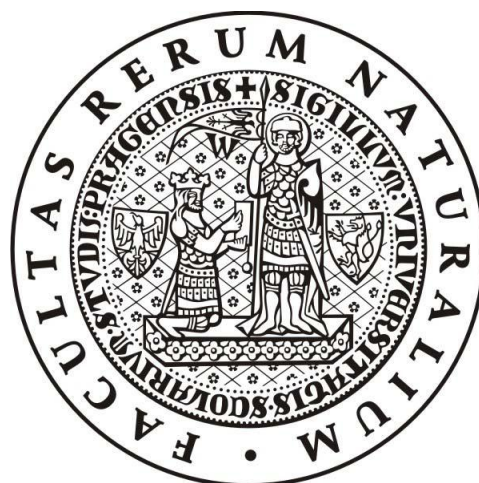


**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Biologie

Studijní obor: Ekologická a evoluční biologie



**Petra Příbylová**

Obohacování Jižního oceánu železem

Iron fertilization of the Southern ocean

Bakalářská práce

Školitel: Mgr. Michal Koblížek, Ph.D.

Garantka: RNDr. Lucie Juříčková, Ph.D.

Praha, 2012

### *Poděkování*

Ráda bych poděkovala zejména svému školiteli Michalovi Koblížkovi a své garantce Lucii Juříčkové za vstřícnost a trpělivost a dále všem, kdo mne při psaní této práce podporovali.

### Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 10.5.2012

Podpis

## Abstrakt

Tato práce shrnuje současnou úroveň znalostí o vlivu železa na růst planktonu ve vztahu ke snižování koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře. V rozsáhlých oblastech Tichomoří a Jižního oceánu je železo limitujícím faktorem pro růst fytoplanktonu. Tato práce je zaměřena na oblast Jižního oceánu, kde chronologicky popisuje přírodní a umělé experimenty, jejichž cílem bylo zjistit možnosti umělého obohacování oceánu železem. Principem umělých pokusů bylo přidání roztok železa do vrchní vrstvy oceánu, které mělo za následek zvýšený růst fytoplanktonu a koncentrace chlorofylu. U přírodních obohacení byla také pozorována reakce planktonu na přísun železa z výstupných proudů (upwellingu). I v těchto případech byl zaznamenán větší přírůstek fytoplanktonu a jeho chlorofylu. V současné době živě diskutovaná možnost velkoplošného obohacování je zatím z důvodu obav z dopadů takového geoinženýrství a nedostatečného poznání zakázána Spojenými národy.

**Klíčová slova:** plankton, Jižní oceán, oxid uhličitý v atmosféře, obohacování železem, výstupné proudy

## Abstract

This thesis summarizes the current knowledge of the effect of iron on the growth of plankton in relation to lowering the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. Iron is a limiting factor for phytoplankton growth in large parts of the Pacific Ocean and the Southern Ocean. This thesis is focused on the Southern ocean, where it chronologically describes natural and artificial experiments, where the objective was to uncover the possibilities of artificial iron fertilization of the ocean. The iron fertilization experiments were based on supplying the upper layer of the ocean with an iron solution, which resulted in an increase in phytoplankton growth and chlorophyll concentration. The reaction of plankton to a natural iron input via upwelling was also observed. In these cases an increase of phytoplankton and chlorophyll was observed. Nowadays, the lively discussed possibility of large-scale fertilization is restricted by the United Nations due to insufficient knowledge and concerns of geoengineering.

**Key words:** plankton, Southern Ocean, carbon dioxide in the atmosphere, iron fertilization, upwelling

# Obsah

1. Úvod .....	5
2. Jižní oceán.....	8
3. Limitace železem.....	10
4. Umělé obohacování oceánu železem.....	12
4.1 SOIREE .....	13
4.2 EisenEx.....	14
4.3 SOFeX .....	15
4.4 EIFEX.....	16
4.5 LOHAFEX.....	18
5. Přírodní obohacování železem.....	20
5.1 CROZEX .....	21
5.2 KEOPS.....	21
6. Perspektivy velkoplošného přihnojování železem .....	22
7. Je to správné?.....	23
8. Závěr.....	25
9. Použitá literatura .....	26

# 1. Úvod

Mořský plankton se skládá z mikroskopických organismů, které jsou pasivně unášeny vodním prostředím. Patří sem viry, bakterie, protista a menší mnohobuněčné organismy. Plankton můžeme také rozdělit dle funkčních skupin. Fytoplankton je tvořen fotosyntetickými organismy obsahující chlorofyl, eukaryotní řasy a prokaryotických sinic (*Cyanobacteria*). V širším slova smyslu do něj řadíme i některé skupiny autotrofních a mixotrofních prvoků: rozsivky (*Bacillariophyceae*) z kmene Heterokontophyta, obrněnky (kmen Dinoflagellata) a kokolitky (*Coccolithophorales*) patřící do kmene Haptofyta. Do zooplanktonu řadíme živočichy a heterotrofní prvoky. Zbylé dvě skupiny, bakterioplankton (s výjimkou sinic) a viroplankton, pro tuto práci nejsou podstatné a nebudou dále zmiňovány.

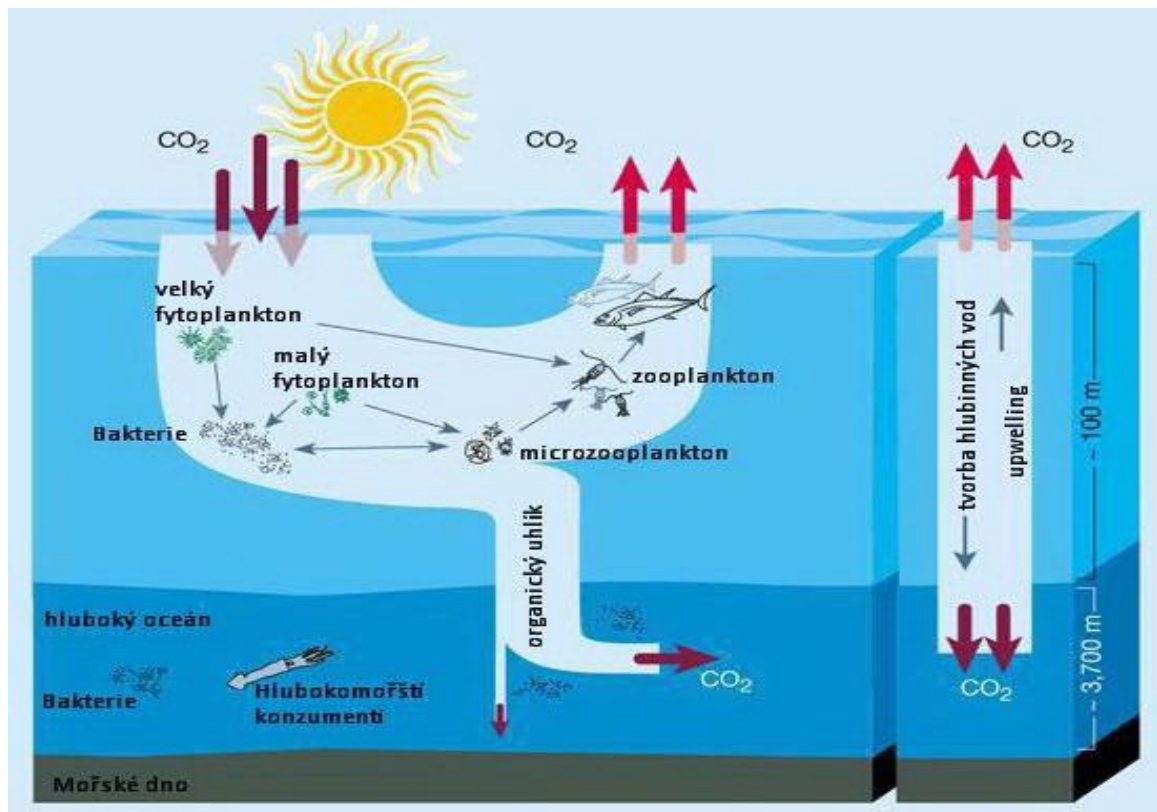
Fytoplankton se může vyskytovat v různých velikostech od pikoplanktonu (0.2-2  $\mu\text{m}$ ) po mikroplankton (20-200  $\mu\text{m}$ ). Aby se mohl udržet v eufotické zóně, horních 100 m kam dosahují sluneční paprsky, musela evoluce přijít s různými vylepšeními. Někteří například vylučují drobné kapičky oleje, jiní mají výrůstky různých tvarů, aby co nejvíce zabránili klesání. Některé skupiny fytoplanktonu vytvářejí pevné schránky tvořené uhličitánem vápenatým (např. kokolitky) nebo oxidem křemičitým (rozsivky).

Mořský fytoplankton tvoří jako primární producent základnu mořské potravní pyramidy. Ačkoliv fytoplankton tvoří pouze 1% fotosyntetizující biomasy, je zodpovědný za zhruba polovinu globální primární produkce (Field et al. 1998). Slouží jako potrava pro zooplankton, který je dále konzumován organismy ve vyšších trofických úrovních (Falkowski 2012). Množství a produkce fytoplanktonu ovlivňuje biomasu a diverzitu ostatních mořských organismů. Určuje například i horní hranici výnosu z rybolovu (Chassot et al. 2010). Miliardy těchto drobných organismů vytvářejí přibližně polovinu kyslíku v naší atmosféře (Falkowski 2012). Stejně jako u terestrických rostlin, fytoplankton potřebuje ke svému růstu dostatek světla a živin. Většina mořského prostředí trpí spíše nedostatkem živin, hlavně fosforu a dusíku, v některých případech též křemíku nebo železa.

První oceánografická měření jsou známa z doby zhruba před stopadesáti lety. Díky nim lze pozorovat neustálé snižování celosvětové koncentrace chlorofylu. Důvodů tohoto snižování může být mnoho. Mohou být spojeny se změnami vertikální stratifikace a upwellingu (Behrenfeld et al. 2006), případně s množstvím prachových částic z pevniny (Paytan et al. 2009) nebo tvorbou mraků a větrem (Gregg et al. 2005). Faktory jako sedimenty

splachované řekami z pevniny (Ware a Thomson 2005) a oceánské proudění mohou také hrát roli ve snižování celosvětové koncentrace chlorofylu (Broecker et al. 1999). Snížený růst fytoplanktonu je způsoben převážně oteplováním povrchové vrstvy oceánů. V tropických a subtropických vodách se navíc teplejší horní vrstva nepromíchává s hlubšími vrstvami, které jsou bohaté na živiny (Boyce et al. 2010). Proto také tyto oblasti nazýváme oceánskými pouštěmi. Postupem času bude mít oteplování oceánů čím dál tím větší vliv na změnu mořských ekosystémů (Richardson a Shoeman 2004).

