



ORKUSTOFNUN

Auðlindadeild

**Gróðurhúsaáhrif
virkjunarlóna
Heimildakönnun**

Hákon Aðalsteinsson

1998

OS-98064



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 510 961

Hákon Aðalsteinsson

Gróðurhúsaáhrif virkjunarlóna

Heimildakönnun

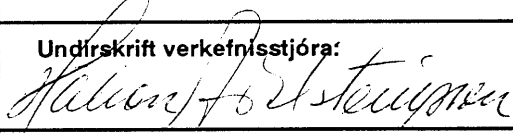
OS-98064

Október 1998

ISBN 9979-68-023-7

ORKUSTOFNUN: Kennitala 500269-5379 - Sími 569 6000 - Fax 5688 896
Netfang os@os.is - Heimasíða <http://www.os.is>



Skýrsla nr.: OS-98066	Dags.: Október 1998	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Gróðurhúsaáhrif virkjunarlóna Heimildakönnun	Upplag: 50	
	Fjöldi síðna: 24	
Höfundar: Hákon Aðalsteinsson	Verkefnisstjóri: Hákon Aðalsteinsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Könnun/samanburður heimilda, mat	Verknúmer: 3-510961	
Unnið fyrir:		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: <p>Talsverð umræða hefur farið fram um hugsanleg gróðurhúsaáhrif af miðlunarlonum vatnsaflsvirkjana. Í þessari skýrslu er annars vegar gefið yfirlit um niðurstöður af rannsóknum sem geta talist marktækar, en þær helstu eru frá Kanada og Finnlandi. Hins vegar er farið yfir helstu forsendur sem umræðan hefur byggt á og loks er samantekt um gróðurhúsaáhrif vatnsaflsvirkjana, sem m.a. eru vísbending um áhrif mismunandi aðstæðna. Samkvæmt ítarlegum rannsóknum í Kanada losa vatnsaflsvirkjanir þar aðeins um 1/30 til 1/60 af því sem orkuver knúin jarðfnaeldsneyti losa. Almennt flæðir um tíu sinnum meira gróid land á hverja orkueiningu í lönum vatnsaflsvirkjana í Kanada og Finnlandi miðað við flestar virkjanir hérlendis. Af því leiðir að það er næsta víst að lón hérlendis hafi enn minni gróðurhúsaáhrif en lón t.d. í Kanada, eða af stærðargráðunni þúsund tn/TWh á ári miðað við tíu þúsund tonn/TWh á ári í Kanada. Þrátt fyrir að gróðurhúsaáhrif af virkjun vatnsafls hérlendis sé að öllum líkindum hverfandi er æskilegt að vita hver þau eru, ekki síst vegna ýmissa sérkenna íslensks jarðvegs.</p>		
Lykilorð: Vatnsaflsvirkjanir, virkjunarlón, gróðurhúsalofttegundir, votlendi, mómýrar, kolefni, metan	ISBN-númer: ISBN 9979-68-023-7	
	Undirskrift verkefnisstjóra: 	
	Yfirfarið af: Dr Hlynur Óskarsson og Dr Ólafur Arnalds, Rala	

EFNISYFIRLIT

1. Inngangur	3
2. Rannsóknir á virkjunarlónum í Kanada	4
2.1 Losun frá yfirborði mómyra	4
2.2 Losun um yfirborð lónanna	5
2.3 Flæði úr botni	5
2.4 Styrkfallandi í vatnssúlunni	5
2.5 Niðurstöður og athugasemdir	6
3. Vöktunarrannsóknir á lónum í La Grande-kerfinu	8
3.1 Ályktanir	8
4. Mat á áhrifum tveggja lóna í Quebecfylki	10
4.1 Forsendur	10
4.2 Gróðurhúsaáhrif vatnsorkuvera	11
4.3 Önnur dæmi og athugasemdir	12
5. Mat á áhrifum tveggja lóna í Finnlandi	15
5.1 Beinar mælingar	15
5.2 Útreikningar á langtímalosun	15
6. Heildarsýn á gróðurhúsaáhrif vatnsaflsvirkjana	16
7. Rannsóknir á náttúrulegri losun gróðurhúsalofttegunda	18
7.1 Votlendi	18
7.2 Mikilvægar umhverfisbreytur	18
7.3 Þurrlendi	19
8. Íslenskar aðstæður	20
9. Heimildaskrá	22

TÖFLUR

1. Heildarniðurstöður um losun gróðurhúsalofttegunda frá La Grande og Laforge	6
2. Áætluð árleg losun gróðurhúsalofttegunda (GHG) frá tveimur lónum	11
3. Samanburður á gróðurhúsaáhrifum mismunandi aðferða við raforkuframleiðslu	12
4. Metanlosun í votlendi	18
5. Land sem fer undir vatn vegna vatnsaflsvirkjana á Íslandi	21

MYNDIR

1. Helstu kolefnisefnaferlar í lóni við loftfirrðar aðstæður við botn	4
2. Þróun nokkurra mikilvægra vatnalíffræðilegra þátta sem tengjast rotnun á lónbotni	9
3. Styrkur súrefnis og metans með dýpi	13

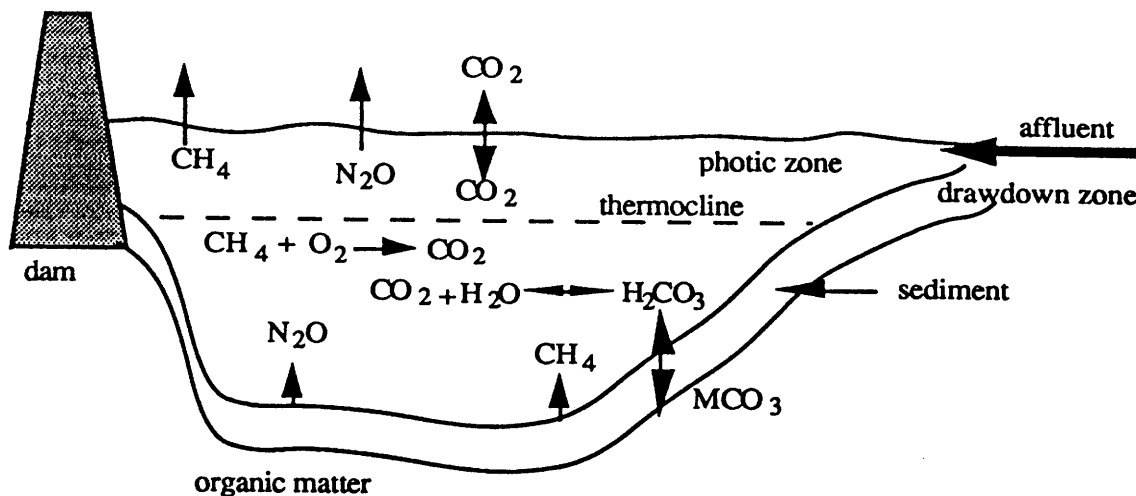
1. Inngangur

Nokkuð hefur verið rætt um hugsanleg gróðurhúsaáhrif virkjunarlóna, t.d. í erindi sem flutt var á ráðstefnu Verkfræðingafélags Íslands og Framtíðarstofnunar um gróðurhúsaáhrif í nóvember 1997. Allnokkrar greinar hafa birst um efnið í erlendum tímaritum. Í fæstum tilvikum hefur þar verið byggt á beinum mælingum á losun frá yfirborði lónanna, heldur á óbeinum mælingum og útreikningum. Þessir útreikningar fela gjarnan í sér tilvísanir í myndun kolefnis í mómýrum á norðurslóðum (*boreal* og *arctic*), þar sem menn gefa sér hve stór hluti kolefnis sem bundinn er í jarðveginum muni losna á tilteknum tíma, yfirleitt á 50-100 ára tímabili. Tilgangur þessarar skýrslu er að nálgast staðreyndir um gróðurhúsaáhrif vatnsaflsvirkjana út frá tiltækum rannsóknum og jafnframt að ræða hugsanleg áhrif virkjana á Íslandi hvað þetta varðar.

Mýrar (*peatlands*) eru mjög víða á norðurslóðum. Talið er að þær þeki þar um 3,5 milljónir km². Núverandi mýrar hafa verið að myndast á síðustu 11-14 þús. árum. Í þeim er talið vera um 450 milljarða tn af kolefni, sem er um þriðjungur af kolefni í jarðvegi í heiminum. Mýrar eru mikilvægar geymslur fyrir kolefni og talið er að þær bindi um 100 milljón tn af kolefni á ári (um 30 g C/m² á ári, en það jafngildir um 100 g koltvöxíð/m² á ári) (Gorham 1991). Þetta mat er byggt á mælingum á þykkun og telst því vera nettó binding. Vegna ýmissa eiginleika mýra, sem síðar verður minnst á, eru þær jafnframt með helstu metanlosurum heimsins, og er talið að þær losi alls um 30-35 milljón tn af metani á ári, sem svarar til 10 g/m² metans á ári. Metan er talið vera 21 sinnum virkari gróðurhúsalofttegund en jafnþyngd þess af koltvöxíði (IPCC 1995), og 10 g/m² metans eru því að þessu leyti jafngild um 200 g/m² af koltvöxíði. Þetta þýðir að þrátt fyrir hina miklu bindingu kolefnis í lífmassa losa mýrar um 100 g/m² koltvöxíð-ísgildis umfram það sem binst á ári hverju.

Í virkjunarlónum myndast gróðurhúsalofttegundir við rotnun gróðurs og jarðvegs í gróðurlendum sem lenda undir vatni. Á mörkum vatns og sets myndast koltvöxíð eða metan eftir því hvort súrefni kemst að eða ekki. Koltvöxíð á yfirborði setsins en metan niðri í setinu. Í þeim tilvikum þegar lón verða lagskipt vegna hitamismunar í yfirborðs- og botnlögum, getur súrefni gengið til þurrðar í botnlögum. Þar ríkjja þá bakteríur sem valda loftfirrðum efnahvörfum og við þær aðstæður myndast nær eingöngu metan við rotnun lífrænna efna, eins og skýringarmyndin sýnir (mynd 1).

