Läänemere seisund ja meres toimuvad protsessid

Jüri Elken
TTÜ Meresüsteemide Instituut
juri.elken@taltech.ee

Koos- ja kaastöö: vt viited

Euroopa Liit
Euroopa struktuuri- ja investeerimisfondid

Eesti
tuleviku heaks

TAL TECH
MERESÜSTEEMIDE INSTITUUT

MSI

Mõisteid. Seisundi indikaatorid

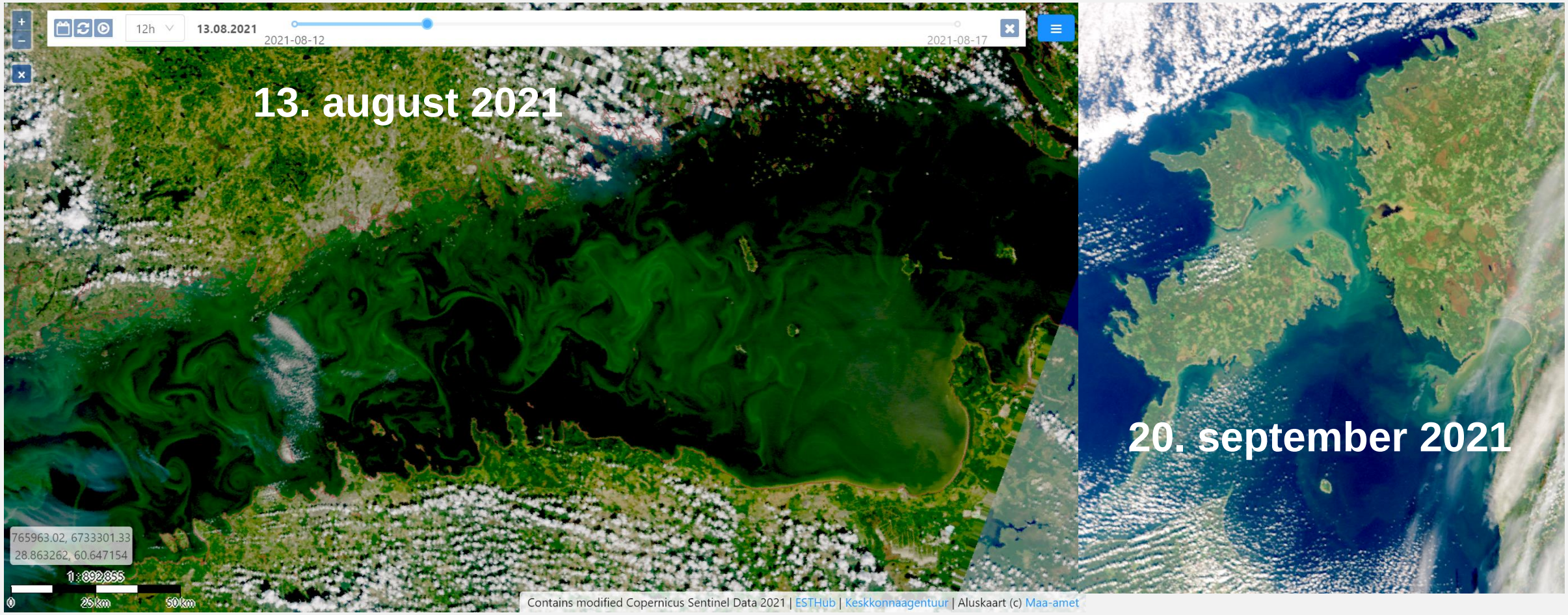
Läänemere põhilised looduslikud protsessid

Eutrofeerumine
- seisundi rekonstruktsioon ja analüüs
- projektsioonid kuni 2100

Bioloogiline mitmekesisus, ohtlikud ained

Uudsed jälgimissüsteemid
(1) *in-situ* automaatsed telemeetriaga sensorsüsteemid, (2) kaugseire, (3) vaatlusandmeid „laiendavad“ mudelid

Keskkonnaseisund nüüd: vetikad ja heljum



RITA kaugseire projekt, + COPERNICUS

Rivo Uiboupin, Sander Rikka (MSI)

EL Merestrateegia Raamdirektiiv

EL merestrateegia raamdirektiivi (2008/56/EÜ; MSRD) põhieesmärk on säilitada või saavutada hiljemalt aastaks 2020 oma mereala **hea keskkonnaseisund**, mida saab saavutada riikides erinevate meetmete kasutuselevõtuga. Igal riigil tuleb välja töötada ja rakendada oma merealas merestrateegia, et edendada merede säästvat kasutamist ja säilitada mereökosüsteeme.

