir sem fjölga sér jafnframt hægt (k-tegundir) geta aftur á móti ýtt undir stöðugleika vistkerfa sinna þar sem þær geta dregið úr miklum sveiflum í lífmassaframleiðslu á svæðinu sem að jafnaði orsakast af breytileika í frumframleiðslu, afránsprýstingi, næringarframboði og fleira^[57]. Þessi grundvallarlögmál í vistfræði ber að hafa til hliðsjónar þegar lagt er mat á þol stofna fyrir álagi sem og áhrif þeirra innan vistkerfa.

Vöntun er á rannsóknum sem meta með beinum hætti áhrif hvalastofna á búsvæði sín. Ein slík tilviksrannsókn frá Alaska kannaði áhrif aukinnar viðveru hnúfubaka á afmörkuðu svæði á síldarstofn sem á vetrardvala á svæðinu^[50] en fjölmargar rannsóknir hafa á síðasta áratug eða svo gefið til kynna breytingar í útbreiðslu og farhegðun hnúfubaka með lengdri viðveru á fæðusvæðum sínum á norðlægum breiddargráðum fram á vetur^[50, 61-63], m.a. við Ísland. Frá því um 2010 hefur sést meira til hnúfubaka í hvalaskoðunarferðum á Íslandi bæði sumar og vetur, samanborið við árin á undan (persónuleg reynsla höfundar og samskipti við aðila í hvalaskoðun). Þó svo viðvera hnúfubaka og annara skíðishvala að vetri til á hærri breiddarbaugum sé ekki algert nýmæli^[64-66] bendir þessi aukna viðvera á fæðustöðvum til breyttra aðstæðna skíðishvala^[67-71]. Rannsóknin á fæðuhegðun hnúfubaka í Alaskaflóa benti til að afránsprýstingur hvalanna á Kyrrahafssíld (*Clupea pallasii*), sem hefur verið þar í vetrardvala, hafi aukist með lengdri viðveru fram á vetur og stækkandi stofni hnúfubaka á svæðinu^[50]. Sennilegt er að hnúfubakar leggi síðar af stað í far eða sleppi fari ef aðgengi að fæðu hefur verið slápt yfir sumarið. Í rannsókninni var talað um að nokkrir hvalanna í Alaskaflóa (veturinn 2017) væru sjáanlega í lélegu líkamsástandi, bæði horaðir og lúsugir sem er vísbending um lélegt líkamsástand og veikt ónæmiskerfi. Með stækkandi stofnum og aukinni samkeppni innan tegundar má ætla að á ákveðnum svæðum fari sumar hvalategundir að nálgast burðarþol svæða líkt og þessi tilviksrannsókn greinir frá. Í Alaskaflóa er meginfæða hnúfubaka á svæðinu síld, einnig sækja þeir í átu og aðra óskilgreinda fæðu en þó í afar litlum mæli^[50]. Á slíkum svæðum má gera ráð fyrir að afránsprýstingur stækkandi stofna hvala (í þessu tilfelli hnúfubaka) hafi tímabundið sjáanleg áhrif á stofnstærð meginfæðutegundar sem er ráðandi fæðutegund á svæðinu. Á Íslandsmiðum neyta hnúfubakar aftur á móti fjölbreyttrar fæðu, þá einna helst átu, loðnu og síld^[14, 63, 72]. Þó benda nýlegar rannsóknir á að síldin sé tekin í minna mæli en átan og loðnan^[72]. Eins og áður hefur verið nefnt er ekki þekkt hvaða áhrif stækkandi stofnar hvala hafi á lífmassaframleiðslu átutegunda í Norður Atlantshafi. Rannsóknir á áhrifum stækkandi steypireyðastofna í Suður Íshafi hafa aftur á móti gefið til kynna styrkingu átustofna á þeim svæðum sem steypireyðastofnar hafa styrkst^[73-75]. Helsta ástæðan er talin vera næringarefnaflutningur hvala en í úrgangi þeirra er mikið magn járns sem skortur er af á svæðinu en svifþörungur eru háðir þessu snefilefni fyrir starfsemi sína^[73-77]. Því geta áhrif hvala á búsvæði sín verið bundin aðstæðum hvers svæðis en ljóst er að frekari rannsókn er þörf til að svara slíkum spurningum með góðri vissu.

Samkvæmt rauðum lista IUCN á stöðu tegunda er áætlaður fjöldi hnúfubaka á heimsvísu um 135 þúsund dýr. Talið er að um 230 þúsund hnúfubakar (skekkmörk 156.000 - 401.000) hafi verið að finna á heimsvísu fyrir atvinnuhvalveiðar^[42, 78, 79]. Á heimsvísu telja steypireyðar um 10-20 þúsund dýr en eru talin hafa verið 330 þúsund (skekkmörk 298.000-359.000) á Suðurrhveli einu fyrir tíma atvinnuhvalveiða^[42]. Ef gengið er út frá íhaldssömu mati hefur fjöldi hnúfubaka á heimsvísu ekki náð neðri mörkum áætlaðrar alheimsstofnstærðar fyrir tíma hvalveiða og steypireyðar eiga enn langt í land. Hvort vistkerfi sjávar í dag haldi uppi slíkum fjölda er óljóst enda hafa vistkerfi sjávar breyst mikið frá því fyrir 19. öld, með t.d. verulegri fækkun í fiskistofnum vegna ofveiði mannsins, mengunar

og annarra umhverfisbreytinga^[80]. Miðað við stofnstærðir hnúfubaka, þar sem fjölgun hefur orðið mest, (Suðurhvelið, Norðaustur-Atlantshafið og Norður-Kyrrahafið) er tegundin ekki lengur í miklum vexti ef einhverjum. Sennilegt er að á sumum svæðum geti hnúfubakar farið að nálgast burðarþol sitt líkt og niðurstöður frá Alaskaflóa benda til^[50]. Slíkt ástand leiðir sennilega til tímabundinnar fækkunar á mikilvægustu fæðutegund hvalanna, sérstaklega ef ein fæðutegund er ráðandi. Þegar hvalastofn nálgast burðarþol fæðusvæða sinna mun stofninn líklega sveiflast að einhverju leyti með fjölgun og fækkun þar til stöðugleika er náð. Þar sem lífsferlar og lífshættir hvala (langlífi, þéttleikaháðir og lág frjósemi) draga úr miklum sveiflum má ætla að fæðutegundir þeirra, sem eru flestar skammlífari og fjölga sér örar (r-tegundir), veikist ekki markvert með fjölgun í stofnum hvala^[57].

3 Hvalir í vistkerfum sjávar

Vistkerfi sjávar á norðurskautinu og á lág-arktískum svæðum líkt og umhverfis Íslands hafa og eru enn að gangast undir umtalsverðar breytingar vegna hlýnunar sjávar og aukningar í frumframleiðslu á afmörkuðum svæðum^[81-85]. Loftslagstengd áhrif - eins og breytingar á hitastigi og seltu innan íslenskra og nálægra hafsvæða hafa leitt til breytinga á útbreiðslu fiska, hvala og annarra sjávarlífvera^[4, 86-88]. Þær tegundir uppsjávarfiska hér við land sem hafa sýnt hvað mestar breytingar í stofnstærð og útbreiðslu á undanförunum árum eru loðna, makrill (*Scomber scombrus*) og sandsíli (*Ammodytidae*)^[4, 86, 89]. Í kjölfar hruns á sandsílastofni á landgrunninu sunnan við Ísland í kringum aldamótin 2000^[4, 90] varð umtalsverð fækkun í þeim stofnum sjávardýra sem hafa nýtt sandsíli að miklu leyti. Þessi áhrif greindust fljótlega meðal fjölmargra sjófuglategunda^[91, 92]. Breytingar í átustofnum^[93] um og við landið eru jafnframt taldar hafa haft áhrif af afkomu og útbreiðslu sjófugla og hvala^[4, 94]. Komið hafa í ljós markverðar breytingar á útbreiðslu og fjölda tiltekinnna hvalategunda við Ísland og í Noregshafi sem rekja má til þessa óstöðugleika í útbreiðslu og fjölda innan fæðustofna eins og átu, sandsílis og loðnu^[4, 95, 96]. Hrefnum fækkaði umtalsvert við Ísland upp úr 2007 eða úr um 44.000 dýrum árið 2001 í um 11.000 dýr árið 2009 og er áætlað að útbreiðsla þeirra hafi færst norðar fyrir vikið^[4, 44]. Vegna þessara breytinga í fæðuframboði breyttist fæðusamsetning hrefna hér við land^[90]. Hnúfubökum hefur fjölgað við landið frá því um 1995 en stofninn hefur náð nokkrum stöðugleika síðan 2001^[4, 44]. Útbreiðsla steypireyða hefur færst norðar frá því að hafa áður verið nokkuð bundin við Irmingerhaf milli Grænlands og Íslands. Sú tilfærsla gæti hafa tengst fjölgun í langreyðastofninum síðan 1987 sem hefur leitt til skörunar þessara tegunda er sú síðarnefnda færði sig út í dýpri hluta Grænlandshafs.

Þrátt fyrir að stórhveli líkt og steypireyður, langreyður, hnúfubakur og hrefna geti ferðast langar vegalengdir milli hafsvæða og sumar hverjar sýnt sveigjanleika í fæðuvali benda rannsóknir til þess að breytingar á útbreiðslumynstri fæðutegunda þeirra hafi leitt til neikvæðra áhrifa á líkamsástand þeirra og frjósemi^[58-60, 97]. Sífelld fleiri rannsóknir gefa til kynna að einn af lykilþáttum í vistkerfum sjávar sem þarf að endurheimta og styrkja að nýju séu stærri sjávardýr sem tróni ofarlega í fæðukeðjunni, líkt og hvalir. Greina má skýran sameiginlegan rauðan þráð í niðurstöðum og ályktunum þessara rannsókna um að endurheimt og verndun stórra sjávardýra muni auka stöðugleika vistkerfa sjávar og draga úr miklum sveiflum í stofnstærðum dýra neðar í fæðuvefnum. Mikilvægur ávinningur af styrkingu stofna stórra sjávardýra geta verið aukin afköst í flæði næringarefna um vistkerfin, aukin kolefnisbinding vistkerfa og efling á lífbreytileika þeirra svæða^[t.d. 15, 22, 23, 51, 76, 77, 98-102]. Í ljósi mikils álags á sjávarspendýr á norðlægum slóðum er enn ríkari ástæða til að vakta þessa stofna mun betur og draga úr neikvæðum áhrifum á viðkomu þeirra.

3.1 Gildi hvala í vistkerfum sjávar

Stór rándýr í hafi eins og hvalir og önnur sjávarspendýr, einnig hákarlar og stærri fisktegundir, sinna fjölbreyttu hlutverki sem að miklu leyti snýst um temprun á fæðustofnum og viðhaldi efnaferla í

vistkerfinu². Jafnframt sinna þessar tegundir fjölbættri vistkerfisþjónustu³ sem fjallað verður nánar um í þessum kafla. Um stór rándýr er gjarnan notað vistfræðilega hugtakið „toppafræningi“ og stendur það fyrir þær lífverur sem tróna efst eða ofarlega í fæðuvef síns vistkerfis. Sem dæmi um mikilvæg hlutverk slíkra dýra eru:

- a) temprun á stofnstærðum fæðu sinnar^[102-104],
- b) næringarefnaflutningur og viðhald hringrásra ólífrænna efna^[24, 105, 106],
- c) vistmótandi⁴ áhrif innan búsvæða sinna sem nýtast öðrum lífverum^[51, 107-109],
- d) temprun á áhrifum loftslagsbreytinga með því að stuðla að heilbrigðum samfélögum frumframleiðenda^[110]

Stærri sjávarlífverur, þá sérstaklega rándýr, stuðla gjarnan að ofanstýringu⁵ í vistkerfum sínum og hafa þannig töluverð áhrif á temprun lífverustofna á lægri fæðuþrepum. Ef umtalsverð fækkun eða jafnvel hrun verður í stofnum toppafræningja á slíkum svæðum er sennilegt að keðjuverkandi áhrifa verði vart niður eftir fæðuþrepunum sem oft leiðir til minnkunar á lífbreytileika svæðisins og í afköstum lífferlisins⁶ til bindingar kolefnis og flæði næringarefna^[22, 111] (sjá útskýringu á lífferlinu í boxi 3).

Vistmótandi áhrif stórra sjávardýra eru oft umtalsverð, slík áhrif fela í sér breytingar á tilteknum vistum eða búsvæðum vegna ýmissa athafna þeirra, s.s. umbreytingum á búsvæðinu sjálfu eða áhrifum á ólífræna þætti þess^[112]. Athafnir vistmótandi lífvera geta myndað skjól, aðgengi að næringu eða jafnvel búsvæði fyrir aðrar lífverur. Sem dæmi um slíkt eru líkamsleifar annarra dýra sem afræningi skilur eftir og verður næring úr líkamsleifunum þannig aðgengileg öðrum lífverum^[113]. Þegar stærri afræningjar drepast og sökkva til botns flyst mikið magn næringar til botns sjávar þar sem framleiðsla á lífmassa er að jafnaði afar lítil og myndast gjarnan tímabundin vistkerfi á hræjunum^[51, 114]. Í djúpsjó er að finna lífverur hverra lífsferlar og lífshættir eru aðlagðir að aðgengi að hræjum stórra afræningja, líkt og hvala^[115]. Umtalsverðar hvalveiðar frá fyrri tíð eru taldar hafa útrýmt fjölda tegunda þessara sérhæfðu hvalahræta á botni sjávar^[51].

Nýlega hefur verið bent á mikilvægi toppafræningja í hafi samanborið við önnur dýr, hvað varðar uppsöfnun á lífvirkum fitusýrum^[23]. Slíkar fitusýrur eru lífræn snefilefni sem fæst dýr eru fær um að framleiða en meðal slíkra fitusýra eru omega-3 fitusýrur^[23, 116-118]. Þessar fitusýrur eru fyrst og fremst fengnar úr svifþörungum eins og kísilþörungum í sjó og ferskvatni^[118]. Þessi efni flytjast upp fæðukeðjuna og safnast fyrir í skrokkum neytendanna^[119]. Það gerir toppafræningja í sjó ákaflega afkastamikla í næringarefnaflutningi slíkra efna, að því gefnu að þeir séu étnir af öðrum lífverum sjávar. Auk kolefnisbindingar og þátttöku í flæði ólífrænnar næringar í vistkerfum, sinna toppafræningjar í sjó einnig mikilvægu hlutverki á færibaldi þessara lífrænu snefilefna milli vistkerfa í hafi, ferskvatni og landi^[116].

Frá því um miðja 20. öld hafa stærri og langlífari afræningjar í fæðuvef sjávar, svo sem stærri fiskar sem eru fiskætur og stærri sjávarspendýr, statt og stöðugt fækkað í fæðuvef sjávar á meðan smærri og skammlífari tegundir fiska og hryggleysingja, neðar í fæðuvefnum, hafa orðið ráðandi^[120-123]. Talið er að tap á stærri og langlífari afræningjum í vistkerfum sjávar hafi og muni hafa umtalsverð áhrif á ferla innan lífhvolfsins^[124, 125]. Rannsókn, sem nýtti almenn vistkerfalíkön^[125], keyrði hermanir á umhverfisbreytingum og stærðarsamsetningu lífvera í vistkerfum í þeim tilgangi að áætla kolefnisbindingu, næringarefnahringrásir, vistkerfisþjónustu og þol fyrir breyttum

² Ecosystem functions

³ Ecosystem services

⁴ Ecosystem engineers

⁵ Top-down regulation

⁶ Biological pump

umhverfisaðstæðum í ólíkum vistkerfum jarðar, bæði á landi og í sjó. Rannsóknin sýndi fram á að vistkerfi sem hýsa stærrí lífverur viðhalda meiri framleiðslu og lífmassa og eru slík vistkerfi frjósamari en vistkerfi án stórra lífvera. Auk þess hafa slík kerfi meira þol fyrir ýmiskonar röskunum og eru talin auka lífbreytileika svæða. Með afráni tempra hvalir fæðustofna sína en hafa í kjölfarið óbein áhrif á jafnvægi annarra tegunda innan fæðuvefsins. James A Estes *og fél.* ^[33] tóku saman meginhlutverk stórra rándýra eins og hvala í vistkerfum sjávar:

- 1) Þar sem næringarþörf hvala er almennt mikil neyta þeir að jafnaði mikils lífmassa en að sama skapi skila þeir frá sér gífurlegu magni úrgangs sem nýtist öðrum lífverum í vistkerfinu ^[24, 51]. Auk þess er það algengt meðal margra hvalategunda og þekkt mjög vel meðal skíðishvala að þeir leggist í langar árstíðabundnar ferðir milli fæðustöðva og/eða fæðu og æxlunarstöðva (öðru nafni „far“). Því hafa hvalir ekki aðeins áhrif innan sinna fæðusvæða með lóðréttri tilfærslu næringarefna heldur stuðla þeir jafnframt að láréttum flutningi næringarefna á ferðum sínum.
- 2) Jákvætt samband á milli stærðar og búsvæðanotkunar sýnir að stór sjávardýr eins og hvalir hafa getu til að tengja vistkerfi í gegnum næringarflutning og afrán og stuðla þannig að umfangsmeiri samtengingu vistkerfa á stórum skala ^[126].
- 3) Vegna stærðar sinnar hafa stór sjávardýr oft vistmótandi áhrif í umhverfi sínu, svo sem með hreyfingu og veiðiaðferðum, t.d. með róti á sjávarbotni eða rekstur á fæðutorfum upp að yfirborðinu sem gerir öðrum dýrum kleift að nálgast annars óaðgengilega fæðu, eða tímabundin vistkerfi á líkamsleifum þeirra á botni sjávar.

Áframhaldandi tap á stærrí lífverum í vistkerfum gæti haft til langs tíma umtalsverð áhrif á starfsemi vistkerfa jarðar ^[125]. Með tilliti til þeirra fjölbættu vistmótandi áhrifa sem hvalir og fleiri stærri sjávardýr geta haft í vistkerfum sínum er áætlað að á mörgum hafsvæðum séu það einmitt þær tegundir sem gætu spilað lykilhlutverk í endurheimt búsvæða í hafi sem og verndun þeirra tegunda sem eru háðar þessum búsvæðum ^[22].

Ef tekið er mið af öllum þeim hvöllum sem þekkjast á jörðinni í dag skipa þeir ákaflega fjölbreyttan sess í vistkerfum sjávar, bæði hvað varðar fæðuval, búsvæðaval, næringarefnaflutning og vistkerfismótun. Þeir þættir sem fyrst og fremst hafa mótað fjölbreytileika hvalategunda innan þessara undirættbálka (þ.e. tannhvala og skíðishvala) er aðlögun að mismunandi fæðu (sjá nánar í boxi 1). Ef hvalir eru skoðaðir sem ein heild er ljóst að áhrifa þeirra gætir í afar fjölbreyttum sjávar- og ferskvatns vistkerfum og tengja þeir saman ólík búsvæði sjávar með bæði lóðréttum og láréttum ferðum sínum milli búsvæða ^[51, 78, 106].

3.2 Ferðir hvala

Fjölmargar hvalategundir leggja í árstíðabundið far sem nær oft yfir þúsundir kílómetra sem gerir útbreiðslusvæði þeirra gjarnan afar víðáttumikil ^[127-129]. Sem dæmi dreifast fæðustöðvar hnúfubaka í Norður Atlantshafi frá austurströnd Norður Ameríku í Maine-flóa og upp að Baffinflóa við vesturströnd Grænlands, áfram til Íslands og norður að Jan Mayen, austur að Noregsströndum og upp eftir Barentshafi. Frá hverri fæðustöð teygist útbreiðslusvæði hvers stofns svo áfram suður eftir að æxlunarstöðvum úti fyrir Norðvestur Afríku (Grænhöfðaeyjar) í austri og í Karíbahafi í vestri ^[130-134] þar sem hnúfubakar frá ólíkum fæðustofnum mætast. Útbreiðsla annarra skíðishvala í Norður Atlantshafi eins og steypireyða og langreyða er sambærileg en þær halda sig þó að jafnaði fjær landi og steypireyðarnar eru sjaldgæfari á nyrstu breiddarbaugum eins og í Barentshafi ^[135-137]. Slík farhegðun er í raun vel þekkt meðal allra skíðishvalategunda en minna þekkt meðal tannhvalategunda, þó farhegðun nokkurra þeirra eins og t.d. búrhvala (*Physeter macrocephalus*), háhyrninga (*Orcinus orca*) og andarnefja (*Hyperoodon ampullatus*) er nokkuð vel þekkt ^[138-142]. Far skíðishvala einkennist því af löngum ferðalögum milli fæðustöðva og æxlunarstöðva. Á báðum

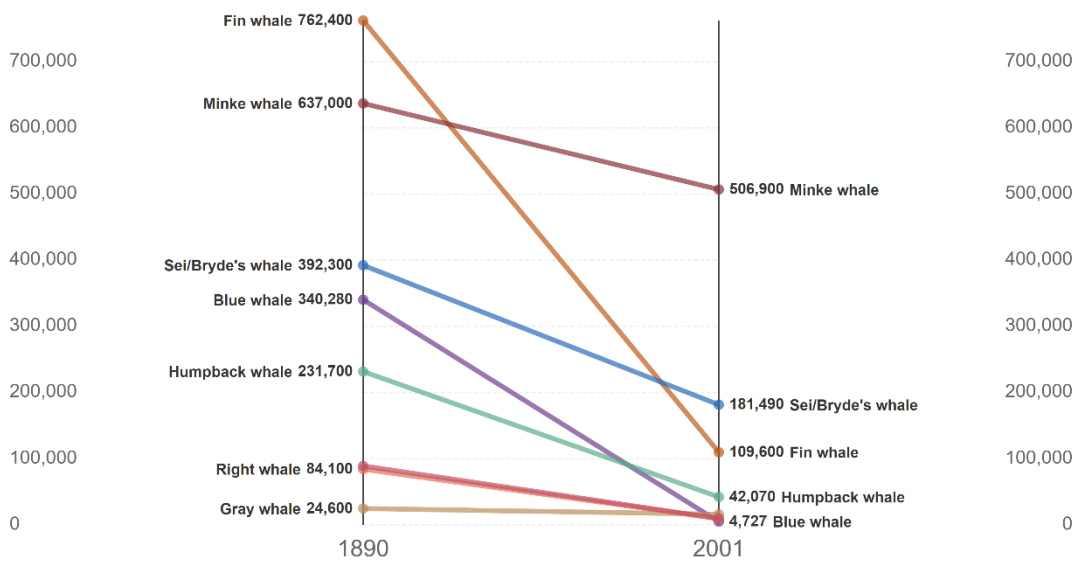
stöðum er gott framboð af sérhæfðum auðlindum sem eru mikilvægar, bæði fyrir fæðunám og æxlun, og tryggja því viðgang stofnsins. Fæðustöðvar þurfa að bjóða upp á gott aðgengi að fæðu sem fyrirfinnst í miklu magni og er nokkuð fyrirsjáanlegt og stöðugt. Það hefur leitt til þess að hvalir eru nokkuð áttagakærir og halda sig eftir fremsta megni við sömu fæðustöðvarnar^[t.d. 131, 132, 134, 143-146]. Fyrir langflesta farhvali eru gjöfulustu fæðustöðvarnar því á háum breiddargráðum frá vori og fram á haust^[128], líkt og umhverfis Ísland. Æxlunarstöðvar eru þó á mun lægri breiddargráðum eins og áður kom fram, eða nær miðbaug^[128]. Það er ekki fyllilega ljóst hvernig val fyrir slíkum fjarlægum æxlunarstöðvum hefur komið til þar sem fæðuframboð er lítið sem ekkert fyrir skíðishvali á þeim svæðum. Hentugar aðstæður fyrir hvalkýr til að kelfa og ala kálfana sína fyrstu vikur lífsins virðast líklegasta skýringin, þá sérstaklega til að forðast árásir og afrán háhyrninga sem eru mun tíðari á hærri breiddargráðum^[147]. Auk þess er líklegt að þessi farhegðun leiði til þess að hvalir frá ólíkum fæðusvæðum komi saman á æxlunarstöðvunum sem ýti undir erfðablöndun milli stofna. Vegna þessara þarfa leggja skíðishvalir í lengstu farleiðir sem þekkjast meðal spendýra^[127].

3.3 Staða hvalastofna á heimsvísu

Hvalveiðar í atvinnuskyni eru taldar hafa fækkað stofnum stórhvela á heimsvísu um 81%^[42]. Til að áætla stærðir hvalastofna fyrir tíma hvalveiða eins og kemur fram á Mynd 2, og á tímum hvalveiða, hafa gögn úr dagbókum skipstjóra á hvalveiðiskipum verið nýtt sem og erfðafræðiaðferðum beitt^[42, 78, 148].

The decline of global whale populations

Shown are estimates of global whale populations in pre-whaling periods versus the year 2001.



Source: Pershing et al. (2010); Christensen (2006)

OurWorldInData.org/biodiversity - CC BY

Note: Estimates – particularly for the distant past – are crude, and come with significant uncertainty. Pre-whaling dates depend on the whale species and region (most are in the late 19th and early 20th century) but have all been coded as the year 1890 for consistency.