Mořský fytoplankton silně ovlivňuje klimatické procesy (Murtugudde et al. 2002, cit. dle Boyce et al. 2010) a biogeochemické cykly na naší planetě (Sabine et al. 2004, Roemmich a McGowan 1995). V průběhu fotosyntézy spotřebovává oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ , který se z atmosféry pomocí difúze dostává do biosféry a dýcháním organismů zpět, a tím ovlivňuje zemské klima (Falkowski 2012). Co se však stane s absorbovaným uhlíkem? První možností je, že jej v podobě mořského fytoplanktonu v horních 100 m zkonzumují heterotrofové a jiní živočichové, kteří ho využijí na tvorbu vlastních tkání. Tento proces nicméně vytváří  $\text{CO}_2$ , který může být znovu upotřeben novým fytoplanktonem k růstu. Tedy množství  $\text{CO}_2$  by zůstávalo prakticky neměnné a žádný uhlík by se nedostal k mořskému dnu. Druhou možností je, že mrtvý fytoplankton, heterotrofové a fekální materiál klesne do hloubky více než 500 m a tam je rozložen mikroorganismy. Hluboké chladné vody se jen ojediněle míchají s povrchovými teplými vodami a až za několik století se tedy pomalým hlubokomořským cyklem dostane tato uhlíkem obohacená voda znovu na povrch a  $\text{CO}_2$  zpět do atmosféry. Je ovšem nutné podotknout, že v reálných podmínkách nastávají obě tyto možnosti současně a je velmi náročné určit objem exportovaného uhlíku do hlubin. Druhá možnost popisuje princip biologické pumpy (obr. č. 1), procesu, při kterém je  $\text{CO}_2$  aktivně odstraňováno z atmosféry a ukládáno na stovky let v hlubokém oceánu (Falkowski 2012).

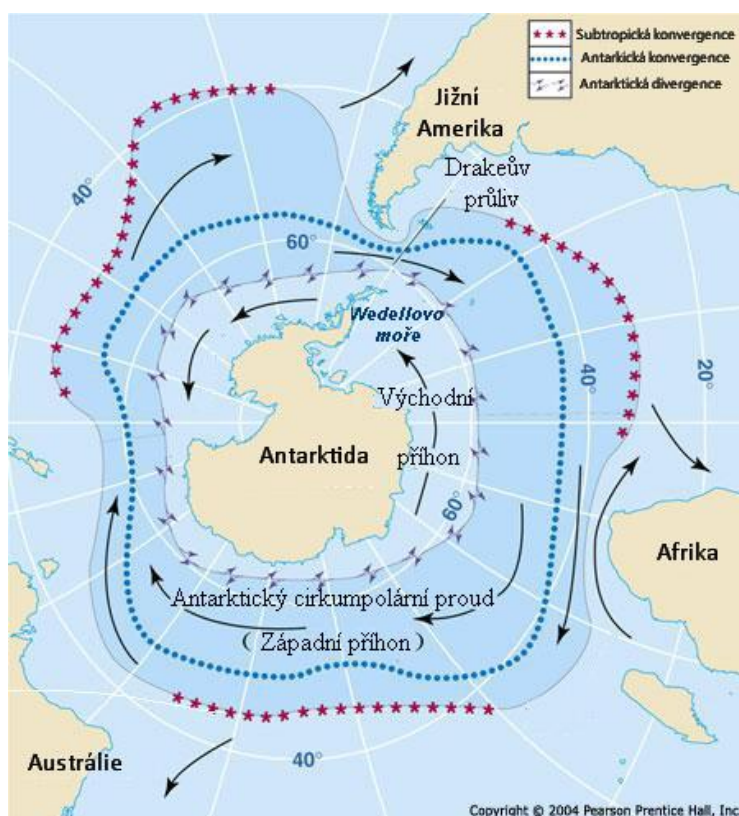


Obrázek 1 Biologická pumpa (Chisholm 2000)

Předpokládá se, že postupující klimatické změny by mohly fungování biologické pumpy nepříznivě ovlivnit. Teplejší voda na povrchu je méně hustá a nepromíchává se s chladnou na živiny bohatou vodou. Teplejší voda tedy zůstává na povrchu, má méně živin a tudíž i méně fytoplanktonu. Dá se očekávat, že jak se bude naše klima oteplovat, bude se snižovat schopnost fixace uhlíku ve světových oceánech (Behrenfeld et al. 2006). Pokud by k tomu došlo, změní se pravděpodobně složení mořských ekosystémů (Richardson a Schoeman 2004), což bude mít vliv na biogeochemické cykly (Henson et al. 2010), výnosy rybolovu (Brander 2007) a koloběh oceánu (Murtugudde et al. 2002, cit. dle Boyce et al. 2010). Zvyšující se teplota oceánů vede taktéž ke snižování globální koncentrace chlorofylu *a*. Nejvíce je to pozorovatelné u tropických a subtropických oblastí, kde jsou živiny omezeny stratifikací (Boyce 2010). Jediné povzbudivé by mohlo být, že se mrazivé vody severního Pacifiku oteplí a zvýší fixaci uhlíku (Falkowski 2012).

## 2. Jižní oceán

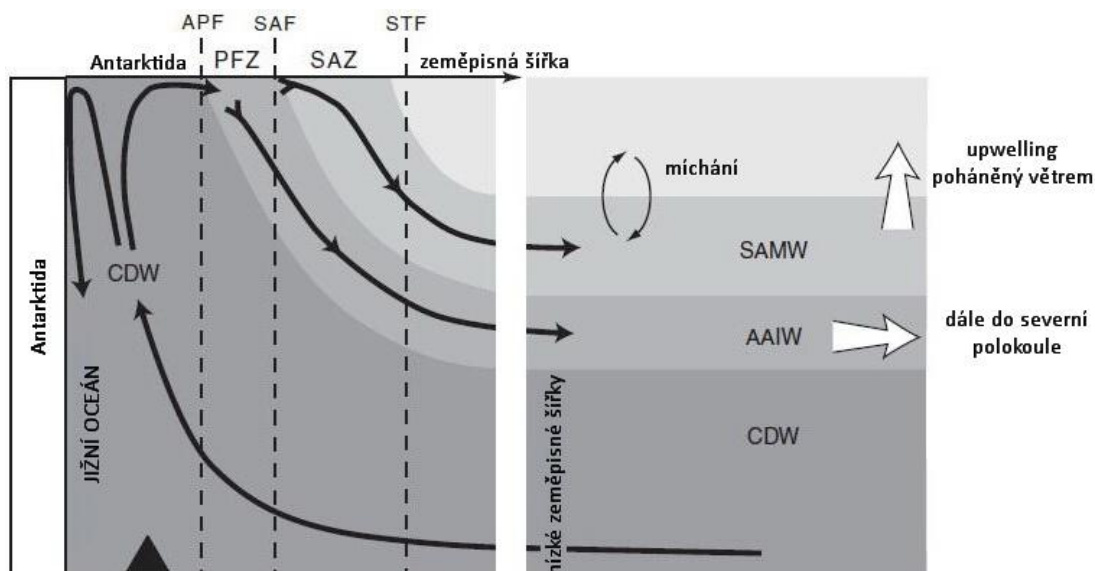
Jižní oceán neboli Antarktický či Jižní ledový oceán byl Mezinárodní hydrografickou organizací formálně zařazen mezi oceány až v roce 2000. Jeho celková rozloha je 20 327 000 km<sup>2</sup>, což ho činí druhým nejmenším na Zemi. Prvenství zaujímá jako nejhlubší oceán s průměrnou hloubkou 4 500 m. Jižní oceán se od ostatních liší tím, že krom Antarktidy v jeho středu není ohraničen pevninou, ale sousedí s Tichým, Atlantským a Indickým oceánem. Jižní oceán se od okolních oceánů liší především vlastnostmi vodní masy, která oblévá Antarktidu. Ta je ohraničena takzvanou antarktickou konvergencí, též známou jako Polární fronta. Tato linie je souběžná se západními větry a prochází středem Antarktického cirkumpolárního proudu (Západní příhon), který vytváří kruh kolem Antarktidy. Tento proud je nejsilnější na světě a směrem na východ neustále transportuje 130 milionů kubických metrů vody za vteřinu (Cousteau 2008).



Obrázek 3 Jižní oceán a systém povrchového proudění kolem Antarktidy. Východní příhon je hnán polárními východními větry od východu na západ. Západní příhon teče okolo Antarktidy od západu na východ ve větší vzdálenosti od kontinentu. Antarktická konvergence a divergence je způsobena interakcemi na hranicích těchto dvou proudů. (Oceanografie, Thurman a Trujillo)



Zeměpisné vymezení Jižního oceánu není zcela ustálené. Pro oceánografy je Jižního oceán vymezen Antarktickou konvergencí. Tato hranice ovšem není pevná a v průběhu času se její poloha významně mění. Z tohoto důvodu se též používá spíše geografické ohraničení, která definuje Jižní oceán jako oblast jižně od 60° rovnoběžky jižní zeměpisné šířky.



Obrázek 4 Vstupní a výstupní vody Jižního oceánu (Anderson et al. 2009)

Jižní oceán je též významnou oblastí pro hlubokomořskou (termohalinní) cirkulaci mořské vody. Jižně od polárního kruhu (APF- *Antarctic polar front*) přináší větrem poháněný upwelling cirkumpolární hlubinné vody (CDW- *Circumpolar deep water*) na povrch. Část tohoto výstupného proudu se přesouvá na jih, ztrácí vzplývavost a vytváří hlubinné vody podél pobřeží Antarktidy. Zbytek výstupného proudu se na hladině pohybuje severně díky převládajícím západním větrům. Část antarktických hladinných vod se smíchává se subtropickými povrchovými vodami a vytváří subantarktické vody (SAMW- *Subantarctic mode water*), které zásobují termoklinu oceánů jižní polokoule. Z nejhustší povrchové vody se stává Antarktická střední voda (AAIW- *Antarctic intermediate water*), která se dostává až severně od rovníku. (Sarmiento et al. 2004).