Põhilised meetmed

1. **Bioloogiline mitmekesisus** – merekaitsealad, kavad viigerhüljeste ja vesiviljeluse jaoks
2. **Võõrliigid** – leviku ohjamine teadlikkuse kaudu, ballastvee reeglite rakendamine
3. **Kalandus** – piirkondlikud püügipiirangud, väheväärtusliku kala ärakasutamine
5. **Eutrofeerumine** – LNG laevakütuseks, laevadelt reostuse vähendamine, sadevee puhastus
7. **Hüdroloogia muutus** – laevade lainete mõju vähendamine
8. **Saasteained vees** – parem äkkreostuse tõrje võimekus, ohutum punkerdamine merel
9. **Saasteained toidus**
10. **Mereprügi** – hüljatud kalapüügivahendite reguleerimine, koristustalgud, plastkottide kasutuse vähendamine
11. **Meremüra ja –energia** – impulsshelide register

Meetmekava on ajakohastatud 2018. Aastaks 2020 jääb Eesti merealade hea keskkonnaseisund saavutamata, peamiseks põhjuseks kogu Läänemere eutrofeerumine.

Jälgitavad indikaatorid Läänemeres

HELCOM Läänemere tegevuskava

D1 – Biodiversiteet:	Hüljeste arvukus, toitumus ja trendid
	Kalade (eri liigid) arvukus
	Merelindude arvukus talvel ja kevadel
	Püünistesse jäänud imetajad ja linnud
D2 – Võõrliigid	Uute liikide saabumise trendid
D4 – Toiduahelad	Zooplanktoni keskmine suurus ja arvukus
D5 – Eutrofeerumine	Lämmastiku ja fosfori koormus
	Hapnik
	Klorofüll-a
	Lämmastik/DIN ja fosfor/DIP
	Merevee läbipaistvus
D8 - Ohtlikud ained	Imetejate ja kotkaste sündimus
	Orgaanilised ained (HBCDD, PFOS, PBDE)
	Radioaktiivsed isotoobid
	Raskmetallid (Pb, Cd, Hg)
	Naftareostus

Looduslikud indikaatorid

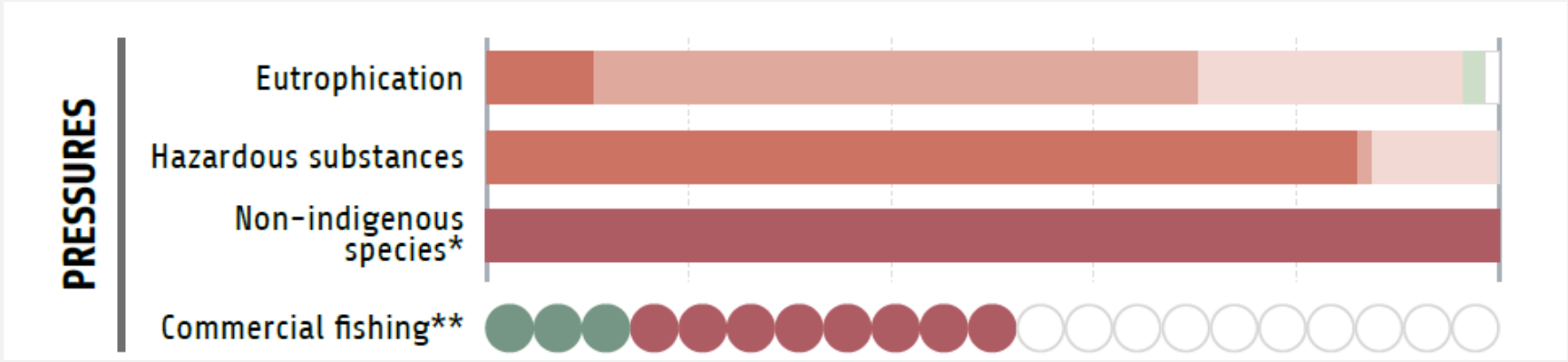
- Merepinna temperatuur
- T, S ja O_2 sügavates basseinides
- Jäätingimused
- Veevahetus Põhjamerega ja basseinide vahel
- Lainetuse kliima