Mynd 2. Samantekt á áætlaðri heimsstofnstærð skíðishvala sem voru mikið veiddir á 19. og 20. öld í upphafi atvinnuhvalveiða og svo árið 2001. Stofnstærðartölur fyrir upphaf atvinnuhvalveiða eru fengnar frá^[15] og^[42]. Þýðingar á hvalaheitum: Fin whale = langreyður, minke whale = hrefna, sei whale = sandreyður, Bryde's whale = skorureyður, blue whale = steypireyður, humpbac whale = hnúfubakur, right whale = sléttbakur, Gray whale = sandlægja. Mynd er fengin frá OurWorldInData.org

Þessi umtalsverða fækkun á hvalastofnum á heimsvísu á tiltölulega stuttum tíma, eða frá lokum 19. aldar og fram á níunda áratug 20. aldar, er talin hafa breytt stýringu vistkerfa og mögulega veikt mikilvæga hringferla næringarefna á tilteknum hafsvæðum^[t.d. 33, 51, 52, 126, 149, 150].

Eftir að hvalveiðar voru stöðvaðar á heimsvísu með banninu árið 1986 hefur orðið fjölgun meðal margra hvalategunda og sumir stofnar styrks töluvert. Því má þakka samræmdum verndaraðgerðum í heiminum sem hafa skilað miklum árangri. Staða hvalategunda á heimsvísu er þó afar breytileg en þekking á fjölda innan margra tegunda og stofna er brotkennd og því erfitt að gera áreiðanlegt mat á stöðu þeirra^[11]. Það sem helst virðist stýra velgengni ákveðinna hvalategunda er sveigjanleiki í búsvæða- og fæðuvali. Þær sem eru ósérhæfðari í fæðuvali og/eða búsvæðavali standa oft betur en þær sem eru sérhæfðari. Hvað varðar skíðishvali eru steypireyðar (*Balaenoptera musculus*) og sandreyðar (*Balaenoptera borealis*) dæmi um hvali sem eru sérhæfðir í fæðuvali og hafa einmitt ekki náð sér eins vel á strík eftir að atvinnuhvalveiðum lauk þó svo stofnar þeirra hafi almennt stækkað. Einnig má nefna Norður Atlantshafs sléttbakinn (*Eubalaena glacialis*) sem er á barmi útrýmingar vegna viðfarandi álags af hálfu mannsins á búsvæðum þeirra^[4, 14]. Dæmi um tækifærissinnaðri tegundir eru hnúfubakar (*Megaptera novaeangliae*), langreyðar (*Balaenoptera physalus*) og hrefnur (*Balaenoptera acutorostrata*) en sumum stofna þessara tegunda hefur vegnað betur eftir að hvalveiðum línnti^[83, 151].

Box. 1

Fæðuhættir hvala

Í dag hafa verið skilgreindar 93 tegundir hvala á jörðinni sem flokkast í tvo undirættbálka, skíðishvali (e. mysticeti) (Mynd 4) og tannhvali (e. odontoceti)^[10, 11] (Mynd 3). Hugtakið stórhveli (e. great whales) er gjarnan notað um stóra hvali en er þó ekki flokkunarfræðilegs eðlis. Hugtakið er gjarnan notað sem samheiti yfir þær hvalategundir jarðar sem ná mikilli stærð og oft háum lífaldri, eða um 70 til >100 ár^[15, 21]. Sem dæmi um stórhveli má nefna hina stóru skíðishvali eins og steypireyðar, langreyðar og hnúfubaka sem eru reyðarhvalir og svo sléttbakaættina (Balaenidae) sem og stærri tannhvali eins og búrhvalinn (*Physeter macrocephalus*). Hinar fjölmörgu ættir tannhvala hafa aðlagast afar fjölbreyttum fæðuvistum sem teygja sig frá efstu til neðstu laga sjávar.

Flestar tegundir tannhvala, t.d. tegundir innan höfrungaættar (*Delphinidae*), einnig mjaldrar (*Delphinapterus leucas*) og náhvalir (*Monodon monoceros*) sækja sér fæðu úr efstu lögum sjávar eða á landgrunninu þar sem megin uppistaða fæðunnar eru ýmsir uppsjávarfiskar og botnfiskar^[8, 14]. Sérhæfðir djúpkafarar líkt og búrhveli (*Physeter*), svínhveli (*Ziphiidae*) og höfrungar á borð við grindhvali (*Globicephala melas*) og rispuhöfrunga (*Grampus griseus*) geta aftur á móti kafað eftir æti niður í djúpsjó^[16]. Enn aðrir tannhvalir, ferskvatnshöfrungar (*Platanistoidea*), halda svo til í stærstu ferskvatnskerfum jarðar.



Mynd 5. Skíði úr langreyði (*Balaenoptera physalus*).

Fæðustöðvar skíðishvala eru gjarnan afmarkaðar við svæði þar sem gott aðgengi er að smærri uppsjávarlífverum með mikinn lífmassa, svo sem átutegundum og smærri uppsjávarfiskum á borð við sandsíli, síld, loðnu^[1-6]. Það sem einkennir fæðuhætti skíðishvala er síun sem felur í sér að þeir sigta smáa og næringarríka fæðu úr sjónum með svonefndum skíðum (Mynd 5) sem vaxa niður úr efri gómi í stað tanna. Meðal skíðishvala finnast stærstu dýr jarðar, en steypireyðurin er þar fremst í flokki, en hún getur orðið allt að 30 metra löng og um 170 tonn. Langreyðurin fylgir í humátt á eftir hvað varðar lengd og massa. Skíðishvalir hafa þróað með sér mikla stærð sem gerir þá betur í stakk búna til að lifa á köldum hafsvæðum þar sem fæða þeirra er algengust en líkamar þeirra hafa lítið yfirborð miðað við rúmmál sem lágmarkar hitatap. Slík aðlögun hefur líklega verið drifin áfram af miklu næringarframboði á hærri breiddagráðum, sem hefur gert slíkt náttúrulegt val mögulegt^[13].



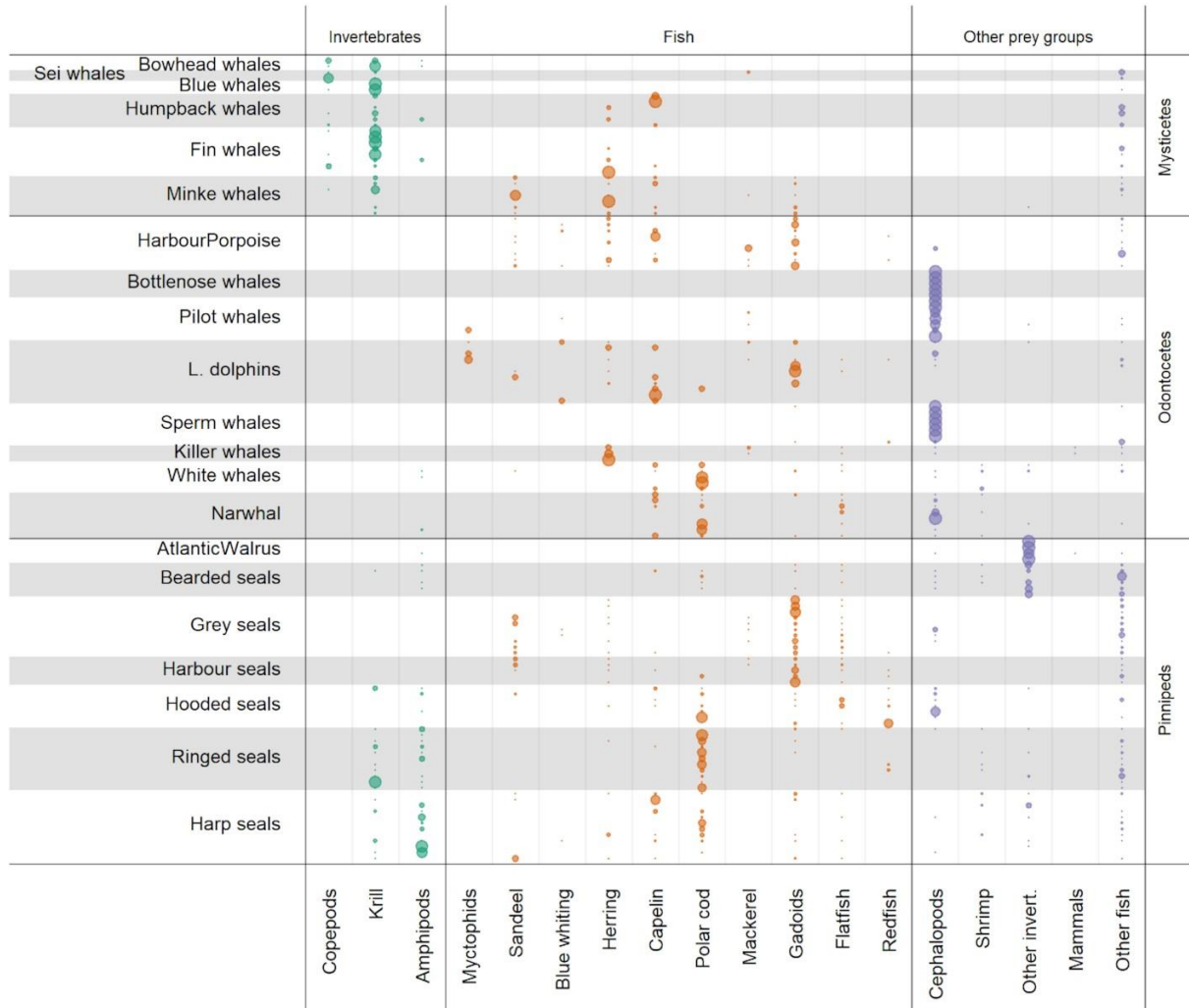
Mynd 3. Norðsnjaldri (*Mesoplodon bidens*) er tannhvalur af svínhvalaætt. Fullvaxta eru þeir um 5 m langir og vega um 1 tonn.



Mynd 4. Hnúfubakur (*Megaptera novaeangliae*) er skíðishvalur af reyðarhvalaætt. Fullvaxta verða þeir um 15 m langir og vega um 30 tonn.

Mikilvæg fæðusvæði skíðishvala eru einna helst umhverfis Suðurskautið og við suðurenda meginlanda Afríku og Ameríku sem og í norðanverðu Norður Atlantshafi, Barentshafi, Norður Íshafi og Norður-Kyrrahafi. Á þessum hafsvæðum er aðgengi að smárrí og næringaríkri uppsjávarfæðu hvað mest og eru því mikilvæg fæðusvæði skíðishvalategunda^[147, 152, 153].

Rannsóknir á fæðuvali sjávarspendýra í Norðurhöfum og Barentshafi hafa sýnt fram á að meginfæða skíðishvala eru ljósáta (*Euphausiidae*), síld (*Clupea harengus*) og loðna (*Mallotus villosus*)^[8, 14, 90]. Tannhvalir á þessum slóðum sækja að miklu leyti í smokkfiska en einnig þorskfiska (*Gadidae*), ískóð (*Boreogadus saida*), loðnu og síld á meðan flestar selategundir sækja í stærri bolfiska að undanskildum rostungum (*Odobenus rosmarus*) sem neyta fyrst og fremst skelfisks og annarra botnlægra hryggleysingja (Mynd 6)^[8].



Mynd 6 Fæðuval sjávarspendýra í Norðurhöfum og Barentshafi skv. samantekt Mette Skern-Mauritzen og fél. ^[8]. Birt með leyfi höfundar (Attribution 4.0 International (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>).

3.4 Hvalveiðar og staða hvalastofna við Ísland

Umtalsverðar hvalveiðar sem fólu í sér notkun sprengiskutla voru stundaðar á Íslandsmiðum sem og annars staðar í heiminum frá 19. öld og fram á níunda áratug 20. aldar. Eftir þann tíma fóru atvinnuhvalveiðar víðsvegar að leggjast af vegna gífurlegrar fækkunar á hvöllum og erfiðleika hvalveiðiskipa við að finna stórhveli til veiða og síðar vegna minni eftirspurnar eftir hvallýsi en veiðarnar höfðu leitt til gífurlegs hruns í flest öllum stofnum veiddra hvala^[16]. Talningar gerðar í Noregshafi og við Ísland á árunum 1987–1989 sýndu að mikið hrun hafði átt sér stað í áður stórum hvalastofnum í Noregshafi og norður af Íslandi, þ.e. einna helst meðal Grænlandssléttbaka (*Balaena mysticetus*), steypireyða og sandreyða, en einnig hafði orðið mikil fækkun meðal búrhvala, langreyða og hnúfubaka^[16]. Í talningunum 1987-88 voru þeir þrjár síðarnefndu algengustu hvalirnir við Ísland og í Noregshafi en stofnstærð hnúfubaka var þá áætluð rétt undir 2.000 dýrum og langreyðar um 4.000 dýr, en búrhvalir voru metnir um 4.000–5.000 dýr í Noregshafi^[16].

Eftir að hvalveiðibann var sett á af Alþjóðahvalveiðiráðinu (IWC) frá og með árinu 1986 hófust kerfisbundnar hvalatalningar í mið- og austanverðu Norður Atlantshafi og fóru fram alls sjö sinnum á árunum 1987 til 2016. Flest þau lönd sem liggja að hafsvæðinu hafa tekið þátt í talningum, þ.e. Ísland, Noregur, Bretlandseyjar, Færeyjar og Grænland^[154]. Hlutverk Íslands hefur verið að vakta hafsvæðið umhverfis landið á svæðinu frá Jan Mayen í norðri, milli Færeyja og Grænlands og suður af Íslandi niður að um 50. breiddargráðu^[44] ^[155, 156]. Hér á eftir verður fjallað nánar um veiðar og stöðu þeirra hvalategunda sem voru hvað mest veiddar við Ísland og hafa verið rannsakaðar hvað mest frá því talningar hófust. Þessar tegundir eru steypireyðar, langreyðar, hnúfubakar og hrefnur.

3.4.1 Steypireyðar

Talið er að um 11.000 steypireyðar hafi verið veiddar í Norður Atlantshafi frá upphafi hvalveiða. Veiðar á steypireyðum hófust í Norður-Noregi úti fyrir Finnmörk en aðeins á því svæði voru um 3.000 steypireyðar veiddar á tímabilinu 1860–1905, úti fyrir Svalbarða voru önnur u.þ.b. 1.000 dýr veidd og umhverfis Ísland voru um 5.000 steypireyðar veiddar, um 2.000 úti fyrir Nýfundnalandi og um 1.000 við Færeyjar. Eins og kemur fram á Mynd 7 hafa stofnar steypireyða í miðju Norður Atlantshafi ekki styrkst að sama skapi og náskyldu tegundirnar hnúfubakar og langreyður. Eftir að hvalveiðar hættu jókst þéttleiki steypireyða mest úti fyrir Norðausturlandi á árunum 1987–2001 sem bendir til einhvern styrkingar í stofninum og breytinga á útbreiðslu þeirra^[4, 157, 158]. Á þessu tímabili er talið að steypireyðum hafi fjölgað úr u.þ.b. 300 dýrum og upp í um 1.000 dýr. Síðustu talningar (2015) á steypireyðum í miðju Norður Atlantshafi mátu fjölda þeirra vera um 3.000 dýr^[159]. Á heimsvísu hefur fjöldi steypireyða aukist og er talið í dag að fjöldi fullþroska dýra sé á bilinu 5.000–15.000 á heimsvísu^[136]. Þónokkur dæmi þekkjast um blendinga sem eru afkvæmi steypireyðar og langreyðar, bæði frá Íslandi og fleiri hafsvæðum^[160-162]. Það er talið stafa af veikum stofni steypireyða þrátt fyrir fjölgun frá árinu 1987. Fáliðaður stofn gerir dýrunum erfiðara fyrir að finna maka og aukin skörun á útbreiðslu þessara tveggja tegunda gæti ýtt undir slíka blöndun^[160-162].

3.4.2 Langreyðar

Veiðar á langreyðum héldu áfram eftir að steypireyðarnar því sem næst hurfu og stóðu yfir nokkuð samfleytt frá 1860 og fram á níunda áratug 20. aldar. Veiðitölur fyrir langreyðar fram á miðbik 20. aldar eru á reiki, en helsta skýringin er sú að hvalveiðiflotarnir eru taldir hafa misst um 30-50% veiddra dýra þar sem veiðibúnaðurinn var ekki nógu sterkur og gaf sig eftir að dýrin voru drepin eða á meðan veiðunum stóð^[163, 164]. Alþjóðahvalveiðiráðið áætlaði að um 98.000–115.000 langreyðar hafi verið veiddar úr Norður Atlantshafi frá upphafi hvalveiða. Íslendingar hófu veiðar á langreyðum á ný árið 2006 og rennur núgildandi leyfi út 2023. Ef skoðaðar eru veiðitölur Alþjóðahvalveiðiráðsins þá voru aðeins sjö langreyðar veiddar fyrsta árið og svo 125 dýr árið 2009. Samkvæmt þeirri samantekt hafa veiðar farið fram sjö sumur á tímabilinu 2006-2022 en þau sumur hafa verið veidd um 130-150 dýr hvert sumar^[165].

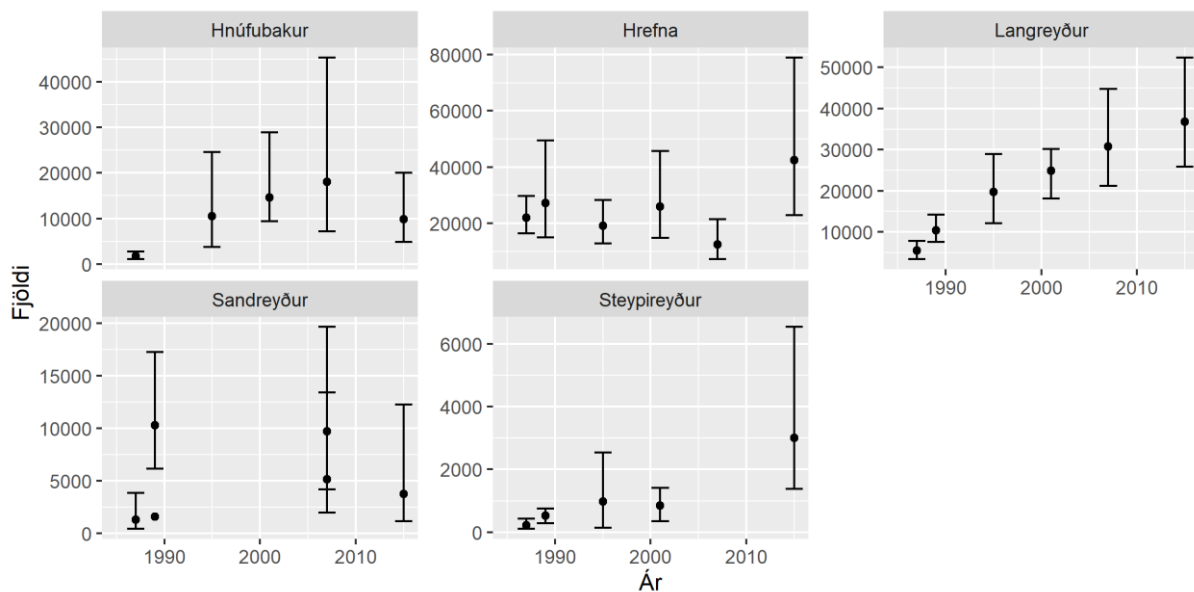
Langreyðastofninn hafði náð betri vexti en steypireyðar og hnúfubakar strax upp úr 1989 um og úti fyrir Ísland þegar stofninn mældist um 10.000 dýr^[159] (sjá töflu í Viðauka 4). Samkvæmt nýjustu tölum frá 2015 var stofninn á því svæði áætlaður um 36.000 dýr^[166] (Mynd 7), en stofninum tilheyra þeir hvalir sem Íslendingar veiða. Frá því talningar hófust hefur útbreiðslusvæði langreyða breyst töluvert og hefur mestur þéttleiki þeirra mælst úti fyrir landgrunnið suðvestur af Íslandi^[4]. Árið 2015 fundust þær í meira magni en áður djúpt suður af landinu og úti fyrir Færeyjum en lítið fyrir norðan landið þar sem steypireyðarnar halda sig að jafnaði hluta sumars. Í dag er áætlað að tegundin telji um 145.000 langreyðar á heimsvísu og telst í viðkvæmri stöðu á flestum svæðum jarðar^[137].

3.4.3 Hnúfubakar

Veiðar á hnúfubökum stóðu yfir á sama tímabili og á langreyðum og steypireyðum en talið er að um 5–6.000 dýr hafi verið veidd í Norður Atlantshafi, langstærstur hluti þeirra hvala var veiddur á

Íslandsmiðum og úti fyrir N-Noregi. Veði hnúfubaka minnkaði talsvert upp úr 1920 og áætlað að á þeim tíma hafi stofninn verið orðinn afar lítill^[16].

Stofnar hnúfubaka hafa víðsvegar náð sér ágætlega á strik eftir að atvinnuveiðum á þeim lauk upp úr 1950. Á milli áranna frá fyrstu hvalatalningunum í Norður Atlantshafi árið 1986 og fram til ársins 2001 jókst fjöldi hnúfubaka úr um 2.000 dýrum í um 15.000 árið 2001^[159], eða 12% árleg aukning. Síðan þá og fram að talningum árið 2015 hefur stofninn haldist nokkuð stöðugur eða í kringum 10–15.000 dýr (Mynd 7). Talningar síðustu ára benda til að stofnar hnúfubaka hafi einnig náð stöðugleika í Norður-Kyrrahafi með í kringum 20.000 dýr^[167] og í flestum æxlunarstofnum Suðrhvellsins með samanlagt um 97.000 dýr^[168]. Viðvera hnúfubaka við landið gæti verið að lengjast en reglulega sést til hnúfubaka nálægt landi fram á vetur og hafa neðansjávarhljóðupptökur leitt í ljós að hvalirnir halda hér til að einhverju marki yfir veturinn^[61, 68, 169-171].



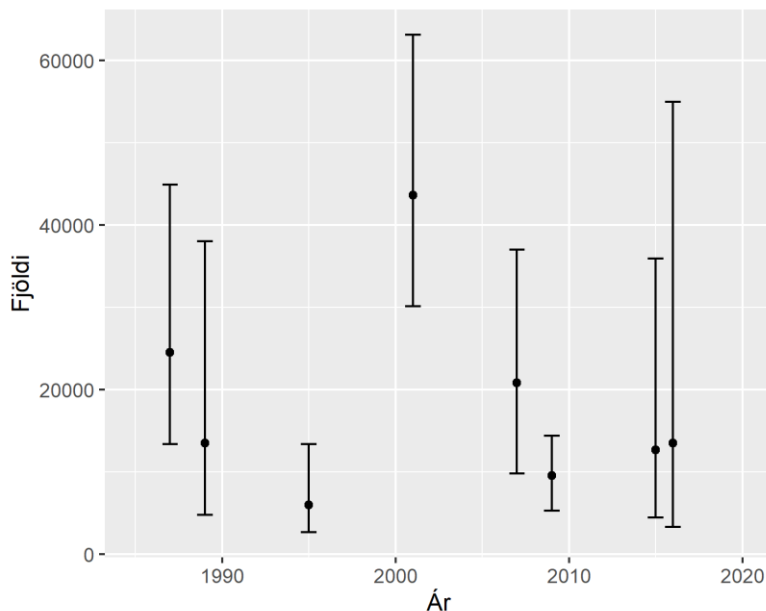
Mynd 7. Stofnstærðarmat á fjórum skíðishvölum í miðju Norður Atlantshafi á leitarsvæðum Íslands og Færeyja sem safnað hefur verið úr Trans-North Atlantic Sighting Surveys (TNASS og NASS) frá árunum 1987 til 2016. Niðurstöður talningar á hrefnum á strandsvæðum Íslands koma fram á Mynd 8. Árin 1989 og 2007 voru leitarsvæðin fyrir sandreyðar stækkuð umtalsvert sunnar út fyrir landgrunn, eða að Írlandi. Þessi ár eru gefnar tvær tölur fyrir sandreyðar en lægri eru fyrir sama leitarsvæðið og fyrir aðra hvali en hærri tölurnar fyrir stærra leitarsvæðið suður af landinu. Athugið að y-ásar sem sýna fjölda tölur eru ekki á sama skala milli grafa og því getur reynt villandi að bera gröfin saman án tillits til y-ásanna. Gögn eru fengin frá ^[43, 44, 157, 158, 166, 172-176].

3.4.4 Hrefnur

Alþjóðahvalveiðiráðið (IWC) hefur skilgreint fjóra hrefnustofna í Norður Atlantshafi og skiptast þeir í Norðaustur Atlantshafsstofn, mið-Norður Atlantshafsstofn, Vestur-Grænlandsstofn og Austur-Kanadastofn en samtals telja þessir stofnar um 156.000 einstaklinga^[177].

Hrefnur voru ekki veiddar af eins miklum krafti og stærri skíðishvalir í upphafi hvalveiða á 19. öld og framan af 20. öldinni^[178]. Árið 1914 hófust atvinnuveiðar á hrefnu við Ísland en umfangið var lítið hér við land þar til eftir seinni heimsstyrjöld^[179]. Umtalsverðar veiðar hófust aftur á móti á hrefnum í Norðaustur Atlantshafi árið 1941 og voru þar Norðmenn stórtækastir^[165] en þá var fækkun meðal stórhvela orðin mikil. Fram til ársins 1983 er talið að um helmingur hrefnustofnsins í Norður Atlantshafi hafi verið tekinn á þessu tímabili, eða um 100.000 dýr^[178]. Síðan þá voru hrefnuveiðar í Norður Atlantshafi fyrst og fremst stundaðar af norskum hvalveiðiskipum, en Norðmenn fóru að veiða hrefnur innan íslenskrar landhelgi af meiri krafti upp úr 1960. Eftir að landhelgin stækkaði út í 50 mílur árið 1975 hættu Norðmenn hrefnuveiðum við Ísland en Íslendingar héldu þeim áfram til 1985 þar til hvalveiðibann var svo sett á árið 1986, þá höfðu Íslendingar veitt um 200 dýr á ári^[179].