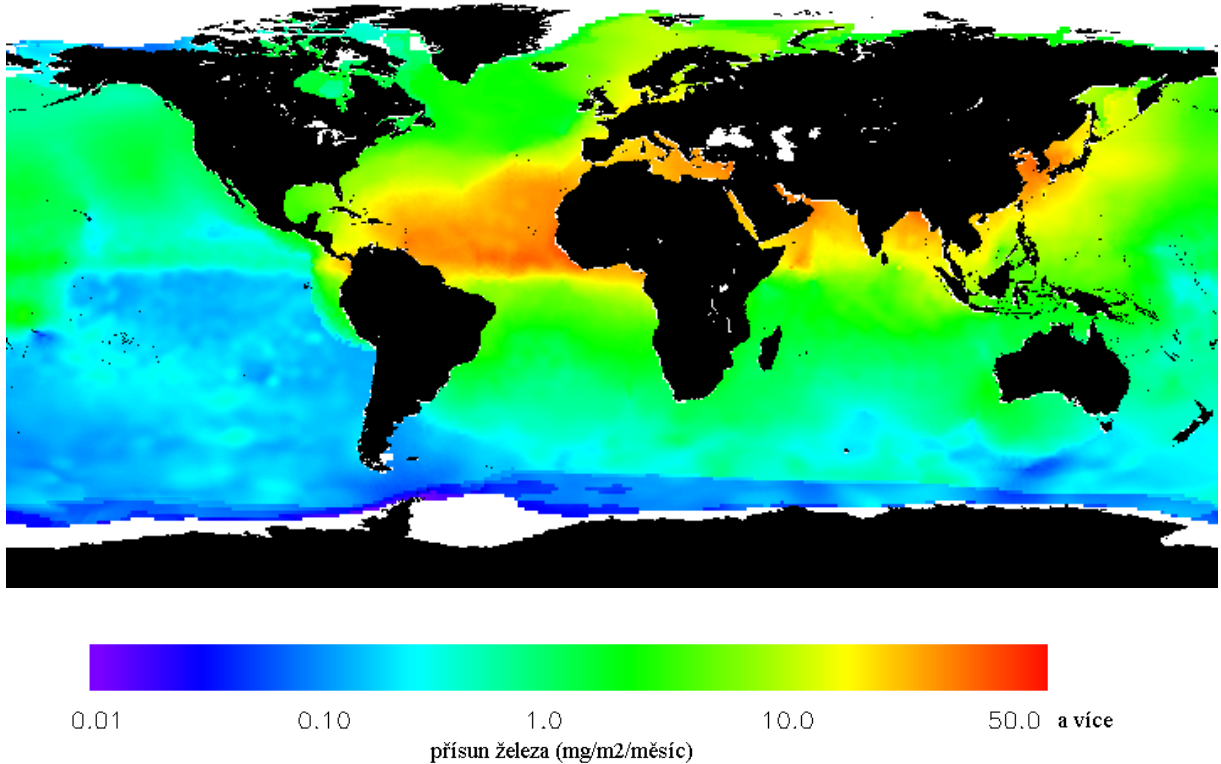
Jižní oceán hraje významnou roli i v regulaci glaciální a interglaciální variability atmosférického CO<sub>2</sub>, protože zde vyplouvají hlubokomořské masy vody na povrch, kde dochází k výměně plynů s atmosférou (Sigman a Boyle 2000). Upwelling také dodává křemík do eufotické zóny Jižního oceánu, kde se vyskytují na něm závislé rozsivky (Anderson et al.

2009). Ačkoliv je upwelling důležitý, jeho podíl v globální asimilaci železa fytoplanktonem je zhruba  $0,7 \times 10^9$  mol Fe za rok, tedy sedmáctkrát menší než globální asimilace železa (Fung et al. 2000). Nejlépe lze ukázat princip upwellingu na níže uvedeném obrázku.

### 3. Limitace železem

Pro většinu oblastí světového oceánu je charakteristický nedostatek živin. V otevřeném oceánu tenká povrchová vrstva trpí nedostatkem základních živin, jako jsou sloučeniny dusíku a fosforu, případně křemíku. Dusík je naštěstí fixován sinicemi, které vytváří dusičnany. Fosfor je v biosféře vázaný pouze ve fosforečnanech. V případě že, organismus zemře, fosforečnany se dostávají do mořské vody, kde musí být ovšem včas zachyceny jiným organismem, jinak dojde k jejich vysrážení na fosforečnan vápenatý, který poté klesá ke dnu. Fytoplankton tedy spoléhá na dodání potřebných látek prostřednictvím výstupných proudů (upwelling) (Chisholm 2000).

V některých oblastech oceánu se vyskytují oblasti, kde je základních živin dostatek, přesto je zde koncentrace chlorofylu nízká. Tyto oblasti (*High Nutrient Low Chlorophyll Areas*, HNLC) se vyskytují v rovníkovém Tichomoří, severozápadní Tichomoří a v Jižním oceánu. Již v 30. letech minulého století přišel Joseph Hart s hypotézou, že by růst fytoplanktonu mohl být v těchto oblastech omezen nedostatkem železa. Železo je sice čtvrtým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře (Taylor 1964), ale v mořské vodě je ho paradoxně nedostatek. V anaerobních podmínkách, které na naší Zemi panovaly před cca 3 mld. let bylo v tehdejších mořích železnatých iontů dostatek. Před 2,2 mld let se ovšem do naší atmosféry začal díky rozvoji sinicím uvolňovat kyslík, který původní železnaté ionty ( $\text{Fe}^{2+}$ ) zoxidoval na nerozpustné železité ionty ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (Sung a Morgan 1980), které po vysrážení vytvořily mohutné geologické usazeniny. V současné době je hlavním zdrojem železa pro oceány pevninský prach transportovaný atmosférou (Martin et al. 1991) a upwelling neboli míchání eufotické zóny s vrstvou pod ní, která obsahuje rozpuštěné železo (Fung et al. 2000). Pobřežní oblasti jsou zásobeny železem z řek a kontinentálních sedimentů z pobřeží. Nicméně přísun říčních usazenin a vysoké nároky pobřežního fytoplanktonu mohou způsobit, že tyto živiny jsou nedosažitelné pro fytoplankton otevřeného oceánu (Fung et al. 2000). Na obrázku níže je možné pozorovat přísun železa do oceánů.



Obrázek 2 Přísun železa do oceánu ve formě větrem hnaného prachu (Gao et al. 2001)

V 80. letech na konferenci ve Woods Hole Prof. John Martin znovu vyzdvihl myšlenku významné úlohy železa pro fungování mořských planktonních společenstev. Na rozdíl od předchozích jednoduchých představ přišel se zcela převratnou hypotézou. Základem jeho teorie bylo, že změny v přísunu železa do Jižního oceánu v průběhu dob ledových a meziledových významně mění produktivitu a intenzitu biologické pumpy v této oblasti. Tento jev způsobuje změny koncentrace CO<sub>2</sub> a působí tak na globální klima jako na pozitivní zpětnou vazbu. Slavným se stal jeho výrok: „Dejte mi půl tankeru železa a já vám dám zpět dobu ledovou“. Jeho hypotéza byla velmi prostá, rozpoutala však bouřlivou diskuzi. Její podstatou bylo, že pokud se produktivita Jižního oceánu zvýší díky zvýšenému přísunu železa, růst fytoplanktonu povede k odčerpání části CO<sub>2</sub> z atmosféry a následné změně klimatu. V té době se začalo měřit množství CO<sub>2</sub> ve vzduchových bublinách ukrytých v ledovcích (Berner et al. 1980, Delmas et al. 1980), kde bylo zjištěno, že se koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře v průběhu času měnila. Nejvyšší koncentrace (~280 ppm) jsou v současnosti a v posledních interglaciálních zatímco v glaciálních se koncentrace CO<sub>2</sub> pohybovala kolem 200 ppm (Barnola et al. 1987). Rozdíl těchto koncentrací tvoří asi 170 miliard tun uhlíku ze zemské atmosféry. Usuzuje se, že na tyto změny měly vliv oceánské procesy. Koncentrace

CO<sub>2</sub> v naší atmosféře se neustále zvyšuje a proto se začalo více vědců zajímat o Martinovu hypotézu.

Hypotéza o významu železa pro mořský fytoplankton byla nejprve ověřována pomocí jednoduchých přídavek železnatých solí do lahviček s mořskou vodou. Přidané železo stimulovalo růst fytoplanktonu, ale první pokusy nebyly zcela průkazné, jelikož lahvičky s mořskou vodou neobsahovaly zooplankton, který se v oceánu přirozeně vyskytuje a predací zabraňuje přemnožení fytoplanktonu. Proto se roku 1993 uskutečnil IronEx I, první pokus umělého obohacování železem přímo v otevřeném oceánu. V oblasti rovníkového Tichomoří jižně od Galapág byla mořská voda cíleně obohacena roztokem síranu železnatého. Přídavek železa měl za následek velký nárůst fytoplanktonu, což potvrdilo představu o limitaci této oblasti nedostatkem železa.

Tato práce se blíže zabývá pokusy, jež byly později konané v Jižním oceánu, a jejich vliv na dané prostředí. Původně se tato práce měla zabývat vlivem železa na živočichy. Vliv tohoto kovu na Jižní oceán je prozatím stále málo prozkoumán a o jeho vlivu na živočichy není dostatek informací. Velice málo se ví o jeho vlivu na mesozooplankton a mikrozooplankton. Jak na přísun železa reagují vyšší trofické vrstvy není známo. Proto bylo téma pojaté více ze šířky a shrnuje vliv železa na růst fytoplanktonu.

## 4. Umělé obohacování oceánu železem

Z důvodu lepšího porozumění, způsobu jakým jsou oceány ovlivněny železem, byla v průběhu posledních 15 let provedena řada experimentů s umělým obohacováním železem v oblastech s vysokým množstvím živin a málo chlorofylu (HNLC).

Tyto pokusy měly zodpovědět na tři základní vědecké otázky:

- 1) Je dostupnost železa hlavním faktorem limitujícím primární produkci Jižního oceánu?
- 2) Mohl zvýšený přísun železa v průběhu dob ledových zvyšovat produkci Jižního oceánu a ovlivňovat tak pomocí množství CO<sub>2</sub> v atmosféře klimatu na naší Zemi?
- 3) Bylo by možné pomocí cílených přídavek železa snížit rostoucí množství CO<sub>2</sub> v atmosféře a odvrátit tak nebezpečí globálního oteplování?

