

TÍMI OG BREYTILEIKI Í VATNAFRÆÐI

Árni Snorrason
Orkustofnun
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

INNGANGUR

Í þessu erindi er ætlunin að fjalla um *tíma og breytileika* í vatnafræði. Fyrst verður fjallað örlítið um mælingar Fornegypta og síðan gefið yfirlit um vatnafræði og hringrás vatnsins. Því næst er fjallað almennt um vökvakerfi og suma eiginleika þeirra og í framhaldi af því er lýst vökvakerfum í hringrás vatnsins. Breytileika í vatnafræðilegum stærðum er síðan lýst, með tilvísun í veður- og veðurfar. Að lokum er fjallað um langtímabreytingar í veður og vatnafari og lýst þeim áhrifum, sem athafnir mannsins geta haft á slíkar breytingar.

UPPHAF VATNAMÆLINGA

Helstu rætur vestrænnar menningar má rekja til þjóðfélaga sem uxu og döfnuðu við stórfjót suðlægra landa. Er þar helst að nefna Egyptaland og Mesópótamíu.

Hin nánú tengsl milli vatns og afkomu leiddu fljótt til þess að vatnamælingar hófust. Ef dæmi er tekið af Egyptum, þá beindust mælingar þeirra aðallega að vatnshæðarmælingum á vatnsborði Nílar. Tilgangur mælinganna var einkum tvennskona, annars vegar að fylgjast með hinum árvissu flóðum Nílar, hins vegar að fylgjast með langtímabreytingum árinna.

Á grundvelli mælinganna voru gerðar spár bæði um tímasetningu flóðanna svo og um það hversu hratt og hátt flóðbylgjan risi. Spár þessar voru framkvæmdar af æðstu prestum Egypta og réðst staða þeirra oft af því, hversu vel þeim tókst til með spárnar. Minnir staða þeirra nokkuð á stöðu sérfræðinga í tækniþjóðfélagi nútímans.

Flóð Nílar eiga sér upptök á syðri hluta vatna-

sviðs árinna. Það veldur því að orsakir þeirra voru Egyptum lítt kunnar. Spár þeirra um flóðin byggðu því ekki á þekkingu á orsakatengslum veðurs og vatns, heldur beint á reynslu þeirra af hegðun flóðbylgjunnar á leið hennar niður Nílardalinn. Flóðin komu árvisst, en breytileg þó, án þess að aðstæður við neðri hluta Nílar hefðu áhrif þar á. Svipar þetta nokkuð til vatnafræða nútímans. Þau byggja enn að miklu leyti á reynslusamböndum og reynsluhyggju almennt, frekar en á grundvallarþekkingu á grunnferlum og orsakakeðju vatns-hringrásarinnar. En víkjum nú að vatnafræðinni.

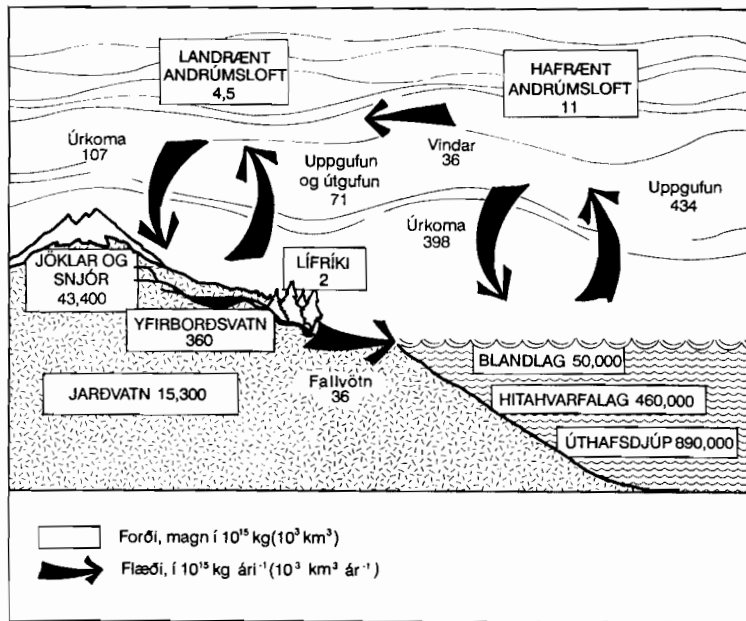
VATNAFRÆÐI NÚTÍMANS

Allmargar skilgreiningar eru til á fræðigrein þeirri, sem við köllum vatnafræði. Almenna skilgreiningin gæti verið á þessa leið:

"Vatnafræði er þau vísindi, sem fjalla um vatn jarðar, tilvist þess, hreyfingu og dreifingu. Einnig fjallar vatnafræðin um eðlis- og efnafræðilega eiginleika vatnsins ásamt tengslum þess og víxlverkan við umhverfið, þar með talin tengsl þess við lífheiminn."