Árið 2003 voru 36 hrefnur veiddar í vísindaskyni við Ísland í tengslum við rannsóknir Hafrannsóknastofnunar^[179]. Íslendingar hófu svo atvinnuveiðar á hrefnum að nýju árið 2006 og rennur það leyfi út árið 2023^[180]. Athygli hefur vakið að fjöldi hrefna á íslensku landgrunni hefur minnkað töluvert síðan 2001 (Mynd 8) eða úr um 44.000 niður í um 10.000 dýr árið 2009. Talið er að hrun í sandsílastofninum og tilfærsla hrefna norðar á bóginn í ætisleit séu helsta skýringin en fjölgun hefur átt sér stað við Jan Mayen á sama tíma^[4, 90, 178].



Mynd 8. Stofnstærðartölur fyrir hrefnur á landgrunni Íslands frá árinu 1987-2016.

3.5 Hlutverk hvala í hringrásum ólífræna efna í vistkerfum sjávar

Vegna stærðar, langs lífaldurs og víðáttumikillar útbreiðslu er áætlað að hvalir hafi mikil áhrif á vistkerfi stórra hafsvæða^[51]. Rannsóknir benda til að þeir hafi umtalsverð áhrif á næringarefnaflutning í hafinu, á hringrásir ólífræna efna (einnig kölluð steinefni) eins og kolefnis, járns, niturs og fosfórs sem og bindingu þeirra^[51, 98, 106, 125]. Bindingin á sér stað bæði beint með uppsöfnun næringarefna í skrokkum hvalanna og óbeint með dreifingu ólífræna næringarefna (sjá nánar í boxi 2) í efstu lögum sjávar sem eru nýtt af ljóstillífaðum lífverum (frumframleiðendum) eins og

Box. 2

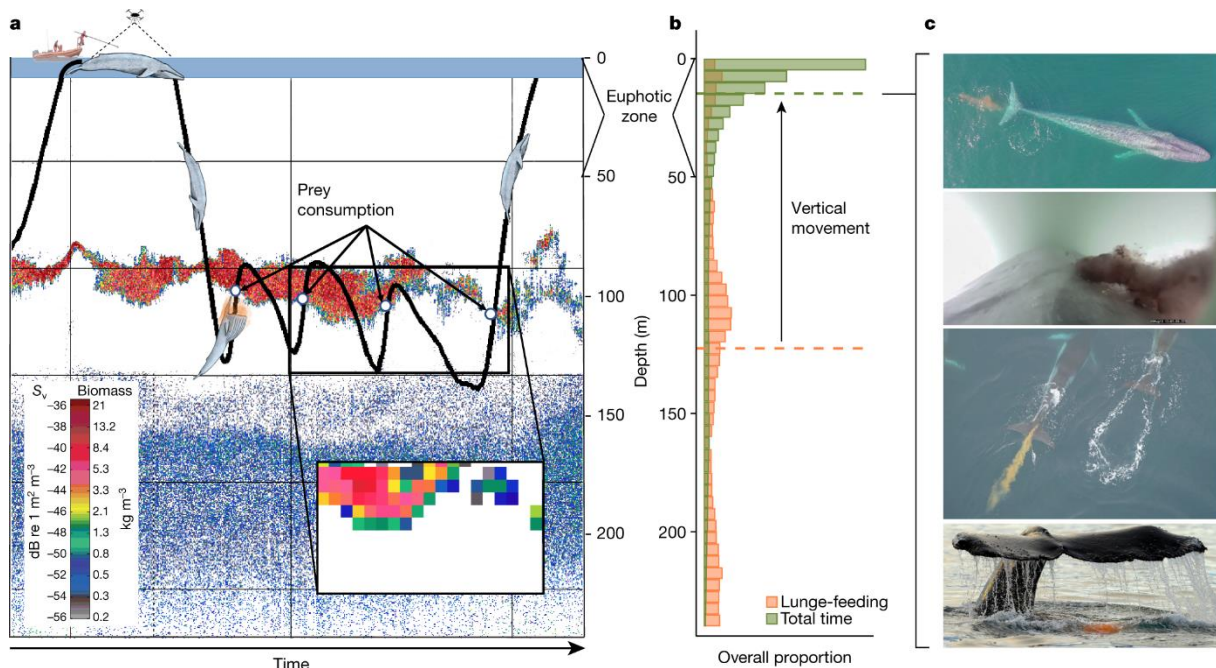
Hvað eru ólífræn efni?

Virkar hringrásir ólífræna efna eru undirstaða heilbrigðra vistkerfa, bæði á landi og í sjó. Sem dæmi um ólífræn efni eru steinefni sem eru lífsnauðsynleg lífverum, efni á borð við snefilefni járn (Fe), natrín (Na) og kalín (K) og önnur magnmeiri frumefni eins og nitur (N), kolefni (C), vetni (H) og súrefni (O) sem eru helstu frumefni líkamans. Önnur ólífræn efni mikilvæg lífríkinu eru t.d. fosfór (P) og brennisteinn (S). Öll eru þessi ólífrænu efni, sem einnig eru kölluð **steinefni**, mikilvægar byggingareiningar lífræna efnasambanda lífríkisins (heimild). Hringrásir frumefna eru að ýmsu leyti ólíkar en munurinn byggir hæð helst á með hvaða móti og í hvaða miðli efnin umbreytast og flytjast milli þrepa (heimild), þ.e.a.s. hinir líf-, eðlis- og efnafræðilegu ferlar sem eiga í hlut og gera það að verkum að efnin geta flust milli og nýst ólíkum lífverum.

svifþörungum. Svifþörungur binda kolefni beint úr andrúmsloftinu við ljóstillífun og nýta til þess steinefni á borð við nitur, fosfór og járn við yfirborð sjávar (sjá nánari útskýringu í Viðauka 1). Ýmsir

eðlisfræðilegir þættir stuðla að tilflutningi næringarefna upp að yfirborði sjávar en sú starfsemi er ekki jafndreifð yfir árið. Sjávardýr bera einnig töluvert magn af þessum efnum upp í efri lög sjávar með úrgangslosun (sjá nánar í umfjöllun um lífferlið í boxi 3). Í ljóstillífunarferlinu er koltvísýringurinn svo klofinn í kolefni og súrefni. Kolefnið er nýtt í framleiðslu á sykrum innan þörunganna (og annarra ljóstillífandi lífvera), en súrefnið í sameindinni losnar út sem aukaafurð. Aukaafurð sem er nauðsynleg flestu lífi á jörðinni.

Þar sem stórhveli geta nýtt gríðarlegs magns af fæðu binst mikið magn kolefnis og annarra næringarefna í skrokkum þeirra, að sama skapi losa þeir út mikið magn ólífrænna næringarefna í úrgangi^[51, 106]. Úrgangur þeirra hefur mikið flot og helst nokkuð lengi við yfirborðið sem gefur svifþörungum kost á að nýta úr honum steinefni til uppbyggingar og endurnýjunar á nauðsynlegum lífefnasameindum^[24, 35, 74, 77, 181]. Úrgangslosun hvala uppi í ljóstillífunarlaginu (Mynd 9) kemur sér einna best þegar vatnsbolurinn er nokkuð lagskiptur vegna hitamismunar uppsjávar og djúpsjávar sem gjarnan gerist á vorin og tengist vorblóma svifþörunga á norðlægum breiddagráðum (sjá nánar í Viðauka 1). Við þær aðstæður viðhaldast næringarefnin úr úrganginum lengur innan þess svæðis sem frumframleiðsla getur farið fram á^[24].



Mynd 9. Á mynd a) er sýnt köfunarmynstur steypireyðar þar sem hún sækir sér fæðu í fæðubelti niður fyrir ljóstillífunarlagið (e. euphotic zone). Hvalurinn gerir fjórar atlögur að átunni (merkt inn á kort með bláum hringjum). Mynd b) sýnir hlutfall tímans sem steypireyðurin eyðir uppi á yfirborðinu (grænir stöplar) og við að veiða (appelsínugulir stöplar) frá yfirborði og niður fyrir 200 m. Mynd c) sýnir hægðalosun fjögurra skíðishvala í þessari röð talið frá efstu mynd: steypireyður, langreyður, hrefnur og hnúfubakur. Myndin er fengin frá Matthew S Savoca og féll. ^[75] (Leyfisnúmer fyrir myndbirtingu: 5573600011611)

Svifdýr og smærri sunddýr sem halda til í blönduðum torfum (sjá nánari lýsingu í boxi 3), er gjarnan að finna á þeim svæðum sem lífmassi svifþörunga er mikill og mynda svokölluð fæðubelti. Á slík næringarik svæði sækja skíðishvalir að mestu fæðu sína enda eru stærri svifdýr (líkt og átutegundir) og smærri torfufiskar algeng fæða á matseðli þeirra hvala^[3, 4] sem og stærri fiskitegunda^[182, 183]. Smádýrin í fæðubeltunum ferðast lóðrétt upp og niður vatnsbolinn, þá gjarnan einu sinni til tvisvar á sólarhring^[12, 27]. Þessi lóðréttu tilfærsla fæðubeltanna stuðlar að flutningi ólífrænna efna úr efri lögum og niður í neðri lög sjávar þar sem efnin geta fallið til botns þegar lífverurnar deyja eða losa frá sér úrgang^[27]. Lóðrétt ferðalög þessara smádýra aftur upp að yfirborðinu stuðla svo að flutningi

næringarefna upp í ljóstillífunarlagið⁷ þegar þau losa þar frá sér úrgang. Þessi tilfærsla næringarefna sjávardýra er lífferlið sem er nánar fjallað um í boxi 3.

Með ferðum sínum upp og niður vatnsbolinn draga smádýrin í fæðubeltunum einnig til sín djúpkafara líkt og hvalir (Mynd 9). Flestir hvalir geta kafað niður fyrir ljóstillífunarlagið og sótt sér þangað fæðu en hversu djúpt þeir fara er breytilegt milli tegunda. Hvalirnir flytja leifarnar, sem þeir nýta ekki úr fæðunni til orkugjafar eða uppbyggingar á eigin skrokkum, upp í ljóstillífunarlagið við úrgangslosun og nýtist úrgangurinn þar fyrst og fremst ljóstillífandi lífverum (Mynd 9 og Mynd 10)^[24, 51, 106, 181]. Lífrænar leifar úrgangsins nýtast einnig smáum neytendum eins og smærra dýrasvifi, svo sem krabbaflóm (Copepoda)^[24]. Skíðishvalir halda að mestu til innan blandlagsins⁸ sem nær að jafnaði niður að 200 m^[27] og leggja þannig að mörkum í viðhaldi næringarefna innan þess lags líkt og kemur fram á Mynd 15. Djúpkafarar líkt og búrhvalir, svínhvalir og grindhvalir sækja sér aftur á móti fæðu að mestu niður fyrir blandlagið og eiga því þátt í flutningi næringarefna sem finnast neðan við hitaskiptalagið⁹ og í úthafsdjúpi¹⁰ og upp í ljóstillífunarlagið. Með endurnýjun og flutningi næringarefna á þennan hátt er talið að hvalir og önnur stærri rándýr hafsins eigi þátt í styrkingu samfélaga svifþörunga og svifdýra eins og átutegundum (Euphausiids)^[35, 73, 184].

⁷ Ljóstillífunarlag (e. euphotic zone): Efsta lag sjávar þar sem geislar sólar berast niður í sjóinn og geta stuðlað að ljóstillífun. Það er oftast innan blandlagsins.

⁸ Blandlag (e. mixed-layer): Sá hluti efra lags sjávar sem er einsleitur hvað varðar hitastig og seltu, lagið nær frá yfirborði sjávar og niður að hitaskiptalagi

⁹ Hitaskiptalag (e. thermocline): er þar sem hitastig vatnsbolsins fellur skyndilega, þetta lag tekur við af blandlaginu

¹⁰ Úthafsdjúp (e. bathypelagic): Dýpi sem nær frá um 1.000 m til 4.000 m dýpi

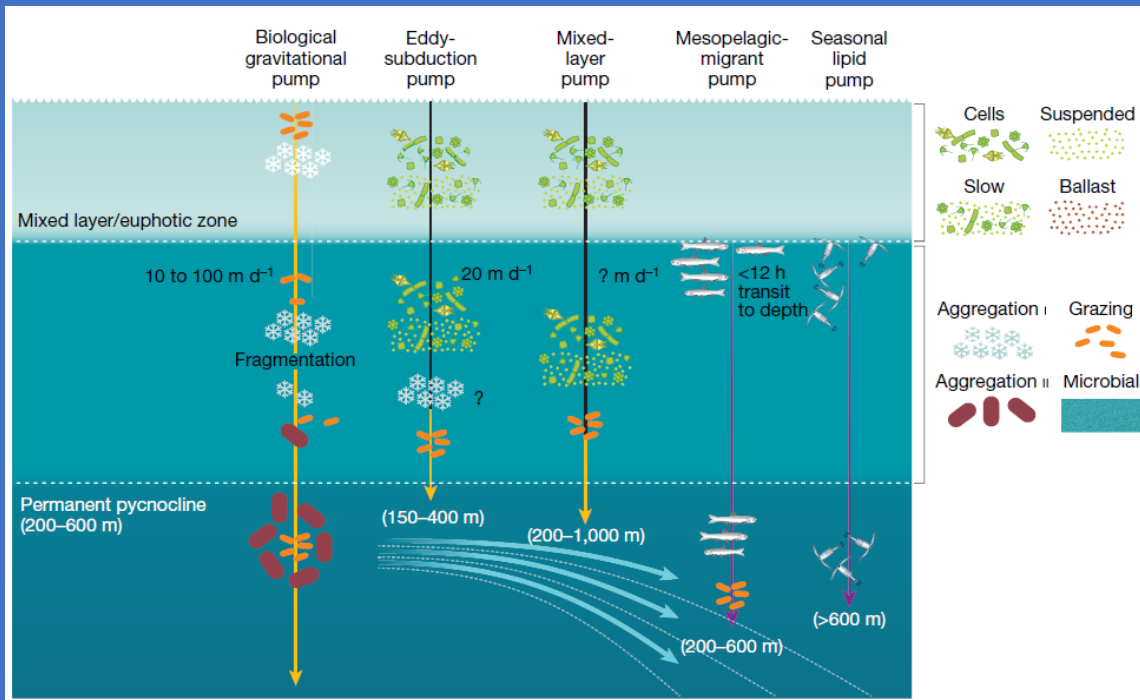
Box. 3

Lífferlið í hafi

Orðið lífferli (e. **biological pump**) er notað til að skilgreina ferlið sem leiðir til flutnings á ólífrænum næringarefnum (steinefnum) milli efri laga sjávar og djúpsjó í gegnum starfsemi lífvera. Flutningar næringarefna í lífferlinu stýrast af virkum og óvirkum agnaflutningi lífvera. Dæmi um óvirkan flutning eru þyngdarkraftur jarðar sem veldur því að lífrænar leifar lífveranna falla til botns (e. biological gravitational pump), einnig hringiður sem geta flutt lífverur og leifar þeirra niður (e. eddy subduction pump), blöndun sjávar (e. mixed layer pump) og uppstreymi sjávar (e. upwelling) sem flytur næringarefnin og lífverurnar upp (sjá nánar í Viðauka 1 og Mynd 10). Hinn virki flutningur verður hins vegar vegna lóðréttra ferðalaga sjávardýra sem að sjálfsdáðum synda upp og niður í dýpið, kallast það **lóðrétt far**.

Lóðrétta farið felur í sér einn mesta flutning á lífverum sem þekktist á jörðinni með tilliti til lífmassa og þéttleika dýra^[7, 8]. Þær lífverur sem eiga hér helst í hlut eru miðsævisfiskar og dýrasvif sem mynda oft gríðarþéttar torfur, stundum nefndar **fæðubelti** (e. scattering layer). Á hverri nóttu víðsvegar um hafsvæði jarðar flytur þessi mikli fjöldi smárra sjávardýra sig úr myrkum undirdjúpum miðsævisins, sem nær frá um 200 m niður á 1.000 m dýpi, og upp að yfirborði sjávar í ljóstillífunarlagið í leit að svifþörungum til ætis. Þegar birtir færa sjávardýrin sig aftur niður í djúpið til að forðast afrán stærri dýra sem eru oftast virkari á daginn í efri lögum sjávar^[7, 15].

Sjávardýrin í fæðubeltinu losa frá sér úrgang og sum þeirra drepast. Það losar um ólífræn efni eins og kolefni, járn, nitur og brennistein úr líkómum þeirra. Vegna þessara lóðrétta ferðalaga verður sú losun bæði í efri og neðri lögum sjávar^[17-20]. Stærri rándýr sem leita að fæðu í þessum smádýratorfum eru sjávarspendýr, líkt og hvalir, en einnig sjófuglar og stærri fiskar. Þessi stærri rándýr skilja svo eftir sig umtalsverðan úrgang í efri lögum sjávar og hafa því **með atferli sínu ýtt undir tilflutning næringarefna upp í blandlagið þar sem ljóstillífun á sér stað** eða viðhaldið því innan **blandlagsins**^[22-26].



Mynd 10. Lífferlar í hafi sem stuðla að flutningi lífvera og lífrænna leifa úr efri lögum (blandlagi) og niður í djúpsjó^[27]. Biological gravitational pump = þyngdarkraftur jarðar sem stuðlar að flutningi lífveruleifa og úrgans niður í djúpsjó. Eddy-subduction pump = Hringiðustraumar sem flytja lífverur og lífrænar leifar niður fyrir blandlagið. Mixed layer pump = Blöndun sjávar veldur tilflutningi á lífverum og leifum þeirra neðar í blandlagið á veturna og svo upp í efri lögina á sumrin. Mesopelagic migrant pump = lóðrétt far lífvera. Seasonal lipid pump = svifdýr binda mikið af fitusýrum í líkama sínum áður en þau leggjast í dvala í djúpsjó. Bláu örvarnar sýna flutningsleið agna af yfirborðinu og niður eftir hita-dýrparlagi djúpsjávar. Nánari lýsingar má finna í Philip W Boyd og fél.^[27]

3.6 Áætluð útlosun á köfnunarefni (N) í úrgangi hvala á íslenskum hafsvæðum

Framlag tiltekinna hvalategunda í næringarefnaflutningi upp í efri lög sjávar hefur verið metið fyrir afmörkuð svæði á jörðinni en einnig hafa verið gefnar út áætlanir fyrir stærri svæði ^[24, 106] (t.d.

Tafla 2). Áætluð útlosun stórhvala á köfnunarefni, hér eftir kallað nitur, á íslenskum hafsvæðum hefur ekki verið gefin út svo vitað sé og er því áætluð hér samkvæmt því stofnstærðarmati sem gert hefur verið innan íslenskra og nærliggjandi hafsvæða. Markmiðið er að áætla afköst skíðishvalastofna við Ísland í útlosun á nitri (N) í gegnum úrgangslosun í efri lögum sjávar til að meta mögulegt framlag þeirra í dreifingu á ólífrænni næringu í efri lögum sjávar við Ísland. Útreikningar á áætlaðri útlosun hvala á nitri með úrgangi voru gerðir samkvæmt reikniaðferðum J Barlow *og fél.* ^[185] og Joe Roman & James J McCarthy ^[24]. Stærðir sem nýttar voru til að reikna út orkuþörf hvala, sem eru svo aftur nýttar til að meta útlosun á nitri¹¹, voru fengnar úr Jóhann Sigurjónsson & Gísli A Víkingsson ^[14] sem rannsökuðu umfang fæðuöflunar hjá hvölum á íslenskum og nálægum hafsvæðum. Útreikningar byggja á áætlaðri stofnstærð þeirra skíðishvala sem taldir voru í talningarleiðöngurum í Norður Atlantshafi á árunum 1987-2015 (sjá töflu í viðauka 4).

Tafla 1 Gildi sem nýtt eru til útreiknings á niturlosun skíðishvala við Íslandsstrendur. Útreikningar fyrir niturlosun hvarrar tegundar voru reiknuð út samkvæmt aðferðum Joe Roman & James J McCarthy ^[24] og stærðir til útreikningar á orkuþörf komu frá Jóhann Sigurjónsson & Gísli A Víkingsson ^[14]

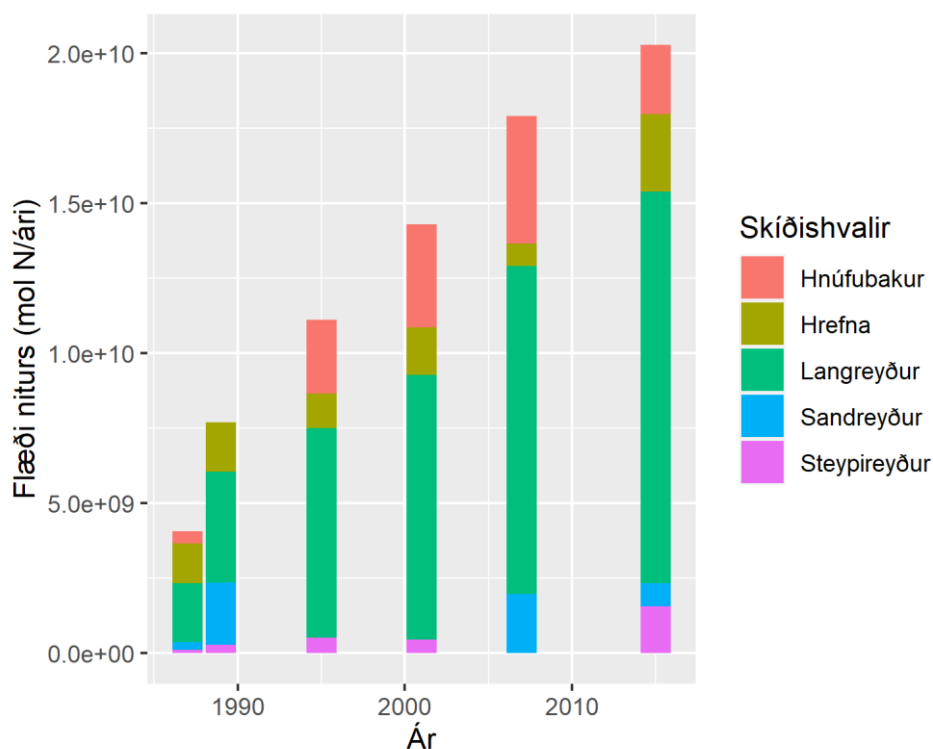
Útlosun á nitri per meðalhval innan stofns í gegnum úrgangslosun	
Tegund	Útlosun per einstakling á N (kg/dag)
Steypireyður	24
Langreyður	16,4
Hrefna	2,8
Hnúfubakur	10,8
Sandreyður	9,4

Þar sem næringarefnaflutningur stofna er í línulegu sambandi við stofnstærð hvalanna hverju sinni er ljóst að með aukinni stofnstærð eykst losun næringarefna í hverjum stofni (Mynd 11 og Mynd 12) (sjá nánar fyrir hverja tegund í Viðauka 5). Ef þetta línulega samband er skoðað má sjá að hallatalan er nokkuð breytileg milli tegunda. Stærri tegundir binda eðlilega meira á hvern einstakling og hafa hlutfallslega lægri efnaskiptahraða, því er hallatalan brattari hvað varðar útlosun á nitri í stærri hvölum og eykst því hraðar með aukningu í stofni, samanborið við minni tegundirnar (Mynd 12). Tölurnar eru hér fyrst og fremst nýttar til skýringar á þeirri aukningu sem verður í útlosun á nitri fyrir hvern einstakling í stofni (Tafla 1).