Á skýringarmyndinni má enn fremur sjá að í vatninu hvarfast hluti af metaninu við súrefni og vatn og getur það þá i) yfirgefið lónið sem koltvöxíð, ii) orðið eftir í vatninu sem karbonat eða iii) bundist málmjónum. Í eftirfarandi frásögn af rannsóknum kemur í ljós, að efnahvörf sem verða í vatninu áður en metan nær yfirborði vatnsins hafa mikla þýðingu fyrir mat á gróðurhúsaáhrifum virkjunarlóna. Einnig losnar lítilsháttar af tvínituroxíði, en það er oftast en ekki í samkeppni við metanlosun, þannig að ef mikið losnar af tvínituroxíði má búast við að minna losni af metan. Þau tvö ár sem víðtækar mælingar stóðu yfir á virkjunarsvæðum í norðanverðu Quebec í Kanada, var tvínituroxíð aldrei í mælanlegum styrk.



Mynd 1: Helstu kolefnisefnaferlar í lóni við loffirrdar aðstæður við botn (Dubeau o.fl. 1995).

2. Rannsóknir á virkjunarlónum í Kanada

Um nokkurra ára skeið hefur verið fylgst með losun og dreifingu metans og koltvíoxíðs í tveimur virkjunarlónum við Jamesflóa, syðst í Hudsonflóa í norðanverðu Québecfylki í Kanada (Duchemin o.fl. 1995). Annað lónið, La Grande, var myndað 1978 og hitt, Laforge, 1993.

Lónin eru á 53-54°N breiddar, ársúrkoma er um 800 mm og meðalhiti um -3°C (-35 til 23). La Grande er 2835 km², meðaldýpi um 22 m, og Laforge 960 km², meðaldýpi um 3 m. Lónin eru á ís 6-8 mánuði á ári og hitastig í botnlögum þar sem þau eru dýpst er um 4°C árið um kring.

Á þessu svæði eru barrskógar (taiga) ríkjandi, aðallega svartgreni, gráfura og lerki, með fremur lágvöxnum hægvaxta trjám (um 50 ára endurnýjunartími). Inni á milli eru klapparholt, mómyrar (peatland) og kjarrlendi, þar sem víðir og elri eru ríkjandi tegundir.

Beinar mælingar á gaslosun við yfirborð lónanna voru gerðar u.þ.b. annan hvern dag yfir grynri hluta þeirra á tímabilinu júní til september 1993 og júní til ágúst 1994. Í dýpri hluta þeirra voru mælingar gerðar vikulega á sama tímabili. Þá voru gerðar nokkrar mælingar á styrk metans í vatninu frá um 5 m dýpi til botns, og loks í yfirborði botnsetsins. Síðastnefndu mælingarnar voru gerðar til að meta annars vegar styrkfallið á mörkum sets og vatns og hins vegar uppi í vatnssúlunni. Til samanburðar var losun metans og koltvíoxíðs frá yfirborði nálægra mómyra mæld á tímabilinu júní til september 1993.

2.1 Losun frá yfirborði mómyra

Í þessum rannsóknum var aðeins verið að mæla losun, þannig að eftirfarandi tölur segja ekkert um nettókolefnisbúskapinn.

Metan: 65 mg/m^2 á dag (+/-39; n: 25); um 8 g/m^2 á ári

Koltvíoxíð: 1500 mg/m^2 á dag (+/-800; n: 21); um 180 g/m^2 á ári.

Þessar tölur voru taldar sambærilegar við það sem aðrir höfðu fengið út við svipaðar aðstæður (sjá 4. töflu í 7. kafla).

2.2 Losun um yfirborð lónanna

Einstökum mælingum var skipt í venjulegar og óvenjulegar aðstæður. Óvenjulegar aðstæður eru hvassviðri sem valda miklu róti í lónunum, og undir slíkt getur einnig fallið þegar vart verður við loftbólur eða þegar dauður mosi flýtur upp.

Ef öll gildin eru sett á tíðnilfnurit eru mæligildin gaussdreifð, þar sem um 80% mæligilda falla á tiltölulega þröngt bil. Innan við 15% mæligildanna eru dæmigerð fyrir óvenjulegar aðstæður.

Metanlosun yfir dýpri hluta lónanna ($> 7 \text{ m}$) er aðeins um þriðjungar af losun yfir grynri hlutanum ($< 3 \text{ m}$), þ.e. að meðaltali $2,6$ á móti $8,0 \text{ mg/m}^2$ á dag. Hins vegar er losun koltvíoxíðs um þriðungi hærrí yfir dýpri en grynri hluta lónanna, þ.e. 1800 á móti 1200 mg/m^2 á dag. Þessi mismunur á losun yfir dýpri og grynri hluta lónanna er bein afleiðing af efnahvörfum í vatnssúlunni. Á leið sinni frá botni á miklu dýpi hefur metanið mun lengri tíma til að oxast í koltvíoxíð en þar sem lónin eru grunn.

Styrkur beggja efnanna er frá 5-10 sinnum hærrí við óvenjulegar aðstæður, en þær voru ráðandi í aðeins 12-13% tilvika. Þessi mismunur er innifalinn í meðalgildunum.

2.3 Flæði úr botni

Meðallosun metans úr mómýrar-botni var um 520 mg/m^2 á dag og koltvíoxíðs um 3200 mg/m^2 á dag. Samsvarandi tölur fyrir skóglendis-botn voru 5 og 2100 mg/m^2 á dag. Þegar mest var flæddi um 280 sinnum meira af metan úr mómýrar-botni en út úr vatninu á sama tíma. Hins vegar var munurinn líttill yfir skóglendis-botni og sömuleiðis losnaði svipað af koltvíoxíði yfir hvorum botni fyrir sig.

2.4 Styrkfallandi í vatnssúlunni

Fyrri hluta tímabilsins, þ.e. frá júní og fram í júlí var meira en hundraðfaldur munur á styrk kolefnisgasa við botn og yfirborð lónanna þar sem mómýrar höfðu flætt. Þessi mismunur fór hratt minnkandi þegar leið á sumarið og var nær að engu orðinn í september. Styrkur gasanna var ætíð mun minni þar sem lónið hafði flætt yfir skóglendi, og mismunur milli botns og vatns-yfirborðs aðeins um tvöfaldur fyrri hluta tímabilsins og nær enginn er komið var fram í september. Flæði hvort sem var metans eða koltvíoxíðs hafði minnkað hratt þegar leið á sumarið og var í september yfirleitt mun minna en tíundi hluti þess sem mældist í júní.

Ástæða þykir til að ætla að verulegur hluti af hinum háa styrk kolefnisgasa sem mældist við botn í júní megi rekja til rotnunar plöntusvifs, en plöntusvif er oft mjög mikið á vorin í kjölfar ísabrota. Til þessarar ályktunar liggja gild rök, sem styðjast við mælingar á kolefnisbúskap stöðuvatna.

2.5 Niðurstöður og athugasemdir

Höfundar telja að í flestum tilfellum megi auðveldlega skýra fallandi styrk metans frá botni til yfirborðs með oxun. Mælingar benda til að leggja megi mómýrar- og skóglendis-botnngerðirnar nokkuð að jöfnu í losun gróðurhúsalofttegunda, þegar bornar eru saman niðurstöður mælinga við yfirborð lónanna yfir þessum mismunandi botnngerðum. Við mælingar sem þessar er reyndar engin leið að greina uppruna kolefnisins nákvæmlega, vegna láréttra strauma.

Þótt lónin stöðvi framleiðni gróðurlendisins sem fer undir vatn og þá jafnframt hina miklu kolefnisbindingu, sem getur orðið í mómýrum og reyndar einnig eitthvað í norðlægum barrskógum, þá getur framleiðsla lífvera í vatninu og setmyndun af þeirra völdum vegið þar eitthvað í móti, a.m.k. á meðan gera má ráð fyrir flæði næringarefna úr setinu.

Tafla 1: Heildarniðurstöður um losun gróðurhúsalofttegunda frá La Grande og Laforge á flatareiningu og ári, þar sem reiknað er með að meðallosun dreifist á 120 daga.

	eink.	mg/m ² á dag	g/m ² á ári
<i>metan</i>	grunnt (< 3 m)	8	1
	djúpt (> 7 m)	2,6	0,3
<i>koltvíoxíð</i>	grunnt (< 3 m)	1200	140
	djúpt (> 7 m)	1800	220
<i>koltvíoxíðígildi</i>	grunnt (< 3 m)		160
	djúpt (> 7 m)		225

Samkvæmt þessum rannsóknum vegur metan um 15% í gróðurhúsaáhrifum þar sem lónin eru grýnnst, en aðeins um 3-4% þar sem þau eru dýpst. Meginskýringin felst í oxun metans þar sem vatnsúlan er nógu löng, þ.e vatnið djúpt.

Ef við reynum að bera saman heildargróðurhúsaáhrif mýranna og lónanna, þá er jöfnuðurinn einhvern veginn þannig (mikið einfaldaður):

1. Mýrarnar binda um 100 g/m² á ári af koltvíoxíði (um 30 g C) á ári (sjá inngangskafli). Þetta má bera hann saman við nettóbindingu í lífrænu seti miðlunarlóna eða stöðuvatna. Það er örugglega mjög breytilegt.
2. 180 g/m² á ári af koltvíoxíði binst og losnar aftur. Nettóáhrifin eru engin.
3. 8 g/m² á ári af metan myndast við loftfirrða rotnun lífrænna leifa. Þetta skiptir verulegu máli vegna þess að gróðurhúsaáhrif metans eru 21 sinnum meiri en jafnþyngdar þess af koltvíoxíði, eða 168 g/m²

Í heild losa mýrarnar í grennd við lónin nettó um 70 g/m² koltvíoxíð-ígildi á fermetra á ári (losun 170 samkvæmt lið 3 að frádreginni bindingu 100 samkvæmt lið 1).

Ef við gefum okkur að meðallosun frá viðkomandi lónum hafi verið mitt á milli þess sem lónin losuðu á grunnum og djúpum svæðum (tafla 1) jafngildir það meðallosun um 190 g/m² á ári.

Ef lónbotninn hefði að mestu leyti verið mómýri fyrir, mætti álykta svo að losun frá lónunum hafi verið um 120 g/m^2 koltvíoxíð-ísgildi umfram það sem rekja má til nálæggra mýra. Nú er það fjárrí lagi að hægt sé að alhæfa á þennan hátt, því oftast eru mómýrar aðeins lítt hluti lónbotnanna.