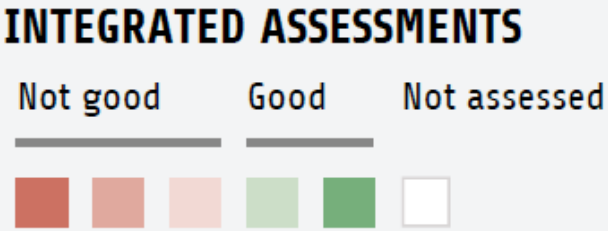
Oluline probleem on traditsiooniliste vaatluste liiga suur intervall

Soovitatakse täiendada:

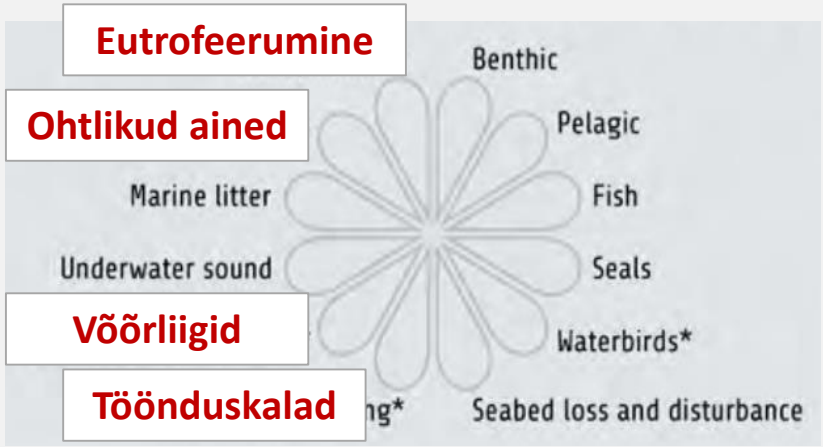
- kaugseire (temperatuur, klorofüll, lainetus)
- ferriboks, *in-situ* automaatjaamad
- andmeid täiendavad mudelid