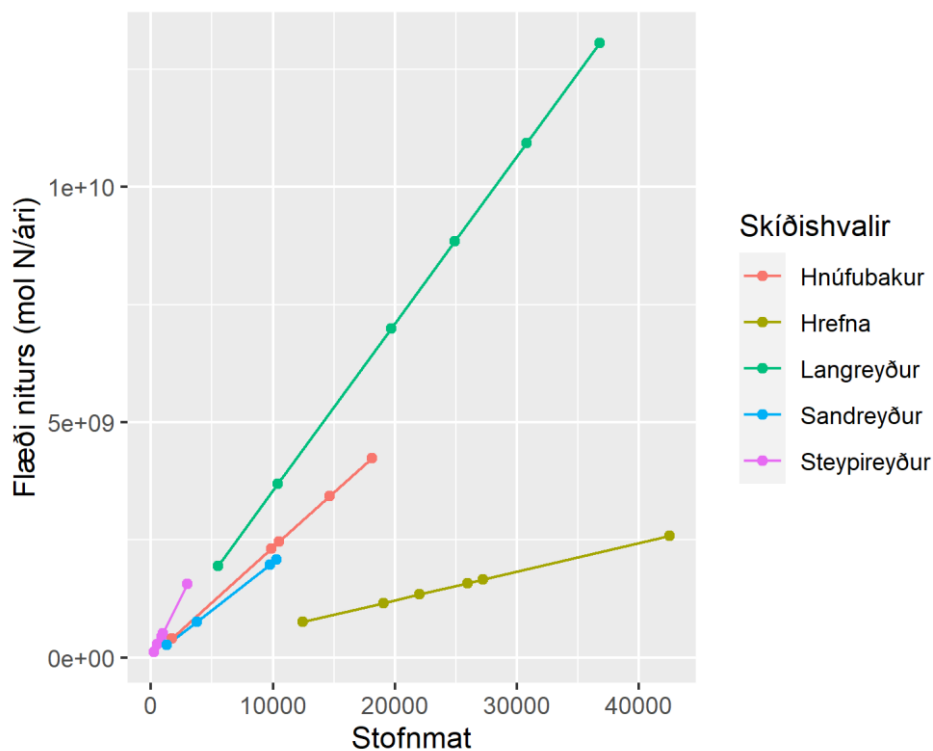
Ef niturflæðið í gegnum úrgangslosun á ári er skoðað hjá stofnum þeirra skíðishvala sem metnir voru hér og yfirfært í tonn, hefur flutningur á nitri aukist úr um 24 þúsund tonnum í rúmlega 280 þúsund tonn á árunum 1987-2015 (Mynd 11). Þar eru langreyðarnar afkastamestar enda næststærstar hvala og stofninn hefur náð ágætis vexti síðan um 1990, samanborið við aðra skíðishvali (Mynd 12). Einnig má sjá nokkuð greinilega að ef stofnar steypireyða ná sér á strik má búast við enn meiri afköstum í flutningi á nitri og öðrum næringarefnum upp að yfirborði sjávar. Framboð næringarefna er nægt við Ísland að vetrarlagi vegna blöndunar sjávar og þar sem frumframleiðendur eru ekki virkir á þeim tíma. Hér verður sjórinn svo næringarefnasauður að loknum vorblóma^[186, 187]. Áhrif af auknu

¹¹ Niturflæðið er hér áætlað í mólum niturs á ári til að gefa til kynna þurrvikt frumefnisins án tillits til þess í hvaða sameindarformi efnið er (s.s. innan prótína eða jóna eins og NH₄⁺), það auðveldar einnig samanburð við aðrar rannsóknir.

aðgengi að næringarefnum að sumri í gegnum úrganglosun hvala á virkni svifþörunga hefur lítið verið rannsökuð, en frumniðurstöður benda til að áhrifin séu markverð^[35].



Mynd 11. Áætlað flæði köfnunarefnis (N) á tímabilinu 1987-2015 upp að yfirborði sjávar í formi úrgangs hvala þar sem það nýtist ljóstíllífandi lífverum. Nýtt eru gögn frá leitarsveiðum Íslands og Færeyja.



Mynd 12. Samband stofnstærðar og niturflutningsgetu tegundar. Nýtt eru gögn frá leitarsveiðum Íslands og Færeyja.

Með tilliti til þess magns niturs sem losnar við úrgangslausun hvala á yfirborði sjávar má áætla að framlag þeirra í vistkerfum sjávar skipti máli. Eins og kom fram í rannsókn á niturflutningi hvala í Maine-flóa á austurströnd Bandaríkjanna er framlag hvalanna á því svæði meira en framlag alls þess árframburðar sem rennur út í flóann^[51]. Rannsóknir á næringarefnaflutningi í árframburði á Íslandi hafa gefið til kynna að um 19–146 tonnum á ferkílómetra er skilað út í hafið á ári hverju^[188]. Því má áætla að framlag hvala til næringarefnaflutnings upp í efri lög sjávar sé markvert í vistkerfum hafsins umhverfis Ísland líkt og annars staðar í mið-Norður Atlantshafi.

3.7 Hlutverk hvala í kolefnisbindingu sjávar

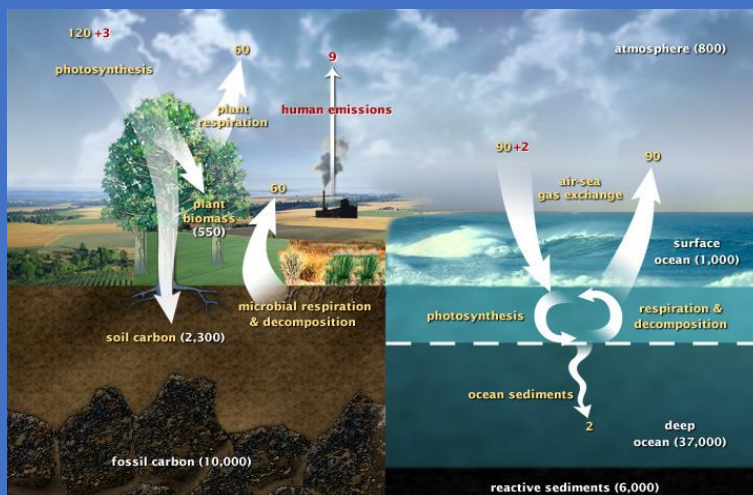
Allar lífverur jarðar binda kolefni í formi lífrænna byggingasameinda en tími þeirrar bindingar er gríðarlega breytilegur milli lífvera þar sem lífmassi og lífaldur lífverunnar skiptir höfuðmáli. Því getur binding kolefnis í lífverum verið allt frá nokkrum klukkutímum, dögum og yfir í marga áratugi^[98]. Vegna stærðar og langs lífaldurs eru stórhveli sérlega afkastamikil í bindingu kolefnis á eigin líftíma sem og eftir dauða í samanburði við aðrar lífverur^[98, 99, 189]. Þeir bæði binda kolefni í eigin skrokkum og eins og áður hefur verið greint frá stuðla að vexti svifþörunga með úrgangslausun^[12, 24, 27, 51, 106, 181].

Box. 4

Hraða og hæga kolefnishringrásin

Þegar talað er um hringrás kolefnis er átt við flutningi frumefnisins kolefnis (C) milli efnasambanda bæði í ólífrænum fyrirbærum náttúrunnar (eins og jarðskorpunni, vatni og sjó) og í lífverum. Kolefnið sem bundið er innan hægu kolefnishringrásarinnar er oftast staðsett djúpt í jarðlögum eða í djúpsjó og getur tekið þúsundir eða jafnvel hundruð milljónir ára að berast út í andrúmsloftið í formi gastegunda eins og CO₂. Ef kolefnið berst út í andrúmsloftið tilheyrir það hinni hröðu hringrás kolefnis. Helsta flutningsleið kolefnis úr hægu yfir í hröðu hringrásina er í gegnum eldvirkni og brennslu á jarðefnaeldsneyti^[9].

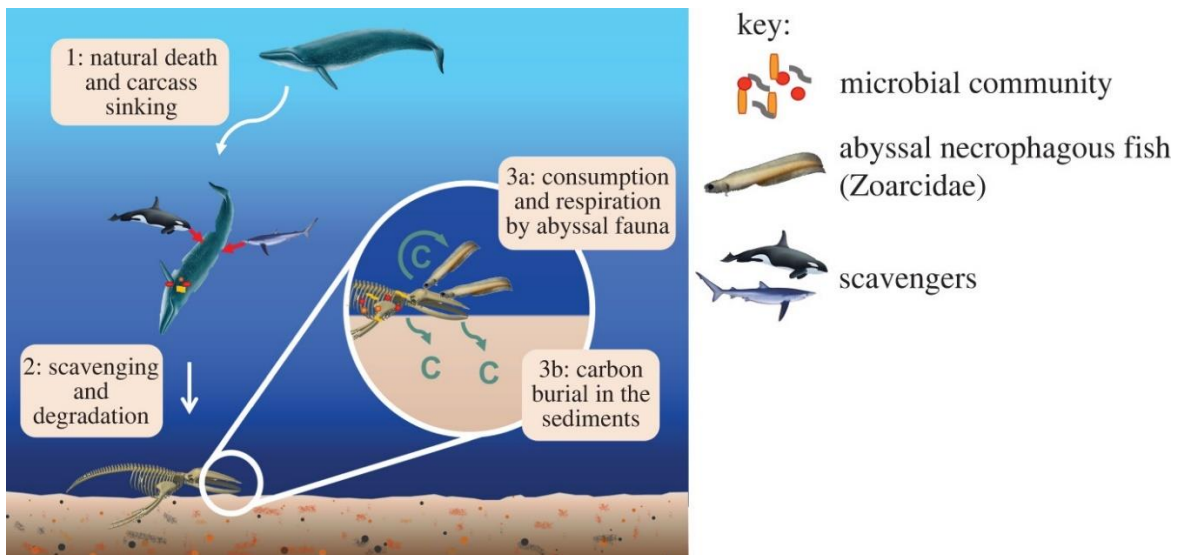
Efra lag sjávar tilheyrir hröðu kolefnishringrásinni en yfirborð sjávar tekur upp koltvísýring úr lofti og losar sameindina jafnframt frá sér aftur. Fyrir iðnbyltinguna var þessi losun og upptaka sjávar á CO₂ nokkuð jöfn, en nú tekur sjórinn meira en hann nær að losa. Þetta ójafnvægi hefur orsakað súrnun sjávar (sjá nánar í Viðauka 2). Innan hröðu kolefnishringrásarinnar berst kolefnið milli lífvera, þar sem ein étur aðra, og binst því í lífverunni út líftíma hennar. Því geta langlífari lífverur bundið kolefni lengur og því stærri sem þær eru þá binda þær meira kolefni á líftíma sínum. Þegar lífvera deyr þar sem hún er í snertingu við andrúmsloftið verður rotnun oft hraðari og í því ferli losnar kolefni á gasformi (t.d. sem CO₂ og CH₄). Ef lífveran endar líf sitt þar sem rotnun er hæg s.s. í múrlendi eða á sjávarbotni aukast líkur á flutningi kolefnis í líkama hennar inn í hægu kolefnishringrásina^[9].



Mynd 13 Skýringarmynd af hröðu kolefnishringrásinni við yfirborð jarðar og sjávar og tilfærslu kolefnis milli hægu og hröðu hringrásarinnar. Gulu tölurnar tákna náttúrulegt flæði kolefnis og rauðu tölurnar sýna framlag mannsins af kolefni í gíгатонnum á ári yfir í hröðu hringrásina. Hvítu tölurnar gefa til kynna magn kolefnis sem bundið er í hægu kolefnishringrásinni í kolefnisbirgðum jarðar. (Skýringarmyndin er fengin frá U.S. DOE, Biological and Environmental Research Information System.)

Hluti þeirrar frumframleiðslu og framleiðni átu sem er keyrð áfram af næringarflutningi hvala upp í efri lög sjávar er endurunni í efri lögum sjávar innan neðri laga vistkerfisins þar sem hluti kolefnisins losnar út sem CO₂ vegna ljóstillífunar svifþörungna^[18, 35, 76, 77, 190, 191].

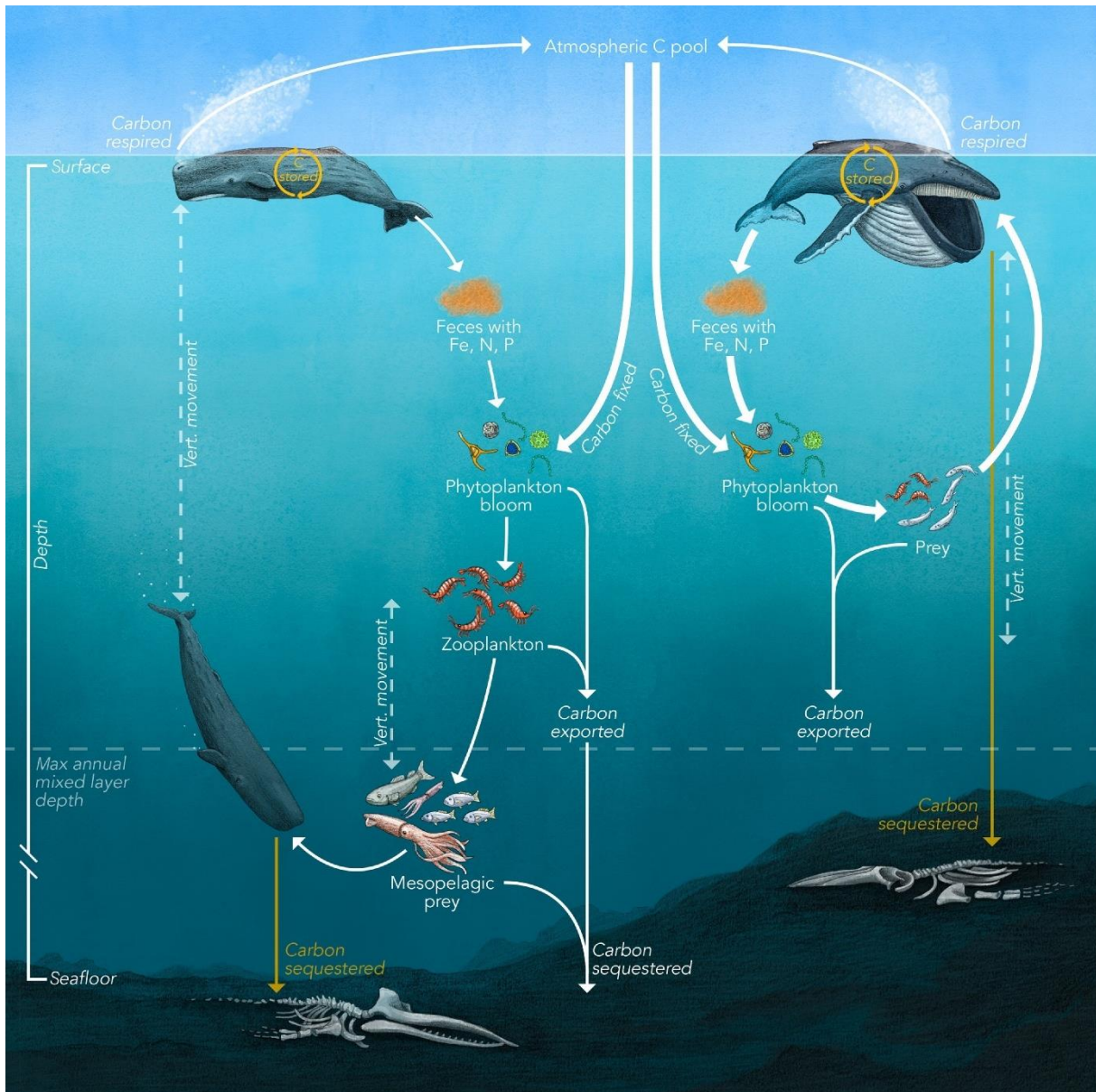
Sá hluti kolefnisins sem aftur á móti flyst ekki inn í endurnýjunarferli kolefnis í efri lögum sjávar, þ.e. hröðu kolefnishringrásina, getur fallið til botns (Mynd 14) og geymst á botni sjávar í áratugi, aldir og jafnvel árþúsundir og tilheyrir þá hægu kolefnishringrásinni (því er lýst nánar í boxi 4). Því er afar mikilvægt að hluti þess kolefnis sem er í umferð í vistkerfum falli úr endurvinnsluferlinu og geymist í geymslubirgðum djúpsjávar eða viðhaldist um tíma innan fæðuvefja djúpsjávar.



Mynd 14. Skýringarmynd á kolefnisbindingu hvalahræja. 1) Eftir dauða sökkva hræin og niðurbrot hefst af völdum grotvera (e. microbial community). 2) Hræin verða að hluta til aðgengileg hræætum, þá sérstaklega eftir að flot kemst í hræin vegna gaslosunar grotvera (örvera) innan hræjanna. 3a) Þegar hræin falla að lokum til botns verða þau aðgengileg djúpsjávarlífverum og örverum. Við öndun lífveranna (dýra og örvera) losnar CO_2 (og fleiri gastegundir) sem getur að lokum losnað út um yfirborð hafsins og borist í hröðu kolefnishringrásina. Sá tími sem það tekur CO_2 frá botnsamfélagi að losna út í andrúmsloftið getur verið frá áratugum til árþúsunda. Fer það aðallega eftir dýpt svæðisins og styrkleika hafstrauma. 3b) Kolefnið sem ekki losnar út við bruna (öndun) grefst í botnset þar sem bindingin nær að minnsta kosti yfir aldir. Myndin er fengin frá Anaëlle Durfort og féll. ^[189]. (Myndin er birt með leyfi höfundar, Attribution 4.0 International (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)

Afköstin á flutningi kolefnis niður í djúpsjó eru ákaflega breytileg milli hafsvæða þar sem framleiðslugeta hafsvæða er misjöfn^[98]. Framleiðslugeta íslenskra hafsvæða er að jafnaði mikil vegna afkastamikillar frumframleiðslu, einna helst á og við landgrunnið suðvestur af landinu. Afleiðing þess er mikil framleiðsla á lífmassa svífdýra eins og rauðátu (*Calanus finmarchicus*) og ljósátu (Euphausiids)^[192] sem dregur til sín skíðishvali. Því er ljóst að íslensk hafsvæði eru mikilvæg í bindingu kolefnis, bæði innan hröðu og hægu kolefnishringrásarinnar.

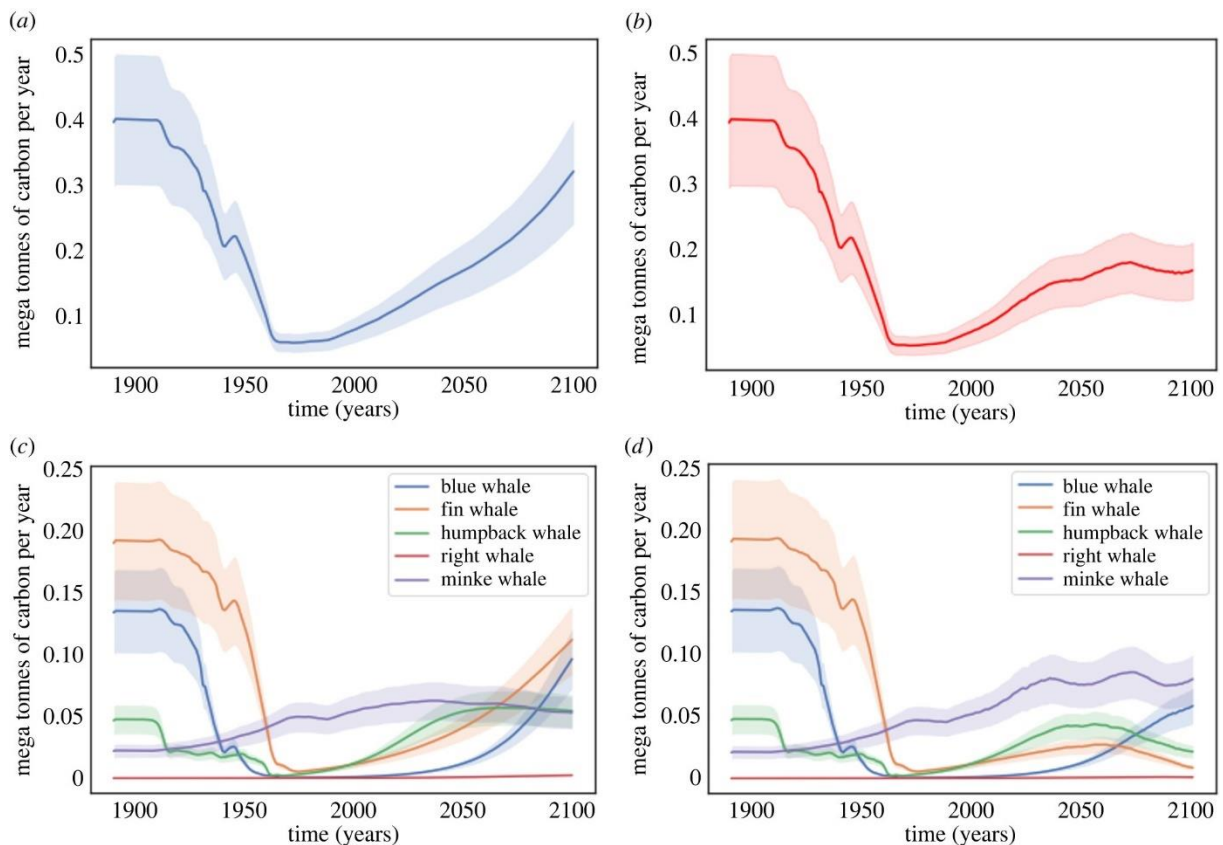
Áður en hvalveiðar hófust er talið að stórhvelastofnar heimsins hafi bundið um 9 milljónum tonnum meira af kolefni en áætlað er fyrir núlifandi stórhvelastofna. Þessir risavöxnu toppafræningjar voru að einhverju leyti leystir af hólmi af smærri sjávardýrategundum sem kepptu um sambærilegar fæðuauðlindir. Þar sem efnaskiptahraði smærri hryggdýra er hlutfallslega meiri en stærri dýra^[15, 45-47] er talið að þessi umbreyting yfir í fleiri, smærri afræningja í sjávarvistkerfum hafi leitt til um 30% rýrnunar á lífmassa kerfanna^[15]. Stærri sjávardýr flytja kolefni á mun skilvirkari máta niður í djúpsjó en þau smærri, auk þess verða stærri dýrin, líkt og hvalir, sjaldnar fyrir náttúrulegu afráni vegna stærðar sem aftur eykur lífslíkur þeirra.



Trends in Ecology & Evolution

Mynd 15. Dæmi um bindingu kolefnis í gegnum tvenns konar hópa hvala – annars vegar djúpköfunarhval (hér búrhvalur) og hins vegar skíðishval (hér hnúfubakur) sem kafar grynna. Báðir hópar hvala fylgja sama ferlinu hvað varðar beinan kolefnisflutning og -bindingu (með hræjum) en óbein áhrif þeirra á kolefnisbindingu eru aftur á móti ólík. Djúpkafarar sækja sér fæðu fyrir neðan blandlagið (e. mixed layer) og flytja því næringarefni úr dýpri lögum og upp að yfirborðinu. Skíðishvalir sækja sér fæðu fyrst og fremst innan blandlagsins og leggja því aðallega til viðhalds næringarefna innan þess lags. Næringarefni haldast þá aðgengileg frumframleiðendum lengur. Gular örvar gefa til kynna beint framlag hvalanna til kolefnisbindingar og hvítu örvarnar sýna óbein framlög þeirra til þess ferlis. Myndin er fengin frá Heidi C Pearson og féll. ^[98], (Höfundaréttur áskilinn Elsevier, Publishing Attribution 4.0 International (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>).

Andrew J Pershing og féll. ^[15] áætluðu að ef hvalastofnar kæmst í sambærilegt horf og fyrir tíma atvinnuhvalveiða myndi flutningur á kolefni í djúpsjó aukast um 160 þúsund tonn á ári með hvalahræjum einum sem falla til botns. Heidi C Pearson og féll. ^[98] áætluðu áhrif stórhvela á kolefnisbindingu í hafi með tilliti til vistfræði- og stofnfræðilegra breyta. Líkön þeirra gáfu sterklega til kynna að endurheimt hvalastofna gæti leitt til aukningar í kolefnisbindingu í djúphöfum bæði beint með dauðum hvölum sem sökkva til botns og óbeint með virkjun kolefnislífferlisins (til kolefnisbindingar). Anaëlle Durfort og féll. ^[189] komust að sambærilegri niðurstöðu með líkönum sem áætluðu kolefnisbindingu fyrir og á tímum iðnaðarhvalveiða, nú á tímum og svo með endurheimt hvala í Suður-Íshafi fram til ársins 2100 (Mynd 16).



Mynd 16 Áætluð áhrif fimm skiðishvalategunda í Suðrhöfum á kolefnisbindingu á milli árunna 1890-2100 miðað við áætlaðar stofnstærðir. Á mynd a) og c) er ekki tekið tillit til áhrifa loftslagsbreytinga en á myndum b) og d) er gert ráð fyrir áhrifum loftslagsbreytinga. Á myndum a) og b) kemur fram áætluð heildarkolefnisbinding þessara fimm tegunda hvala (með og án áhrifa loftslagsbreytinga) á meðan myndir c) og d) gefa til kynna afköst hvernar tegundar fyrir sig í kolefnisbindingu í Suðrhöfum (með og án áhrifa loftslagsbreytinga). Þýðingar á hvalaheimum: Blue whale = steypireyður, fin whale = langreyður, humpback whale = hnúfubakur, right whale = [Suður-Íshafs] sléttbakur, minke whale = [Suðurskauts-] hrefna. Myndin er fengin frá Anaëlle Durfort og féll.^[189] (Myndin er birt með leyfi höfundar, Attribution 4.0 International (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)

Þrátt fyrir slíka útreikninga er þörf á gögnum sem geta með meiri nákvæmni áætlað hvert hið beina (með hræjum) og óbeina framlag hvala til kolefnisbindingar er, svo sem með virkjun lífferlisins og bindingu kolefnis í gegnum ljóstillífun fyrir tilstuðlan dreifingar á ólífrænni næringu. Talið er að atvinnuhvalveiðar hafi fjarlæggt um 17 milljón tonn af kolefni sem bundin voru í veiddum hvölum^[15] út úr kolefnahringrás hafsins og því komið í veg fyrir mögulega bindingu þess kolefnis í djúpsjó. Þessi umtalsverða fækkun á hvalastofnum á heimsvísu á tiltölulega stuttum tíma er talin hafa umbreytt stýringu margra sjávarvistkerfa^[193] og haft þannig áhrif á starfsemi kolefnishringrásarinnar í hafi. Jan-Olaf Meynecke og féll.^[194] benda aftur á móti á í nýlegri rannsókn sinni að binding hvalahræja í botnseti djúpsjávar sé óveruleg þar sem stærsti hluti kolefnisins flyst yfir í fæðuvef djúpsjávar í gegnum hrætur og örverur. Engu að síður hægir það ferli á flutningi kolefnisins í gasformi (t.d. CO₂) inn í hröðu hringrásina við yfirborð sjávar^[189]. Af þessu má álykta að enn er nokkuð ójóst hvert framlag hvala er til kolefnisbindingar og eru efasemdarraddir innan vísindasamfélagsins sem telja að sú binding sé ekki marktæk í baráttunni við loftslagsbreytingar. Þó svo binding kolefnis í stórhvelum sé lítil (~1.4 Gt C)^[98] í stóra samhenginu álykta fjölmargar vísindarannsóknir að styrking á stofnum stórra rándýra í vistkerfum sjávar, þá einna helst hvölum, styrki vistkerfi sjávar á margvíslegan hátt^[t.d. 15, 22, 29, 30, 33, 51, 98, 125, 126]. Eins og Heidi C Pearson og féll.^[98] benda á er verndun hvalastofna áhættulítil aðgerð sem er mun líklegri til að skila af sér jákvæðum langtíma áhrifum í vistkerfum sjávar heldur en neikvæðum. Þekkingin á hlutverki stórhvela í viðhaldi stöðugra vistkerfa og bindingu kolefnis mun eflast og skýrast með verndun stofna svo lengi sem hún leiði til stækkunar þeirra.