Eigin setmyndun:

Rannsóknir hafa verið gerðar á vötnum í svipuðu gróðurlendi og breiddargráðu í Kanada og lónin sem voru til umræðu hér að framan. Plöntusvif í þeim spannar vítt svið, bæði mun meira og minna en í umræddum lónum, byggt á blaðgrænumælingum, að meðaltali um 5 mg/m^3 . Í vötnunum er frumframleiðsla plöntusvifs að meðaltali um 100 g C/m^2 á ári (Schindler 1972). Það er svipað og í Þingvallavatni (Pétur M. Jónason 1992). Úr því vatni eru til tvöskonar mælingar og útreikningar á setmyndun. Með beinum mælingum á setþykknun milli aldursgreindra öskulaga fann Hafliði Hafliðason (1992) að árlega svaraði setmyndun á árunum 1918-1983 til bindingar um 10 g C/m^2 á ári. Þar sem þessi nettóþykknun verður á um helmingi botnsins reiknast setmyndun vera að meðaltali um 5 g C/m^2 á ári þegar henni er jafnað á allt yfirborð vatnsins. Hafliði gerir ekki greinarmun á áfoki og eigin setmyndun vatnsins, en það getur skýrt mismun í mati hans og Ebbe Lastein (1983) á bindingu kolefnis í setinu. Sá síðarnefndi mat kolefnisbindingu í seti vatnsins um 3 g C/m^2 á ári. Hann byggði á nettóþykknun, svipað og Hafliði, en útreikninga sína byggði hann á mælingum á lífrænu efni, sem var á leið til botns, og mælingum á yfirborðsseti í rannsóknnum 1979. Þingvallavatn er mun dýpra og stærra en vötnin í Kanada og skv. mælingum Lastein's er rotnun mjög hröð á meðan lífrænu leyfarnar eru að setjast til, enda er kolefnisinnihald sets í Þingvallavatni mun lægra en algengt er í grynnri og næringarríkari vötnum.

Þar sem ég hef ekki rekist á beinar mælingar á bindingu kolefnis í seti vatna á þeim slóðum í Kanada, sem lónin og umrædd vötn eru, leyfi ég mér að álykta til bráðabirgða, að setmyndun sé í réttu hlutfalli við framleiðni. Framleiðni sem nemur 100 g C/m^2 á ári og lífræni plöntusvifs með 5 mg/m^3 af blaðgrænu (chl a) samsvari þannig setmyndun sem nemur 5 g C/m^2 . Þá hef ég tekið tillit til athugasemda í niðurlagi fyrri málsgreinar.

3. Vöktunarrannsóknir á lónum í La Grande-kerfinu

Á vegum Hydro-Quebec hefur reglulega verið fylgst með vatnsgæðum í lónum í La Grande virkjunarkerfinu frá árin 1978 (Schetagne 1994). Í grein Schetagne er fyrst og fremst fjallað um þá þætti sem hafa tekið breytingum á tímabilinu, en mun fleiri efni hafa verið mæld en hér er sagt frá. Virkjunarkerfið er á milli 52. og 55. °N. Loftslag er kalt meginlandsloftslag, meðalhiti um -4° C. Vatnafarið einkennist af miklum vorflóðum af völdum snjóbráðar, minnkandi rennsli eftir því sem líður á sumarið, miklum haustrigningum og lágrennsli um veturinn, sem hefst í nóvember og stendur út maí. Vatnið er tært, fátækt af steinefnum og næringarefnum, þ.e. næringarsnautt (oligotrophic).

Rannsóknirnar náðu til þriggja lóna (La Grande 2, Opinaca og Caniapiscou). Til að fá gögn til samanburðar við lónin hófst reglubundin sýnataka í vötnum á svæðinu 2 árum áður en byrjað var að fylla lónin. Sýni voru tekin árlega þá og fyrstu árin eftir að framkvæmdum lauk en síðan á 3-4 ára fresti. Á fyrra tímabilinu voru sýni tekin tvisvar í mánuði yfir sumartímann (júní-október) og fjórum sinnum að vetri (nóvember-maí). Á seinna tímabilinu voru mælingar framkvæmdar þrívægis á hverju ári; í lok vetrar, eftir blöndun vatnsins að vori og yfir sumarið.

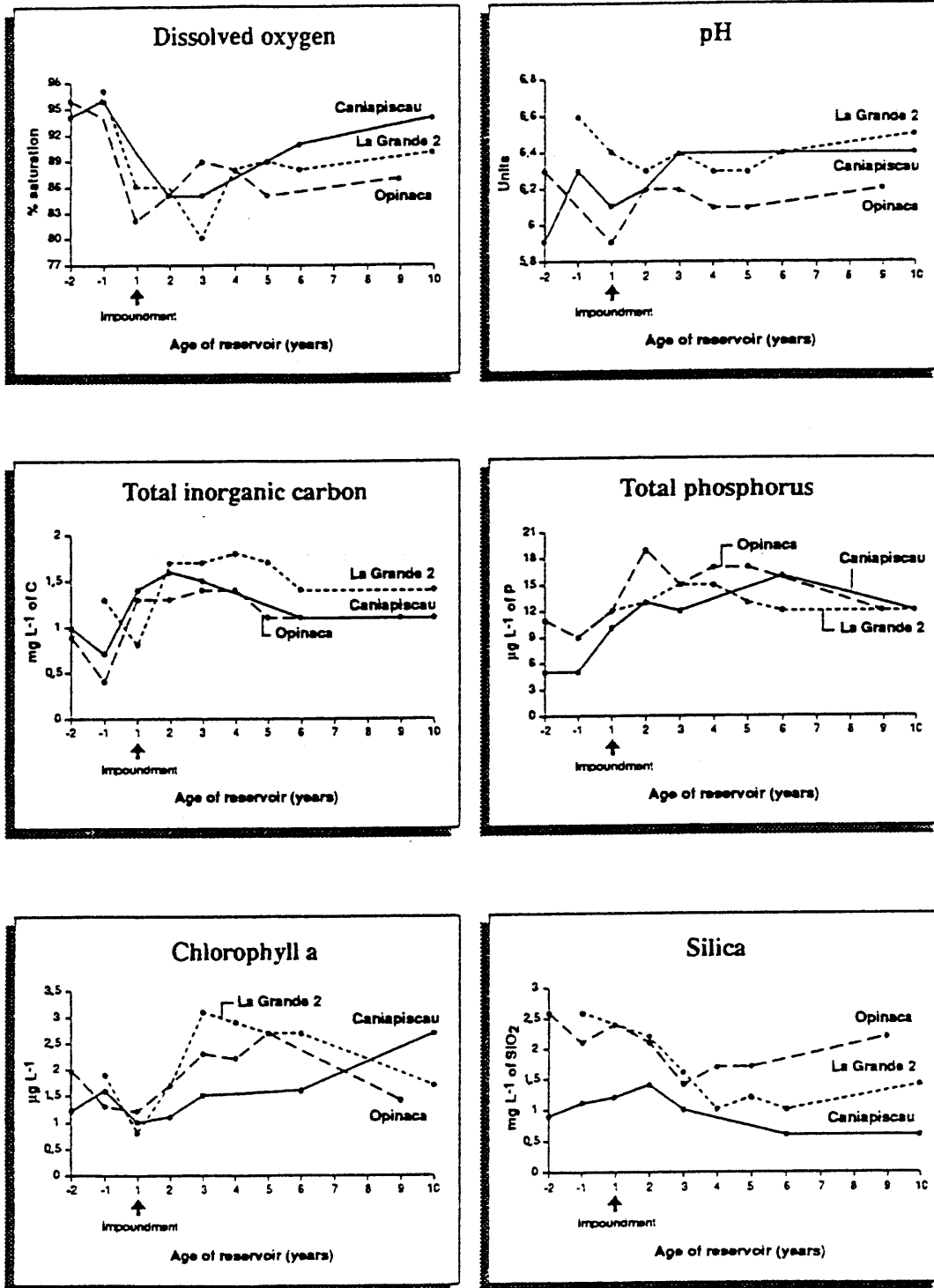
Á fyrra tímabilinu var pH og súrefni mælt í vatnssúlunni frá yfirborði til botns, og sýni til mælinga tekin frá yfirborði til 10 m dýpis og í neðsta metra vatnssúlunnar. Efstu 10 m samsvara þeim hluta vatnssúlunnar þar sem meginíð af frumframleiðni plöntusvifs fer fram (euphotic zone). Auk sýna til rannsókna á plöntu- og dýrasvifi voru eftirfarandi þættir/efni mæld reglulega: pH, járn, mangan, næringarefni (fosfór, ammoníum, ólífrænt kolefni og kísill) og blaðgræna. Á síðari tímabilinu voru eftirtalin þættir/efni mæld: súrefni, pH, fosfór, ólífrænt kolefni, kísill og blaðgræna.

Það sem fyrst og fremst gerist þegar gróðurlendi er sökkt undir vatn er að lífrænt efni byrjar að rotna. Því fylgja aukin ólífræn kolefnissambönd og útlæði steinefna og næringarefna, en styrkur súrefnis lækkar (mynd 2). Aukning verður í öllum næringarefnum nema kísli. Kísill er væntanlega fremur líftill í mómýrunum og ekki þess að vænta að styrkur hans aukist eftir myndun lónanna. Reyndin var sú að styrkur kísils minnkar verulega í byrjun, sem tengist vexti kísilþörungum. Plöntusvif tvöfaldast í vatninu í byrjun. Sex til átta árum eftir myndun lónanna sækir styrkur allra þessara efna í svipað far og var í upphafi. Eina undantekningin er í Caniapiscou-lóninu. Plöntusvif tekur þar nokkru seinna við sér en í hinum lónunum og er enn að aukast 10 árum eftir myndun lónsins og jafnframt lækkar styrkur kísils jafnt og þétt allan tímann.

Súrefnismettun er minnst í lok vetrar þegar minnst hreyfing er á vatni og blöndun tregust. Mettun súrefnis var frá 0-6% við botninn en kemst upp í 70-90% við blöndun vatnsins á vorin. Aðeins um 20-30% af rúmtaki lónanna var minna en 50% mettað súrefni í lok vetrar, og aðeins lítið brot þess alveg súrefnisfírrt (anoxic).

3.1 Ályktanir

Auðrotnanlegt lífrænt efni er ekki meira en svo að það tekur ekki nema 2-5 ár að kreista úr því meginíð af því sem getur losnað í tveimur af lónunum. Í hinu þriðja (Caniapiscou) er útlosun efna mest á 6. til 10. ári frá því að byrjað var að fylla það. Skýringarnar eru taldar geta verið eftirfarandi: Það tók hálf til eitt ár að fylla fyrrnefndu lónin, en 3 ár að fylla hið síðastnefnda. Flatarmál þess í hlutfalli við rúmmál er 4-5 sinnum meira en hinna og ennfremur er viðstaða vatns í því 29 mánuðir á móti 4-6 í hinum fyrrnefndu.