Všechny oblasti, které byly podrobeny experimentům, měly po přidání roztoku železa zvýšené množství primární produkce, což dokazuje, že železo hraje stěžejní roli pro fotosyntézu a další fyziologické procesy. Na začátku každého pokusu rostlo množství všech skupin fytoplanktonu, ale u jediných rozsivek byl zaznamenán zvýšený nárůst množství po celou délku experimentu. Příčinou toho byla jejich schopnost uniknout predáčnímu tlaku (Boyd et al. 2007).

## 4.1 SOIREE

Zatím bylo provedeno 5 pokusů o umělém obohacení Jižního oceánu železem. Prvním pokusem byl SOIREE (*the Southern Ocean Iron Release Experiment*) konaný na lodi R/V Tangaroa v únoru 1999 jiho-jihovýchodně od Tasmánie. Plocha o průměru 8 km byla v průběhu 12 hodin obohacena 8663 kg síranu železnatého, rozpuštěného v okyselené mořské vodě. Současně se železem byl přidán i hexafluorid sírový (SF<sub>6</sub>) sloužící jako indikátor označující obohacenou oblast. Čtvrtý, šestý a osmý den po spuštění pokusu, kdy koncentrace rozpuštěného železa v oblasti klesla na 0,3 nM, bylo znovu přidáno železo do středů oblastí, které určoval indikátor (Watson et al. 2000). Po celou dobu pokusu byly brány vzorky ze středu dané oblasti a na konci 13 denního pokusu se oblast rozrostla na plochu přes 200 km<sup>2</sup> (Charette a Buesseler 2000).

Výsledky experimentu SOIREE dokumentují nárůst primární produkce, zvýšení biomasy fytoplanktonu a trojnásobný nárůst chlorofylu. Došlo též k posunu ve složení fytoplanktonu z malých na velké buněčné druhy, převážně rozsivky, které mohou přerůst své predátory, jakmile nejsou omezeny živinami. To všechno mělo za následek snížení množství živin a CO<sub>2</sub> v povrchových vodách (Chisholm 2000).

Biomasa řas by však mohla být mnohem větší, než se během tohoto experimentu odhadovalo. Ze satelitních snímků bylo možné pozorovat i měsíc po konci pokusu, že hladina chlorofylu byla stále trojnásobná oproti okolí a přeměnila se v jakýsi pruh ve tvaru mašle 150 km dlouhý a 4 km široký díky difúzi a míchání vody. K 23. březnu, tedy 3 týdny po ukončení experimentu bylo řasami fixováno 600-3000 tun uhlíku. Kolik bylo exportováno z povrchové zóny do hlubin není jasné, nebyly získány žádné důkazy svědčící o tom, že obohacení zvýšilo export uhlíku z hladiny do hlubin oceánu (Boyd et al. 2000). Naopak, během experimentu SOIREE byly v obohacené zóně naměřeny nižší hodnoty exportu uhlíku

než v okolních vodách. Důvodem mohlo být to, že nově narostlé rozsivky, byly lehčí a pomaleji klesaly ke dnu (Abraham et al 2000).

## 4.2 EisenEx

Druhým pokusem byl EisenEx, který probíhal v listopadu 2000 s pomocí výzkumného ledoborce Polarstern. Výzkum se konal jižně od Afriky a trval 22 dní. Do oceánu bylo přidáno celkem 2340 kg železa ve formě kyselého roztoku síranu železnatého během nultého, osmého a šestnáctého dne experimentu (De Baar 2001; cit. dle Bakker et al. 2005). Jako indikátor byl znovu použit SF<sub>6</sub> (Smetacek 2001). Pátý a třináctý den byla oblast zasažena silnou bouří, ta měla za následek hluboké promíchání pokusné zóny (Cisewski et al. 2005). Růst řas byl omezen nedostatkem světla vinou velké oblačnosti (Gervais et al. 2002). Po sedmi dnech se železo promíchalo až do hloubky 76 metrů a dodatečně se obohacená oblast silně rozrostla (Bakker et al. 2005).

Do první bouře bylo pozorováno jen malé snížení CO<sub>2</sub> v povrchových vodách. Několik dní po bouři zůstalo množství CO<sub>2</sub> povrchových vod neměnné, po 7. dni však začalo lehce klesat. Mezi 8. až 12. dnem se začalo množství CO<sub>2</sub> trvale snižovat. Druhá bouře, která se objevila 13. den, promíchala povrchový uhlík do větších hlubin a zvětšila obohacenou oblast (Watson et al. 2001; cit. dle Bakker et al. 2005). I přes nepřízeň počasí, se během EisenEx odstranilo 1433 tun rozpuštěného anorganického uhlíku (Bakker et al. 2005).

Klimatické podmínky měly očividně vliv na tento pokus. Vítr i atmosférický tlak ovlivnily přenos CO<sub>2</sub> ze vzduchu do oceánu. Je tedy velmi důležité vybrat vhodnou polohu pro uskutečnění těchto obohacovacích pokusů (Bakker et al. 2005).

Stejně jako u SOIREE i u tohoto experimentu nelze přesně určit, kolik uhlíku skutečně bylo odstraněno z vodní hladiny (Bakker et al. 2005). Autoři se domnívají, že více uhlíku bylo dlouhodobě exportováno při EisenEx, díky jeho poloze blíže k subdukčním zónám, kde povrchová voda klesá, míchá se s hlubinnou vodou a vytváří větší potenciál pro export atmosférického CO<sub>2</sub> (Sloyan and Rintoul, 2001).

### 4.3 SOFeX

Třetím pokusem o obohacení Jižního oceánu železem byl americký experiment SOFeX (*Southern Ocean Iron Experiment*), který se konal mezi lednem a únorem roku 2002 (Coale et al. 2004). Z logistických důvodů byly k tomuto experimentu použity tři výzkumná plavidla, R/V Roger Revelle, R/V Melville a ledoborec Polar Star. Obohacení železem prováděl R/V Roger Revelle ve dvou rozdílných oblastech (Coale et al. 2004) vybraných na základě hydrografických podmínek, množství živin a předpokládaného biogeochemického působení. Účelem tohoto výběru bylo nalezení oblastí, které by mohly reprezentovat celý Jižní oceán (Krishnamurthy et al. 2007). V tomto experimentu se testovala nejen Martinova hypotéza, ale také zda vody chudé na křemičitany severně od Antarktické polární frontální zóny APFZ sníží reakci na obohacení železem (Krishnamurthy et al. 2007). Předchozí dva experimenty se totiž konaly ve vodách s průměrnou koncentrací kyseliny křemičité (~5 až ~25 μM) (Coale et al. 2004). Tento pokus je také první, který se dá považovat za zdařilý. První část experimentu se odehrála severně od APFZ, v povrchových vodách charakteristických vysokou koncentrací dusíkatých sloučenin a fosforečnanů a nízkou koncentrací kyseliny křemičité. Druhá část se konala jižně od APFZ, ve vodách bohatých jak na živiny tak kyselinu křemičitou (Twining et al. 2004). Právě kyselina křemičitá může uvnitř APFZ limitovat biomasu, růst fytoplanktonu i export uhlíku (Coale et al. 2004).

Obě plochy o rozměrech 15 km x 15 km byly obohaceny roztokem síranu železnatého a jako indikátor byl při prvním obohacení znovu užit SF<sub>6</sub>. Severní oblast byla obohacena dvakrát a jižní oblast čtyřikrát. Z obou oblastí byly odebrány čtyři vzorky – jeden před obohacením, dva během procesu přilhojování (3. a 6. den) a jeden mimo obohacenou oblast. Analyzováno bylo osm souborů vzorků, z nichž v každém bylo podrobena rozboru zhruba 10-20 buněk jednotlivých druhů, tedy celkem 268 buněk. K analýze byl užit SXRF (*synchrotron-based X-ray fluorescence* – synchrotron založený na rentgenové fluorescenci), který je schopen zaměřit konkrétní buňky a zajišťuje, aby analýza nebyla ovlivněna abiotickým materiálem, který se může vyskytovat např. na filtrech (Coale et al. 2004).

Severní oblast se vyskytovala v regionu mnoha frontálních systémů a k 38. dni se rozšířila ze čtverce 15 km x 15 km na protáhlý pruh o délce 340 km a šířce 7 km. Naopak jižní oblast se k 20. dni pomalu roztáhla všemi směry na plochu ~ 2380 km<sup>2</sup>. K vypočítání výsledného rozředění obohacených vod byl při výpočtu zohledněn úbytek SF<sub>6</sub> (Coale et al. 2004) a ke stanovení změny tvaru byly užity satelitní snímky (Abraham et al. 2000). Obě tyto

metody přinesly podobné výsledky. Rychlost rozředění určená za pomoci satelitních snímků v severní oblasti byla  $0,11 \text{ den}^{-1}$  a rychlost rozředění změřená pomocí  $\text{SF}_6$  byla  $0,10 \text{ den}^{-1}$ . V jižní oblasti byla rychlost zředění kolem  $0,075 \text{ den}^{-1}$  (Coale et al. 2004).

Po obohacení železem se zvýšila schopnost fotosyntézy a koncentrace chlorofylu *a* (Coale et al. 2004). U předchozích pokusů byl po obohacení železem v křemičitých vodách zřetelný nárůst rozsivek (Boyd et al. 2000). U projektu SOFeX bylo v severní části pozorováno zvětšení buněk ( $>5 \mu\text{m}$ ), v jižní části se však velikost populace fytoplanktonu nezměnila. Na severu byl zvýšený růst spíše bičíkatých - nekřemičitých skupin, jako jsou Haptofyta, *Pelagophyta* či obrněnky, zatímco v jižní oblasti byly dominantní rozsivky (Coale et al. 2004). Přestože jižní oblast je bohatá na kyselinu křemičitou, rozsivky v jižní i severní části byly tenkostěnné a málo křemičité (Armstrong et al. 2002; cit. dle Coale et al. 2004).

V jižní oblasti došlo ke změně limitujícího růstového faktoru fytoplanktonu, a to ze železa na světlo. Na severu bylo oproti jihu tedy dvojnásobné množství primární produkce. SOFEX dokazuje, že přídavek železa stimuloval v severní zóně jak primární produkci tak vedl ke zvýšení obsahu partikulovaného organického uhlíku nezávisle na menším množství křemičitanu (Coale et al. 2004).