Tafla 2 Samantekt heimilda í rannsókn Heidi C Pearson og fél. ^[98] Þar sem áætlað er framlag hvala til kolefnisbindingar fyrir og eftir atvinnuhvalveiðar. Allar rannsóknir benda til töluverðs samdráttar í kolefnisbindingu vegna fjækkunar í hvalastofnum á heimsvísu. (Höfundaréttur áskilinn Elsevier, Publishing Attribution 4.0 International (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>).

Mechanism	Species	Region	Pre-whaling C estimate ^a (N)	Modern C estimate (N, year)	C fate	Refs
Biomass	8 Baleen whale taxa ^b	Global	1.1×10^{-2} Gt C (2.9×10^6)	2.0×10^{-3} Gt C (1.1×10^6 , 2016)	Stored ^c	Updated from [7] ^d
Whale falls	All baleen whales	Global	3.6×10^{-4} Gt C/year (2.9×10^6)	6.2×10^{-5} Gt C/year (1.1×10^6 , 2016)	Sequestered	Updated from [7,95] ^e
Whale pump	Blue whale	Southern Ocean	1.3×10^{-1} Gt C/year, range: 5.2×10^{-2} Gt C/year to 2×10^2 Gt C/year (2.4×10^5)	2.8×10^{-3} Gt C/year, range: 1.2×10^{-3} to 4.5×10^{-3} Gt C/year (5.2×10^3 , 2012)	Fixed	[44]
Whale pump	Blue, fin, humpback, and Antarctic minke whales	Southern Ocean	2.2×10^{-1} Gt C/year; range: 2.7×10^{-2} to 1.5 Gt C/year	2.2×10^{-2} Gt C/year; range: 2.7×10^{-3} to 1.5×10^{-1} Gt C/year	Fixed	[8]
Whale pump	Sperm whale (<i>Physeter macrocephalus</i>)	Southern Ocean	2.4×10^{-3} Gt C/year ($\sim 1.2 \times 10^5$)	4×10^{-4} Gt C/year (1.2×10^4 , 2001)	Exported	[43]
Great whale conveyor belt	Blue whale	Southern Hemisphere	1.4×10^{-4} Gt C/year (3.3×10^5)	5.1×10^{-7} Gt C/year (1.2×10^3 , 2001)	Fixed	[10]

^aAll C values are gross and do not account for the amount of C respired by great whales.

^bMinke (*Balaenoptera acutorostrata*), Antarctic minke (*Balaenoptera bonaerensis*), sei (*Balaenoptera borealis*), Bryde's (*Balaenoptera bryde*), blue (*Balaenoptera musculus*), fin (*Balaenoptera physalus*), bowhead (*Balaena mysticetus*), gray (*Eschrichtius robustus*), right (*Eubalaena* spp.), and humpback (*Megaptera novaeangliae*) whales.

^cWhile some great whales can live >100 years, most known lifespans of these species are <100 years; thus, the C is considered stored.

^dValues calculated per Pershing *et al.* [7] using updated pre-whaling and modern population estimates from Smith *et al.* [20].

^ePershing *et al.* [7] was the first attempt to calculate C export by whale falls. They used a conservative assumption that 50% of orqual and gray whale carcasses are exported while only 10% of right and bowhead whale carcasses are exported. Smith and Baco [95] suggested that a high proportion of whale deaths occur during migration. Even for North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*), a coastal species with a robust monitoring network, the observed number of carcasses is much lower than the estimated number of whale deaths. For this paper, we used higher percentages: 90% for orquals and gray whales, 50% for right and bowhead whales. This increases the export flux

3.8 Helstu ógnir sem steðja að hvalategundum í dag

Frá upphafi iðnbyltingar hefur álag á lífríkið aukist stöðugt og stöðugt. Mengun, búsvæðaröskun og ofveiði, svo dæmi séu tekin, hafa umturnað stórum hluta vistkerfa jarðar. Breytingar á umhverfi hvala og annara sjávardýra hafa jafnframt verið umtalsverðar en þeir álagsþættir sem eru hvað þekktastir eru ýmiskonar efnamengunar (t.d. olía, þrávirk lífræn efni og plast), rusl sem dýrin flækjast í, skerðing á búsvæðum t.d. vegna ofveiði, mikillar skipaumferðar, hljóðmengunar og loftslagsbreytinga sem valda breytingum á útbreiðslu og aðgengi að fæðu og auka hættu á útbreiðslu sjúkdóma^[195].

Það sem helst hefur áhrif á möguleika hvalategunda til vaxtar og viðhalds er búsvæðaval, hversu áttthagakærir þeir eru (þ.e. hversu hæfir þeir eru að flytja sig frá röskuðu búsvæði og yfir á nýtt) og fæðuval^[83, 151]. Þær tegundir sem eru háðar strandsvæðum eða ferskvatni þar sem þéttbýli mannfólks er mikið eiga mest undir högg að sækja^[11, 195]. Rannsóknir á stöðu sjávarspendýra á norðurhvara sýna að með hlýnun og tapi á hafís muni útbreiðsla farhvala færast norðar, það geti jafnframt aukið samkeppni milli hvalategunda að fæðuauðlindum^[83, 151]. Þá er líklegra að þeir sem eru sérhæfir í fæðu og eru áttthagakærir láti frekar undan í samkeppninni. Þá má búast við lengdri viðveru á norðlægari fæðusvæðum þar sem erfiðara getur orðið fyrir hvalina að afla sér nægs næringarforða fyrir veturinn til að halda í far á æxlunarslóðir. Því er ljóst að álag loftslagshlýnunar auk annarra beinna áhrifa mannsins á flesta hvalastofna norðurhvelsins er umtalsvert^[83, 151].

Hér verður vakin sérstök athygli á ákveðnum álagsþáttum sem eru taldir hafa mikil áhrif á viðkomu flestra hvalategunda í dag, þ.e. skipaumferð, hljóðmengun, plast- og ruslmengun og sjúkdómar. Hér er ekki fjallað sérstaklega um efnamengun en það skal tekið fram að slík mengun getur valdið töluverðu álagi á margar hvalategundir. Flestir hvalir hafa í sér uppsöfnuð eiturefni, sérstaklega fyrir tilstuðlan þrávirkra lífrænna efna sem finnast t.d. í skordýraeitri og ýmiskonar aukaefnum og íðefnum úr iðnaði. Þó er munur á milli tegunda hvað það varðar. Þessi efni eru fituleysanleg og geta því

safnast upp í miklu magni í spiki hvala og geta stuðlað að ýmiskonar heilsufarslegum vandamálum^[196, 197].

3.8.1 Skipaumferð

Aukning í siglingaumferð bæði stórskipa og smærri hraðskreiðra strandbáta eykur álag á stór sjávardýr eins og hvali sem þurfa að koma upp á yfirborðið til að anda, ein einnig beinháfa (*Cetorhinus maximus*) og hvalháfa (*Rhincodon typus*) sem sía svif við yfirborð sjávar^[198]. Helstu áhrif skipaumferðar á þessa rísa hafsins eru árekstrar við skip sem leiða af sér oft alvarleg meiðsli ef dýrið drepst ekki, en einnig breytingar á nýtingu og hegðun dýranna á þeim búsvæðum sem siglingaumferð er mikil^[199]. Þess konar álag innan mikilvægra búsvæða (t.d. fæðustöðva) getur leitt til breytinga í fæðuháttum og jafnvel minni árangurs í næringaröflun. Þar sem skipaumferð er mikil eykst hættan á plast-, eiturefna- og hljóðmengun en auk þess leiðir hún til búsvæðaröskunar^[200] eins og t.d. með uppbroti¹² á búsvæðunum^[201, 202]. Upplýsingar um tíðni árekstra farartækja við hvali eru ekki þekktar fyrir íslensk hafsvæði en Hafrannsóknastofnun heldur utan um alla hvalreka á Íslandi og gætu þau gögn gefið vísbendingar um tíðni þeirra. Mynd 17 sýnir hnúfubak á íslensku strandsvæði sem hefur að öllum líkindum fengið í sig skipaskrúfu en lifað af og sárin gróið.



Mynd 17. Hnúfubakur með afgerandi ör aftan við bakugga sem líklega er komið til vegna áverka frá bátaskrúfu. Hvalurinn sást í Steingrímsfirði 2020. (Eigandi myndar: Edda E. Magnúsdóttir. Myndatökusmiður er Nicholai Xuereb).

3.8.2 Hljóðmengun

Hljóðflutningsgeta hafsins gerir það að verkum að bakgrunnshljóðin, eða hljóðvistin, samanstendur af fjölbreyttum náttúrulegum og ónáttúrulegum hljóðum þar sem margvíslegir hljóðgjafar leggja sitt af mörkum. Náttúruleg hljóð koma frá vindi og öldubroti, af og til vegna eldingar, neðansjárvarjarðskjálfta og eldsumbrota, sem og frá fjölbreyttum sjávardýrum. Ónáttúruleg hljóð eru aftur á móti þau sem myndast vegna ýmissa athafna mannsins eins og olíu- og gasleit, kaþátaleitir þar sem nýttar eru gífurlega háværar hljóðsjár, stórskipaumferðir og fleira^[203].

Umfangsmiklar rannsóknir á hljóðvist norðurhjarans hafa staðið yfir í áráraðir þar sem fylgst hefur verið náið með þeim breytingum sem eiga sér þar stað í umhverfishljóðum hafsins^[203-206]. Á næstu árum verða róttækustu breytingarnar í hljóðvist hafsins í Norður Íshafi. Með þynningu hafíssins, minni útbreiðslu hans og stærri svæða sem haldast lengur íslaus fækkar þeim stundum þar sem hljóðvistin er í vari fyrir veðri og vindum. Það sem í ofanálag gerbreytir þeirri hljóðvist sem hefur ríkt á norðurskautinu í milljónir ára fyrir tilstuðlan hafíssins, er aukning skipaumferðar vegna opunar áður lokaðra siglingaleiða þar sem hafís leggur ekki lengur allan ársins hring^[207]. Því má búast við verulegri aukningu í stórskipaumferð um og við íslenska landhelgi.

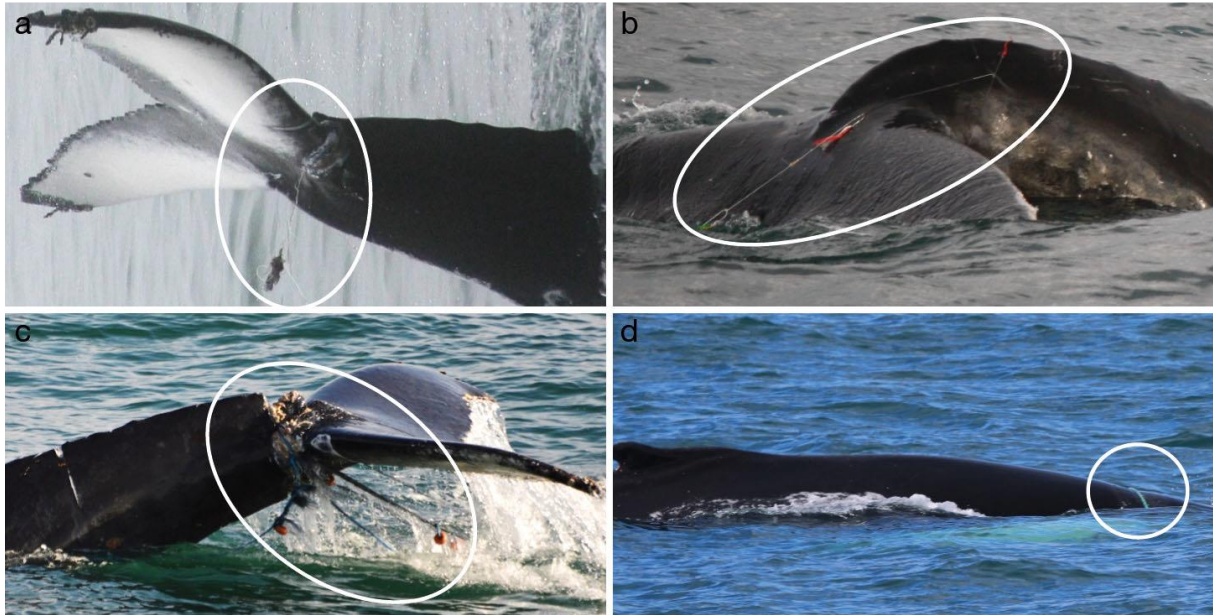
Athafnir mannsins sem valda hljóðmengun í hafi halda áfram að aukast og þá sérstaklega vegna skipaumferðar^[203]. Þessi umbreytingin á hljóðvist hvala og annara sjávardýra hefur dregið úr getu þeirra til samskipta eða neyðir þá til að aðlaga hljóðsamskiptin að orkufrekari hljóðgerðum til að

¹² Habitat fragmentation

yfirgnæfa bakgrunnshljóðin^[201, 202]. Áhrifin eru sérstaklega mikil á langdrægar hljóðgerðir sem eru í tilfelli skíðishvala fyrst og fremst mikilvæg þegar þeir leita sér maka yfir langar vegalengdir.

3.8.3 Rusl og veiðarfæri

Sjávarspendýrum stafar töluverð ógn af veiðarfærum og öðru rusli í sjó. Talið er að um 25% hnúfubaka við strendur Íslands hafi flækst í neti og öðrum fiskveiðibúnaði á lífsleiðinni en lifað það af^[208]. Fjöldi þeirra sem drepst vegna veiðarfæra hér við land er ekki þekktur en þó nokkur dæmi um slíkan dauða hafa verið tilkynnt^[209, 210]. Tölur eru óþekktar fyrir aðra skíðishvali við strendur Íslands en vel er þekkt að hnísur (tannhvalir) sem eru minnstu hvalirnir, en einnig land- og útselir lenda hvað tíðast í netum og drukkna þar^[211].



Mynd 18. Dæmi um veiðarfæri sem hafa flækst um stirtlu og líkama hnúfubaka. Myndirnar eru teknar við Ísland og fengnar frá Charla J Basran og féli.^[208] (Myndin er birt með leyfi höfundar, Attribution 4.0 International (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)

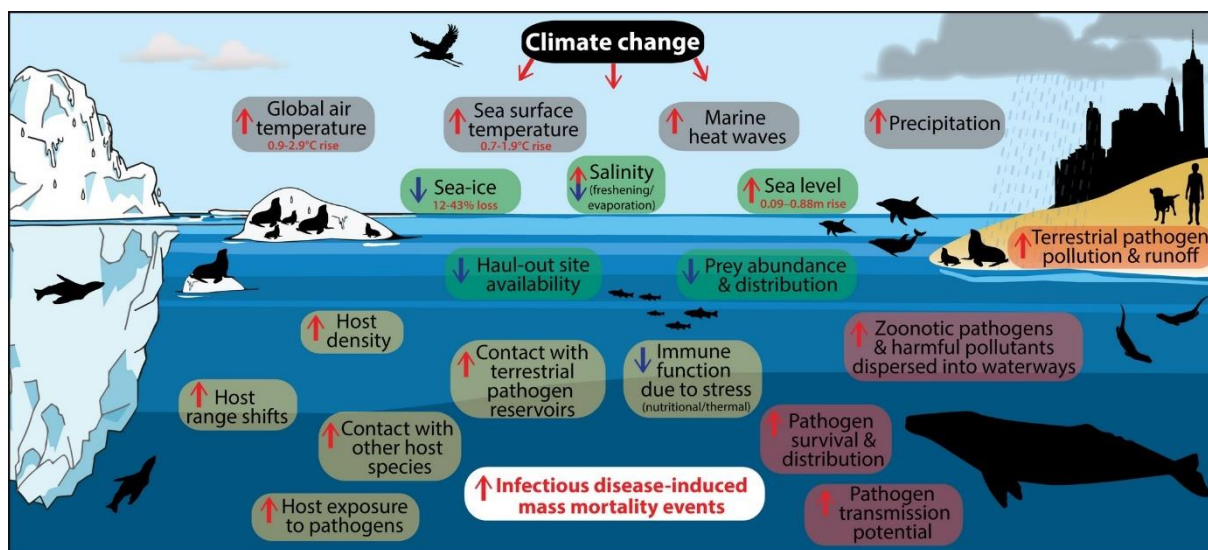
Inntaka á plasti, bæði örplasti og stærra plastrusli hefur mælst í töluverðu magni meðal ýmissa hvalategunda. Þær tegundir sem eru að því er virðist útsettari fyrir stærra plastrusli eru tannhvalir og þá sérstaklega djúpkafarar sem nærast meðal annars á hryggleysingjum eins og smokkfiskum og marglyttum^[212-214]. Líklega ruglast þessir hvalir á plastpokum og öðru rusli fyrir syndandi hryggleysingja. Þó hefur stórt plastrusl og veiðibúnaður fundist í meltingarvegi annarra tannhvala og einnig skíðishvala^[215, 216].

Magn á örplasti er sífellt að aukast í hafi þar sem stærra plastrusl brotnar niður í smærri og smærri einingar. Á því formi á plastið greiða leið inn í fæðuvefinn, þá sérstaklega í gegnum síara meðal hryggleysingja, fiska og hvala. Skíðishvalir og aðrir síarar í hafi eru taldir sérstaklega útsettir fyrir örplastsmengun, bæði beint þegar þeir sía fæðu úr sjónum en þá fylgir örplast með, og óbeint þar sem örplastið berst í gegnum fæðuna þeirra (t.d. átu og aðra smáa síara)^[217-220]. Rannsóknir á langreyðum, hnúfubökum, sandreyðum og skorureyðum (*Balaenoptera brydei*) hafa sýnt fram á umtalsvert magn örplasts í meltingarvegi þessara dýra.^[220-222]

3.8.4 Sjúkdómar

Skerðing á búsvæðum, skortur á fæðu og fjölmargir mengunarþættir valda álagi á sjávarspendýr sem eykur hættuna á veikingu ónæmiskerfa. Slík staða eykur líkur á sýkingum og smiti en aukið hitastig er jafnframt talið ýta undir dýrafarsóttir (Mynd 19). Með hækkandi yfirborðshitastigi sjávar er jafnframt

áætlað að tíðni sjúkdóma í sjávarspendýrum muni aukast enn frekar, en á síðustu 30 árum hefur dýrafarsóttum fjölgað á heimsvísu^[223].



Mynd 19. Áætluð áhrif loftslagshlúnunar og veingar búsvæða í sjó á aukningu í útbreiðslu sjúkdóma meðal sjávardýra. Myndin er fengin frá Claire E Sanderson & Kathleen A Alexander ^[223].

4 Lokaorð

Hér hefur verið varpað ljósi á stöðu þekkingar á hlutverkum hvala í vistkerfum sjávar og möguleg áhrif þeirra innan íslenskrar landhelgi. Gífurleg þekking hefur skapast innan vísindanna um lífshætti hvala og margþætta starfsemi þeirra í vistkerfum hafsins. Með góðri vissu má draga þá ályktun að hvalir hafi almennt jákvæð áhrif á vistkerfi sín og veiti vistkerfisþjónustu sem getur ýtt undir lífbreytileika og frjósemi vistkerfa í hafi. Rannsóknir hafa sýnt með nokkuð góðri vissu að afrán hvala hafi ólíklega neikvæð áhrif á efnahagslega mikilvæga fiskistofna og að afrán stórhvela skarist ekki marktækt á við sjávarútveginn á Íslandi. Mikið hefur verið rætt um mögulegt framlag hvala til kolefnisbindingar. Ýmsar rannsóknir hafa áætlað, þó ennþá með allnokkurri óvissu, beint framlag hvala til kolefnisbindingar í formi hvalahræja sem flytjast niður í djúpsjó og er samhljómur meðal þeirra að það framlag sé marktækt og muni eflast umtalsvert með endurheimt hvalastofna. Aftur á móti er greining á óbeinum áhrifum hvala til kolefnisbindingar með virkjun frumframleiðslu enn háð mikilli óvissu. Með nokkuð góðri vissu má sjá að ákveðnir hvalastofnar, eins og hnúfubakar og langreyðar, hafa styrkst á íslenskum og nærliggjandi hafsvæðum frá því á níunda áratug 20. aldar og hafa líklega náð stöðugleika í vistkerfum svæðisins. Engu að síður hafa þær tegundir ekki náð áætlaðri stofnstærð sinni frá því fyrir tíma atvinnuhvalveiða. Aðrar tegundir standa þó enn verulega höllum fæti, líkt og steypireyðar, sem þrátt fyrir aukningu telja aðeins um 3000 dýr í Norður Atlantshafi og Norður Atlantshafs sléttbakar sem eru á barmi útrýmingar. Álag á sjávarspendýr er orðið umtalsvert og hafa rannsóknir þegar sýnt minni frjósemi og verra líkamsástand hjá ýmsum skíðishvölum í Norður Atlantshafi. Loftslagsbreytingar og önnur bein áhrif mannsins draga verulega úr gæðum búsvæða í hafi og auka álagið á fjölmargar hvalategundir. Því ríkir mikil óvissa um framtíð margra hvalastofna með aukinni hlýnun, mengun og breyttu útbreiðslumynstri fæðustofna þeirra. Með aukinni innspýtingu í rannsóknir á fjölbreyttum þáttum vistkerfa hafsins við Ísland og hlutverki hvala í þeim vistkerfum eykst skilningur okkar á áhrifum þessa risa hafsins á umhverfi sitt. Slík þekkingaraukning er mikilvægt tól í ákvarðanatöku um verndun hafsvæða og hvalastofna á tímum loftslagsbreytinga.

5 Þakkir

Höfundur vill þakka Freydísi Vigfúsdóttir, PhD sérfræðingi á skrifstofu sjálfbærni hjá Matvælaráðuneytinu og Guðmundi Þórðarsyni, PhD sérfræðingi á skrifstofu sjávarútvegs hjá Matvælaráðuneytinu fyrir faglegan yfirllestur á skýrslunni og gagnlegar ábendingar. Höfundur þakkar sérstaklega Guðjóni Má Sigurðssyni, MS sjávarlíffræðingi og hvalasérfræðingi við uppsjávarsvið Hafrannsóknastofnunar og Söru Harðardóttur PhD sérfræðingi í dýrasvifi við uppsjávarsvið Hafrannsóknastofnunar fyrir faglegan og gagnrýninn yfirllestur. Höfundum vísindagreina sem góðfúslega deildu myndefni sínu í skýrslunni er sérstaklega þakkað. Bjarnveig Ingvarsdóttir íslenskufræðingur og kennari fær miklar þakkir fyrir vandaðan prófarkalestur. Dúa Jóhannssyni Landmark upplýsingafulltrúa Matvælaráðuneytisins er þakkað kærlega fyrir yfirllestur og ábendingar við lokadrög.