Viðfangsefni vatnafræðinnar eru samkvæmt framansögðu ótæmandi. Þess vegna ráða tilgangur og þarfir mannanna því, hvar vatnafræðinga ber niður í vinnu sinni. Þar, eins og í öðrum hagnýtum vísindagreinum, eru tengsl fræða og framkvæmda mikil. Ennfremur eru veruleg tengsl við aðrar þær fræðigreinar, sem fjalla um hringrás vatnsins á jörðinni, svo sem haffræði og veðurfræði. Mynd 1 sýnir nánar viðfangsefni vatnafræðinnar, svo og tengsl hennar við aðrar vísindagreinar.

Hringrás vatnsins í náttúrunni er óumræðilega



MYND 1. Hringrás vatnsins. (Teiknað uppúr *The Global Climate System*. Autumn 1984 - Spring 1986).

flókin, en þó eru nokkuð skýrir höfuðdrættir. Sólin er *primus motor*, því orka hennar knýr alla hringrás vatnsins. Eitt mikilvægasta ferlið í vatns-hringrásinni er uppgufun vatns, sérstaklega frá yfirborði úthafanna. En þessi uppgufun er aðal massatilflutningurinn frá höfum og landi til loft-hjúpsins. Hreyfing andrúmsloftsins er annað mikilvægt ferli vatnsringrásarinnar. Þriðja ferlið er svo úrkoman og flutningur hennar um yfirborð jarðarinnar með grunnvatni og í vatnsföllum. Fjórða ferlið er hreyfing úthafanna, og fimmta ferlið er samspil heimskaufássins, hafsins og andrúmsloftsins.

VÖKVAKERFI

En snúum okkur að grundvallaratriðum. Þær greinar hefðbundinnar eðlisfræði, sem liggja fræðilegum athugunum á hringrás vatnsins til grundvallar, eru vökvaaflfræði og varmafræði. Þessar fræðigreinar fjalla almennt um hreyfingu og eiginleika vökvakerfa, þar sem vökvinn hefur þann eiginleika að vera samfelldur. Dæmi um vökvakerfi eru andrúmsloftið, höfin, vötnin, rennsli

vökva í opnum farvegum og grunnvatnskerfi, bæði heit og köld.

Til þess að hægt sé að lýsa þeim grundvallarlögmálum, sem stjórna hreyfingu og hegðan vökvakerfa, verður að ganga út frá því, að ýmsar eðlisfræðilegar stærðir eða sviðsbreytur, sem einkenna kerfið, svo sem þrýstingur, þéttleiki, hiti og hraði, hafi einhlítt og ákveðið gildi á sérhverjum stað í vökvanaum. Til viðbótar er gert ráð fyrir því, að þessar breytistærðir vökvans og hlutfleiður þeirra séu samfelldar breytur af staðsetningu og tíma. Að þessum skilyrðum uppfylltum er hægt að lýsa slíkum vökvakerfum með hlutfleiðujöfnum.

Þau grundvallarlögmál hefðbundinnar eðlisfræði, sem ráða hegðun vökvakerfa, og fullnægja ofangreindum skilyrðum, eru varðveisla massa (eða efnis), skriðþunga og orku. Á grundvelli þessara varðveislulögmála er hægt að leiða út hneppi af hlutfleiðujöfnum, sem lýsa vökvakerfinu.

GRUNDVALLARJÖFNUR

Jafnan, sem byggir á varðveislu massans, er kölluð samfelldnifafnan, og segir hún einfaldlega, að breyting á massa, innan ákveðins rúmmáls vökvans, sé jöfn mismuninum á þeim massa sem flæðir inn og út úr því sama rúmmáli.