Mynd 2: Þróun nokkurra mikilvægra vatnalíffræðilegra þátta sem tengjast rotun lífrænna leifa eftir að þurrlendi hefur farið undir vatn (meðaltal mælinga í efstu 10 m vatnssúlunnar). (Evolution of the main water quality parameters linked with the decomposition of flooded organic matter in the photic zone (ice free period) of the La Grande Complex reservoirs (Schetagne 1994).

4. Mat á áhrifum tveggja lóna í Quebecfylki

4.1 Forsendur

Hér verður fjallað um útreikninga á gróðurhúsaáhrifum tveggja lóna við Hudsonflóa í Quebec (Dubeau o.fl. 1995). Í þessum reikningum er metið hve mikið af eldsneyti er notað til framleiðslu véla og rafbúnaðar og til mannvirkjagerðar og tekið tillit til þess hve mikið af álagsorku er framleitt með eldsneyti. Eldsneytisorkuver eru að meðaltali notuð minna en 200 klst. á ári, og framleiða minna en 0,5% af raforku sem seld eru frá þessum orkufyrirtækjum. Þetta hlutfall er hærra en á Íslandi, en hér hefur þetta hlutfall ekki farið yfir 0,2% síðan byggðalínan var tekin í notkun.

Í þessari úttekt er byggt á ýmsum rannsóknum, mælingum og tilraunum sem hafa verið gerðar á lónum í Quebec, m.a. rannsóknum sem greint er frá í 2. kafla. Samkvæmt þeirri úrvinnslu sem hér er notuð er talið að meðallosun frá viðkomandi miðlunarlónum sé um 80 g koltvfoxíðgildi/m² á ári í 50 ár, þ.e. 4 kg/m² yfir allt tímabilið.

Í samantekt um heildarniðurstöður rannsókna segir m.a.:

- Lífrænar leifar rotna mjög mismunandi hratt. Lágur hiti veldur því að rotnun er almennt hæg, t.d. hafa kafarar víða fundið tré, trjágreinar og lífrænan jarðveg sem hefur geymt furðuvel í meira en 50 ára gömlum lónum. Lauf rotnar t.d. hratt en lignin-keðjur og þessháttar rotna mjög treglega.
- Tilraunir með jarðvegskjarna úr botni lónanna í rannsóknastofu benda til að mjög lítið rotni úr jarðvegi neðan 10 cm dýpis.
- Losun metans hefur ekki mælst meiri en 1% af heildarþyngd gróðurhúsalofttegunda.
- Lögungun lónanna skiptir miklu máli. Hlutfall metanlosunar af heild er minni í djúpum lónum en grunnum.
- Hraði rotnunar er mestur á 2. ári eftir fyllingu lónanna. Rotnun jarðvegsins fjarar smám saman út, og er farin að nálgast náttúruleg gildi u.þ.b. 10 árum eftir fyllingu lónanna. Einstakar mælingar á 2. ári eftir fyllingu hafa verið allt að 400 sinnum hærra en náttúruleg gildi. (Rannsóknir Schetagne (1994) sem greint er frá hér að framan (3. kafli), benda til að útstreymi næringarefna og þar af leiðandi aukning plöntusvifs geti átt þar hlut að máli).
- Af heildarniðurstöðum nýjustu mælinga á losun gróðurhúsalofttegunda er ályktað að heildarlosun umræddra lóna sé um 4 kg/m² á 50 ára tímabili.

Athugasemdir: Mér virðist að hér sé ekki tekið tillit til þess hvort kolefni losnar eða binst í mómyrum. Það getur átt sér þá eðlilegu skýringu að mómyrar vegi lítið í þessu tilviki, því að í athugasemdum er þess getið að í einu af lónunum teljist mómyrar aðeins þekja 2-3% af gróðurlendinu. Eins og segir í 2. kafla eru hægvaxta barrskógar ríkjandi á þessum slóðum. Séu þeir í jafnvægi er binding og losun einnig í jafnvægi og gróðuhúsaáhrif engin. Barrskógarnir eru almennt taldir binda nokkuð af kolefni, en Rudd o.fl. (1993) telja að skógareldar jafni það út. Ef mómyrar þöktu 2,5% þess lands sem fór undir vatn, vóg losun mómyranna aðeins 2,5% af 100, eða 2,5 g/m² á ári af koldíoxíð-gildi jafnað á allt lónið. Ef mómyrar hefðu þakið 10% af lónstæði yrði samsvarandi tala og áður getur um 10 g/m².

Fram hefur komið að framleiðsla plöntusviðs er þó nokkur í þessum lónum ekki síður en í náttúrulegum vötnum. Hér að framan (3. kafli) er minnst á niðurstöður rannsókna á náttúrulegum vötnum á þessum slóðum. Ég reyndi að átta mig á líklegri setmyndun með því að bera saman þessi vötn og Þingvallavatn. Í þessum náttúrulegu vötnum er meðalstyrkur blaðgrænu, sem er mælikvarðai á plöntusvið um 5 mg/lm^3 . Í rannsóknum á nokkrum vötnum í lónstæðum (3. kafli) var meðalstyrkur blaðgrænu um 1,5 og jókst í u.þ.b. 3 mg/lm^3 á fyrstu árunum eftir að lónin voru mynduð. Styrkurinn sótti aftur í sama farið og hann var fyrir fyllingu lónanna eftir nokkur ár. Ef menn jafna áhrifum lónanna á 50 ár, veða þessi ár sem plöntusviðið tvöfaldaðist ekki sérlega mikið, og til þess að jafna út tölur getum við sagt að meðalstyrkur blaðgrænu í lónunum sé nærri 2 mg/lm^3 yfir allt tímabilið. Ef vötn sem mælast með 5 mg/lm^3 af blaðgrænu að meðaltali binda um 5 g Clm^2 í seti, þá er líklega ekki fjærri lagi að álykta að vötn með 2 mg/lm^3 af blaðgrænu setji af sér talsvert minna set, t.d. 2 g Clm^2 á ári, en það gæti svarað til um 8 g/lm^2 af koltvíoxíði á ári.

Ef bornar eru saman niðurstöður af vangaveltum í tveimur fyrri málsgreinum sést að fundin eru sæmleg rök fyrir því að taka hvorki tillit til þess að lónin stöðva bindingu/losun kolefnis í gróðurlendum sem lónin flæða yfir, né nýrrar setmyndunar í lónunum. Ástæðan er sú að þarna munar heilli stærðargráðu, og samtala þeirrar losunar sem stöðvuð var og eigin setmyndunar er innan skekkjumarka í þessum útreikningum.

Ekki kemur glögg fram hvernig höfundar komast að niðurstöðu um hvaða tölu eigi að nota til að áætla gróðurhúsagasmýndun í umræddum lónum. Á vegum Hydro-Quebec hafa farið fram mælingar og tilraunir í mörg ár, þar sem menn hafa m.a. fundið út að áhrifin þróast eftir svonefndu pseudo-Lorenz ferli. Áhrifin ná háamarki á 2. ári og eru farin að nálgast náttúruleg gildi eftir 10 ár. Flestar mælingar hafa verið gerðar á þessu fyrsta 10 ára tímabili. Ef menn hafa komist að því að losun gróðurhúsalofttegunda jafngildi u.þ.b. 200 g/lm^2 á ári af koltvíoxíði á fyrstu 1-2 áratugunum eftir myndun lónanna, er auðvelt að skýra að þegar jafnað er á 50 ár sé miðað við mun lægra meðaltal, þ.e. 80 g/lm^2 á ári ($200:2,5$), og yfir 50 ára tímabil jafngildir það 4 kg/lm^2 .

4.2 Gróðurhúsaáhrif vatnsorkuvera

Ef bera á saman gróðurhúsaáhrif af framleiðslu raforku með vatnsorku og eldsneyti þarf að umreikna áhrifin á sambærilega einingu, þ.e. orkuframleiðslu.

Dubeau og félagar reikna heildarlosun gróðurhúsalofttegunda í lónum tveggja stórra vatnsorkuvera í Quebec til u.þ.b. 10.000 tn/TWh á ári (tafla 2).

Tafla 2: Áætluð árleg losun gróðurhúsalofttegunda (GHG) frá tveimur lónum norðarlega í Quebec í samanburði við stærð virkjunar.

Vatnsorkuver	Flatarmál lóns km^2	Flætt gróðurl. km^2	Uppsett afl MW	Árleg framl. TWh	Flætt land km^2/TWh	Losun CO2 tonn/TWh
Great Whale	3.500	1.800	3.200	16,2	216	8.800
La Grande	15.900	11.500	15.700	89,3	178	10.300

Gróðurhúsaáhrifin eru háð því hve mikið gróðurlendi flæðir. Í vatnsorkuverum skiptir því verulegu máli hve mikið land flæðir miðað við stærð orkuvers. Ef mikið land er látið flæða fyrir litla orkuframleiðslu geta gróðurhúsaáhrifin orðið veruleg, jafnvel samanborið við brennslu lífrænna orkugjafa. Talsvert af ágreiningi manna á meðal á rætur að rekja til þess hvaða dæmi um vatnsorkuver eru höfð til vitnisburðar.

Til viðbótar losun úr lónunum áætla þeir að á byggingartíma hafi losnað koltvíoxíð sem jafngildir um 3.600 tn/TWh á ári og vegna keyrslu olfuorkuvera (0,5%) um 3.600, eða samtals um 17.000 tn/TWh á ári (tafla 3).

Það mat sem liggur til grundvallar tölum í töflu 2 er byggt á niðurstöðum beinna mælinga í La Grande-vatnakerfinu. Til þess að hafa vaðið fyrir neðan sig birta þeir Dubeau og félagar annað fhalddssamara mat, sem byggir á því að mat á metanlosun er tvöfaldað, gert er ráð fyrir að helm-ingur alls kolefnis sem bundið er í efstu 20 cm jarðvegsins rotni og yfirgefi vatnið, þrátt fyrir að beinar mælingar gefi annað til kynna. Þetta endurskoðaða mat þrefaldar losun gróðurhúsaloft-tegunda í koltvíoxíðgildum frá lónunum. Í þessu mati er gert ráð fyrir 50 ára líftíma virkjan-anna í stað 100 ára (sjá 7. kafla). Ef gert er ráð fyrir 100 ára líftíma í stað 50 ára sé ég ekki betur en að þær tölur sem gefnar eru upp í töflu 2 gildi í stórum dráttum fyrir fhalddssamt mat á gróðurhúsaáhrifunum, að því gefnu að losun gróðurhúsalofttegunda sé að engu orðin á 50 árum, þ.e komin í jafnvægi við umhverfið (7. kafli).