Světlo hrálo také velkou roli v omezení růstu fytoplanktonu. Na severu bylo ke konci experimentu zjištěno, že nedostatek světla snížil rychlost růstu drobného fytoplanktonu o téměř 40% a rozsivek zhruba o 20%. S růstem fytoplanktonu také rostlo samozastiňování. Na jihu bylo oproti severní části omezení světlem vyšší o 20%. Z toho pak vyplývá jasná souvislost mezi zpomalujícím růstem fytoplanktonu a zmenšující se limitační rolí nedostatku světla díky samozastiňování (Krishnamurthy et al. 2007).

#### 4.4 EIFEX

Čtvrtým pokusem v Jižním oceánu uskutečněným během 21. ledna – 25. března 2004 jižně od Afriky byl převážně německý projekt EIFEX (*European Iron Fertilization Experiment*). Střed zvolené oblasti byl dvakrát obohacen kyselým roztokem síranu železnatého. První obohacení železem se konalo 1. den po odběru kontrolních vzorků. Druhé se konalo 15. den pokusu, protože koncentrace železa se dvojnásobně až trojnásobně snížila z původní. Na každém z měřených míst byl odebrán 4 ml vzorek pro analýzu složení



fytoplanktonu pomocí průtokové cytometrie. Do vzorků byla přidána i kapka pufrovaného roztoku a až do měření byly uskladněny při teplotě  $-80^{\circ}\text{C}$  (Hoffmann et al. 2006).

Celkové koncentrace chlorofylu *a* a POM silně vzrostly uvnitř obohacené oblasti. Až k 26. dni vzrostla koncentrace chlorofylu *a* pětinašobně, poté však začala klesat. Podobnou koncentraci chlorofylu *a* bychom našli u SOIREE a EisenEx (Boyd et al. 2000). U SOFEXu výsledky ukázaly vyšší koncentraci chlorofylu *a*, která byla převážně způsobena jeho počáteční nízkou koncentrací (Coale et al. 2004). Koncentrace chlorofylu *a* v hloubce 20 m se zvýšila pětinašobně k 26. dni experimentu, zatímco množství partikulovaného organického uhlíku (POC), dusíku (PON) a fosforu (POP) se k 29. dni pokusu sotva zdvojnásobila. Ke konci experimentu se koncentrace chlorofylu *a* začala snižovat a to z důvodu úmrtí obohaceného fytoplanktonu. Přestože hlavním příjemcem tohoto obohacení byly rozsivky větší než 20  $\mu\text{m}$ , zvýšený růst byl také zaznamenán u malých rozsivek (2-8  $\mu\text{m}$ ). To vedlo ke změně složení fytoplanktonu a to z haptofytního (kokolitky a *Phaeocystis*) na rozsivky (Hoffmann et al. 2006).

Na základě analýz vysoce-účinné kapalinové chromatografie (HPLC) bylo zjištěno, že rozsivky, které tvořily nejvýznamnější část fytoplanktonu před i během experimentu, ukázaly největší odezvu na obohacení železem. Celková koncentrace chlorofylu *a* v rozsivkách se zvýšila pětinašobně a celkové množství rozsivek se téměř ztrojnásobilo. Množství křemičitých rozsivek se oproti jiným zřetelně zvýšilo. Jedinou skupinou, jejíž počet se snížil, a to skoro čtyřnásobně, byla *Emiliana huxleyi* (Hoffmann et al. 2006).

Aby bylo možné rozeznat reakce mezi piko- (< 2 $\mu\text{m}$ ), nano- (2-20 $\mu\text{m}$ ) a mikrofytoplanktonem (> 20 $\mu\text{m}$ ) na nový přísun železa, byla provedena analýza změn pigmentového složení. Pikoplankton přispíval méně než 20% k celkové koncentraci chlorofylu *a* před pokusem a i během pokusu se jeho participace příliš nezměnila. Během experimentu byl velikostně dominantní nanoplankton, který přispíval 44% až 71% k celkové koncentraci chlorofylu *a*. Mikrofytoplankton zaznamenal největší nárůst biomasy a to z 12% na 46% (Hoffmann et al. 2006).

Měření pomocí vysoko-účinné kapalinové chromatografie HPLC ukázalo, že fukoxanthin a chlorofyl *c* 1.2 byly po chlorofylu *a* nejvíce zastoupenými pigmenty u mikrofytoplanktonu. Chlorofyl *c* 1.2 je hlavní pigment pro hnědé řasy – obrněnky, *Pelagophyta*, skrytěnky a rozsivky. Fukoxanthin je naopak pigment vyskytující se převážně u rozsivek, můžeme ho však nalézt i u *Phaeocystis*. Poměr mezi fukoxanthinem a chlorofylem

*a* byl během experimentu relativně vysoký, mezi 0,56 až 0,87, a ukazuje tak, že mikrofytoplankton se skládal hlavně z rozsivek (Hoffmann et al. 2006).

Před pokusem převládaly počty Haptofyt, které ale od 22. dne experimentu byly překonány množstvím rozsivek. Kromě pigmentové analýzy i počty buněk ukazují, že rozsivky o velikosti 2-8  $\mu\text{m}$  zvýšily své množství mnohem více než Haptofyta stejné velikosti.

Data potvrzují, že umělé obohacování železem má vliv na více věcí, než jen na biomasu fytoplanktonu. Například, po obohacení železem je mikrofytoplankton moc velký, aby byl zkonsumován mikrozooplanktonem a příliš rychle rostoucí, na to aby byl zkonsumován mesozoplanktonem (Coale et al. 1996). Menší skupiny fytoplanktonu jsou poté více vystaveny spásání (grazingu). Změny ve struktuře pikoplanktonu a nanoplanktonu, tedy změny v hlavním potravním zdroji mikrozooplanktonu, mají vliv na složení fekálních peletek. Ty jsou důležitým transportním mechanismem uhlíku do hlubin oceánu (Hoffmann et al. 2006).

## 4.5 LOHAFEX

Prozatím posledním velkým pokusem v Jižním oceánu byl projekt LOHAFEX, který se uskutečnil od 27. ledna do 17. března 2009. Zaměřil se na Jižní oceán v jeho Atlantské části. Tento experiment vznikl ve spolupráci Německa a Indie, z čehož vyplývá i jeho název – LOHA znamenající v hindštině železo a FEX jakožto obohacovací experiment (*Fertilization Experiment*) (Berkman 2011). Tento pokus se málem neuskutečnil z důvodu nařčení od několika ekologických společností, že se jedná o nebezpečný „geoinženýrský“ experiment, který porušuje současné předpisy Spojených národů o znečišťování moře (Strong et al. 2009). Na nátlak ekologických organizací se Německá vláda rozhodla zastavit pokus v momentu, kdy R/V Polarstern již plul na plánované místo experimentu mezi Jižní Afrikou a Jižní Amerikou. Nakonec byl naštěstí zákaz odvolán, poté co se ukázalo, že plánovaný experiment předpisy Spojených národů neporušuje. Ekologické obavy z tohoto výzkumu pramení z jeho délky trvání a velikosti obohacené plochy. Dosud nebyl uskutečněn experiment, který by trval 40 dní a obohacoval plochu 300  $\text{km}^2$ , proto byl považován za možnou hrozbu, že se jedná o velkoplošné obohacování oceánu (Strong et al. 2009).

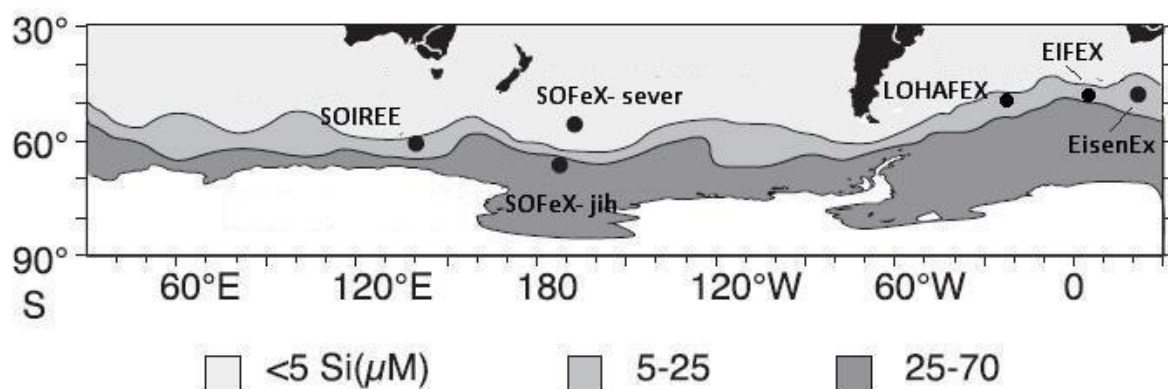
LOHAFEX se konal v oblasti, kde je jiné složení planktonu oproti zbytku Jižního oceánu. I zde byl zjištěn zvýšený růst fytoplanktonu po obohacení oceánu 6 tunami rozpuštěného železa. Po prvních čtrnácti dnech se díky růstu fytoplanktonu zvýšil i grazing klanonožců (*Copepoda*) a množství různonožců (*Amphipoda*). Tím se uhlík přesouval dál do potravního řetězce a většina fytoplanktonem fixovaného uhlíku byla ihned remineralizována a jen nepatrné množství bylo exportováno do hlubin (Strong *b* et al. 2009). Na rozdíl od jiných experimentů, zde byl dominantní pikoplankton a nanoplankton, protože před umělým obohacením došlo k přírodnímu přísunu železa, kde rozsivky spotřebovaly veškerou kyselinu křemičitou (Strong *b* et al. 2009).