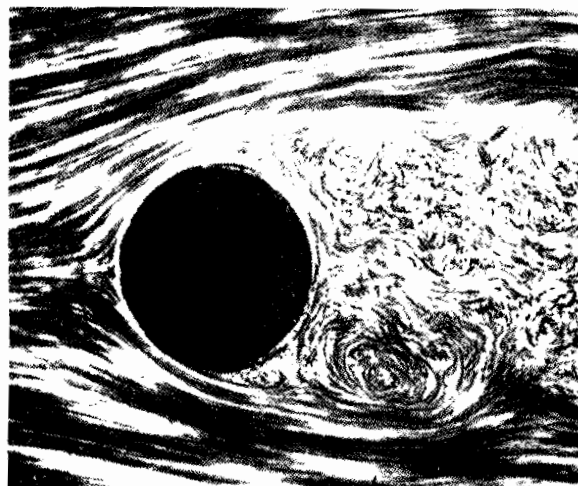
Jöfnurnar, sem byggja á öðru lögmáli Newtons um varðveislu skriðþungans, eru kallaðar Navier-Stokes jöfnur. Þetta lögmál segir, að breyting á skriðþunga hlutar, eða í þessu tilfalli örlítills rúmmáls vökvans, sé jöfn öllum þeim kröftum, sem á hlutinn verka. Helstu kraftar, sem skipta máli í vökvakerfum, eru þrýstikraftur, aðdráttarkraftur og viðnámskraftur. Einnig þarf að taka tillit til krafta, sem stafa af snúningi jarðar, og á það sérstaklega við um hin stóru vökvakerfi veður- og haffræðinnar.

Jafnan, sem byggir á varðveislu varmaorku, er kölluð varmafræðilega orkujafnan. Hún byggir á fyrsta lögmáli varmafræðinnar, sem segir að breyting á innri orku kerfis, í þessu tilfalli örlítið rúmmál vökvans, sé jöfn mismuninum á varmanum, sem bætist við kerfið, og vinnunni, sem kerfið framkvæmir.

Þessar jöfnur, sem við getum kallað grundvallarjöfnur, eru ekki fullnægjandi sem lýsing á vökvakerfum. Ástæðan er meðal annars sú, að í jöfnunum eru fleiri breytistærðir en sem nemur fjölda þeirra sjálfra. Til þess að leysa þetta vandamál verður að setja fram jöfnur, sem lýsa eiginleikum vökvans sjálfs. Yfirleitt eru þær byggðar á innsæi og reynslu, þó að reynt sé að byggja á grundvallarlögmálum. Gera verður verulegar einfaldanir og setja verður fram ýmiskonar reynslusambönd til þess að fá fram lausnir. Einnig er fræðileg framsetning upphafs- og randskilyrða verulegum vandkvæðum bundin og verður því oft að nota sambönd, sem sömuleiðis byggja á innsæi og reynslu. Auðvitað draga þessi sambönd dóm af því kerfi, sem unnið er með, og eru því frábrugðin frá einu kerfi til annars. Eitt vandamál er samt sameiginlegt við lýsingu á flestum náttúrulegum vökvakerfum. Skulum við nú líta á það.

IÐUSTREYMI OG ÁHRIF ÞESS

Veigamiklar forsendur fyrir gildi og útleiðslu Navier-Stokes jafnanna, svo og fyrir varðveislujöfnunum efnis og orku, byggja á því að streymi vökvans sé án óreglu. Reyndin er hinsvegar sú, að flest vökvakerfi í náttúrunni eru mjög breytileg og óregluleg. Er sá eiginleiki þeirra nefndur iðustreymi, *turbulence*. Rétt er að geta þess að iðustreymi er einkenni vökvafleðisins sjálfs, eins og íslenska orðið ber með sér, ekki eiginleiki vökvans. Einnig er rétt að nefna, að iðustreymi í vökvum lýtur a.m.k. fræðilega Navier-Stokes jöfnunum, því stærðarskali iðustreymis er mörgum stærðargráðum stærri en hreyfing sameinda.



MYND 2. Iðustreymi. Úr J.O. Hinze: *Turbulence*. Mc Graw-Hill, 1959.

Höfuðeinkenni iðustreymis (mynd 2) eru hinar hendingakenndu breytingar þess. Þetta þýðir í raun, að ákvarðanlegar aðferðir við lýsingu á iðustreymi eru nánast ómögulegar. Til að fá fram lausnir getur því reynt nauðsynlegt að beita tölfræðilegum aðferðum. Þetta gildir þrátt fyrir að iðustreymi lúti Navier-Stokes jöfnunum, eins og áður er vikið að.