Tafla 3: Samanburður á gróðurhúsaáhrifum mismunandi aðferða við raforkuframleiðslu; á 50 ára líftíma vatnsorkuvera (Dubeau o.fl. 1995).

Orkuver	Nýtni %	Losun CO ₂ -fg. tn/TWh(a)	Hlutf.
Vatnsorka		17.200	1
Gasorkuver	45	475.200	28
Olfuorkuver	35	828.000	48
Kolaorkuver	35	1.033.200	60

Endurskoðað fhalddssamt mat gæfi um 20.000 tn/TWh að meðaltali á 100 ára tímabili í stað 17.200 að meðaltali yfir 50 ára tímabil.

Hlutfallstölur fyrir eldsneytisorkuverin lækka verulega, þ.e. nýtnin eykst ef þau eru einnig rek-in sem varmaorkuver fyrir fjarvarmaveitur. Fyrir 75% nýtni lækkar hlutfall fyrir gas- og olfu-orkuver í 19 og 22.

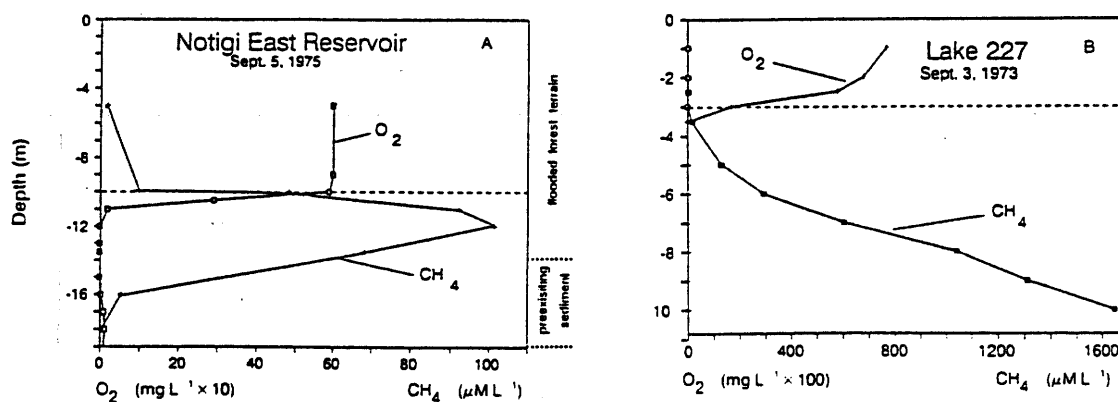
4.3 Önnur dæmi og athugasemdir

Í erindi á ráðstefnu Verkfræðingafélags Íslands og Framtíðarstofnunar um gróðurhúsaáhrif í nóvember 1997 studdist Jón Haldánarson, efnaverkfræðingur hjá Járnblandifélaginu við grein í New Scientist frá því í maí 1996, eftir Fred Pearce. Í þessari grein er fyrst sagt frá vatnsorku-veri á Amazona svæðinu. Þar var 3.100 km² árdal sökkkt undir vatn. Ekki þótti svara kostnaði að höggva og nýta skóginn í dalnum og því fór meira en 100 milljónir tn af gróðri undir vatn.

Á fyrsta ári eftir myndun lónsins (1988) var áætlað að það hafi gefið frá sér um 12 milljón tn af koltvíoxíð-ígildi. Árið 1990 var sú tala komin í um 7 milljón tn og um 2 milljónir tn 1995. Spáð er að losunin muni lækka í um 0,5 milljónir tn á 50 árum. Talið er að metanlosun minnki mun hægar en losun koltvíoxíðs, og t.d. er talið að það taki um 500 ár fyrir tré að rotna í loftfirrtu umhverfi. Þetta einstaka dæmi er fjarri því að vera dæmigert, því að það land sem fór undir í hlutfalli við orkuvinnslu er 30 sinnum meira en meðaltal allra vatnsaflsvirkjana í S-Ameríku, og til að setja þetta í samhengi við þekkt dæmi, þá er uppsett afl í virkjuninni aðeins um 250 MW eða álfa og Búrfellsvirkjun.

Fyrir okkur er áhugaverðara að skoða dæmi frá Kanada, eins og hér að framan. Í umræddri grein er vitnað til rannsókna sem vísindamenn við rannsóknastofnun í Winnipeg gerðu grein fyrir í sænska tímaritinu Ambio (Rudd o. fl. 1993).

Rudd og félagar byggðu í aðalatriðum á eftirfarandi rannsóknum. Sú fyrri varðar mælingar í Notigi lóninu í norðurhluta Manitoba. Með greininni fylgir mynd sem sýnir dýptardreifingu í styrk metans og súrefnis, annars vegar í lóninu og hins vegar í stöðuvatni (mynd 3).



Mynd 3: Styrkur súrefnis og metans með dýpi í A) Notigi-lóni norðarlega í Manitoba fylki og B) í vatni 227 norðvestarlega í Ontario fylki í Kanada. Brotna línan markar dýpi á hitaskil. Hægra megin við mynd A að ofan segir að þar hafi skóglendi farið undir vatn og að neðan setbotn vatns sem þar var fyrir (Rudd o.fl. 1993).

Bæði vatnið og lónið eru hitalagskipt og fellur súrefnisstyrkurinn hratt yfir hitaskilin. Þeir félagar leggja út af mismunandi útliti á metanlínuritinu til að leggja mat á einkenni lónsins hvað varðar metanlosun. Í stöðuvatninu eykst metan hratt eftir því sem nálgast botn, en í lóninu er metan hæst rétt undir hitaskilunum en lækkar mjög hratt á örfárra metra bili nokkrum metrum yfir botni. Þennan mismun skýra þeir þannig að metan losni miklu hraðar þar sem land hafði nýlega flætt (yfir 16 m dýpi) heldur en yfir gamla setbotninum neðan 16 m dýpis. Ennfremur endurspeglar útlit línuritsins þá staðreynd að láréttur flutningur efna er mun hraðari en lóðréttur. Með þetta í huga mætti nota heildarstyrk metans skv. línuritinu að viðbættu mati á lóðréttum flutningi upp í gegnum hitaskilin til að áætla hve mikið lónið framleiddi af metan. Út frá þessu áætluðu þeir félagar að lónið hefði framleitt 7,4 g/m² það árið af metani.

Mómýri sem hafði farið undir vatn var annað viðfangsefnið sem þeir félagar lögðu út af. Eftir því sem orðalagið gefur til kynna (*from the surface of ponds that form naturally on peatlands*)

er ljóst að þeir hafa verið að mæla útstreymi úr botni, þ.e. að segja frá yfirborði tjarna í mýri sem fór undir vatn. Þarna fundu þeir há gildi, sem þeir töldu jafngilda losun 15-30 g/m² á ári af metani og 450-1800 g/m² á ári af koltvíoxíði.

Út frá þessum tölum áætluðu þeir að losun úr lónum næmi 3,9-7,7 g/m² á ári af metani á móti u.þ.b. 1 g/m² sem voru niðurstöður margra ára rannsókna á vegum Hydro-Quebec (tafla 1), og 190-200 g/m² á ári af koltvíoxíði, sem er svipað og í rannsóknum Hydro-Quebec (140-220). Umbreytt í koltvíoxíð ígildi er áætlun Rudd og félaga 50-100% hærri en það sem fengist hefur með beinum mælingum á vegum Hydro-Quebec. Mat Rudds og félaga fær nokkurn stuðning af rannsóknum á finnskum lónum (5. kafli). Hins vegar verður að hafa í huga að botngerð og dýpi eru svo ráðandi þættir um losun metans að allur samanburður verður að taka mið af aðstæðum.

Mælingarnar á Notigi-lóninu voru gerðar á 2. ári eftir fyllingu, en það er einmitt það ár sem metanlosun er í hámarki.

Við útreikninga sína á gróðurhúsaáhrifum byggðu Rudd og félagar auk ofantalinna mælinga á nokkuð almennum forsendum. Meginforsendur voru þær að 2/3 gróðurs og jarðvegs myndu rotna en mun minna af trjám og ennfremur að 1/10 af kolefninu myndi losna á forni metans. Í þeim rannsóknum sem sérfræðingar á vegum Hydro-Quebec hafa stundað um árabíl hefur metanlosun aldrei mælst meiri en 1% af styrk koltvíoxíðs (g/m² á ári), hvað þá eitthvað nærri 10%. Þessi ágreiningur hlýtur fyrst og fremst að stafa af aðferðinni sem menn hafa til að nálgast mat á losun og mismunandi aðstæðum. Beinar mælingar á losun um yfirborð lónanna eru að öðru jöfnu marktækari en óbeinar mælingar og flóknir útreikningar. Lögum lónskálar skiptir einnig verulegu máli, og þá helst hvort grunnt er á undirlag, t.d. mómyrar-botn, eða aðra þá botngerð, sem líkleg er til að vera uppspretta metangass. Í djúpum lónum og þar sem grunn lón eru dýpst virðist mestu skipta hve mikið er af auðrotnanlegum gróðurleyfum og jarðvegi, vegna þess að meginíð af því metani sem myndast oxast í koltvíoxíð áður en það fer úr vatninu.

Annað sem hefur verið gerð athugasemd við er að Rudd og félagar notuðu stuðulinn 60 til að veða áhrif metans samanborið við koltvíoxíð, í stað 21 sem er almennt notað nú að tillögu IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

5. Mat á áhrifum tveggja lóna í Finnlandi

5.1 Beinar mælingar

Árin 1994 og 1995 voru gerðar mælingar á losun gróðurhúsalofttegunda í tveimur lónum í Kemijoki vatnakerfinu í N-Finnlandi (Hellsten o.fl. 1996). Lokka (417 km²) var myndað 1967 á landi sem var 80% mómýri. Porttipahta (214 km²) var myndað 1970 á landi sem var að mestu skógi vaxið (50%). Fimm athugunarsvæði (50x50 m) voru í Lokka, en fjögur í Porttipahta. Aðferðir voru svipaðar og í kanadísku rannsóknunum, og megináhersla lögð á beinar mælingar á losun um yfirborð lónanna, en einnig var mælt í vatnssúlunni frá botni og uppúr. Að auki voru gasbólur mældar. Það var einnig reynt í kanadísku rannsóknunum en án árangurs. Auk þess voru sýni tekin til mælinga á botngerð.