Läänemere surveteegurid ja biodiversiteet 2011-2016





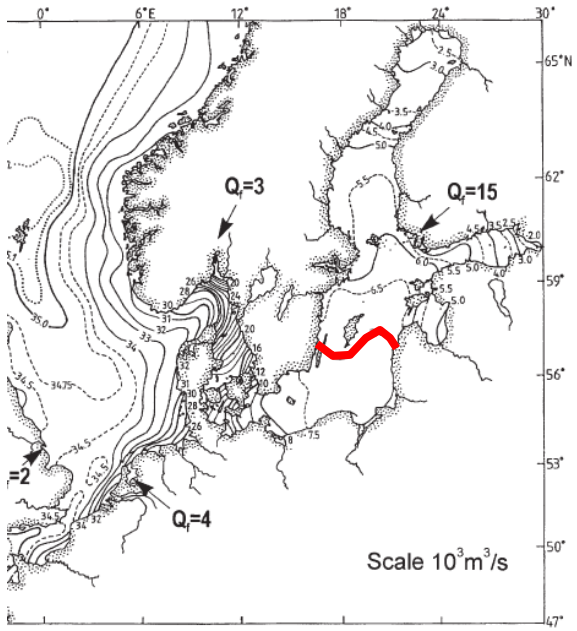
Joonise legend



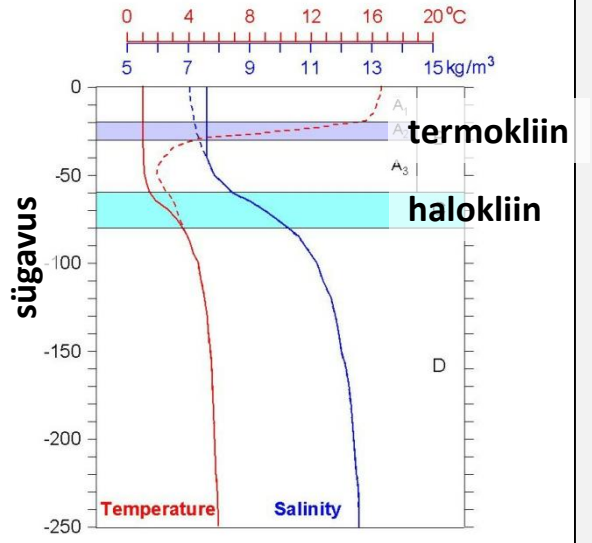
HELCOM (**2018**): State of the Baltic Sea – Second HELCOM holistic assessment 2011-2016. Baltic Sea Environment Proceedings 155.