Annað mikilvægt einkenni iðustreymis eru dreifieiginleikar þess (diffusivity). Eiginleikar þessir orsaka mun hraðari tilflutning innan vökv-

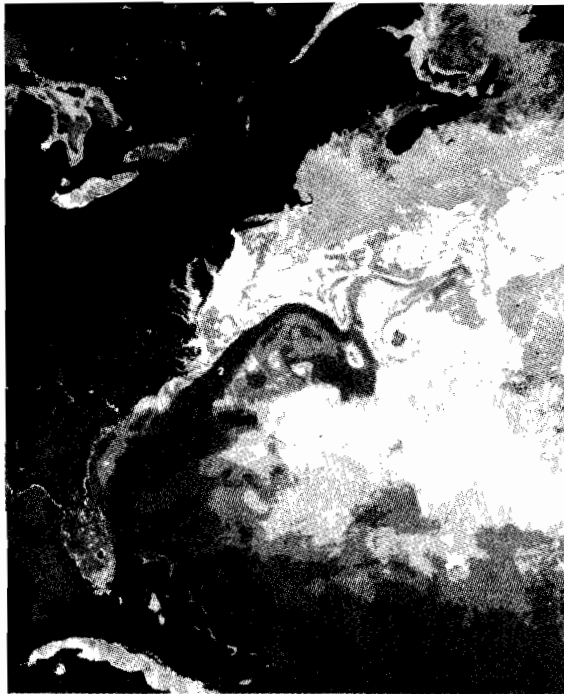
ans á orku, skriðþunga og öðrum breytum vökvans, heldur en á sér stað í streymi, sem ekki er iðustreymi. Þessi aukni tilflutningur innan vökvans hefur gríðarlegar afleiðingar í för með sér fyrir flest vökvakerfi náttúrunnar og væri erfitt að hugsa sér heim, sem byggir við streymi sem ekki væri iðustreymi. Ef vökvinn hættir að fá utanaðkomandi orku valda dreifieiginleikarnir því, að orkan og skriðþunginn dreifast og rennslið hættir að vera iðustreymi.

Orsakir iðustreymis eru taldar vera þær, að vökvakerfið hagar sér á ólínulegan hátt við ákveðin skilyrði, eins og Navier-Stokes jöfnurnar bera með sér. Þetta hefur dramatískar afleiðingar í för með sér, því að slík kerfi geta sýnt af sér hegðun, sem er ekki ákvarðanleg. Ástand kerfisins breytist svo óreglulega með tíma, að svo virðist sem það sé tilviljanakennt. Þetta ástand ólínulegra ákvarðanlegra kerfa er kallað "kaotískt" og sýnir vel, hversu ófullnægjandi lýsing hin hefðbundna aflfræði Newtons er.

Það, að ákvarðanleg kerfi skuli geta verið "kaotísk", hefur alvarlegar afleiðingar í för með sér, því ef farið er eftir hinum hefðbundna hugsunarhætti, ætti að vera hægt að segja fyrir um tímaþróun kerfisins, ef ástand þess á ákveðnum tíma væri þekkt með nægilegri nákvæmni. Þetta á í raun einnig við um nútíma eðlisfræði, því báðar heimsmyndir virðast gefa í skyn, að nútíðin feli í sér bæði framtíð og reyndar fortíð, því öll lögmál þeirra eru óháð stefnu tímans. Greinilegt er, að fullyrðing sem þessi stenst engan veginn, a.m.k. ekki um iðustreymin vökvakerfi. Vísindi sem fást við spádóma um þau verða því að setta sig við það, að geta í mesta lagi spáð fyrir um framtíðarástand kerfisins með líkindum.

Á myndum 3 og 4 eru sýnd mismunandi vökvakerfi. Af þessum myndum sjáum við, að hringrás vatnsins samanstendur af vökvakerfum, stórum og smáum, sem tengjast hvert öðru, eins og hringrásarnafnið ber með sér. Við höfum fjallað nokkuð um þau vandamál, sem koma upp við lýsingu á vökvakerfum. Þeim er það öllum sameiginlegt, að erfitt er að spá fyrir um framtíðarástand kerfisins, þó að það sé skoðað í einangrun. Því hefur verið