Experiment	Rok	Místo	Délka trvání	Množství	Testované hypotézy	závěr
SOIREE (Boyd et al 2000)	1999	oblast Austrálie, jižně od polárního kruhu	13 dní	1740kg Fe 50 km <sup>2</sup>	* primární produkce omezena železem * fixace uhlíku během růstu fytoplanktonu	* železo je limitující pro primární produkci * nebyl pozorován posun uhlíku do hlubin
EisenEX (Smetacek 2001)	2000	Afrika, v oblasti polárního kruhu	21 dní	4 tuny FeSO <sub>4</sub> 38,5km <sup>2</sup>	* primární produkce omezena železem * zda Fe prach přispívá ke snížení atmosférického CO <sub>2</sub> během glaciálů	* železo je limitující pro primární produkci * železo ovlivňovalo pouze jisté druhy fytoplanktonu
SOFEX - severní a jižní (Coale et al. 2004)	2002	Nový Zeland, severně a jižně od polárního kruhu	53 dní	S: 1712 kg Fe 225 km <sup>2</sup> J: 1260 kg Fe 225 km <sup>2</sup>	* zda obohacovací pokusy zvyšují uskladnění uhlíku do hlubin oceánu * vliv křemíku a zeměpisné variability	* nárůst POC, ale ve srovnání s přírodním obohacováním nízké
EIFEX (Hoffmann et al. 2006)	2004	Atlantic	35 dní	7 tun FeSO <sub>4</sub> 150 km <sup>2</sup>	* vliv železa na strukturu fytoplanktonní společnosti * schopnost uskladnění uhlíku a poměry remineralizace	* posun fytoplanktonu z původního picoplanktonu * většina vázaného uhlíku nebyla remineralizována
LOHAFEX (NIO Press Release 2009)	2009	Atlantic	40 dní	10 tun FeSO <sub>4</sub> 300km <sup>2</sup>	* ekologický posun a osud uskladněného uhlíku	* zvýšený grazing zooplanktonu

Tabulka 1 Porovnání pokusů umělého obohacování železem v Jižním oceánu

Problémem všech provedených krátkodobých pokusů zůstává nedořešená otázka, zda by pozorované změny, platily i pro dlouhodobé umělé obohacování. Souvislý umělý přísun železa by mohl změnit složení druhů fytoplanktonu i jejich velikost, tudíž i export živin horní

vrstvy vodního sloupce by byl jiný než současný železem limitovaný stav. Pozorovaný mírný nárůst poměrů N/P a C/P by naznačoval menší export fosforu a dost možná i větší export dusíku. Tyto předpoklady ale neberou v potaz potenciální změnu primárního konzumenta z mikro- na mesozooplankton, tudíž celkový efekt na export živin je těžko předvídatelný (Hoffmann et al. 2006).



Obrázek 5 Vyznačená místa pokusů v Jižním oceánu (Coale et al. 2004 a vlastní úprava)

## 5. Přírodní obohacování železem

Jakou roli hraje železo v biologické pumpě v Jižním oceánu lze studovat v oblastech s vysokým množstvím fytoplanktonu, který je přirozeně stimulován přísunem železa v okolí ostrovů a zvýšeného reliéfu dna. Příkladem jsou experimenty KEOPS a CROZEX (Pollard et al. 2009). Důležitým rozdílem mezi umělým a přírodním obohacováním je, že k zvýšenému přísunu železa dochází především v průběhu zimy. Spouštěčem růstu fytoplanktonu je tedy konec limitace světlem na jaře nikoliv železo (Venables et al. 2007).

## 5.1 CROZEX

Projekt CROZEX (*CROZet natural iron bloom and EXport experiment*) se odehrál na britské lodi RSS Discovery během australského léta od listopadu 2004 do ledna 2005 v okolí Crozetových ostrovů, což je souostroví vzdálené 2000 km jihovýchodně od Jihoafrické republiky. Zde byla testována hypotéza, jestli je pozorovaný severo-jížní gradient koncentrace fytoplanktonu vyvolán přírodním přísunem železa, který má za následek zvýšený tok organického uhlíku do hlubin. K výpočtu exportovaného uhlíku bylo užito sedimentačních pastí severně, východně a jižně od ostrovů (Pollard et al. 2009).

Výzkumný tým vypožoroval, že 270 tun železa v oblasti o velikosti Irsko způsobilo dvojnásobný až trojnásobný nárůst biologické produktivity. Ale sedimentační pasti odhalily, že export uhlíku do hlubin oceánu nebyl ani zdaleka takový jako u náhorní plošiny Kerguelen (viz níže) (Schiermeier 2009). U CROZEXu bylo množství exportovaného uhlíku v hloubce 200 m, téměř osmdesátkrát menší než bylo naměřeno u KEOPS (Blain 2007). Výsledky tohoto projektu dokládají, že i kdyby celková plocha světových oceánů byla saturována přísunem železa, tak by to nemělo velký efekt na objem atmosférického CO<sub>2</sub> (Schiermeier 2009).

## 5.2 KEOPS

Měsíc po spuštění britského projektu CROZEX se v Jižním oceánu uskutečnil druhý projekt zkoumající vliv přirozeného přísunu železa. Převážně francouzská expedice KEOPS (*Kerguelen ocean and plateau compared study*) se konala od 19. ledna do 13. února 2005 v okolí náhorní plošiny Kerguelen, kde je fytoplankton obohacen železem a jinými makroživinami z hlubin, a má největší přírodně obohacený růst fytoplanktonu v Jižním oceánu (Blain 2007). V této oblasti roste fytoplankton ve dvou různých zónách. První zónou je úzký pruh, který se rozšiřuje severovýchodně od Heradova ostrova a severně od polárního kruhu. Druhá zóna zabírá plochu přibližně 45 000 km<sup>2</sup> jihovýchodně od ostrova a je omezena zvětšující se hloubkou na okraji náhorní plošiny. Růst fytoplanktonu v těchto dvou oblastech probíhá od začátku listopadu do konce února (Blain 2007).

Z výsledků této expedice lze soudit, že schopnost exportu uhlíku ve zkoumané oblasti je přinejmenším desetkrát vyšší než u SOFeXu (viz výše), kde byla zhruba 4300 mol mol<sup>-1</sup>,

a u jiných obohacovacích pokusů v Jižním oceánu (De Baar et al. 2005). Tyto odhady nezahrnují horizontální transport rozpuštěného železa a anorganického uhlíku DIC (*dissolved inorganic carbon*). Promíchávání s vnějšími vodami mimo náhorní plošinu by vedlo k doplňování DIC a odstranění rozpuštěného železa a tudíž ke zvětšení odstraňování uhlíku (Blain 2007).

Vzájemné působení mezi železem a cykly uhlíku (Gnanadesikan et al. 2003) znemožňuje přímo odhadnout objem CO<sub>2</sub>, který bude po obohacení z upwellingu odstraněn, ale je očividné, že přírodní systém je extrémně citlivý na železo, mnohem více než je naznačeno u umělých obohacovacích pokusů (Blain 2007). Tento experiment by tudíž neměl být brán jako náznak, že snižování CO<sub>2</sub> pomocí geoinženýrství (Chisholm et al. 2001) by dosáhlo velkého účinku (Blain 2007).

## 6. Perspektivy velkoplošného přihnojování železem

Všechny dosud uvedené experimenty probíhaly v období od 1999 až 2009 a měly zhruba stejný základ – rozkládaly se na menší ploše a trvaly jen několik týdnů. Tyto pokusy byly biologického rázu. V současné době se uvažuje o druhé vlně pokusů o velkoplošné obohacení, které by již měly za cíl cílené ovlivňování klimatu (geoinženýrství), tedy výrazné ovlivnění mořského ekosystému.

Aby tyto experimenty druhé generace mohly trvat např. celé desetiletí, je potřeba aby jim předcházely detailně zpracované fyzikální a biogeochemické modely obohacených vod. Například množství exportovaného uhlíku počítáme jako rozdíl mezi tokem CO<sub>2</sub> ze vzduchu do železem obohacené vody a tokem CO<sub>2</sub> bez přítomnosti obohacení. Výpočet tohoto toku zahrnuje jeho několikaleté pozorování a může být tedy vypočítán pouze modelováním. Problémem však je, že model musí správně napodobit biologické, chemické, fyzikální vlastnosti a jejich vzájemné působení v HNLC vodách. Současné modely zatím nejsou dostačující (Watson et al. 2008).

Předpokládá se, že experimenty druhé generace by probíhaly na ploše 200 km x 200 km za použití modelačně-pozorovací strategie. Ta by měla pomoci zodpovědět některé otázky, které nelze zjistit pouhým pozorováním (Watson et al. 2008):

- Efektivita odstranění CO<sub>2</sub> z atmosféry – která je závislá na počátečním fyzikálním, chemickém a biologickém stavu
- Vyměření vedlejší trajektorie obohacené oblasti potřebuje přizpůsobené dálkové snímání a pozorování *in situ*
- Zhodnocené výsledky potřebují kontrolní situaci – jak by to vypadlo, kdyby k obohacení nedošlo

U počátečních pokusů bylo potřeba 12 - 14 hodin k aplikaci síranu železnatého v souvislém cca 10 km dlouhém pruhu. K obohacení celé plánované plochy 200 km x 200 km by však bylo zapotřebí mnoha plavidel, což přináší množství problémů s jejich koordinací v systému mořských proudů tak aby se i část vody pod hladinou sunula s obohacenou vodou na hladině atd. Alternativou by mohlo být obohacování oceánu z letadel, ale v tom případě by byla obohacená pouze horní tenká vrstva a železo by se nepromíchávalo do hloubek. Navíc by byla aplikace více jak 10 tun chemikálií velmi finančně náročná (Boyd et al. 2007).

Dalším problémem by bylo použití vhodného indikátoru. U pokusů první generace byl využíván SF<sub>6</sub>, ten se ale rozkládá rychleji než by bylo zapotřebí na pokusy trvající několik měsíců. K mapování takto velké oblasti by bylo nejspíše zapotřebí letadel či vrtulníků s biooptickými senzory k monitorování fluorescence chlorofylu či CO<sub>2</sub> (Boyd et al. 2007).

Nynější modely pro pokusy druhé generace používají i některá měření z prvních experimentů. I tak ale nejlépe shrnují současné chápání a výsledky, které poskytují, jsou jedinou jistotou.

## 7. Je to správné?

Rostoucí množství atmosférického CO<sub>2</sub> již začíná způsobovat lokální, regionální a globální změnám klimatu (Houghton et al. 2001; cit. dle Liss et al. 2005). Lidé stále více přemýšlí, jak se vypořádat s rostoucím skleníkovým efektem naší planety (Liss et al. 2005). Snížení množství CO<sub>2</sub> v atmosféře pomocí cíleného obohacování oceánu by mohlo

představovat možnost jak negativní dopady snížit. Před několika lety se dokonce reálně počítalo s tím, že by se díky geoinženýrství dalo vydělat na emisních povolenkách.