Mælingarnar náðu til þess tíma sem lónin voru íslaus (150 dagar), og var rannsóknartímanum skipt í þrennt; 1) eftir ísabrot (16 dagar), 2) tímabil vorhámarks í plöntusvifi (7 d) og 3) það sem eftir var tímans fram að því að lónin lagði (127 dagar). Nánast allt metan losnaði á fyrsta tímabilinu og einnig langmest af koltvíoxíði. Tvínituroxíð var oftast ómælanlegt en það sem mældist kom nær allt á fyrsta tímabilinu (95%). Ástæða þess hve mikið af losuninni átti sér stað á skömmum tíma eftir að ísinn brotnaði upp kann að vera fólgin í því að skv. athugun Finnanna oxast metan mjög hægt við lágan hita eins og er við ísabrot. Jafnframt vaknar sú spurning hvort Kanadamennirnir hafi náð mælingum strax eftir ísabrot, þ.e. við mjög lágan hita. Það gæti hugsanlega skýrt hve lítið af metani skilaði sér út í fyrstu mælingunum.

Gróðurfar og jarðvegur í lónskálunum var vel þekkt og með rannsóknum á botngerð var mögulegt að vega mælingarnar miðað við ólíkar botngerðir. Metanlosun var mest í Lokka (1995: 28,5 og 1994: 61,2 g/m² á ári), en 4 g/m² á ári í Porttipahta (1995). Hins vegar var koltvíoxíð losun um tvöfalt meiri í hinu sýðarnefnda. Að koltvíoxíðgildi var losun í Porttipahta um 740 á móti um 1100 g/m² á ári í Lokka 1995, en í Lokka var losunin talsvert hærri 1994 eða um 1680 g/m² á ári. Tvínituroxíð vó í heildina minna en 2% miðað við koltvíoxíðgildi.

5.2 Útreikningar á langtímalosun

Mælingarnar voru gerðar 25-27 árum eftir myndun lónanna, þ.e. löngu eftir að gera má ráð fyrir að mesta losunin hafi átt sér stað, sbr. kanadísku rannsóknirnar. Á fyrstu árum eftir myndun Lokka flutu stórar breiður af dauðum mosa upp, mest 1970 eða 25 km². Árið 1974 flutu um 8 km² upp og 1994 var áætlað að um 1 km² hafi flotið upp. Til þess að lyfta þessum mosabreiðum áætluðu Väisänen o.fl. (1996) að þurft hafi um 7 milljón m³ af gasi. Þetta notfærðu þeir sér til að áætla hve mikið af metangasi hafi losnað á fyrstu árum lónanna.

Finnarnar miðuðu sína útreikninga á heildarlosun frá lónunum við að dreifa henni á 100 ár, en það er sú viðmiðun sem sérfræðingahópur á vegum alþjóða orkuráðsins (IEA) hefur orðið ásáttur um (Gagnon og Vate 1997). Niðurstaðan varð sú að frá Porttipahta lóninu hefði að meðaltali losnað um 720 g/m² á ári og frá Lokka um 1140 g/m² á ári (koltvíoxíðgildi).

Í Kemijoki vatnakerfinu eru alls 19 vatnsaflsvirkjanir sem framleiða um 4,2 TWh/a. Heildarflatarmál lóna er 631 km², þ.e. um 158 km²/TWh. Losun í þessu virkjunarvatnakerfi verður þá 165 g koltvíoxíðg./kWh og fyrir allar vatnsaflsstöðvar í Finnlandi er samsvarandi tala um 70 g koltvíoxíðgildi/kWh (70.000 tn/TWh á ári). Þegar á heildina er litið vega vatnsorkuver þar sem sáralítið land fer undir, þ.e. þar sem stöðuvötn eru notuð til miðlunar, meira en helming af orkuvinnslu vatnsorkuvera.

Athugasemdir: Ekki er að sjá að Finnarnir hafi tekið neitt tillit til þess að mómyrar, sem þöktu þó um 80% af botni Lokka-lónsins, hafi áður losað metan út í andrúmsloftið sem e.t.v. var umfram það sem þær bundu. Samkvæmt Kettunen o.fl. (1996) mældist metanlosun í mómyrum í N-Finnlandi um 18 g/m² á ári, sem er meira en tvöfalt hærra en flestir aðrir hafa mælt í mómyrum á norðlægum slóðum (sjá töflu 4 í 7. kafla). Þegar litið er til þess að 80% af botni Lokka var mómyri, vega mómyrar a.m.k. 44% af heildarflatarmáli finnskra lóna (0,8x4121754), e.t.v. um helming.

6. Heildarsýn á gróðurhúsaáhrif vatnsaflsvirkjana

Þótt nokkuð hafi verið fylgst með framvindu lífrkis og vatnsgæða í miðlunarlónum vatnsaflsvirkjana víða um heim, gáfu menn lengi vel ekki mikinn gaum að hugsanlegum gróðurhúsaáhrifum. Það var tekið sem gefið mál að þau væri sáralstíll miðað við raforkuframleiðslu úr eldsneyti. Það var ekki að ráði fyrir en Rudd o.fl. (1993) lögðu fram útreikninga sem gátu bent til að þessi áhrif hefðu verið grófllega vanmetin að umræðan tók kipp. Helstu andsvörin komu frá Hydro-Quebec í byrjun eins og getið er hér að framan, enda voru þeir hvað fremstir í rannsóknum á þessu sviði og voru í raun tilbúnir með fyrstu niðurstöður ítarlegra rannsókna þegar þessi umræða hófst. Auk þeirra gátu Finnar fljótlega lagt fram beinar rannsóknarniðurstöður til þessara umræðna.

Að frumkvæði alþjóða Kjarnorkustofnunarinnar (IAEA: International Atomic Energy Agency) hafa nokkrir vinnuhópar verið starfandi til að gera úttekt á og bera saman gróðurhúsaáhrif mismunandi aðferða við raforkuframleiðslu. Árið 1996 kom hópur sérfræðinga saman í Montreal undir forystu van de Vate til að gera úttekt á gróðurhúsaáhrifum vatnsaflsvirkjana. Gagnon og Vate (1997) hafa tekið saman helstu niðurstöður af því sem þar var lagt fram.

Lögd er áhersla á að líta verði á allar hliðar orkuvinnslunnar, allt frá byggingu orkuveranna til rekstrar á líftíma þeirra. Lagt er til að gengið sé út frá 100 ára líftíma vatnsorkuvera. Sumir hlutar þeirra endast mun lengur en aðrir skemur, og þótt viðhald mannvirkja geti orðið talsvert á tímabilinu, þá vegi það lítið í heildina, einkum ef lítið er til endingartíma lóna. Ef lítið er til gróðurhúsaáhrifa þarf að huga að þremur meginþáttum:

1. Byggingarstig: Stíflugerð, skurðgröftur, gangagerð, smíði vélbúnaðar og stöðvarhúsa o.s.frv.
 2. Rotnun lífmassa og þar af leiðandi losun gróðurhúsalofttegunda.
 3. Framleiðslu toppafls eða varaafis (*thermal backup power*).
1. Notkun eldsneytis á byggingastigi er mjög mismunandi eftir því hverskonar mannvirki eiga í hlut. Bygging jarðstíflna hefur almennt í för með sér mun minni notkun eldsneytis en bygging steyptra stíflna. Við byggingu smárra virkjana er almennt notað mun meira af gróðurhúsalofttegundum en við byggingu stórra virkjana miðað við orkuvinnslu. Einnig hafa virkjanir í fjallalandslagi yfirleitt meiri gróðurhúsaáhrif á byggingastigi en virkjanir á tiltölulega flötu landi. Samkvæmt þeim tölum sem lagðar voru fram í Montreal getur þessi hluti áhrifanna verið afar breytilegur, eða allt frá 100 til 10.000 tn/TWh(a), þegar litið er til einstakra virkjana. Vattenfall metur þessi áhrif í heild til 500-700 tn/TWh(a) í virkjunum sínum í Svíþjóð. Í Swiss er samsvarandi mat um 4.000 tn/TWh(a) (Dones og Gantner 1996), og um 1.800 tn/TWh(a) í virkjunum í La Grande í Quebec (*í yfirliti hér*

að framan í kafla 4.2 þar sem tilgreint er dæmi frá Kanada, var notuð talan 3.600 tn/TWh(a), en þá var miðað við 50 ára líftíma í stað 100). Hæsta gildið 10.000 tn/TWh(a) er fengin fyrir nýlega smávirkjun í Bandaríkjunum.

2. Gert er ráð fyrir að allri losun gróðurhúsalofttegunda sem rekja má til þurrlendis sem flæðir við myndun lóna sé lokið innan 50 ára. Í köflum 4 og 5 voru tilgreind dæmi frá Kanada og Finnlandi um beinar mælingar og útreikninga á gróðurhúsaáhrifum miðlunarlóna. Í tilfalli Kanada var byggt á 50 ára líftíma en í tilfalli Finnlands á 100 ára líftíma. Kanadamenn hafa einnig kynnt útreikninga með mjög varfærum forsendum, og er það notað hér með dreifingu á 100 ár. Niðurstaða af mati á gróðurhúsaáhrifum vatnsaflsvirkjana í Finnlandi reiknað á orkuvinnslu er um 70.000 tn koltvíoxíðgildi/TWh(a), en um 20.000 tn/TWh(a) í Kanada (20 g/kWh; 1.000 tn/TWh jafngilda 1 g/kWh). Þessi mikli munur sem er á mati gróðurhúsaáhrifa lóna í Finnlandi og Kanada byggist fyrst og fremst á mismun á losun metans, sem aftur byggist á háu hlutfalli mómyra í lónskálum finnskra miðlunarlóna miðað við þau kanadísku. Eins og segir í athugasemdum við finnsku tölurnar, þá er þar ekkert tillit tekið til þess að mómyrarnar sem lónskálarnar þekja nú hefðu gefið frá sér verulegt magn metans, líklega um helming þess sem lónin láta frá sér. Ég tel því að finnarnir ofmeti gróðurhúsaáhrif lónanna um helming, etv. af ásettu ráði.