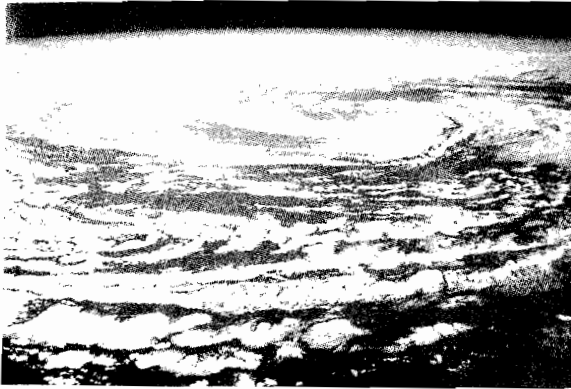
fullyrt að um þessar mundir sé lýsing á iðustreymandi vökvakerfum, byggð á grundvallarlögmálum eðlisfræðinnar, það vandmál nútíma vísinda, sem sé bæði mikilvægast og erfiðast að leysa. Líklegt er, að bæta verði verulega úr með lýsingu á innri eiginleikum vökvans og tengslum þeirra við sviðsbreytur vökvastreymisins. Hér er þörf á að líta til varmafræðinnar, sérstaklega til meðhöndlunar þeirra ferla, sem eru dreifðir og óviðsnúanlegir, *irreversible*.



MYND 3. Vökvakerfi. Mynd úr gerfitungli af Golfstraumnum við austurströnd N-Ameríku. (NASA - Gulf Stream Temperature).

Nú hefur verið fjallað nokkuð um atriði, sem varða vökvakerfi almennt. Reynt hefur verið að draga fram þann breytileika, sem einkennir slík kerfi, stór jafnt sem smá. Annarskonar breytileiki einkennir vatnafræðileg kerfi og munum við nú fjalla nokkuð um það.

Helsta uppspretta breytileika í vatnafræðilegum



MYND 4. Vökvakerfi. Skýjasveipur lágþrýstisvæðis. (Úr Oceanus, Vol. 29).

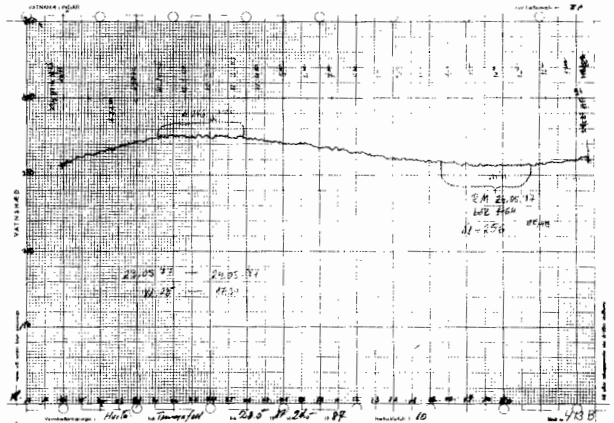
kerfum eru breytingar á veðri og veðurfari. Fyrst ber að nefna úrkomuna, en hún er ákaflega breytileg, bæði í tíma og rúmi. Hún er reyndar sú breyta, sem langerfiðast er að segja fyrir um, og er happadrýgst að líta á hana sem hendingarkennda (stókastíska). Úrkomun hefur bæði bein og óbein áhrif á vatnafar og ræðst það mjög af jarðeðlisfræðilegum og veðurfarslegum aðstæðum, hvernig þau áhrif eru.

Hitastig loftins er einnig ákaflega þýðingarmikil breytistærð fyrir vatnafar. Áhrif hitans eru aðallega þrennskonar, í fyrsta lagi hefur hann áhrif á bæði raka og orkutílfærslu innan vatnshringrásarinnar, svo sem við uppgufun og útgufun og uppgufun íss, svo eitthvað sé nefnt. Í öðru lagi ræður hitastig loftins mestu um það, hvort úrkomun fellur sem regn eða snjór. Í þriðja lagi ræður hitastig loftins miklu um leysingu jökla og snævar.

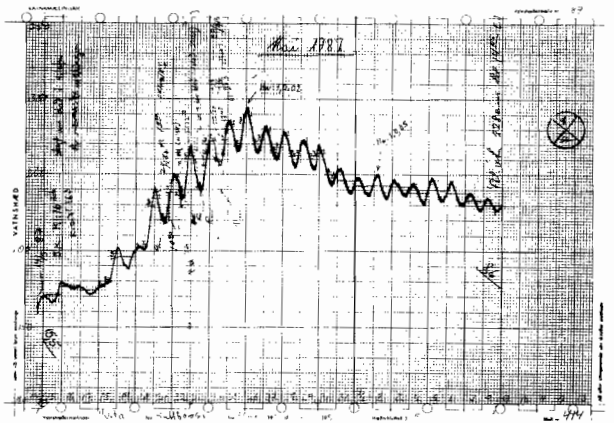
Jarðeðlisfræðileg gerð kerfisins hefur einnig veruleg áhrif. Þar má helst nefna landslag, jarðfræði og jarðlagaskipan, jarðveg og gróðurfar og svo má lengi telja.