6 Heimildaskrá

1. J.R. Schoenherr. 1991. *Blue whales feeding on high concentrations of euphausiids around Monterey Submarine Canyon*. Canadian Journal of Zoology. **69**(3): bls. 583-594.
2. P.C. Gill. 2002. *A blue whale (Balaenoptera musculus) feeding ground in a southern Australian coastal upwelling zone*. Journal of Cetacean Research and Management. **4**(2): bls. 179-184.
3. G.A. Víkingsson. 1997. *Feeding of fin whales (Balaenoptera physalus) off Iceland-diurnal and seasonal variation and possible rates*. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science. **22**.
4. G.A. Víkingsson, og féll. 2015. *Distribution, abundance, and feeding ecology of baleen whales in Icelandic waters: have recent environmental changes had an effect?* Front Ecol Evol. **3**(6): bls. 18.
5. P. Domenici. 2001. *The scaling of locomotor performance in predator-prey encounters: from fish to killer whales*. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology. **131**(1): bls. 169-182.
6. B.R. Tershy. 1992. *Body size, diet, habitat use, and social behavior of Balaenoptera whales in the Gulf of California*. Journal of Mammalogy. **73**(3): bls. 477-486.
7. M.J. Behrenfeld, og féll. 2019. *Global satellite-observed daily vertical migrations of ocean animals*. Nature. **576**(7786): bls. 257-261.
8. M. Skern-Mauritzen, og féll. 2022. *Marine mammal consumption and fisheries removals in the Nordic and Barents Seas*. ICES Journal of Marine Science. **79**(5): bls. 1583-1603.
9. I.C. Prentice, og féll., *The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide*.
10. IWC. 2023. *Taxonomy: classification of Cetacea*. 2023 [sótt 01.03.2023 2023]. Aðgengilegt frá: <https://iwc.int/about-whales/cetacea>.
11. IUCN-CSG. 2019. *Status of the world's cetaceans*. 2019 [sótt 16.06 2023]. Aðgengilegt frá: <https://iucn-csg.org/status-of-the-worlds-cetaceans/>.
12. S. Honjo, og féll. 2014. *Understanding the role of the biological pump in the global carbon cycle: an imperative for ocean science*. Oceanography. **27**(3): bls. 10-16.
13. G.J. Slater, J.A. Goldbogen, og N.D. Pyenson. 2017. *Independent evolution of baleen whale gigantism linked to Plio-Pleistocene ocean dynamics*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. **284**(1855): bls. 20170546.
14. J. Sigurjónsson og G.A. Víkingsson. 1997. *Seasonal abundance of and estimated food consumption by cetaceans in Icelandic and adjacent waters*. J Northwest Atl Fish Sci. **22**: bls. 271-287.
15. A.J. Pershing, og féll. 2010. *The impact of whaling on the ocean carbon cycle: why bigger was better*. PloS one. **5**(8): bls. e12444.

16. I. Christensen, T. Haug, og N. Øien. 1992. *Seasonal distribution, exploitation and present abundance of stocks of large baleen whales (Mysticeti) and sperm whales (Physeter macrocephalus) in Norwegian and adjacent waters*. ICES J. Mar. Sci. . **49**: bls. 341–355.
17. C. Schlosser, og féll. 2018. *Mechanisms of dissolved and labile particulate iron supply to shelf waters and phytoplankton blooms off South Georgia, Southern Ocean*. Biogeosciences. **15**(16): bls. 4973-4993.
18. E. Cavan, og féll. 2019. *The importance of Antarctic krill in biogeochemical cycles*. Nature communications. **10**(1): bls. 4742.
19. K. Schmidt, og féll. 2016. *Zooplankton gut passage mobilizes lithogenic iron for ocean productivity*. Current Biology. **26**(19): bls. 2667-2673.
20. K. Schmidt, og féll. 2011. *Seabed foraging by Antarctic krill: Implications for stock assessment, benthic-pelagic coupling, and the vertical transfer of iron*. Limnology and Oceanography. **56**(4): bls. 1411-1428.
21. K. Buddhachat, og féll. 2021. *Life expectancy in marine mammals is unrelated to telomere length but is associated with body size*. Frontiers in Genetics. bls. 1792.
22. N. Hammerschlag, og féll. 2019. *Ecosystem function and services of aquatic predators in the Anthropocene*. Trends in ecology & evolution. **34**(4): bls. 369-383.
23. L. Závorka, og féll. 2019. *Aquatic predators influence flux of essential micronutrients*. Trends in Ecology and Evolution. **34**(10): bls. 880-881.
24. J. Roman og J.J. McCarthy. 2010. *The whale pump: marine mammals enhance primary productivity in a coastal basin*. PloS one. **5**(10): bls. e13255.
25. C.-A. Bost, og féll. 2002. *Feeding of diving predators and diel vertical migration of prey: King penguins¹ diet versus trawl sampling at Kerguelen Islands*. Marine Ecology Progress Series. **227**: bls. 51-61.
26. O. Shatova, og féll. 2016. *Seabird guano enhances phytoplankton production in the Southern Ocean*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. **483**: bls. 74-87.
27. P.W. Boyd, og féll. 2019. *Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean*. Nature. **568**(7752): bls. 327-335.
28. L.R. Gerber, og féll., *Should whales be culled to increase fishery yield?* American Association for the Advancement of Science. bls. 880-881.
29. Morissette L, Kaschner K, og G. LR. 2010. *“Whales eat fish”? Demystifying the myth in the Caribbean marine ecosystem*. Fish Fish. **11**: bls. 388–404.
30. L. Morissette, V. Christensen, og D. Pauly. 2012. *Marine mammal impacts in exploited ecosystems: would large scale culling benefit fisheries?*
31. V. Christensen, og féll. 2008. *Ecopath with Ecosim version 6 user guide*. Lenfest Ocean Futures Project. **235**.
32. J. Sigurjónsson og G.A. Víkingsson. 1997. *Seasonal abundance of and estimated food consumption by cetaceans in Icelandic and adjacent waters*. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science. **22**.
33. J.A. Estes, og féll. 2016. *Megafaunal Impacts on Structure and Function of Ocean Ecosystems*. Annu. Rev. Environ. Resour. **41**: bls. 83–116.
34. J.A. Estes, J.S. Brashares, og M.E. Power. 2013. *Predicting and detecting reciprocity between indirect ecological interactions and evolution*. The American Naturalist. **181**(S1): bls. S76-S99.
35. L.V. Smith, og féll. 2013. *Preliminary investigation into the stimulation of phytoplankton photophysiology and growth by whale faeces*. Journal of experimental marine biology and ecology. **446**: bls. 1-9.
36. G. Stefánsson, J. Sigurjónsson, og G.A. Víkingsson. 1997. *On dynamic interactions between some fish resources and cetaceans off Iceland based on a simulation model*. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science. **22**.
37. E.K. Pikitch, og féll., *Ecosystem-based fishery management*. American Association for the Advancement of Science. bls. 346-347.
38. T.E. Essington og A.E. Punt. 2011. *Implementing ecosystem-based fisheries management: advances, challenges and emerging tools*. Fish and Fisheries. **2**(12): bls. 123-124.

39. J.A. Nilsson, og féll. 2016. *Consensus management in Antarctica's high seas—Past success and current challenges*. Marine Policy. **73**: bls. 172-180.
40. B. Arthur, og féll. 2018. *Managing for change: using vertebrate at sea habitat use to direct management efforts*. Ecological Indicators. **91**: bls. 338-349.
41. A.E. Punt, og féll. 2020. *Evaluating management strategies for marine mammal populations: an example for multiple species and multiple fishing sectors in Iceland*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. **77**(8): bls. 1316-1331.
42. L.B. Christensen. 2006. *Marine mammal populations: reconstructing historical abundances at the global scale*. Fisheries Centre Research Reports. **14**(9): bls. 161.
43. D.G. Pike, og féll. 2009. *Trends in the distribution and abundance of cetaceans from aerial surveys in Icelandic coastal waters, 1986–2001*. NAMMCO Sci Publ. **7**: bls. 117–142.
44. D.G. Pike, og féll. 2020. *Distribution and abundance of cetaceans in Icelandic waters over 30 years of aerial surveys*. NAMMCO Scientific Publications. **11**.
45. J.F. Gillooly, og féll. 2001. *Effects of size and temperature on metabolic rate*. science. **293**(5538): bls. 2248-2251.
46. A.M. Hemmingsen. 1960. *Energy metabolism as related to body size and respiratory surface, and its evolution*. Reports of the Steno Memorial Hospital (Copenhagen). **13**: bls. 1-110.
47. M. Kleiber. 1932. *Body size and metabolism*. Hilgardia. **6**(11): bls. 315-353.
48. Hafrannsóknastofnun, *Veiðar á Íslandsmiðum, í Ástand nytjastofna sjávar og ráðgjöf 2021* Hafrannsóknastofnun.
49. E.F. Vogel, og féll. 2021. *Killer whale movements on the Norwegian shelf are associated with herring density*. Marine Ecology Progress Series. **665**: bls. 217-231.
50. J.M. Straley, og féll. 2018. *Seasonal presence and potential influence of humpback whales on wintering Pacific herring populations in the Gulf of Alaska*. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. **147**: bls. 173-186.
51. J. Roman, og féll. 2014. *Whales as marine ecosystem engineers*. Frontiers in Ecology and the Environment. **12**(7): bls. 377-385.
52. A. Bundy, og féll. 2009. *Seals, cod and forage fish: a comparative exploration of variations in the theme of stock collapse and ecosystem change in four Northwest Atlantic ecosystems*. Progress in Oceanography. **81**(1-4): bls. 188-206.
53. D.P. Swain, og féll. 2019. *Risk of extinction of a unique skate population due to predation by a recovering marine mammal*. Ecological Applications. **29**(6): bls. e01921.
54. A.W. Trites, og féll. 2007. *Bottom-up forcing and the decline of Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) in Alaska: assessing the ocean climate hypothesis*. Fisheries Oceanography. **16**(1): bls. 46-67.
55. H. Hátún, og féll. 2009. *Large bio-geographical shifts in the north-eastern Atlantic Ocean: From the subpolar gyre, via plankton, to blue whiting and pilot whales*. Progress in Oceanography. **80**(3-4): bls. 149-162.
56. G. Lassalle, og féll. 2012. *An ecosystem approach for the assessment of fisheries impacts on marine top predators: the Bay of Biscay case study*. ICES Journal of Marine Science. **69**(6): bls. 925-938.
57. S. Apollonio. 2002. *Hierarchical perspectives on marine complexities: searching for systems in the Gulf of Maine*. Columbia University Press.
58. T. Haug, U. Lindstrøm, og K.T. Nilssen. 2002. *Variations in minke whale (*Balaenoptera acutorostrata*) diet and body condition in response to ecosystem changes in the Barents Sea*. Sarsia: North Atlantic Marine Science. **87**(6): bls. 409-422.
59. J.C. George, og féll. 2015. *Bowhead whale body condition and links to summer sea ice and upwelling in the Beaufort Sea*. Progress in Oceanography. **136**: bls. 250-262.
60. H.K. Solvang, og féll. 2017. *Temporal and geographical variation in body condition of common minke whales (*Balaenoptera acutorostrata acutorostrata*) in the Northeast Atlantic*. Polar Biology. **40**: bls. 667-683.
61. E.E. Magnúsdóttir, og féll. 2014. *Humpback whale songs during winter in subarctic waters*. Polar Biol. **37**(3): bls. 427–433.

62. E.T. Vu, *og féll.* 2012. *Humpback whale song occurs extensively on feeding grounds in the western North Atlantic Ocean.* *Aquat Biol.* **14**: bls. 175–183.
63. T. Gunnlaugsson og G. Víkingsson. 2014. *Winter occurrence of whales in waters around Iceland.* IWC SC/65b/RMP06. Available online at: <https://iwc.int/index.php>.
64. A. Berzin og A. Rovnin. 1966. *Distribution and Migration of Whales in the Northeastern Part of the Pacific Ocean, Bering and Chukchi Seas [Raspredelenie i migratsii kitov v severovostochnoi chasti Tikhogo okeana, v Beringovom i Chukotskom moryakh]* Pages 103-136 in *KI Panin, editor.* Soviet Research on Marine Mammals of the Far East. USDOL, Bureau of Commercial Fisheries, Washington, DC.
65. J.M. Straley. 1990. *Fall and winter occurrence of humpback whales (Megaptera novaeangliae) in southeastern Alaska.* Rep Int Whaling Comm. (12): bls. 319–323.
66. A. Ingebrigtsen. 1929. *Whales caught in the North Atlantic and other seas.* Rapp P-v Réun Cons Int Explor Mer. **56**: bls. 1–26.
67. E.E. Magnúsdóttir, *og féll.* 2015. *Humpback whale (Megaptera novaeangliae) song unit and phrase repertoire progression on a subarctic feeding ground.* J Acoust Soc Am. **138**(5): bls. 3362–3374.
68. E.E. Magnúsdóttir, *og féll.* 2019. *Subarctic winter whales: An overwintering strategy of humpback whales in Icelandic waters.* í *World Marine Mammal Conference.* Barcelona.
69. M. Simon, *og féll.* 2010. *Singing behavior of fin whales in the Davis Strait with implications for mating, migration and foraging.* J Acoust Soc Am. **128**: bls. 3200–3210.
70. D. Thiele, *og féll.* 2004. *Seasonal variability in whale encounters in the Western Antarctic Peninsula.* Deep-Sea Res II. **51**: bls. 2311–2325.
71. A. Širović, *og féll.* 2004. *Seasonality of blue and fin whale calls and the influence of sea ice in the Western Antarctic Peninsula.* Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. **51**(17): bls. 2327-2344.
72. R. García-Vernet, *og féll.* 2021. *Ecological niche partitioning between baleen whales inhabiting Icelandic waters.* Progress in Oceanography. **199**: bls. 102690.
73. T.J. Lavery, *og féll.* 2014. *Whales sustain fisheries: Blue whales stimulate primary production in the Southern Ocean.* Marine Mammal Science. **30**(3): bls. 888-904.
74. S. Nicol, *og féll.* 2010. *Southern Ocean iron fertilization by baleen whales and Antarctic krill.* Fish and fisheries. **11**(2): bls. 203-209.
75. M.S. Savoca, *og féll.* 2021. *Baleen whale prey consumption based on high-resolution foraging measurements.* Nature. **599**(7883): bls. 85-90.
76. L. Ratnarajah, *og féll.* 2014. *The biogeochemical role of baleen whales and krill in Southern Ocean nutrient cycling.* PloS one. **9**(12): bls. e114067.
77. L. Ratnarajah, *og féll.* 2016. *A preliminary model of iron fertilisation by baleen whales and Antarctic krill in the Southern Ocean: sensitivity of primary productivity estimates to parameter uncertainty.* Ecological Modelling. **320**: bls. 203-212.
78. J. Roman og S.R. Palumbi. 2003. *Whales before whaling in the North Atlantic.* science. **301**(5632): bls. 508-510.
79. J.A. Jackson, *og féll.* 2014. *Global diversity and oceanic divergence of humpback whales (Megaptera novaeangliae).* Proc. R. Soc. B. **281**(1786): bls. 2013–3222.
80. C. van Weelden, J.R. Towers, og T. Bosker. 2021. *Impacts of climate change on cetacean distribution, habitat and migration.* Climate Change Ecology. **1**: bls. 100009.
81. S.E. Moore og P.J. Stabeno, *Synthesis of Arctic Research (SOAR) in marine ecosystems of the Pacific Arctic.* Elsevier. bls. 1-11.
82. S.E. Moore, *og féll.* 2018. *The Arctic Marine Pulses Model: linking annual oceanographic processes to contiguous ecological domains in the Pacific Arctic.* Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. **152**: bls. 8-21.
83. S.E. Moore, *og féll.* 2019. *Baleen whale ecology in arctic and subarctic seas in an era of rapid habitat alteration.*
84. P. Wassmann. 2015. *Overarching perspectives of contemporary and future ecosystems in the Arctic Ocean.* Progress in Oceanography. **139**: bls. 1-12.

85. H. Björnsson, og féll. 2018. *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi—Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018*. Veðurstofa Íslands.
86. Ó.K. Pálsson, og féll. 2012. *Ecosystem structure in the Iceland Sea and recent changes to the capelin (*Mallotus villosus*) population*. ICES Journal of Marine Science. **69**(7): bls. 1242-1254.
87. M.R. Heath, og féll. 2012. *Review of climate change impacts on marine fish and shellfish around the UK and Ireland*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. **22**(3): bls. 337-367.
88. A.B. Hollowed, og féll. 2011. *Effects of climate change on fish and fisheries: forecasting impacts, assessing ecosystem responses, and evaluating management strategies*. ICES Journal of Marine Science. **68**(6): bls. 984-985.
89. O.S. Astthorsson, og féll. 2012. *Climate-related variations in the occurrence and distribution of mackerel (*Scomber scombrus*) in Icelandic waters*. ICES Journal of Marine Science. **69**(7): bls. 1289-1297.
90. G.A. Víkingsson, og féll. 2014. *Recent changes in the diet composition of common minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) in Icelandic waters. A consequence of climate change?* Marine Biology Research. **10**(2): bls. 138-152.
91. K. Lilliendahl, og féll. 2013. *Viðkomubrestur lunda og sandsílis við Vestmannaeyjar (Recruitment failure of puffin and sand eel in Vestmannaeyjar)*. Náttúrufræðingurinn. **83**: bls. 65-79.
92. F. Vigfúsdóttir, *Sjófuglar, í Staða umhverfis og vistkerfa í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga.*, G.J. Óskarsson, Ritstjóri. Haf- og vatnarannsóknir.
93. T. Silva, og féll. 2014. *Long-term changes of euphausiids in shelf and oceanic habitats southwest, south and southeast of Iceland*. Journal of plankton research. **36**(5): bls. 1262-1278.
94. Þorkell Lindberg Þórarinsson, Böðvar Þórisson, og E.S. Hansen, *Farhættir og vetrarstöðvar íslenskra svartfugla, í Veiðidagbók Umhverfisstofnunar* bls. 40-43.
95. L. Nøttestad, og féll. 2014. *Observations of shifts in cetacean distribution in the Norwegian Sea*. Front Ecol Evol. **2**(83).
96. L. Nøttestad, og féll. 2015. *Recent changes in distribution and relative abundance of cetaceans in the Norwegian Sea and their relationship with potential prey*. Front Ecol Evol. **2**(83): bls. 11.
97. R. Williams, og féll. 2013. *Evidence for density-dependent changes in body condition and pregnancy rate of North Atlantic fin whales over four decades of varying environmental conditions*. ICES Journal of Marine Science. **70**(6): bls. 1273-1280.
98. H.C. Pearson, og féll. 2022. *Whales in the carbon cycle: can recovery remove carbon dioxide?* Trends in Ecology & Evolution.
99. A.H. Martin, og féll. 2021. *Integral functions of marine vertebrates in the ocean carbon cycle and climate change mitigation*. One Earth. **4**(5): bls. 680-693.
100. N. Hammerschlag, og féll. 2018. *Predator declines and morphological changes in prey: evidence from coral reefs depleted of sharks*. Marine Ecology Progress Series. **586**: bls. 127-139.
101. K.J. Krieger og B.L. Wing. 2002. *Megafauna associations with deepwater corals (*Primnoa* spp.) in the Gulf of Alaska*. Hydrobiologia. **471**(1-3): bls. 83-90.
102. J.L. Ruppert, og féll. 2013. *Caught in the middle: combined impacts of shark removal and coral loss on the fish communities of coral reefs*. PloS one. **8**(9): bls. e74648.
103. S.C. Barley, M.G. Meekan, og J.J. Meeuwig. 2017. *Diet and condition of mesopredators on coral reefs in relation to shark abundance*. PloS one. **12**(4): bls. e0165113.
104. S.C. Barley, M.G. Meekan, og J.J. Meeuwig. 2017. *Species diversity, abundance, biomass, size and trophic structure of fish on coral reefs in relation to shark abundance*. Marine Ecology Progress Series. **565**: bls. 163-179.
105. D.E. Schindler, og féll. 2003. *Pacific salmon and the ecology of coastal ecosystems*. Frontiers in Ecology and the Environment. **1**(1): bls. 31-37.

106. C.E. Doughty, *og fél.* 2016. *Global nutrient transport in a world of giants*. Proceedings of the National Academy of Sciences. **113**(4): bls. 868-873.
107. I. Fujisaki, *og fél.* 2012. *Use of alligator hole abundance and occupancy rate as indicators for restoration of a human-altered wetland*. Ecological indicators. **23**: bls. 627-633.
108. J. Willis. 2014. *Whales maintained a high abundance of krill; both are ecosystem engineers in the Southern Ocean*. Marine Ecology Progress Series. **513**: bls. 51-69.
109. S.E. Moore. 2016. *Is it 'boom times' for baleen whales in the Pacific Arctic region?* Biology Letters. **12**(9): bls. 20160251.
110. T.B. Atwood, *og fél.* 2015. *Predators help protect carbon stocks in blue carbon ecosystems*. Nature Climate Change. **5**(12): bls. 1038-1045.
111. M.R. Heithaus, *og fél.* 2008. *Predicting ecological consequences of marine top predator declines*. Trends in ecology & evolution. **23**(4): bls. 202-210.
112. C.G. Jones, J.H. Lawton, og M. Shachak. 1994. *Organisms as ecosystem engineers*. Oikos. bls. 373-386.
113. C. Fallows, A.J. Gallagher, og N. Hammerschlag. 2013. *White sharks (Carcharodon carcharias) scavenging on whales and its potential role in further shaping the ecology of an apex predator*. PloS one. **8**(4): bls. e60797.
114. N.D. Higgs, A.R. Gates, og D.O. Jones. 2014. *Fish food in the deep sea: revisiting the role of large food-falls*. PloS one. **9**(5): bls. e96016.
115. B.A. Bennett, *og fél.* 1994. *Faunal community structure of a chemoautotrophic assemblage on whale bones in the deep northeast Pacific Ocean*. Marine Ecology Progress Series. bls. 205-223.
116. M. Gladyshev, M. Arts, og N.i. Sushchik. 2009. *Preliminary estimates of the export of omega-3 highly unsaturated fatty acids (EPA+ DHA) from aquatic to terrestrial ecosystems*. Lipids in aquatic ecosystems. bls. 179-210.
117. J.J. Williams, *og fél.* 2018. *Mobile marine predators: an understudied source of nutrients to coral reefs in an unfished atoll*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. **285**(1875): bls. 20172456.
118. D.C. Müller-Navarra, *og fél.* 2000. *A highly unsaturated fatty acid predicts carbon transfer between primary producers and consumers*. Nature. **403**(6765): bls. 74-77.
119. S.M. Colombo, *og fél.* 2017. *A fundamental dichotomy in long-chain polyunsaturated fatty acid abundance between and within marine and terrestrial ecosystems*. Environmental Reviews. **25**(2): bls. 163-174.
120. D. Pauly, *og fél.* 1998. *Fishing down marine food webs*. Science. **279**(5352): bls. 860-863.
121. S. Jennings, S.P. Greenstreet, og J.D. Reynolds. 1999. *Structural change in an exploited fish community: a consequence of differential fishing effects on species with contrasting life histories*. Journal of animal ecology. **68**(3): bls. 617-627.
122. G.Á. Ólafsdóttir, *og fél.* 2014. *Historical DNA reveals the demographic history of Atlantic cod (Gadus morhua) in medieval and early modern Iceland*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. **281**(1777): bls. 20132976.
123. T.A. Branch, *og fél.* 2007. *Past and present distribution, densities and movements of blue whales Balaenoptera musculus in the Southern Hemisphere and northern Indian Ocean*. Mammal Review. **37**(2): bls. 116-175.
124. S.L. Chown og K.J. Gaston. 2008. *Macrophysiology for a changing world*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. **275**(1642): bls. 1469-1478.
125. B.J. Enquist, *og fél.* 2020. *The megabiota are disproportionately important for biosphere functioning*. Nature Communications. **11**(1): bls. 699.
126. D.J. McCauley, *og fél.* 2012. *Assessing the effects of large mobile predators on ecosystem connectivity*. Ecol. Appl. . **22**: bls. 1711-17.
127. G. Stone, L. Florez-Conzalaenzd, og S.K. Katona. 1990. *Whale migration record*. Nature. **346**: bls. 705.