Í Sviss er gert ráð fyrir að metanlosun úr lónum sé sambærileg við það sem losnar úr vötnum í Ölpunum, eða um 4 g/m^2 á ári, sem jafngildir um 400 tn/TWh(a) koltvíoxíðgildi (Dones og Gantner 1996). Í Svíþjóð var losun í Luleåvatnakerfinu áætluð um 18.000 tn/TWh, og var það byggt á að allur lífrænn massi í lónstæðunum rotnaði á líftíma lónanna, og að kolefnisinnihald væri hið sama og í meðalfrjósömum jarðvegi (Svensson 1996).

3. Notkun eldsneytisstöðva til framleiðslu á topp- og varaffi er mjög mismunandi. Sumsstaðar er raforkukerfið hannað miðað við að toppar séu framleiddir með eldsneytisstöðvum en annars staðar eins og t.d. á Íslandi er notkun slíkra stöðva undantekning frá reglunni, oftast um 0,1% eða minna af raforkuvinnslu.

7. Rannsóknir á náttúrulegri losun gróðurhúsalofttegunda

7.1 Votlendi

Flestar rannsóknir sem liggja að baki útreikningum á losun metans frá lónum vatnsaflsvirkjana byggja á rannsóknum á mómýrum og öðru votlendi. Ég tel því gagnlegt að fara stuttlega yfir helstu niðurstöður slíkra rannsókna, jafnvel þótt lítið sé á þeim að græða fyrir okkur hér á Íslandi (sjá dæmi um niðurstöður mælinga á metanlosun í 4. töflu). Mómýrar á borð við þær sem eru útbreiddar í köldu meginlandsloftslagi finnast aðeins í litlum mæli hér á landi, og koma lítið við sögu þar sem gróðurlendi hefur farið undir vatn, eða þar sem slíkt gæti komið til.

7.2 Mikilvægar umhverfisbreytur

Vissar bakteríur hafa sérhæft sig í að vinna kolefni og orku til uppbyggingar lífmassa og súrefni til öndunar úr lífrænum leyfum í loftfirrtu umhverfi. Slíkar bakteríur eru ábyrgar fyrir metanmyndun í mómýrum. Eins og allar lífverur þurfa bakteríur einnig steinefni til uppbyggingar. Metanbakteríur nota lífrænar leyfar og koltvíoxíð auk steinefna og mynda lifandi lífmassa og losa lífrænar sýrur, aðallega mjólkursýrur, og metan. Samanborið við ýmsa aðra loftfirta bakteríustarfsemi er starfsemi metanbaktería nokkuð orkufrek, og því geta metanbakteríur orðið undir í samkeppni við bakteríur sem nota t.d. nitrat eða sulfat sem elektrónugega, þegar þau efni eru ríkulega útilátin.

Losun metans getur verið mjög breytileg í einni og sömu mýri eftir gerð gróðurlenda og jarðvegs, hvaða elektrónugegar eru þar, pH, hitastigi og hæð jarðvatns. Styrkur súrefnis og aðgengi í jarðvatni og við yfirborð ræður því hve mikið af því metani sem myndast oxast í koltvíoxíð áður en það sleppur út í andrúmsloftið. Sá hágróður sem þrífst í meira eða minna vatnsmettuðum jarðvegi flytur súrefni til rótanna um loftæðar og þær geta einnig flutt metan til andrúmsloftsins með loftæðunum. Þetta á t.d. við um starir, sem eru algengar í íslensku votlendi.

Staða jarðvatns, hiti og rakastig skýra breytileika metanlosunar að mestu leyti. Því hærri vatnsstaða og hitastig þeim mun meiri losun.

Tafla 4: Metanlosun í votlendi; samantekt niðurstaðna úr nokkrum rannsóknum.

Svæði	Metanlosun		Heimild
	mg/m ² á dag	g/m ² á ári	
N-Svíþjóð	30	4	Granberg o.fl. 1997.
N-Finnland	150	18	Kettunen og Kaitala 1996.
N-Svíþjóð	50	6	Waddington og Roulet 1996.
Fairbanks, Alaska	25	3	Crill o.fl. 1996.
N-Quebec	65	8	Duchenin o.fl. 1995.
Manitoba	75	9	Babier o.fl. 1995.

Fyrstu mælingar á mýrum hérlendis benda til að metanlosun geti verið talsvert minni hér, en í áðurnefndum mómýrum (tafla 4). Þetta mætti m.a. rekja til þess að pH er almennt tiltölulega hátt í mýrum hérlendis (~5-6) og ekki fjarri kjöraðstæðum baktería sem oxa metan (metanotrophic), þ.e. eyða því áður en það sleppur út (Hlynur Óskarsson 1998).

Samkvæmt mælingum sem hafa verið gerðar að vetri undir ís má búast við að allt að 10% af heildarlosun metans eigi rætur að rekja til rottnar undir ís og snjó yfir 5 vetrarmánuði (Melloh og Crill 1996). Í þeirra mælingum var breytileikinn fyrst og fremst háður snjó, því meiri snjór því hærri losun.

7.3 Þurrlendi

Metanlosun er lítil frá þurrlendi, og þar skiptir mestu máli hvort upptaka kolefnis í gróður leiðir til myndunar jarðvegs umfram það sem rotnar. Ennfremur getur verið umtalsverð binding á metani í þurrlendi. Binding í þurrlendisjarðvegi hefur mælst á bilinu 0,2-4,2 mg/m² á dag (Whalen og Reeburgh 1990, Christensen o.fl. 1997). Binding metans á flatareiningu í þurrlendisjarðvegi er aðeins um 1/10 þess sem nemur losun í mómýrum (4. tafla), en á hinn bóginn er þurrlendi mun útbreiddara en votlendi.

Jarðvegur á Íslandi er talsvert frábrugðin því sem er algengt á norðurslóðum. Þetta á rætur að rekja til eiginleika sem tengjast eldfjallauppruna hans. Slíkur jarðvegur bindur meira kol en gengur og gerist og er einnig fastheldnari á það (Ólafur Arnalds pers.upplýs.). Af þessum sökum er örðugt að yfirfæra niðurstöður rannsókna á jarðvegi í öðrum löndum til Íslands

8. Íslenskar aðstæður

Sem fyrr segir er ekki mikið um að votlendi hafi farið undir miðlunarlón á Íslandi. Í samantekt sem tekin var saman á Orkustofnun (Hákon Aðalsteinsson, 1998; handrit) er talið að um 80-90 km² af votlendi gæti farið undir lón miðað við að allir virkjunarkostir sem taldir eru upp í riti Iðnaðarráðuneytisins (1994), *Innlendar orkulindir til vinnslu raforku*, yrðu að veruleika í fyllingu tímans. Þar af þekja Blöndulón og Eyjabakkalón um 20 km² hvort, eða um helming. Ef undan er skilið votlendi á Eyjabökkum, sem að stærstum hluta flokkast sem mýri eða flói, er meirihluti þessa votlendis deiglendi. Annað gróðurlendi flokkast sem þurrlendi. Íslenskur jarðvegur er sérstæður eins og fyrr getur, en sú sérstaða er hér látin liggja á milli hluta, enda er óvíst að sú sérstaða komi fram í aukinni losun kolefnis.

Til þess að rotnanlegur lífmassi þessara lónstæða gefi frá sér metan eftir að vatni væri hleypt á, þarf að uppfylla mikilvægt skilyrði, þ.e. að stór hluti vatnsins verði súrefnislaus. Það verður að teljast frekar vafasamt í ljósi reynslunnar. Mikilvægt skilyrði þess að metan nái að myndast í lónunum er að súrefni þverri við botn. Þetta gerist árvisst bæði að vetrar- og sumarlagi í vötnum á meginlöndunum, eins og komið hefur fram hér að framan. Ástæðan er sterk hitaskil sem koma í veg fyrir að botn- og yfirborðslög geti blandast. Hitaskilin brotna upp vor og haust og þá endurnýjast súrefni við botninn. Hérlendis eru sterk hitaskil aðeins þekkt í vötnum sem hafa tengsl við sjó og í þeim má rekja þau til mismunar í eðlismassa fersks og salts vatns. Í öðrum vötnum eru hitaskil óþekkt að vetri til, og þar hefur aðeins orðið vart við fremur veik skil skamma hríð að sumri. Þessi fullyrðing byggir á mælingum í Mývatni (Jón Ólafsson 1979), Þingvallavatni (Hákon Aðalsteinsson o.fl. 1992), Þórisvatni (Hákon Aðalsteinsson 1976, byggt á mælingum sem VST gerði fyrir Landsvirkjun) og í Lagarfljóti, en þar hefur hiti verið mældur undanfarin ár (Orkustofnun og Landsvirkjun óbirt). Ástæður þess að ekki myndast hitaskil hérlendis eru þær að hér er það vindasamt og skjóllftið að vötnin ná að kólna niður undir 0 °C alveg til botns áður en þau frjósa. Ennfremur eru sumur hér svalari en á meginlöndunum, þannig að yfirborðslög vatnanna ná aldrei að hitna nægilega hratt áður en vindurinn nær að blanda yfirborðs og botnlögum. Hitafall um 1-3 °C í nokkrar vikur nægir ekki til að valda súrefnisþurrð. Annað sem er mikilvægt er að botnlög vatna hérlendis virðast vera kaldari en 1 °C allan veturinn á meðan hitastig við botn vatna norðarlega á meginlöndunum (50 til 60° N) vskur ekki mikið frá 4 °C allt árið.

Heildarniðurstaðan er sú að jafnvel þótt metan myndist við botn eru mjög litlar líkur á að það nái yfirborði án þess að oxast í koltvíoxíð á leiðinni. Það sem þá skiptir máli er heildarmagn lífrænna efna, jarðvegs og gróðurleifa, sem getur rotnað. Gera má ráð fyrir að í votlendi sé slíkt meira en á þurrlendi, þar sem auðrotnanlegar gróðurleifar rotna líklega nokkuð jafnóðum. Ennfremur er rétt að huga að bindingu kolefnis, því að telja má nokkuð ólíklegt að mikið lífrænt set myndist í jökullónum, a.m.k. ekki á hálendinu, til að vega gegn tapaðri nettóbindingu kolefnis.

Eins og áður hefur komið fram, skiptir verulegu máli hve mikið gróðurlendi flæðir samanborið við orkuvinnslu, þ.e. dreifing gróðurhúsaáhrifa á orkuframléisluna. Samkvæmt yfirliti í töflu 5 fara frá 3 upp í 70 km² gróðurlendis undir vatn miðað við 1 TWh/a orkuvinnslu í mismunandi virkjunum, minnst í Þjórsárvirkjunum og mest í Blönduvirkjun. Tiltölulega lítið gróðurlendi ferri undir virkjun Jökulsár á Brú og mjög lítið við virkjun Jökulsár á Fjöllum.