Ágætt og mikilvægt dæmi um vatnafræðilega breytistærð er rennsli tiltekins vatnsfalls á tilteknum stað. Til þess að sýna tengsl hennar við hina ýmsu þætti, sem áður eru nefndir, er rétt að líta á myndir af vatnshæðarmælingum og rennslisröðum. Mynd 5 sýnir vatnshæðarmælingar í Hvítá við Nautavík neðan Gullfoss. Hér hefur tímaskalinn

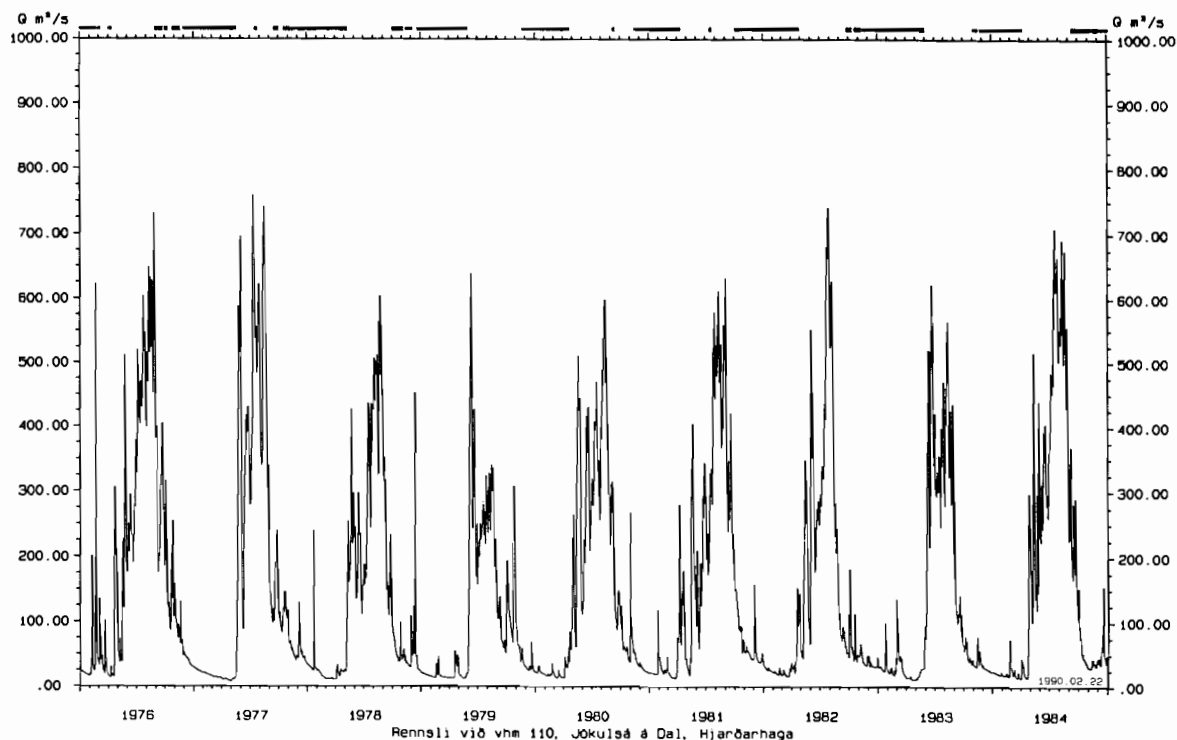
verið teygður mjög, og má þá sjá mjög óreglulegar breytingar í vatnshæðinni. Sumar þessara breytinga eru þó það hægfara, að þær ná yfir nokkurra mínútna tímabil. Til viðbótar þessum hraðari breytingum má sjá breytingar á vatnshæðinni innan dagsins. Hæðarskali breytingarinnar eru 20-30 sentimetrar og tímalengdin er einn sólarhringur. Þetta sést betur á mynd 6. Hér er sýnt mánaðarblað úr sama síritandi vatnshæðarmæli, og eru höfuðeinkenni vatnshæðarinnar dægursveiflan vegna leysingar. Breytingarnar eru ótrúlega reglulegar, en þó sjást hægfara breytingar, eftir því sem á leysinguna líður.



MYND 5. Vatnshæðarmæling í Hvítá við Nautavík. Lengd línurits u.þ.b. 1 sólarhringur.



MYND 6. Mánaðarblað úr sritanum við Hvítá.