128. P.J. Clapham. 2000. *The humpback whale: seasonal feeding and breeding in the baleen whale* í *Cetacean Societies: Field studies of dolphins and whales* J. Mann, R.C. Connor, P.L. Tyack, og H. Whitehead, Editors. The University of Chicago Press: Chicago. bls. 433.
129. H. Dingle. 2014. *Migration: the biology of life on the move*. Oxford University Press, USA.
130. P.T. Stevick, N. Øien, og D.K. Mattila. 1998. *Migration of humpback whale (Megaptera novaeangliae) between Norway and the West Indies*. *Mar Mamm Sci.* **14**: bls. 162–166.
131. P.T. Stevick, N. Øien, og D.K. Mattila. 1999. *Migratory destinations of humpback whales from Norwegian and adjacent waters: evidence for stock identity*. *J Cetacean Res Manage.* **1**: bls. 147–152.
132. P.T. Stevick, og féll. 2003. *Segregation of migration by feeding ground origin in North Atlantic humpback whales (Megaptera novaeangliae)*. *J Zool Lond.* **259**: bls. 231–237.
133. B. Jann, og féll. 2003. *Migration of a humpback whale (Megaptera novaeangliae) between the Cape Verde Islands and Iceland*. *J. Cetacean Res. Manage.* **5**(2): bls. 125–130.
134. P. Stevick, og féll. 2006. *Population spatial structuring on the feeding grounds in North Atlantic humpback whales (Megaptera novaeangliae)*. *J Zool.* **270**(2): bls. 244–255.
135. S.B. Reilly, Bannister, J.L., Best, P.B., Brown, M., Brownell Jr., R.L., Butterworth, D.S., Clapham, P.J., Cooke, J., Donovan, G.P., Urbán, J. & Zerbini, A.N. 2008. *Megaptera novaeangliae* The IUCN Red List of Threatened Species 2008 2008-06-30 [sótt 9. April 2016]. Aðgengilegt frá: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T13006A3405371.en>.
136. J.G. Cooke. 2018. *Balaenoptera musculus (errata version published in 2019)*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018 [sótt 16.06 2023].
137. J.G. Cooke. 2018. *Balaenoptera physalus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018 2018 [sótt 16.06 2023].
138. H.B. Moors. 2012. *Acoustic monitoring of Scotian Shelf northern bottlenose whales (Hyperoodon ampullatus)*.
139. K.J. Lefort, og féll. 2022. *Satellite-tracked sperm whale migrates from the Canadian Arctic to the subtropical western North Atlantic*. *Marine Mammal Science.* **38**(3): bls. 1242-1248.
140. R. Ferreira, og féll. 2017. *First confirmed record of northern bottlenose whale (Hyperoodon ampullatus) in Madeira archipelago, northeast Atlantic*. *Aquatic Mammals.* **43**(5): bls. 474-479.
141. R. Dietz, og féll. 2020. *Migratory and diurnal activity of North Atlantic killer whales (Orcinus orca) off northern Norway*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology.* **533**: bls. 151456.
142. E. Jourdain, og féll. 2019. *North Atlantic killer whale Orcinus orca populations: a review of current knowledge and threats to conservation*. *Mammal Review.* **49**(4): bls. 384-400.
143. F.W. Wenzel, og féll. 2009. *Current knowledge on the distribution and relative abundance of humpback whales (Megaptera novaeangliae) off the Cape Verde Islands, Eastern North Atlantic*. *Aqu. Mamm.* **35**(4): bls. 502–510.
144. R. Ferreira, og féll. 2021. *Bryde's whales in the North-East Atlantic: New insights on site fidelity and connectivity between oceanic archipelagos*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems.* **31**(10): bls. 2938-2950.
145. G.A. Víkingsson og P. Gunnlaugsson, *Stock structure of fin whales (Balaenoptera physalus) in the North Atlantic-indications from non-genetic data, í IWC/SC/57/PFI3*. Available from International Whaling Commission (2005). bls. 11.
146. G.B. Bartha, og féll. 2011. *Population Size and Site Fidelity of North Atlantic Minke Whales (Balaenoptera acutorostrata acutorostrata) off the Atlantic Coast of Nova Scotia, Canada*. *Aquatic Mammals.* **37**(4).
147. P.J. Corkeron og R.C. Connor. 1999. *Why do baleen whales migrate?* *Mar Mamm Sci.* **15**(4): bls. 1228–1245.
148. T.D. Smith, og féll. 2012. *Spatial and seasonal distribution of American whaling and whales in the age of sail*. *PLoS One.* **7**(4): bls. e34905.
149. W. Bowen. 1997. *Role of marine mammals in aquatic ecosystems*. *Marine Ecology Progress Series.* **158**: bls. 267-274.

150. C.R. Smith. 2006. *Bigger is better: the role of whales as detritus in marine ecosystems*. Whales, whaling and ocean ecosystems. bls. 286-301.
151. S.E. Moore og R.R. Reeves. 2018. *Tracking arctic marine mammal resilience in an era of rapid ecosystem alteration*. PLoS biology. **16**(10): bls. e2006708.
152. C. Lockyer. 1984. *Review of baleen whale (Mysticeti) reproduction and implications for management*. Rep Int Whaling Comm. (6): bls. 27–50.
153. C. Ramp, og féll. 2015. *Adapting to a warmer ocean—seasonal shift of baleen whale movements over three decades*. PLoS One. **10**(3): bls. e0121374.
154. N.-N.A.M.M. Commission, *Report of the Abundance Estimates Working Group, October 2019, Tromsø, Norway*. North Atlantic Marine Mammal Commission: Tromsø, Norway.
155. C. Lockyer og D. Pike, *North Atlantic Sightings Surveys 1987–2001. Counting Whales in the North Atlantic*. Tromsø: NAMMCO Sci. Publ.
156. J. Sigurjónsson. 1992. *Recent studies on abundance and trends in whale stocks in Icelandic and adjacent waters*. Royal Academy of Overseas Sciences.
157. J. Sigurjónsson og T. Gunnlaugsson. 1990. *Recent trends in abundance of blue (Balaenoptera musculus) and humpback whales (Megaptera novaeangliae) off west and southwest Iceland, with a note on occurrence of other cetacean species*. Rep Int Whaling Comm. **40**: bls. 537–551.
158. D.G. Pike, og féll. 2009. *A note on the distribution and abundance of blue whales (Balaenoptera musculus) in the Central and Northeast North Atlantic*. NAMMCO Scientific Publications. **7**: bls. 19-29.
159. D.G. Pike, og féll. 2020. *Estimates of the abundance of cetaceans in the Central North Atlantic from the T-NASS Icelandic and Faroese ship surveys conducted in 2007*. NAMMCO Scientific Publications. **11**.
160. R. Spilliaert, og féll. 1991. *Species hybridization between a female blue whale (Balaenoptera musculus) and a male fin whale (B. physalus): molecular and morphological documentation*. Journal of Heredity. **82**(4): bls. 269-274.
161. M.V. Westbury, B. Petersen, og E.D. Lorenzen. 2019. *Genomic analyses reveal an absence of contemporary introgressive admixture between fin whales and blue whales, despite known hybrids*. PloS one. **14**(9): bls. e0222004.
162. C. Pampoulie, og féll. 2021. *Evidence of unidirectional hybridization and second-generation adult hybrid between the two largest animals on Earth, the fin and blue whales*. Evolutionary Applications. **14**(2): bls. 314-321.
163. J.N. Tønnessen og A.O. Johnsen. 1959. *Den moderne hvalfangsts historie: bd. Finnmarksfangstens historie, 1864-1905, av A.O. Johnsen*. Norges hvalfangstforbund.
164. I.W. Commission. 2017. *Report of the Sub-Committee on the Revised Management Procedure*. Journal of Cetacean Research and Management. **18**: bls. 123-173.
165. IWC. 2018. *Catch Limits and Catches taken*. 2018. Aðgengilegt frá: https://iwc.int/table_objection.
166. D.G. Pike, og féll. 2019. *Estimates of the abundance of cetaceans in the Central North Atlantic based on the Nass Icelandic and Faroese shipboard surveys conducted in 2015*. NAMMCO Scientific Publications. **11**: bls. 22.
167. J. Calambokidis, og féll. 2017. *Update on abundance, trends, and migrations of humpback whales along the US West Coast*. IWC Report SC A. **17**: bls. 18-21.
168. IWC. 2016. *Report of the Subcommittee on other Southern Hemisphere whale stocks*. Journal of Cetacean Research and Management. **17**(Suppl.): bls. 250-282.
169. E.E. Magnúsdóttir, *Year-round distribution and abundance of white-beaked dolphins (Lagenorhynchus albirostris) off the southwest coast of Iceland.*, í *Department of Life and Environmental Sciences*. University of Iceland: Reykjavík. bls. 88.
170. E.E. Magnúsdóttir og R. Lim, *Why sing in the sub-arctic? Humpback whale (Megaptera novaeangliae) song structure and progression from an Icelandic feeding ground during winter*, í (Unpublished manuscript). University of Iceland: Reykjavík.

171. J. Sigurðardóttir, *Investigating the feeding effort of humpback whales in sub-arctic Iceland by integrating fine-scale sensor data and land-based observations*, í *Faculty of Life and Environmental Sciences*. University of Iceland: Reykjavík. bls. 55.
172. J. Sigurjónsson og T. Gunnlaugsson, *Distribution and abundance of cetaceans in icelandic and adjacent waters from sightings surveys conducted in June-July 1987*, í *ICES C.M.* International Council for the Exploration of the Sea: Reykjavík, Iceland.
173. K. Cattanch, og féll. 1993. *Sei whale abundance in the North Atlantic, estimated from NASS-87 and NASS-89 data*. Report of the International Whaling Commission. **43**: bls. 315-321.
174. D.G. Pike, og féll., *Estimates of the abundance of humpback whales (Megaptera novaengliae) from the TNASS Icelandic and Faroese ship surveys conducted in 2007*, í *IWC Scientific Committee*: Agadir, Morocco. bls. 15.
175. D.G. Pike, og féll. 2011. *Correcting perception bias for Icelandic aerial surveys, 2007 and 2009*. NAMMCO SC18AESPO8.
176. G.A. Víkingsson, og féll. 2009. *Distribution and abundance of fin whales (Balaenoptera physalus) in the Northeast and Central Atlantic as inferred from the North Atlantic Sightings Surveys 1987–2001*. NAMMCO Sci Publ. **7**: bls. 49–72.
177. J.G. Cooke. 2018. *Balaenoptera acutorostrata*. . The IUCN Red List of Threatened Species 2018 2018 [sótt 27.05 2023].
178. IWC, *Report of the Sub-Committee on the Revised Management Procedure*, í *Journal of Cetacean Research and Management* **19**. International Whaling Commission. bls. 115-153.
179. Hafrannsóknastofnun. e.d. *Saga hrefnuveiða*. e.d [sótt 28.05 2023]. Aðgengilegt frá: <https://hvalir.hafro.is/hrefna/frettir/veidisaga.htm>.
180. IWC. 2023. *Catch Limits and Catches taken*. 2023. Aðgengilegt frá: https://iwc.int/table_objection.
181. J. Roman, og féll. 2016. *Endangered right whales enhance primary productivity in the Bay of Fundy*. PLoS One. **11**(6): bls. e0156553.
182. P. Priou, og féll. 2021. *Dense mesopelagic sound scattering layer and vertical segregation of pelagic organisms at the Arctic-Atlantic gateway during the midnight sun*. Progress in Oceanography. **196**: bls. 102611.
183. C. Anderson, A. Brierley, og F. Armstrong. 2005. *Spatio-temporal variability in the distribution of epi-and meso-pelagic acoustic backscatter in the Irminger Sea, North Atlantic, with implications for predation on Calanus finmarchicus*. Marine Biology. **146**: bls. 1177-1188.
184. V. Smetacek, og féll. 2012. *Deep carbon export from a Southern Ocean iron-fertilized diatom bloom*. Nature. **487**(7407): bls. 313-319.
185. J. Barlow, M. Kahru, og B. Mitchell. 2008. *Cetacean biomass, prey consumption, and primary production requirements in the California Current ecosystem*. Marine Ecology Progress Series. **371**: bls. 285-295.
186. Hafrannsóknastofnun, *Vistkerfi sjávar og áhrifaþættir*, í *Ástand nytjastofna sjávar og ráðgjöf*. Hafrannsóknastofnun: Reykjavík. bls. 12.
187. U. Stefánsson og J. Ólafsson. 1991. *Nutrients and fertility of Icelandic waters*. Marine Research Institute.
188. S.R. Gíslason. 2008. *Weathering in Iceland*. Jökull. **58**: bls. 387-408.
189. A. Durfort, og féll. 2022. *Recovery of carbon benefits by overharvested baleen whale populations is threatened by climate change*. Proceedings of the Royal Society B. **289**(1986): bls. 20220375.
190. T.M. Fenchel og B.B. Jørgensen. 1977. *Detritus food chains of aquatic ecosystems: the role of bacteria*. Advances in microbial ecology. bls. 1-58.
191. L. Ratnarajah, og féll. 2015. *Correction: the biogeochemical role of baleen whales and krill in southern ocean nutrient cycling*. PloS one. **10**(4): bls. e0125134.
192. ICES, *Icelandic Waters ecoregion – Ecosystem overview*, í *Report of the ICES Advisory Committee*, . bls. 15.

193. A.M. Springer, *og féll.* 2003. *Sequential megafaunal collapse in the North Pacific Ocean: An ongoing legacy of industrial whaling?* Proceedings of the National Academy of Sciences. **100**(21): bls. 12223-12228.
194. J.-O. Meynecke, *og féll.* 2023. *Do whales really increase the oceanic removal of atmospheric carbon?* Frontiers in Marine Science. **10**.
195. IUCN. 2008. *Humpback whale on road to recovery, reveals IUCN Red List.* 2008 [sótt 15.05 2023]. Aðgengilegt frá: <https://www.iucn.org/content/humpback-whale-road-recovery-reveals-iucn-red-list>.
196. C. Metcalfe. 2012. *Persistent Organic Pollutants in the Marine Food Chain.* Our world - Brought to you by United Nations University 2012 [sótt 16.06 2023]. Aðgengilegt frá: <https://ourworld.unu.edu/en/persistent-organic-pollutants-in-the-marine-food-chain>.
197. M. Khairy, *og féll.* 2021. *Bioaccumulation of PCBs, OCPs and PBDEs in marine mammals from West Antarctica.* Frontiers in Marine Science. bls. 1738.
198. V. Pirotta, *og féll.* 2019. *Consequences of global shipping traffic for marine giants.* Frontiers in Ecology and the Environment. **17**(1): bls. 39-47.
199. J.M. van der Hoop, *og féll.* 2015. *Vessel strikes to large whales before and after the 2008 ship strike rule.* Conservation Letters. **8**(1): bls. 24-32.
200. C.D. MacLeod. 2009. *Global climate change, range changes and potential implications for the conservation of marine cetaceans: a review and synthesis.* Endangered Species Research. **7**(2): bls. 125-136.
201. S.E. Parks, *og féll.* 2011. *Individual right whales call louder in increased environmental noise.* Biology letters. **7**(1): bls. 33-35.
202. M. Castellote, C.W. Clark, og M.O. Lammers. 2012. *Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise.* Biological Conservation. **147**(1): bls. 115-122.
203. K. Stafford. 2021. *The changing Arctic marine soundscape.*
204. S.E. Moore, *og féll.* 2006. *Listening for large whales in the offshore waters of Alaska.* BioScience. **56**: bls. 49–55.
205. K.M. Stafford, *og féll.* 2008. *Bowhead whale springtime song off West Greenland.* J Acoust Soc Am. **124**(5): bls. 3315–3323.
206. H.D. Johnson, *og féll.* 2015. *Song sharing and diversity in the Bering-Chukchi-Beaufort population of bowhead whales (*Balaena mysticetus*), spring 2011.* Mar Mamm Sci. **31**(3): bls. 902–922.
207. K. Eliasson, *og féll.* 2017. *Identification of development areas in a warming Arctic with respect to natural resources, transportation, protected areas, and geography.* Futures. **85**: bls. 14-29.
208. C.J. Basran, *og féll.* 2019. *First estimates of entanglement rate of humpback whales *Megaptera novaeangliae* observed in coastal Icelandic waters.* Endangered species research. **38**: bls. 67-77.
209. G. Víkingsson. 2011. *Iceland. Progress report on cetacean research, May 2010 to April 2011, with statistical data for the calendar year 2010.* IWC Document SC/63/Prog. Rep. Marine Research Institute, Reykjavik.
210. G.A. Víkingsson og D. Ólafsdóttir. 2003. *ICELAND. PROGRESS REPORT ON CETACEAN RESEARCH, APRIL 2002 TO MARCH 2003 WITH STATISTICAL DATA FOR THE CALENDAR YEAR 2002.* Atlantic. **3**(1): bls. 9.
211. Hafrannsóknastofnun, *Meðafli fugla og sjávarspendýra í grásleppuveiðum 2014- 2018, í Tækniskýrsla.*
212. J.K. Jacobsen, L. Massey, og F. Gulland. 2010. *Fatal ingestion of floating net debris by two sperm whales (*Physeter macrocephalus*).* Marine Pollution Bulletin. **60**(5): bls. 765-767.
213. A.L. Lusher, *og féll.* 2015. *Microplastic and macroplastic ingestion by a deep diving, oceanic cetacean: the True's beaked whale *Mesoplodon mirus*.* Environmental pollution. **199**: bls. 185-191.
214. K.N. Savage, *og féll.* 2021. *Stejneger's beaked whale strandings in Alaska, 1995–2020.* Marine Mammal Science. **37**(3): bls. 843-869.

215. R.W. Baird og S.K. Hooker. 2000. *Ingestion of plastic and unusual prey by a juvenile harbour porpoise*. Can. J. Fish. Aquat. Sci. **51**(20): bls. 0.
216. J. Im, og féll. 2020. *First record of plastic debris ingestion by a fin whale (Balaenoptera physalus) in the sea off East Asia*. Marine Pollution Bulletin. **159**: bls. 111514.
217. J.-P.W. Desforbes, M. Galbraith, og P.S. Ross. 2015. *Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean*. Archives of environmental contamination and toxicology. **69**: bls. 320-330.
218. P. Farrell og K. Nelson. 2013. *Trophic level transfer of microplastic: Mytilus edulis (L.) to Carcinus maenas (L.)*. Environmental pollution. **177**: bls. 1-3.
219. O. Setälä, V. Fleming-Lehtinen, og M. Lehtiniemi. 2014. *Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web*. Environmental pollution. **185**: bls. 77-83.
220. E. Besseling, og féll. 2015. *Microplastic in a macro filter feeder: humpback whale Megaptera novaeangliae*. Marine pollution bulletin. **95**(1): bls. 248-252.
221. M.C. Fossi, og féll. 2016. *Fin whales and microplastics: The Mediterranean Sea and the Sea of Cortez scenarios*. Environmental Pollution. **209**: bls. 68-78.
222. L. Zantis, og féll. 2022. *Assessing microplastic exposure of large marine filter-feeders*. Science of The Total Environment. **818**: bls. 151815.
223. C.E. Sanderson og K.A. Alexander. 2020. *Unchartered waters: Climate change likely to intensify infectious disease outbreaks causing mass mortality events in marine mammals*. Global Change Biology. **26**(8): bls. 4284-4301.
224. E. Butler, S. Knox, og M. Liddicoat. 1979. *The relationship between inorganic and organic nutrients in sea water*. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. **59**(1): bls. 239-250.
225. V. Macovei, og féll. 2019. *Temporal variability in the nutrient biogeochemistry of the surface North Atlantic: 15 years of ship of opportunity data*. Global Biogeochemical Cycles. **33**(12): bls. 1674-1692.
226. K. Gundersen, og féll. 2023. *Thirty years of nutrients and biogeochemistry in the Norwegian, Greenland and Iceland Seas, 1990–2019*. Scientific Data. **10**(1): bls. 256.
227. P.G. Falkowski. 2001. *Biogeochemical Cycles í Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)*,, S.A. Levin, Editor Academic Press. bls. 552-564.
228. D.M. Sigman og M.P. Hain. 2012. *The Biological Productivity of the Ocean*. Earth Systems 2012 [sótt 16.06 2023].
229. M.J. Lutz, og féll. 2007. *Seasonal rhythms of net primary production and particulate organic carbon flux to depth describe the efficiency of biological pump in the global ocean*. Journal of Geophysical Research: Oceans. **112**(C10).
230. C.L. De La Rocha og U. Passow. 2014. *The Biological Pump í Treatise on Geochemistry*, K.K.T. Heinrich D. Holland, Editor Elsevier. bls. 93-122.
231. L. Polimene, og féll. 2017. *Biological or microbial carbon pump? The role of phytoplankton stoichiometry in ocean carbon sequestration*. Journal of Plankton Research. **39**(2): bls. 180-186.
232. NOAA. E.d. *What is upwelling?* Ocean facts E.d [sótt 15.05 2023]. Aðgengilegt frá: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/upwelling.html>.
233. T. Tanhua, N.R. Bates, og A. Körtzinger. 2013. *The marine carbon cycle and ocean carbon inventories í Ocean Circulation and Climate - A 21st Century Perspective*, G. Siedler, S.M. Griffies, J. Gould, og J.A. Church, Editors. Academic Press: Amsterdam. bls. 1-868
234. USGCRP, *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*, N. Cavallaro, G. Shrestha, R. Birdsey, M. A. Mayes, R. G. Najjar, S. C. Reed, P. Romero-Lankao, og Z. Zhu, Ritstjórar. U.S. Global Change Research Program,: Washington, DC, USA. bls. 878.
235. U.S.C.C.S. Program. E.d. *What is the Carbon Cycle? What is the science behind it?* E.d [sótt 12.03 2023]. Aðgengilegt frá: <https://www.carboncyclescience.us/what-is-carbon-cycle>.
236. J.M. Guinotte og V.J. Fabry. 2008. *Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems*. Annals of the New York Academy of Sciences. **1134**(1): bls. 320-342.

237. H. Egilsdottir, og féll. 2013. *Effects of p CO₂ on physiology and skeletal mineralogy in a tidal pool coralline alga *Corallina elongata**. *Marine Biology*. **160**: bls. 2103-2112.
238. J. Olafsson, og féll. 2009. *Rate of Iceland Sea acidification from time series measurements*. *Biogeosciences*. **6**(11): bls. 2661-2668.
239. K. Wirtz, og féll. 2022. *Vertically migrating phytoplankton fuel high oceanic primary production*. *Nature Climate Change*. **12**(8): bls. 750-756.
240. T. DeVries og T. Weber. 2017. *The export and fate of organic matter in the ocean: New constraints from combining satellite and oceanographic tracer observations*. *Global Biogeochemical Cycles*. **31**(3): bls. 535-555.
241. L. Christina og U. Passow. 2007. *Factors influencing the sinking of POC and the efficiency of the biological carbon pump*. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. **54**(5-7): bls. 639-658.
242. L. Bopp, og féll. 2013. *Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models*. *Biogeosciences*. **10**(10): bls. 6225-6245.
243. A. Martínez-García, og féll. 2014. *Iron fertilization of the Subantarctic Ocean during the last ice age*. *Science*. **343**(6177): bls. 1347-1350.
244. D.G. Pike, og féll. 2009. *Estimates of the abundance of minke whales (*Balaenoptera acutorostrata*) from Faroese and Icelandic NASS shipboard surveys*. *NAMMCO Scientific Publications*. **7**: bls. 81-93.
245. D.L. Borchers, og féll. 2009. *Minke whale abundance estimation from the NASS 1987 and 2001 aerial cue-counting surveys taking appropriate account of distance estimation errors*. *NAMMCO Scientific Publications*. **7**: bls. 95-110.
246. C.G. Paxton, og féll. 2009. *Density surface fitting to estimate the abundance of humpback whales based on the NASS-95 and NASS-2001 aerial and shipboard surveys*. *NAMMCO Sci Publ*. **7**: bls. 143-160.
247. D. Pike, og féll. 2005. *Distribution, abundance and trends in abundance of fin and humpback whales in the North Atlantic*. *ICES CM 2005/ Session R/ Marine Mammals: Monitoring Techniques, Abundance Estimation, and Interactions with Fisheries* **R:12**: bls. 24.

Viðauki

Viðauki 1: Tilflutningur næringarefna í sjó

Virkar hringrásir ólífrænna efna eru undirstaða heilbrigðra vistkerfa, bæði á landi og í sjó. Sem dæmi um ólífræn efni¹³ eru steinefni sem eru lífsnauðsynleg lífverum, efni á borð við snefilefni járn (Fe), natrín (Na) og Kalín (K) og önnur magnmeiri frumefni eins og nitur (N), kolefni (C) og súrefni (O) sem eru helstu frumefni líkamans. Önnur ólífræn efni mikilvæg lífríkinu eru t.d. fosfóri (P) og brennisteini (S)^[224-226]. Öll eru þessi ólífrænu efni mikilvægar byggingareiningar lífrænna efnasambanda¹⁴ lífríkisins^[227]. Hringrásir frumefna eru að ýmsu leiti ólíkar en munurinn byggir hvað helst á með hvaða móti og í hvaða miðli efnin umbreytast og flytjast milli þrepa, þ.e.a.s. hinir líf-, eðlis- og efnafræðilegu ferlar sem eiga í hlut eru um margt ólíkir^[227].