Většina vědců však s plány na velkoplošné obohacování oceánu nesouhlasí. Původní cíl prvních biologických obohacovacích pokusů bylo zodpovědět základní otázky o tom, jakým způsobem jsou železo a uhlík využity v mořských ekosystémech a jaké jsou jejich cykly. Poté se však novým cílem stalo omezení globálního oteplování pomocí geoinženýrství, tedy úmyslného pozměnění zemského biologického a fyzikálního systému. Jejich záměrem je pozměnit mořské ekosystémy. Jejich cílem je tedy podnícení růstu velikostně většího fytoplanktonu, který většinou není příliš hojný, protože uhlík vytvořený těmito druhy pravděpodobněji klesne do hlubin. Tento posun na základě potravního řetězce, by měl za následek další neočekávané změny v potravní síti. Krom toho, živiny jako dusík a fosfor klesnou spolu s uhlíkem a tím také změni biogeochemické a ekologické vztahy v systému. Některé modely dokonce předpokládají, že by obohacování železem v globálním měřítku mělo za následek nedostatek kyslíku v rozlehlých oblastech oceánu, což by dramaticky ovlivnilo všechny organismy od mikrobů po ryby (Strong et al. 2009).

Dalším problémem je změna složení různých plynů po obohacovacích experimentech. Po pokusech byla naměřena zvýšená koncentrace dimethylsulfidu (DMS), methyljodidu ( $\text{CH}_3\text{I}$ ) a chlorodibromometanu ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) a u bromoformu byla naopak zjištěna koncentrace nižší (Liss et al. 2005). Zvýšení DMS je běžné u všech obohacovacích experimentů do roku 2004, kde je jeho trojnásobné zvýšení normální a může dosáhnout až osminásobného zvýšení (Turner et al. 2004). Dle modelové studie (Gunson 2005 cit. dle Liss et al. 2005) by dvojnásobný globální nárůst DMS, způsobil snížení atmosférické teploty o 1 - 2°C. To by samozřejmě bylo ideální, ale prozatím nejsme dostatečně seznámeni s přesným cyklem DMS a jeho koloběhem mezi oceánem a atmosférou. Otázkou je, zda by jiné stopové množství atmosférických plynů neovlivnilo ochlazování naší planety. Složení těchto plynů by bylo pozměněno a to rozdílným tokem plynů mezi atmosférou a oceánem, který by vznikl zvýšenou biologickou aktivitou po obohacení železem (Lawrence 2002).

V roce 2008 Spojené národy sepsaly dvě dohody o zákazu velkoplošného přihnojování železem, z důvodu obav týkajících se ekologického rizika a nedostatku vědeckého poznání. Časopis Royal Society v roce 2009 zveřejnil, že tato metoda má relativně malou schopnost absorbce uhlíku a pravděpodobně způsobuje nepříznivé ekologické následky (Strong et al. 2009).



Konkrétní následky globálního obohacování se velmi těžko odhadují, protože reakce oceánu je závislá na velikosti uskutečněného obohacování. V současnosti se lidské emise odhadují na 10 gigatun uhlíku ročně. Tudiž maloplošné přihnojování je v podstatě nedostačující k určení dlouhodobých vedlejších účinků velkoplošného obohacování (Strong et al. 2009). Zajímavý model představil *Zahavir 2008* (cit. dle Strong et al. 2009), že i kdyby celý Jižní oceán byl navždy obohacován železem, tak by bylo ročně odebráno množství menší než 1 Gt ( $10^{12}$  kg) uhlíku z  $\text{CO}_2$  pocházejícího z atmosféry a to po dobu pouze několika let.

## 8. Závěr

Dle výše popsaných experimentů je zřejmé, že železo je limitujícím faktorem pro primární produkci Jižního oceánu. U všech pokusů došlo u fytoplanktonu ke kladné odezvě na přísun železa, ačkoliv odpověď celého ekosystému vždy záležela na řadě jiných faktorů, jako je například počasí. Přísun prachových částic z pevniny se v čase měnil, ale nejvíce se dostával do Jižního oceánu v dobách ledových. Podle Martinovy hypotézy vedl tehdejší přísun železa do Jižního oceánu k ochlazení Země, tedy k pozitivní zpětné vazbě. Tato teorie je sice nyní podpořena více údaji než v 80. letech minulého století, ale není možné ji zcela potvrdit. Je spíš důležité si uvědomit jak velkou roli Jižní oceán hrál. Diskutovaným tématem zůstává, zda je možné snížit koncentraci  $\text{CO}_2$  v atmosféře pomocí geoinženýrství. Lidské emise jsou momentálně tak velké, že by jej nevyvážilo ani obohacení celého Jižního oceánu, což samozřejmě není ani technicky možné. Dále přesně nevíme kolik uhlíku by doopravdy bylo exportováno do hlubin a tedy trvale vyřazeno z oběhu. V současnosti jsou geoinženýrské pokusy zakázány dle Spojených národů, jelikož nelze plně odhadnout, jaké vedlejší ekologické dopady by to mohlo přinést.

## 9. Použitá literatura

- ABRAHAM, E. R., LAW, C. S., BOYD, P. W., LAVENDER, S. J., MALDONADO, M.T. & BOWIE, A.R. 2000: Importance of stirring in the development of an iron-fertilized phytoplankton bloom. *Nature* 407, 727 - 730
- ANDERSON, R. F., ALI, S., BRADTMILLER, L. I., NIELSEN, S. H. H., FLEISHER, M. Q., ANDERSON, B. E. & BURCKLE, L. H. 2009: Wind-Driven Upwelling in the Southern Ocean and the Deglacial Rise in Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science* 323, 1443-1448
- BAKKER, D.C.E., BOZEC, Y., NIGHTINGALE, P. D., GOLDSON, L., MESSIAS, M.-J., DE BAAR, H.J.W., LIDDICOAT, M., SKJELVAN, I., STRASS, V. & WATSON, A. J. 2005: Iron and mixing affect biological carbon uptake in SOIREE and EisenEx, two Southern Ocean iron fertilisation experiments. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 52, 1001-1019
- BARNOLA, J. M., RAYNAUD, D., KOROTKEVICH, Y. S. & LORIUS, C. 1987: Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 329, 408-414
- BEHRENFELD, M. J., O'MALLEY, R. T., SIEGEL, D. A., MCCLAIN, C. R., SARMIENTO, J.L., FELDMAN, G.C., MILLIGAN, A.J., FALKOWSKI, P.G., LETELIER, R.M. & BOSS, E.S. 2006: Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444, 752-755
- BERKMAN, P. A. 2011: Science diplomacy: Antarctica, and the governance of international spaces. *Smithsonian Institution Scholarly Press*, 1-337pp.
- BERNER, W., STAUFFER, B. 1980: Information on the CO<sub>2</sub> cycle from ice cores studies. *Radiocarbon* 22, 227-235
- BLAIN, S., QUÉGUINER, B., ARMAND, L., BELVISO, S., BOMBLED, B., BOPP, L., BOWIE, A., BRUNET, C., BRUSSAARD, C., CARLOTTI, F., CHRISTAKI, U., CORBIÈRE, A., DURAND, I., EBERSBACH, F., FUDA, J. - L., GARCIA, N., GERRINGA, L., GRIFFITHS, B., GUIGUE, C., GUILLERM, C., JACQUET, S., JEANDEL, C., LAAN, P., LEFÈVRE, D., LO MONACO, C., MALITS, A., MOSSERI, J., OBERNOSTERER, I., PARK, Y. - H., PICHERAL, M., PONDAVEN, P., REMENYI, T., SANDRONI, V., SARTHOU, G., SAVOYE, N., SCOUARNEC, L., SOUHAUT, M., THUILLER, D.,

TIMMERMANS, K., TRULL, T., UITZ, J., VAN BEEK, P., VELDHUIS, M., VINCENT, D., VIOLLIER, E., VONG, L. & WAGENER, T. 2007: Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature* 446, 1070-1074

BOYCE, D. G., LEWIS, M. R. & WORM, B. 2010: Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591-596

BOYD, P. W., WATSON, A. J., LAW, C. S., ABRAHAM, E. R., TRULL, T., MURDOCH, R., BAKKER, D.C.E., BOWIE, A.R., BUESSELER, K.O., CHANG, H., CHARETTE, M., CROOT, P., DOWNING, K., FREW, R., GALL, M., HADFIELD, M., HALL, J., HARVEY, M., JAMESON, G., LAROCHE, J., LIDDICOAT, M., LING, R., MALDONADO, M. T., MCKAY, R. M., NODDER, S., PICKMERE, S., PRIDMORE, R., RINTOUL, S., SAFI, K., SUTTON, P., STRZEPEK, R., TANNEBERGER, K., TURNER, S., WAITE, A. & ZELDIS, J. 2000: A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature* 407, 695 - 702

BOYD, P. W., JICKELLS, T., LAW, C. S., BLAIN, S., BOYLE, E. A., BUESSELER, K. O., COALE, K. H., CULLEN, J. J., DE BAAR, H. J. W., FOLLOWS, M., HARVEY, M., LANCELOT, C., LEVASSEUR, M., OWENS, N. P. J., POLLARD, R., RIVKIN, R. B., SARMIENTO, J., SCHOEMANN, V., SMETACEK, V., TAKEDA, S., TSUDA, A., TURNER, S. & WATSON, A. J. 2007: Mesoscale Iron Enrichment Experiments 1993-2005: Synthesis and Future Directions. *Science* 315, 612-617

BRANDER, K. M. 2007: Climate Change and Food Security Special Feature: Global fish production and climate change. *PNAS* 104, 19709-19714

BROECKER, W. S., SUTHERLAND, S. & PENG, T. - H. 1999: A Possible 20th-Century Slowdown of Southern Ocean Deep Water Formation. *Science* 286, 1132-1134

CISEWSKI, B., STRASS, V. H. & PRANDKE, H. 2005: Upper-ocean vertical mixing in the Antarctic Polar Front Zone. *Deep-Sea Research II* 52, 1087-1108

COALE, K. H., JOHNSON, K. S., CHAVEZ, F. P., BUESSELER, K. O., BARBER, R. T., BRZEZINSKI, M. A., COCHLAN, W. P., MILLERO, F. J., FALKOWSKI, P. G., BAUER, J. E., WANNINKHOF, R. H., KUDELA, R. M., ALTABET, M. A., HALES, B. E., TAKAHASHI, T., LANDRY, M. R., BIDIGARE, R. R., WANG, X., CHASE, Z., STRUTTON, P. G., FRIEDERICH, G. E., GORBUNOV, M. Y., LANCE, V. P., HILTING,

A. K., HISCOCK, M. R., DEMAREST, M., HISCOCK, W. T., SULLIVAN, K. F., TANNER, S. J., GORDON, R. M., HUNTER, C. N., ELROD, V. A., FITZWATER, S. E., JONES, J. L., TOZZI, S., KOBLIZEK, M., ROBERTS, A. E., HERNDON, J., BREWSTER, J., LADIZINSKY, N., SMITH, G., COOPER, D., TIMOTHY, D., BROWN, S. L., SELPH, K. E., SHERIDAN, C. C., TWINING, B. S. & JOHNSON, Z. I. 2004: Southern Ocean Iron Enrichment Experiment: Carbon Cycling in High- and Low-Si Waters. *Science* 304, 408- 414

COUSTEAU, F. 2008: *Ocean. New York: DK Pub.*, 1-512pp.