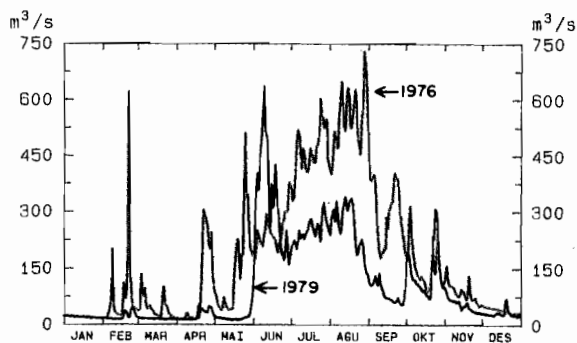
MYND 7. Rennslí Jökulsár á Dal.

Á mynd 7 er rennsli Jökulsár á Dal. Sýnd eru dagsmeðaltöl nokkurra ára og má sjá allmikla reglu í óreglunni. Dagsmeðaltölin sveiflast mikið, en greinileg árstíðarbundin breyting liggur til grundvallar.

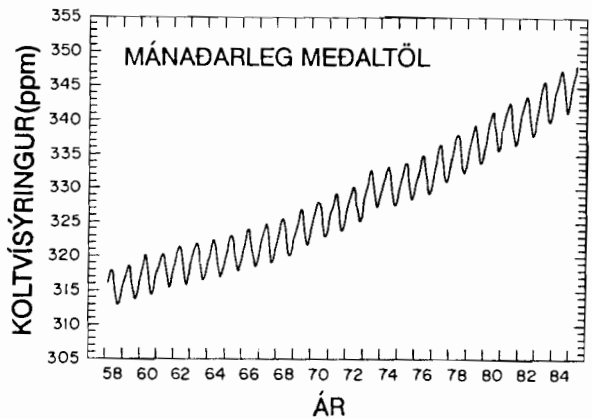
Á mynd 8 sjáum við breytileika milli ára. Áin er Jökla, og sjást áhrif hitastigs ákaflega greinilega á þessum tveim línuritum. Munurinn á rúmmáli þessarra ára er u.þ.b. 2000 gígalítrar, sem samsvarar tvisvar sinnum rúmmáli Þórisvatnsmiðlunar.

Nú ættu tengsl vatna- og veðurfars að vera nokkuð ljós og víkjum því aftur að frekari umfjöllun um hringrás vatnsins. Ef við lítum nú á aðra þá þætti, sem valda breytileika í ferlum vatnshringrásarinnar, þá má skipta þeim í tvo megin flokka. Fyrri flokkurinn varðar ytri skilyrði og breytingar, sem áhrif hafa á hin stærri kerfi vatnshringrásarinnar, hinn síðari varðar innra samspil ferlanna.

Ef við nefnum nokkur atriði, sem falla í fyrri flokkinn, þá er í fyrsta lagi að nefna breytingar á



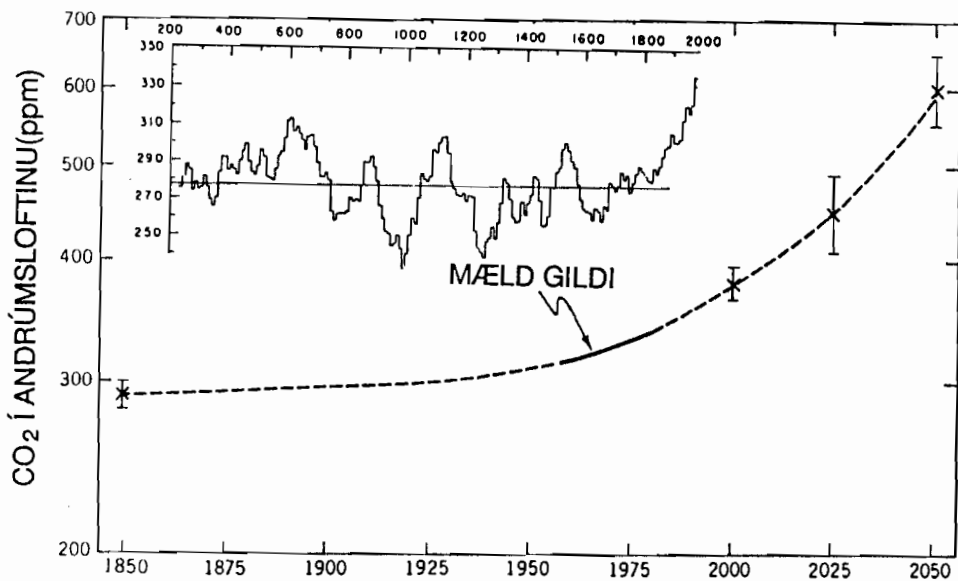
MYND 8. Vhm 110 í Jökulsá á Dal við Hjarðarhaga. Borin er saman ársferill tveggja ára. Árið 1976 var drjúgt vatnsár og Jökla óvenju mikil. Árið 1979 var kalt og vatnsrýrt hafísár.