Frumframleiðsla á lífmassa á sér að mestu leiti stað í efri lögum sjávar þar sem ljóstíllífandi lífverur umbreyta ólífrænum efnum í lífræn efnasambönd sem svo aðrar lífverur geta nýtt sér^[228]. Svo frumframleiðsla geti átt sér stað í efri lögum sjávar þurfa frumframleiðendurnir að hafa aðgengi að koltvísýringi úr andrúmslofti en einnig öðrum ólífrænum næringarefnum sem mest er af í djúpsjó. Slík næringarefni sem finnast í efri lögum sjávar eru skilgreind sem aðflutt¹⁵ næringarefni og berast oftast upp sem ólífræn næringarefni. Þau lífrænu næringarefni sem eru framleidd í ljóstíllífandi lífverum kallast aftur á móti staðmynduð næringarefni¹⁶. Þá nýta ljóstíllífandi lífverurnar aðfluttu ólífrænu næringarefni til nýmyndunar lífrænna efna. Nýmynduðu efnin eru svo ýmist endurnýtt í gegnum fæðuvefi innan blandlagsins eða flytjast á virkan eða óvirkan máta niður í dýpri lög sjávar. Stöðugur tilflutningur á næringarefnum milli djúpsjávar og uppsjávar er ákaflega mikilvægt fyrir heilbrigði vistkerfa. Þessi tilflutningur verður til þess að lífsnauðsynleg næringarefni eru endurnýtt og viðhaldast þannig innan fæðuvefja vistkerfa. Lóðréttur tilflutningur næringarefna í sjó verður bæði vegna eðlisfræðilegra og líffræðilegra ferla í hafi. Hinir eðlisfræðilegu eða ólífrænu ferlar eru til að mynda þyngdarkraftur jarðar sem verða þess valdandi að flestar lífverur og lífrænar leifar sökkva til botns, hitaskiptalög hægja aftur á móti á því ferli, en það gerist þegar efri lögín eru hlýrri og eðlisléttari en þau dýpri. Þar sem hringiðustraumar myndast verður einnig mikill tilflutningur á næringarefnum niður í dýpri lög sjávar. Aðrir eðlisfræðilegir þættir eins og blöndun sjávar ýta aftur á móti undir tilflutning næringarefna úr dýpri lögum og upp í efri lögín. Slík blöndunin verður t.d. þegar yfirborðsvatn kólnar og nær svipuðu hitastigi og neðri lögín og blandast þeim, við það færast næringaríkari kaldsjór úr djúpinu upp í efri lögín. En einnig verður blöndun vegna yfirborðsvinda sem hreyfa til yfirborðsvatnið sem þá leiðir til þess að vatnið sem liggur dýpra dregst upp að yfirborðinu og kemur í stað þess vatns sem færðist til. Það síðarnefnda kallast uppstreymi (e. upwelling) og eru slík áhrif oft mest við strandsvæði, neðansjárhryggi og -fjöll. Lóðréttur tilflutningur næringarefna

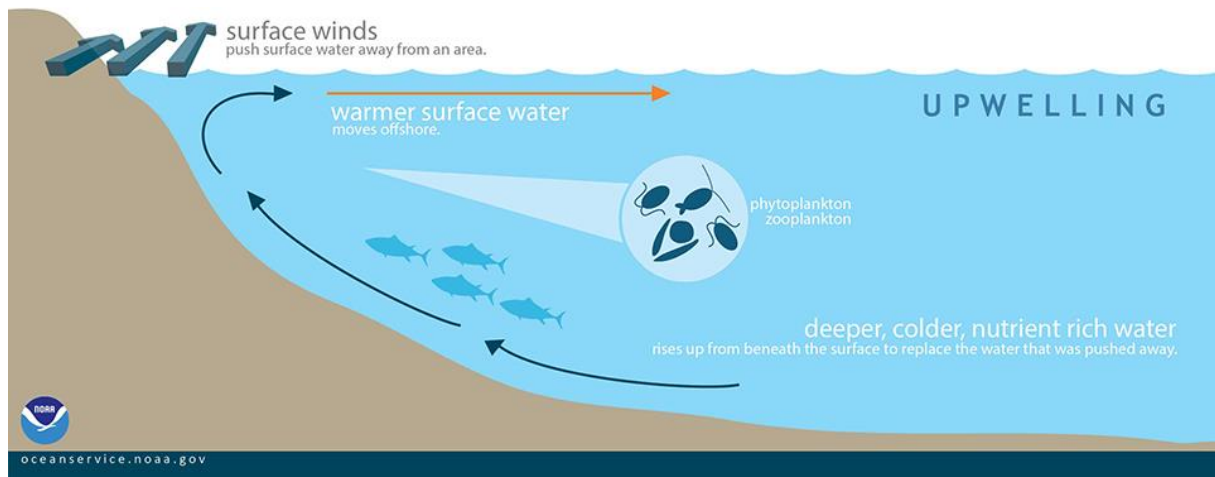
¹³ Ólífræn efni eru öll efnasambönd sem eru ekki lífræn. Þau eru mun einfaldari efni og finnast í hinni dauðu náttúru. Mörg þeirra finnast líka í lífverum og eru þeim nauðsynleg eða myndast við starfsemi þeirra, til dæmis súrefni og koltvíoxíð.

¹⁴ Lífræn efni eru efnasambönd kolefnis nema koltvíoxíð, koleinoxíð og nokkur sölt. Þau finnast í lífandi verum, úrgangi frá þeim og leifum þeirra. Þau eiga það öll sameiginlegt að vera gerð úr kolefnisfrumeindum sem mynda megingrind sameindanna ásamt vetni (H), súrefni (O), nitri (N) og gjarnan fosfóri (P) og brennisteini (S).

¹⁵ Allochthonous nutrients

¹⁶ Autochthonous nutrients

fyrir tilstuðlan lífvera er einnig mikilvægur í vistkerfum sjávar og hefur verið kallaður lífferill á íslensku eða biological pump á ensku og stýrist af ferðum dýra upp og niður vatnsbolinn (Mynd 20)^[229-231].



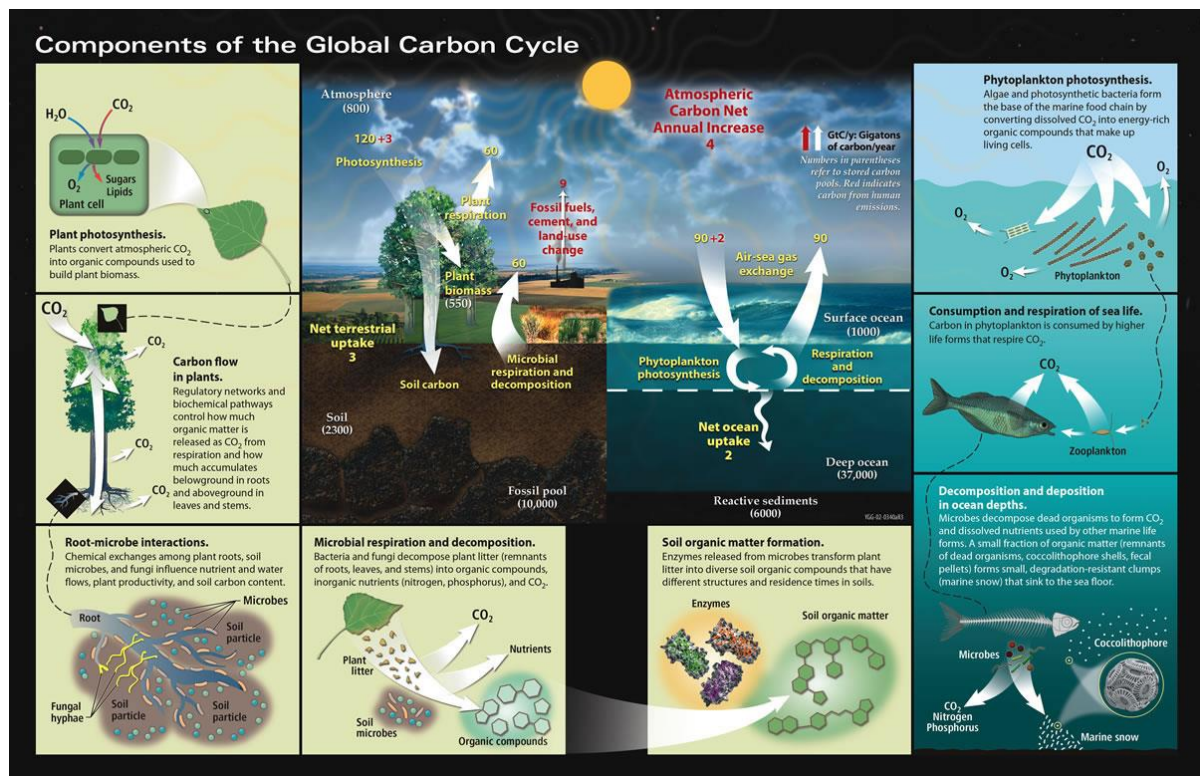
Mynd 20. Á myndinni má sjá hvernig yfirborðsvatnið færast til þegar kaldari og næringaríkur djúpsjór skriður upp eftir neðansjávarhlíð (t.d. við hryggi og landgrunnsbrún). Aðstæður fyrir slíkt uppstreymi (e. upwelling) eru oftast hvað bestar þegar vindar blása samsíða strandlínunum^[232]

Þegar vorar í tempruðu og kuldabeltum jarðar með hækkandi sól og mikilli aukningu í geislun sólar, taka ljóstillífandi lífverur sjávar sterklega við sér og nýta ljósorkuna til ljóstillífunar. Eftir veturinn er uppsöfnun næringarefna gjarnan töluverð í efri lögum sjávar sem gerir ljóstillífandi lífverum kleift að mynda lífræna næringu til eigin vaxtar og viðhalds og fjölga sér þá af krafti. Þessi umbreyting að vori kallast vorblómi og takmarkast fyrst og fremst af næringarframboði í efri lögum sjávar og ljósmagni á tímaeiningu. Haustblóminn verður svo gjarnan í lok sumars eftir að næringarefni hafa náð að safnast upp að nýju í efri lögum sjávar áður en sólin lækkar á lofti á ný. Þessi árstíðaskipta hringrás hafins er grunnstoð vistkerfis sjávar^[186]. Eðlisfræðilegur tilflutningur nægir ekki einn og sér til að viðhalda heilbrigðu flæði næringarefna í vistkerfum en líffræðilegur tilflutningur er afar stór þáttur í því ferli^[230]. Skilvirkni lífferla í hafinu er háð heilbrigðum vistkerfum sem einkennast af miklum lífbreytileika bæði innan og milli tegunda og þar af leiðandi virkri framleiðslu á lífmassa. Stórir toppafræningjar spila þar lykilhlutverk, bæði í beinum tilflutningi á miklu magni næringarefna per einstakling en jafnframt í temprun á öðrum tegundum fæðuvefsins beint eða óbeint í gegnum afrán sitt^[22].

Viðauki 2: Kolefnishringrásin

Hringrás kolefnis er í meginráttum tvíþætt þar sem ákveðið hringrásarkerfi á sér stað milli andrúmslofts og sjávar en annað hringrásarkerfi á milli lands og andrúmslofts. Þessi kerfi tengjast svo innbyrðis í gegnum andrúmsloftið fyrst og fremst en einnig vegna ferskvatnsafrennslis af landi til sjávar og þar sem fæðuvefir lands, sjávar og ferskvatns skarast^[233, 234].

Kolefni flæðir óhindrað milli hafs og andrúmslofts í báðar áttir í forminu CO₂ en upptaka sjávar og losun af kolefni er þó ekki jafndreifð um heimshöfin, en töluvert meira af koltvísýringi losnar í hlýsjó samanborið við kaldsjó þar sem leysni gass í vökva minnkar með vaxandi hitastigi. Á móti kemur að kolefnisbinding svifþörungna í sjó er töluvert meiri á kaldari hafsvæðum en þeim hlýrri, og stafar það af hinum mikla lífmassa svifs á þeim slóðum^[233].



Mynd 21 Upplýsingamyndrit sem sýnir helstu þætti kolefnishringrásarinnar og flutningsleiðir kolefnis milli lífvera og ólífræna þátt náttúrunnar. Myndin fyrir miðju sýnir hröðu kolefnishringrásina við yfirborð jarðar og sjávar og tilfærslu kolefnis milli hægu og hröðu hringrásarinnar. Gulu tölurnar tákna náttúrulegt flæði kolefnis og rauðu tölurnar sýna framlag mannsins af kolefni í gigatonnum á ári yfir í hröðu hringrásina. Hvítu tölurnar gefa til kynna magn kolefnis sem bundið er í hægu kolefnishringrásinni í kolefnisbirgðum jarðar. Myndritið er fengið frá^[235].

Þrátt fyrir þá skilvirkni hefur uppsöfnun koltvísýrings í andrúmslofti og þeir eiginleikar gass að leysni þess eykst með lækandi hitastigi leitt til mun meiri súrnunar sjávar á kaldari hafsvæðum en nær miðbaug^[236].

Um súrnun: Þegar koltvísýringur flæðir yfir í sjó leysist gastegundin upp og gengur í samband við vetni og súrefni og mynda þannig ýmist bikarbónatjónir (HCO₃⁻) eða karbónat jónir (CO₃²⁻). Karbónat jónirnar eru mikilvægar kalkmyndandi lífverum þar sem þær ganga í samband við kalkjónir (Ca²⁺) og mynda þannig mikilvæga byggingarsameind í skeljum og ytri stoðgrind margra sjávarhryggleysingja, sem kallast þá kalsíum karbónat (CaCO₃). Með mikilli aukningu á flæði CO₂ í sjó eykst hlutfall frjálsra vetnisjóna í hafi (H⁺) sem lækka sýrustig sjávar og gera það því óhentugt

ýmsum sjávarlífverum. Þetta aukna magn H^+ jóna dregur einnig úr mettnun kalsíum karbónats í sjó þar sem vetnisjónirnar ganga tíðar í samband við karbónatjónir og mynda úr þeim bíkARBÓNATJÓNIR, í því formi binst karbónatíð ekki við kalkjónir sem þarf til myndunar kalsíum karbónats. Það leiðir til undirmettunar kalsíum karbónats (oftast af gerðinni aragónít) sem verður til þess að kalkmyndandi lífverur hafa ekki nægilegt aðgengi að kalsíum karbónati til uppbyggingar ytri stoðgrinda sinna^[236]. Því ógnar súrnun sjávar mikilvægum lífverum í vistkerfi sjávar, þá sérstaklega á norðurslóðum líkt og við Ísland^[237, 238]

Hafsvæði jarðar eru mikilvæg kolefnisbindisvæði, það þýðir að þau taka við meira af kolefni (að mestu í formi CO_2) en þau losa aftur út^[98]. Koltvísýringur er tekinn upp í miklu magni af ljóstillíffandi lífverum í hafi, þá einna helst svifþörungum. Rannsóknir hafa áætlað að um 56 petagrömm af kolefni ($PgC\ yr^{-1}$) bindist í lífrænar sameindir í svifþörungum á ári hverju^[239]. Eftir bindingu kolefnis inn í fæðuvef sjávar fylgir það í framhaldinu öðrum hvorum þessara ferla; kolefnið losnar aftur út í umhverfið við öndun lífveru (þá ýmist sem CO_2 í andrúmslofti eða á uppleystu formi í sjó) eða viðhelst í lífrænum efnasamböndum í sjónum til lengri tíma, ýmist í föstu formi¹⁷ (t.d. í lífverum), sem uppleyst lífræn efnasambönd¹⁸ eða í langtíma kolefnisbirgðum á botni djúpsjávar^[231]. Það kolefni sem fyrirfinnst á föstu formi flyst að endingu niður á sjávarbotn og geymist þar að jafnaði til lengri tíma, sérstaklega ef það sekkur í djúpsjó (Mynd 4)^[12, 229].

Á árunum 2010-2019 tóku hafsvæði jarðar við um 22% þess kolefnis sem finna má í andrúmslofti en sá hluti þess kolefnis sem flyst niður í djúpsjó^[240] flyst í gegnum hið áðurnefnda lífferli (e. biological pump). Þegar flutningur kolefnis er sérstaklega skoðaður innan lífferlisins er gjarnan talað um lífkolefnisferlið (e. biological carbon pump)^[241].

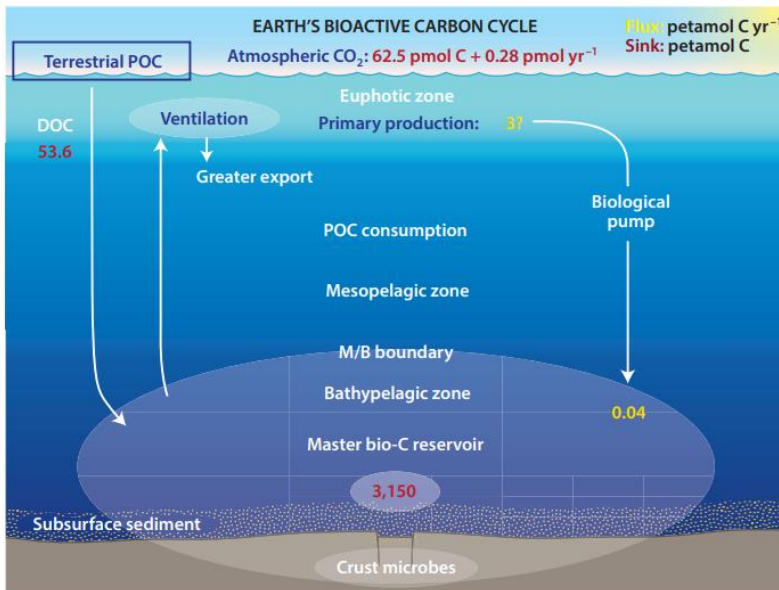
Í meginráttum felur hugtakið lífkolefnisferli í sér að kolefni er fyrst bundið í lífræn efnasambönd í gegnum ljóstillífunarferla í svifþörungum eða öðrum ljóstillíffandi lífverum í efri lögum sjávar (í blandsjó) á ljóstillífunardýpi (e. euphotic zone). Kolefnið er svo endurnýtt inni í fæðukeðjunni ef þörungurinn er étinn af annarri lífveru. Að lokum verður kolefnið, sem áður var hluti af lífrænum efnasamböndum svifþörunganna sem og lífvera ofar í fæðuvefnum, flutt út úr kolefnishringrásinni og til botns sjávar þegar lífverur deyja. Fyrir tilstuðlan lífferilsins eru kolefnin í þessum lífrænum efnasamböndum að lokum aftengd andrúmsloftinu og virku kolefnishringrásinni og bindast þess í stað áðurnefndum kolefnisgeymslubirgðum djúphafsins^[230]. Talið er að lífferlið í hafi sé ábyrgt fyrir flutningi á um 80% þess kolefnis sem fellur úr ljóstillífunardýpinu og niður til botns, eða $9.1 \pm 0.2\ Pg^{19}$ C/ári, það er um 9000 milljón tonn af kolefni á ári^[240].

Rannsóknir á virkni lífferilsins frá bæði okkar tíma og forsögulegum tíma hafa leitt í ljós að skilvirkni lífferilsins í bindingu kolefnis er háð umhverfisaðstæðum á borð við ljósmagn, hitastig, lagskiptingu í sjó og aðgengi að ólífrænum næringarefnum^[242, 243]. Breytingar á virkni lífferilsins vegna breyttra umhverfisaðstæðna eru taldar hafa verið drifkraftur loftslagsbreytinga á jarðsögulegum tímum og þannig stuðlað að reglulegum sveiflum milli kólnunar og hlýnunar, þ.e.a.s. ísaldartímabila og milli-ísaldartímabila^[243].

¹⁷ Particulate organic carbon (POC)

¹⁸ Dissolved organic carbon (DOM)

¹⁹ Pg = Petagrömm. 1 Petagram = 1 gígatonn = 1000 milljón tonn



Mynd 22. Örlög kolefnis í sjó. Skýringarmyndin sýnir bindingu og tilflutning kolefnis í gegnum lífkolefnisferlið. Byrgðir kolefnis í andrúmsloftinu í formi CO₂ er gefið í einingunni petamólum af kolefni (C) (1 pmól = 10¹⁴ mól). CO₂ byrgðir andrúmsloftsins eru að aukast um 0,28 pmól á ári. Djúpsjávargöngir kolefnis eru táknaðar með rauðum tölustöfum (neðansjávur á mynd) en gular tölur tákna kolefnisflæðið (petamól/ári). Magn lífrænna agna (POC: Particulate organic carbon) sem flytjast með lífferlinu niður á sjávarbotn á ári er áætlað vera 0,04 pmól/ári en í dag eru lífrænar kolefnisbirgðir djúphjafs taldar vera 3.150 pmól. Hér er ekki sýnt það magn uppleysts kolefnis (DOM = Dissolved organic matter) sem flyst með niður á sjávarbotn, en um 10% kolefnis flyst í því formi niður á sjávarbotn. Myndin er fengin frá Susumu Honjo og féll.^[12] (Afnot af mynd fylgja reglum útgefanda sem taka til eðlilegrar notkunar skv. Section 107 of the United States Copyright Act)

Viðauki 3: Ecopath – Dæmi um líkan til greiningar á fjölpættu sambandi sjávarlífvera

Ecopath líkanið byggir á svokallaðri massajafnvægis kenningu sem leiðir til línulegrar jöfnu fyrir hverja tegund, stofn eða hóp tegunda í tilteknu kerfi:

$$\frac{B_i \times P_i}{B_i \times EE_i} - \sum \frac{B_j \times Q_j}{B_j \times DC_{ij}} - Ex_i = 0$$

þar sem i stendur fyrir einhvern þátt (stofn, tegund, hópur tegunda) í líkaninu, j stendur fyrir alla afræningja á i sem teknir eru með inn í líkanið, B_i stendur fyrir lífmassa i , P_i/B_i sýnir hlutfall framleiðslu og lífmassa sem er í flestum tilfellum sambærilegt dánartíðni i (Z), Q_j/B_j gefur fæðuneyslu fyrir hverja einingu af lífmassa i , DC_{ij} gefur til kynna hversu stór hluti i er af fæðu j (út frá massa i), EE_i gefur til kynna vistkerfisáhrif²⁰ i , þ.e. hversu stóran hluta af lífmassaframleiðslu i er nýttur af vistkerfinu, og Ex_i er sá hluti af lífmassaframleiðslu i sem er tekinn út úr kerfinu (með brotflutningi af svæði eða vegna veiða)^[28].

²⁰ Ecotrophic: það hlutfall árlegrar nettó frumframleiðslu sem neytt er á efstu stigum fæðuvefsins

Viðauki 4: Niðurstöður NASS og TNASS talninga á stofnmati hvala á talningasvæðum um og við Ísland árin 1987-2016

Töluleg gögn nýtt til útreikninga í kafla 3.3 og 3.6

Tegund	Þéttleiki á Íslandi				Matsár	Svæði	Heimild
	Stofnstærðar- mat	Neðri mörk	Efri mörk				
Steypireyður	3.000	1.377	6.534	2015	Ísland+Færeyjar	[166]	
Steypireyður	855	358	1419	2001	Ísland+Færeyjar	[158]	
Steypireyður	979	137	2.542	1995	Ísland+Færeyjar	[158]	
Steypireyður	531	288	759	1989	Ísland+Færeyjar	[158]	
Steypireyður	222	115	440	1987	Ísland+Færeyjar	[157, 158]	
Langreyður	36.773	25.811	52.392	2015	Ísland+Færeyjar	[166]	
Langreyður	30.777	21.153	44.779	2007	Ísland+Færeyjar	[159]	
Langreyður	24.887	18.186	30.214	2001	Ísland+Færeyjar	[176]	
Langreyður	19.672	12.083	28.986	1995	Ísland+Færeyjar	[176]	
Langreyður	10.378	7.600	14.200	1989	Ísland+Færeyjar	[176]	
Langreyður	5.479	3.380	7.830	1987	Ísland+Færeyjar	[176]	
Hrefna	42.515	22.896	78.942	2015	Ísland+Færeyjar	[166]	
Hrefna	12,427	7,205	21,443	2007	Ísland+Færeyjar	[159]	
Hrefna	25,929	14,747	45,590	2001	Ísland+Færeyjar	[244]	
Hrefna	19,042	12,801	28,325	1995	Ísland+Færeyjar	[244]	
Hrefna	27,184	14,956	49,410	1989	Ísland+Færeyjar	[244]	
Hrefna	21,984	16,310	29,632	1987	Ísland+Færeyjar	[244]	
Hrefna	13.497	3.312	55.007	2016	Íslensk strandsvæði	[44]	
Hrefna	12.710	4.498	35.912	2015	Íslensk strandsvæði	[44]	
Hrefna	9.588	5.274	14.420	2009	Íslensk strandsvæði	[44]	
Hrefna	20.834	9.808	37.042	2007	Íslensk strandsvæði	[44]	
Hrefna	43.633	30.148	63.149	2001	Íslensk strandsvæði	[44, 245]	
Hrefna	5.977	2.671	13.376	1995	Íslensk strandsvæði	[244]	
Hrefna	13.487	4.779	38.060	1989	Íslensk strandsvæði	[244]	
Hrefna	24.532	13.399	44.916	1987	Íslensk strandsvæði	[245]	
Hnúfubakur	9.867	4.854	20.058	2015	Ísland+Færeyjar	[166]	
Hnúfubakur	18.105	7.226	45.360	2007	Ísland+Færeyjar	[159]	
Hnúfubakur	14.662	9.441	28.879	2001	Ísland+Færeyjar	[246, 247]	
Hnúfubakur	10.521	3.716	24.636	1995	Ísland+Færeyjar	[246]	
Hnúfubakur	1.722	1.061	2.795	1987	Ísland + Færeyjar	[172]	
Sandreyður	3.767	1.156	12.270	2015	Irmingerhaf + Ísland + Færeyjar	[166]	
Sandreyður	5.159	1.983	13.423	2007	Irmingerhaf + Ísland + Færeyjar	[159]	
Sandreyður	9737	4,189-	19,665	2007	Irmingerhaf + Ísland + Færeyja + stærra leitarsvæði	36]	
Sandreyður	1.590	Ekki gefið	Ekki gefið	1989	Irmingerhaf + Ísland + Færeyjar	[173]	
Sandreyður	10,300	6,150	17,260	1989	Irmingerhaf + Ísland + Færeyja + stærra leitarsvæði	[173]	
Sandreyður	1.293	434	3.853	1987	Irmingerhaf + Ísland + Færeyja	[173]	
Búrhvalur	23.166	7.699	69.709	2015	Mið-Norður Atlantshafið	[166]	
Búrhvalur	12.268	6.386	23.568	2007	Mið-Norður Atlantshafið	[159]	
Grindhvalir	344.148	162.79 5	727.52 7	2015	Mið-Norður Atlantshafið	[166]	
Grindhvalir	87.417	41.783	182.89 1	2007	Mið-Norður Atlantshafið	[159]	
Andarnefjur	19975	5562	71737	2015	Mið-Norður Atlantshafið	[166]	

Hnýðingur	159.000	49.957	506.05 4	2015	Mið-Norður Atlantshafið	[166]
Hnýðingur	91.277	32.351	257.53 7	2007	Mið-Norður Atlantshafið	[159]
Hnýðingur	31.653	17.679	56.672	2001	Landgrunn Íslands	[44]
Leifturhnýðir	131.022	35.251	486.98 1	2015	Mið-Norður Atlantshafið	[166]
Leifturhnýðir	81.008	27.993	234.42 9	2007	Mið-Norður Atlantshafið	[159]