DE BAAR, H. J. W., BOYD, P. W., COALE, K. H., LANDRY, M. R., TSUDA, A., ASSMY, P., BAKKER, D. C. E., BOZEC, Y., BARBER, R. T., BRZEZINSKI, M. A., BUESSELER, K. O., BOYÉ, M., CROOT, P. L., GERVAIS, F., GORBUNOV, M. Y., HARRISON, P. J., HISCOCK, W. T., LAAN, P., LANCELOT, C., LAW, C. S., LEVASSEUR, M., MARCHETTI, A., MILLERO, F. J., NISHIOKA, J., NOJIRI, Y., VAN OIJEN, T., RIEBESELL, U., RIJKENBERG, M. J. A., SAITO, H., TAKEDA, S., TIMMERMANS, K. R., VELHUIS, M. J. W., WAITE, A. M. & WONG. C. - S. 2005: Synthesis of iron fertilization experiments: From the Iron Age in the Age of Enlightenment. *Journal of geophysical research* 110, 1-24

DELMAS, R. J., ASCENCIO, J. - M. & LEGRAND, M. 1980: Polar ice evidence that atmospheric CO<sub>2</sub> 20,000 yr BP was 50% of present. *Nature* 284, 155-157

FALKOWSKI, P. 2012: The power of plankton. *Nature* 483, 17-20

FIELD, C. B., BEHRENFELD, M. J., RANDERSON, J. T. & FALKOWSKI, P. 1998: Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science* 281, 237-240

FUNG, I. Y., MEYN, S. K., TEGEN, I., DONEY, S. C., JOHN, J. G. & BISHOP, J. K. B. 2000: Iron supply and demand in the upper ocean. *Global Biogeochemical cycles* 14, 281-295

GAO, Y., KAUFMAN, Y. J., TANRÉ, D., KOLBER, D. & FALKOWSKI, P. G. 2001: Seasonal Distributions of Aeolian Iron Fluxes to the Global Ocean. *Geophysical Research letters* 28, 29-32

GERVAIS, F., RIEBESELL, U. & GORBUNOV, M. Y. 2002: Changes in primary productivity and chlorophyll a in response to iron fertilization in the Southern Polar Frontal Zone. *Limnology and oceanography* 47, 1324-1335

- GNANADESIKAN, A., SARMIENTO, J. L. & SLATER, R. D. 2003: Effects of patchy ocean fertilization on atmospheric carbon dioxide and biological production. *Global Biogeochemical Cycles* 17, 191-197
- GREGG, W. W., CASEY, N. W. & MCCLAIN, C. R. 2005: Recent trends in global ocean chlorophyll. *Geophysical Research Letters* 32, L03606 1-5
- HENSON, S. A., SARMIENTO, J. L., DUNNE, J. P., BOPP, L., LIMA, I., DONEY, S. C., JOHN, J. & BEAULIEU, C. 2010: Detection of anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity. *Biogeosciences* 7, 621-640
- HOFFMANN, L. J., PEEKEN, I., LOCHTE, K., ASSMY, P. & VELHUIS, M. 2006: Different reactions of Southern Ocean phytoplankton size classes to iron fertilization. *Limnology and oceanography* 51, 1217-1229
- CHARETTE, M. A. & BUESSELER, K. O. 2000: Does iron fertilization lead to rapid carbon export in the Southern Ocean? *Geochemistry, geophysics, geosystems* G<sup>3</sup> 1, 1-7
- CHASSOT, E., BONHOMMEAU, S., DULVY, N. K., MÉLIN, F., WATSON, R., ASCUEL, D. & LE PAPE, O. 2010: Global marine primary production constrains fisheries catches. *Ecology letters* 13, s. 495-505
- CHISHOLM, S. W. 2000: Stirring times in the Southern Ocean. *Nature* 407, 685-687
- CHISHOLM, S. W., FALKOWSKI, P. G. & CULLEN, J. J. 2001: OCEANS: Dis-Crediting Ocean Fertilization. *Science* 294, 309-310
- KRISHNAMURTHY, A., MOORE, K. J. & DONEY, S. C. 2008: The effects of dilution and mixed layer depth on deliberate ocean iron fertilization: 1-D simulations of the southern ocean iron experiment (SOFEX). *Journal of Marine Systems* 71, 112-130
- LAWRENCE, M. G. 2002: Side Effects of Oceanic Iron Fertilization. *Science* 297, 1993
- LISS, P., CHUCK, A., BAKKER, D. & TURNER, S. 2005: Ocean fertilization with iron: effects on climate and air quality. *Tellus B* 57, 269-271
- MARTIN, J. H. 1990: Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: The iron hypothesis. *Paleoceanography* 5, č. 1, 1-13

- MARTIN, J. H., FITZWATER, S. E. & GORDON, R. M. 1991: We Still Say Iron Deficiency Limits Phytoplankton Growth in the Subarctic Pacific. *Journal of Geophysical Research* 96, 20699-20700
- PAYTAN, A., MACKEY, K. R. M., CHEN, Y., LIMA, I. D., DONEY, S. C., MAHOWALD, N., LABIOSA, R. & POST, A. F. 2009: Toxicity of atmospheric aerosols on marine phytoplankton. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 4601-4605
- POLLARD, R. T., SALTER, I., SANDERS, R. J., LUCAS, M.I., MOORE, C. M., MILLS, R. A., STATHAM, P. J., ALLEN, J. T., BAKER, A. R., BAKKER, D. C. E., CHARETTE, M.A., FIELDING, S., FONES, G. R., FRENCH, M., HICKMAN, A. E., HOLLAND, R. J., HUGHES, J. A., JICKELLS, T. D., LAMPITT, R. S., MORRIS, P. J., NÉDÉLEC, F. H., NIELSDÓTTIR, M., PLANQUETTE, H., POPOVA, E. E., POULTON, A. J., READ, J. F., SEEYAVE, S., SMITH, T., STINCHCOMBE, M., TAYLOR, S., THOMALLA, S., VENABLES, H. J., WILLIAMSON, R. & ZUBKOV, M. V. 2009: Southern Ocean deep-water carbon export enhanced by natural iron fertilization. *Nature* 457, 577-580
- RICHARDSON, A. J. & SCHOEMAN, D. S. 2004: Climate Impact on Plankton Ecosystems in the Northeast Atlantic. *Science* 305, 1609-1612
- ROEMMICH, D. & MCGOWAN, J. 1995: Climatic Warming and the Decline of Zooplankton in the California Current. *Science* 267, 1324-1326
- SABINE, C. L., FEELY, R., GRUBER, N., KEY, R. M., LEE, K., BULLISTER, J. L., WANNINKHOF, R., WONG, C. S., WALLACE, D. W. R., TILBROOK, B., MILLERO, F. J., PENG, T.-H., KOZYR, A., ONO, T. & RIOS, A. F. 2004: The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science* 305, 367-371
- SARMIENTO, J. L., GRUBER, N., BRZEZINSKI, M. A. & DUNNE, J. P. 2004: High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature* 427, 56-60
- SCHIERMEIER, Q. 2009: Ocean fertilization: dead in the water?. *Nature* 457, 520-521
- SIGMAN, D. M. & BOYLE, E. A. 2000: Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature* 407, 859-869

- SLOYAN, B. M. & RINTOUL, S. R. 2001: Circulation, renewal and modification of Antarctic Mode and Intermediate Water. *Journal of physical oceanography* 31, 1005-1030
- SMETACEK, V. 2001: EisenEx: International team conducts iron experiment in Southern Ocean. *U.S. JGOFS News* 11, 11-14
- STRONG, A., CHISHOLM, S., MILLER, C. & CULLEN, J. 2009: Ocean fertilization: time to move on. *Nature* 461, 347-348
- STRONG b, A., CULLEN, J. & CHISHOLM, S. 2009: Ocean Fertilization: Science, Policy, and Commerce. *Oceanography* 22, 236-261
- SUNG, W. & MORGAN, J. J. 1980: Kinetics and product of ferrous iron oxygenation in aqueous systems. *Environmental Science* 14, 561-568
- TAYLOR, S. R. 1964: Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28, 1273-1285
- THURMAN, H. V., TRUJILLO, A. P., 2005: Oceanografía. *Computer Press*, 1-479pp.
- TURNER, S. M., HARVEY, M. J., LAW, C. S., NIGHTINGALE, P. D. & LISS, P. S. 2004: Iron-induced changes in oceanic sulfur biogeochemistry. *Geophysical Research Letters* 31, L14307
- TWINING, B. S., BAINES, S. B., FISHER, N. S. & LANDRY, M. R. 2004: Cellular iron contents of plankton during the Southern Ocean Iron Experiment (SOFeX). *Deep-Sea Research I* 51, 1827-1850
- VENABLES, H. J., POLLARD, R. T. & POPOVA, E. E. 2007: Physical conditions controlling the development of a regular phytoplankton bloom north of the Crozet Plateau, Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II*. 54, 1949-1965
- WARE, D. M. & THOMSON, R. E. 2005: Bottom-Up Ecosystem Trophic Dynamics Determine Fish Production in the Northeast Pacific. *Science* 308, 1280-1284
- WATSON, A. J., BOYD, P. W., TURNER, S. M., JICKELLS, T. D. & LISS, P. S. 2008: Designing the next generation of ocean iron fertilization experiments. *Marine Ecology Progress Series* 364, 303-309