MYND 9. Aukning á koltvísyringsmagni í andrúmsloftinu, eins og það hefur mælst við Mauna Loa á Hawaii á árabílinu 1958 til 1985. (Úr Warren M. Washington og Claire L. Parkinson, 1986).

geislun sólar. Í öðru lagi er það staða jarðarinnar í himingeimnum. Í þriðja lagi eru það áhrif frá innri gerð jarðarinnar, ásamt öðrum þeim jarðeðlisfræðilegu viðburðum, sem áhrif kunna að hafa, svo sem eldgosum. Að lokum ber að nefna athafnir manna, en vegna bruna lífrænna efna hefur hlutfall koltvísyrings í andrúmsloftinu aukist verulega, og eru afleiðingar af því, eins og flestum er kunnugt, ófyrirsjáanlegar. Á mynd 9 sést, hvernig koltvísyringsmagn andrúmsloftsins jókst á árunum 1958 til 1985, en mynd 10 sýnir spá um þróun koltvísyringsmagns í andrúmsloftinu fram til ársins 2050. Einnig hefur hlutfall og jafnvægi ýmissa annarra efna breyst vegna athafna manna. eru áhrif þess einnig ófyrirsjáanleg.

Ef við nefnum nú það, sem einkennir innri gerð hringrásar vatnsins, þá er það gagnvirkni milli hinna ýmsu ferla hennar, sem er uppsprettan að breytingum, sem í dag er nánast ómögulegt að spá um. Gagnvirknin hefur það nefninlega í för með



MYND 10. Breytingar á magni koltvísyrings í andrúmsloftinu á tveimur öldum frá 1850 - 2050. Raunverulega mæld gildi eru aðeins frá 1958 til dagsins í dag, hitt eru áætlaðar tölur. Efra línuritid sýnir kolefnið (C_{13}) mælt í trjáhringjum frá því árið 200 e.Kr. og fram til dagsins í dag. (The Global Climate System. Autumn 1984 - Spring 1986).

sér, að hin hefðbundna orsakakeðja, sem liggur til grundvallar allri hefðbundinni eðlisfræði, hefur rofnað. Þetta lýsir sér þannig, að eitt ferlið hefur áhrif á annað ferli, sem við það breytist með þeim hætti, að það hefur áhrif til frambúðar á upphaflega ferlið. Þannig getur gengið koll af kolli og duga núverndi aðferðir ekki til fullnægjandi meðhöndlunar þessa samspils. Lausn þessara vandamála tengist örugglega fullkomnari eðlisfræðilegri lýsingu á þeim varmafræðilegu ferlum, sem virðast ráðandi í þessu samspili.

LOKAORÐ

Í dag stöndum við andspænis þeirri staðreynd, að maðurinn hefur breytt svo umhverfi sínu, að við blasir veruleg breyting á orkubúskap jarðarinnar. Afleiðingar þess á loftslag og hringrás vatnsins gætu orðið verulegar. Það kann síðan aftur að hafa áhrif á orkubúskapinn. Við slíkar aðstæður verður ekki lengur unnt að rannsaka hin einstöku ferli vatnshringrásarinnar, án þess að taka fullt tillit til gagnverkunar kerfisins og innbyrðis tengsla ferlanna. Einnig er ljóst, að ekki er lengur hægt að treysta um of á reynslusambönd fortíðarinnar á sama hátt og Fornegyptar gerðu, því líklegt er, að framtíðin lúti verulega öðrum lögmálum, en nútíðin og nánasta fortíð. Þetta kallar því á mun dýpri skilning á eðli vatnshringrásarinnar. Sá skilningur verður að byggja á sem fullkomnastri lýsingu á grundvallareiginleikum kerfisins, eigi að vera hægt að segja fyrir um framtíðarhegðan þess. Lausn þessa viðamikla viðfangsefnis mun verða verðugt verkefni vísindamanna nútímans og kallar á umfangsmeiri samvinnu og samhæfingu þeirra, en áður hefur þekkt.