Tafla 5: Land sem fer undir vatn vegna vatnsaflsvirkjana á Íslandi.

Virkjun/virkjanir	Orkuvinnsla GWh/a	Flætt land km ²	Flætt gróðurl. km ²	Flætt land km ² /TWh(a)	Flætt gróðurl. km ² /TWh(a)
Þjórsárvirkjanir	4800 ²	186	13	39	2,7
Blönduvirkjun	750	69	53	46	70
Alls:	5500	255	66	92	11
Norðlingaölduveita	600	62	17	100	28
Fljótisdalsvirkjun	1300	47	27	36	21
Kárahnúkavirkjun	3000	38	28	13	10
Jökulsá á Fjöllum	4000	78	14	20	4
A-Jökulsá, Skag	1000	40	6	40	6
Allar virkjanir:	40000	1100	380	28	10

¹ 1 TWh = 1000 GWh.

² Í þessari tölu er reiknað með Sultartangavirkjun og Hágöngumiðlun.

Ef við berum þessar tölur saman við tölur frá Kanada og Finnlandi, þá flæða um 160 km² lands per TWh/a vegna allra virkjana við James Bayflóa og 112 km²/TWh(a) við Lawrensfjót, og að meðaltali þekja virkjanir í Kemijoki vatnakerfinu 158 km²/TWh(a). Í þessum samanburði er miðað við heildarflatarmál lands, enda eru viðkomandi landsvæði almennt mun betur gróin en gengur og gerist hérlendis. Það er eingöngu Blönduvirkjun sem kemst nærri þessum viðmiðunum (tafla 5). Í stærstu virkjunar-vatnakerfum Svíþjóðar hafa u.þ.b. 20-50 km² flætt per TWh/a, sem er svipað og hérlendis. Jafnvel þótt hér losnaði eitthvað viðlíka af gróðurhúsalofttegundum á flatarmálseiningu og í Finnlandi og Kanada, sem er fjarri því að vera líklegt, flæðir hér aðeins um 1/10 gróðurlenda á orkuvinnslueiningu miðað við áðurnefnd svæði. Af því og þeim edlis- mun sem er á gróðri og gróðurþekju hér og þar má draga þá ályktun að stærðargráða gróður- húsááhrifa af lónum vatnsaflsvirkjana hérlendis sé um 1 g/kWh á ári (1000 tn/TWh(a)).

Ætla má að gróðurhúsááhrif af byggingu virkjana, þar sem stíflur eru gerðar úr jarðefnum geti verið um 0,1-1 g/kWh(a) ef miðað er við niðurstöður starfshóps IAEA (Gagnon og Vate 1997).

Varafl framleitt með olfu svarar til um 0,1% af heildarorkuframleiðslu landsins, og hefur svo verið síðan 1982. Til þessarar framleiðslu fara um 1000 tn af olfu, og af því hlýst losun um 3200 tn af koltvíoxíði. Það svarar til um 600 tn/TWh(a), sem jafngildir 0,6 g/kWh(a) (Orku- stofnun/OBD).

Jarðhitavirkjanir fullnægja u.þ.b. 5% af orkuþörf landsmanna. Kröfluvirkjun er eina háhita- virkjunin sem framleiðir eingöngu rafmagn. Áætlað er að þar losni um 96 g koltvíoxíð per kWh (Halldór Ármannsson og H. Kristmannsdóttir 1992), eða um 100.000 tn/TWh(a), sem er 20-25% af því sem nútímagasorkuver losa ef ekkert er að gert (sjá töflu 3). Talið er að eftir stækkun orkuversins í Svartsengi muni koltvíoxíðlosun þess samsvara um 200.000 tn/TWh(a). Ljóst er að ef þessar tölur eru dæmigerðar þá yfirskyggir losun koltvíoxíðs frá háhitavirkjunum, sem framleiða raforku, alla aðra losun vegna raforkuframleiðslu.

9. Heimildaskrá

- Bubier, J.J., T.R. Moore, L. Bellisario og N.T. Comer 1995. Ecological controls on methane emissions from northern peatland complex in the zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biochemical Cycles* 9: 455-470.
- Christensen, T.R., A. Michelsen, S. Jonasson og I.K. Schmidt 1997. Carbon dioxide and methane exchange of a subarctic heath in response to climate change related to environmental manipulations. *Oikos* 79: 34-44.
- Dones, R. og Urs Gantner 1996. *Greenhouse gas emissions from hydropower full energy chain in Switzerland*. IAEA Advisory Group Meeting on Assessment of Greenhouse Gas Emissions from full Energy Chain for Hydropower, Nuclear Power and other Energy Sources, Hydro-Quebec Headquarters, Montreal (Canada), March 1996.
- Dubeau, D., A. Chamberland og L. Gagnon 1995. *Hydroelectricity, a tool for sustainable development and reducing atmospheric emissions*. World Energy Council 16th Congress. PS/SRD 4.1 Global Environmental Issues, s. 229-248.
- Duchemin, E., M. Lucotte, R. Canuel og A. Chamberland 1995. Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biochemical Cycles* 9: 529-540.
- Gagnon, L. og J.F. van de Vate 1997. Greenhouse gas emissions from hydropower. The state of research 1996. *Energy Policy* 25: 7-13.
- Gorham, E. 1991. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climate warming. *Ecol. Appl.*, 1:182-195.
- Granberg, G., C. Mikkilä, I. Sundh, Bo. H. Svensson og M. Nilsson 1997. Sources of spatial variation in methane emission from mires in northern Sweden: A mechanistic approach in statistical modeling. *Global Biochemical Cycles* 11: 135-150.
- Hafliði Hafliðason, G. Larsen og G. Ólafsson 1992. The recent sedimentation history of Thingvallavatn, Iceland. *Oikos* 64: 80-95.
- Halldór Ármannsson og H. Kristmannsdóttir 1992. Geothermal environmental impact. *Geothermics* 21: 869-880.
- Hákon Aðalsteinsson 1976. *Þórisvatn, áhrif miðlunar og Köldukvíslarveitu á lífsskilyrði sviðs*. Orkustofnun, OS-ROD 7643; 31 s.
- Hákon Aðalsteinsson, P.M. Jónasson og S. Rist 1992. Physical characteristics of Thingvallavatn, Iceland. *Oikos* 64: 121-135.
- Hákon Aðalsteinsson 1998. Votlendi í virkjunarlónum (í útgáfu).
- Hellsten, S.K., P. Martikainen, T.S. Väisänen, A. Niskanen, J. Huttunen, M. Heiskanen og O. Nenonen 1996. *Measured greenhouse gas emission from hydropower reservoirs in Northern Finland*. IAEA Advisory Group Meeting on Assessment of Greenhouse Gas Emissions from full Energy Chain for Hydropower, Nuclear Power and other Energy Sources, Hydro-Quebec Headquarters, Montreal (Canada), March 1996.

- Hlynur Óskarsson 1998. *Icelandic peatlands: Effects of draining on trace gas release*. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of the University of Georgia. Athens, Georgia 1998.
- Kettunen, A., V. Kaitala, J. Alm, J. Silvola, H. Nykänen og P. Martikainen 1996. Crosscorrelation analyses of the dynamics of methane emissions from a boreal peatland. *Global Biochemical Cycles* 10: 457-471.
- IPCC 1995. Climate change 1995. The science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 572 s.
- Jón Ólafsson 1979. Physical characteristics of Lake Mývatn and River Laxá. *Oikos* 32: 38-66.
- Lastein, E. 1983. Decomposition and sedimentation processes in oligotrophic, subarctic Lake Thingvallavatn, Iceland. *Oikos* 40: 103-112.
- Melloh, R.A. og P.M. Crill 1996. Winter methane dynamics in a temperate peatland. *Global Biochemical Cycles* 10: 247-254.
- Moosavi, S.C., P.M. Crill, E.R. Pullman, D.W. Funk og K.M. Petersen 1996. Control on CH₄ flux from an Alaskan boreal wetland. *Global Biochemical Cycles* 10: 287-296.
- Pearce, F. 1996. Trouble bubbles for hydropower. *New Scientist*, May 1996: 28-31.
- Pétur M. Jónasson, H. Aðalsteinsson og G.St. Jónsson 1992. Production and nutrient supply of phytoplankton in subarctic dimictic Thingvallavatn, Iceland. *Oikos* 64: 162-187.
- Rosa, L.P., R. Schaeffer og I. do Fundo 1994. Greenhouse gas emission from hydroelectric reservoirs. *Ambio* 22: 164-165.
- Rudd, J.W.M., R. Harris, C.A. Celly og R.E. Hecky 1993. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? *Ambio* 22: 246-248.
- Schetagne, R. 1994. Water quality modifications after impoundment of some large northern reservoirs. *Arch.Hydrobiol.Beih.Ergebn.Limnol.* 40: 223-229.
- Schindler, D.W. 1972. *Production of phytoplankton and zooplankton in Canadian Shield lakes*. Í: (eds Kajak & Hillbricht-Ilkowska) Productivity Problems of Freshwaters. PWN Polish Scientific Publishers, Warszawa - Kraków, s. 311-331.
- Svensson, B.S. 1996. *Hydropower and the greenhouse effect: A Swedish perspective*. IAEA Advisory Group Meeting on Assessment of Greenhouse Gas Emissions from full Energy Chain for Hydropower, Nuclear Power and other Energy Sources, Hydro-Quebec Headquarters, Montreal (Canada), March 1996.
- Väisänen, T.S., P. Martikainen, S.K. Hellsten, A. Niskanen, J. Huttunen, M. Heiskanen og O. Nenonen 1996. *Importance of greenhouse gas emissions from Finnish hydropower production compared to other sources of electricity, with the Kemijoki water body as an example*. IAEA Advisory Group Meeting on Assessment of Greenhouse Gas Emissions from full Energy Chain for Hydropower, Nuclear Power and other Energy Sources, Hydro-Quebec Headquarters, Montreal (Canada), March 1996.

- Waddington, J.M. og N.T. Roulet 1996. Atmospheric-wetland carbon changes: Scale dependency of CO₂ and CH₄ exchange on the development topography of a peatland. *Global Biochemical Cycles* 10: 233-245.
- Whalen, S.C. og W.S. Reeburgh 1990. Consumption of atmospheric methane by tundra soils. *Nature* 346: 160-162.