Läänemere veeringe

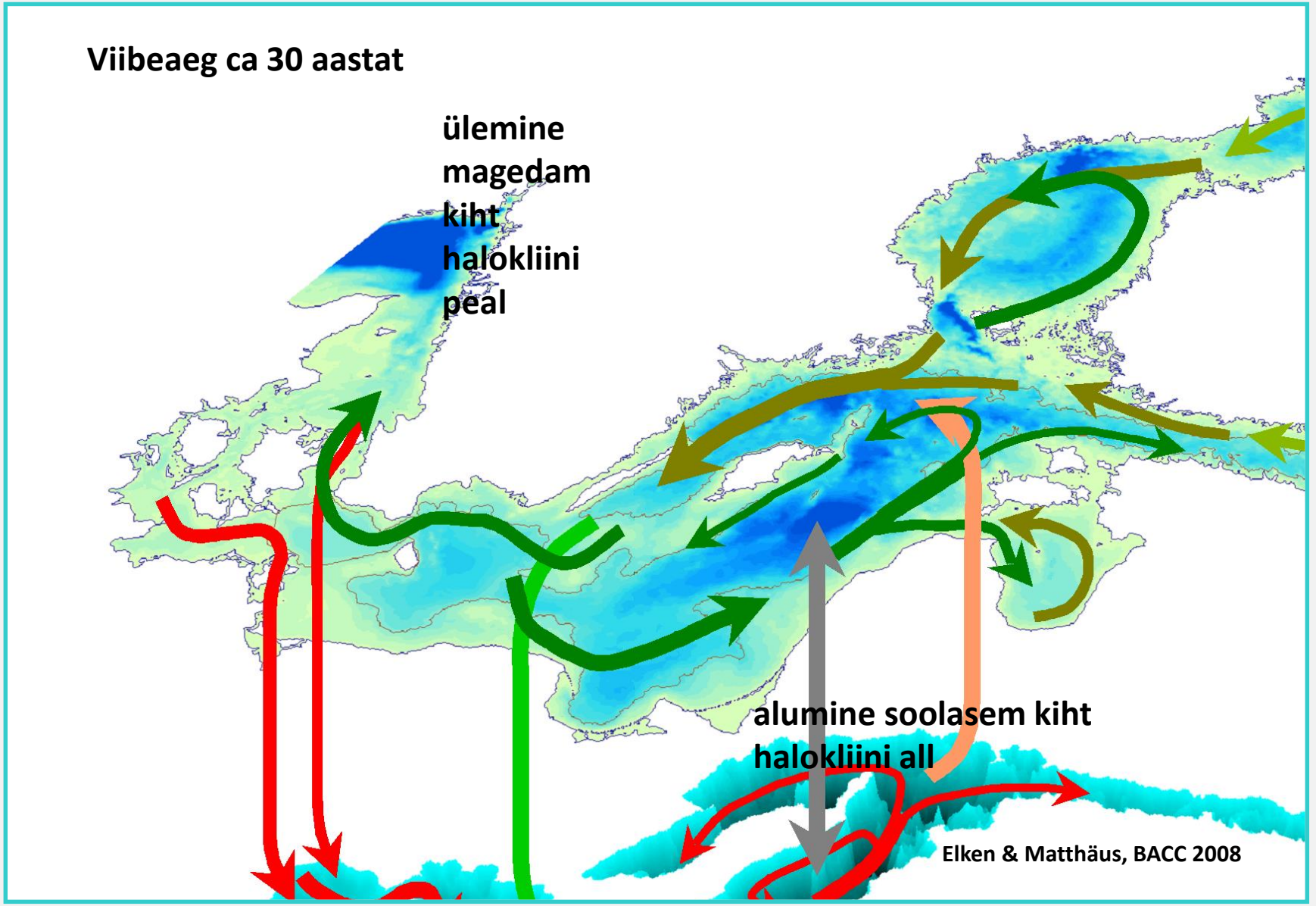
Veepinna soolsus



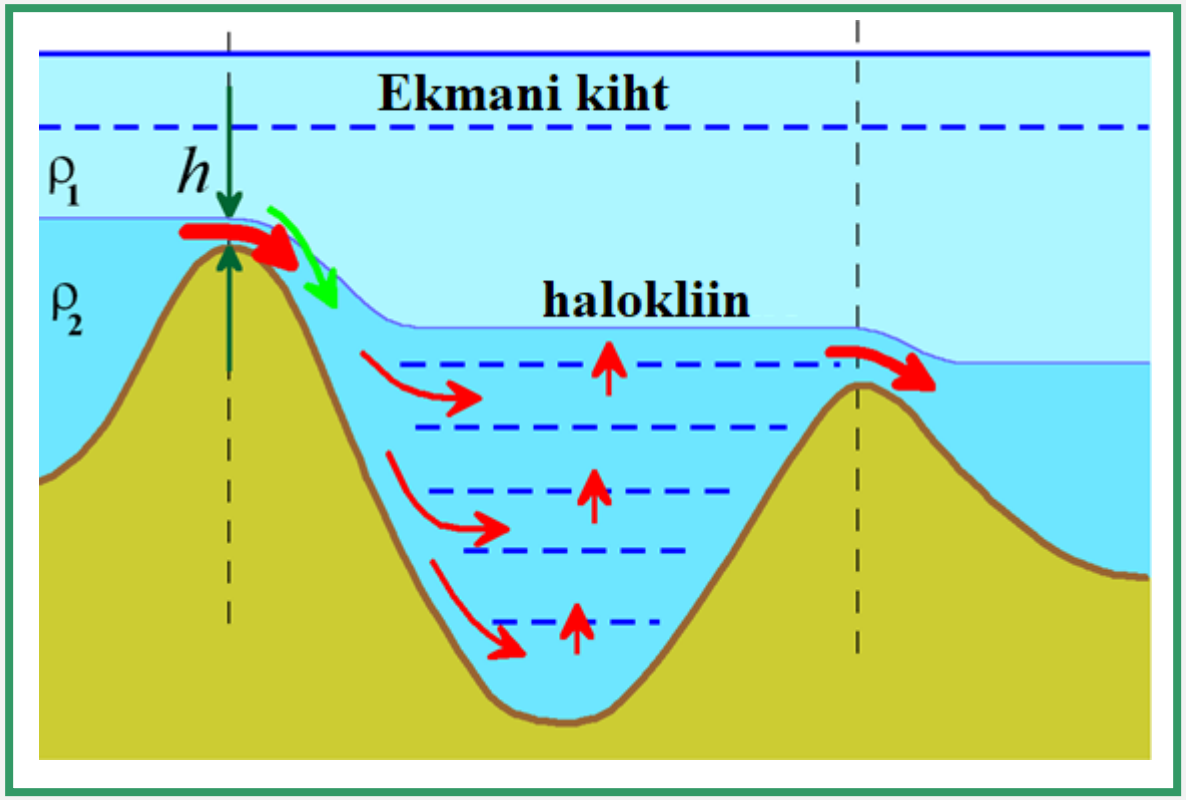
Veesamba kihistus



Viibeaeg ca 30 aastat



Veevahetus ja segunemine ühendatud basseinides



Veetransport pöörlevas kanalis

(Whitehead et al., 1974)

$$Q = \frac{g'h^2}{2f}$$

kus $g' = g\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$

Maa pöörlemine on oluline, kui

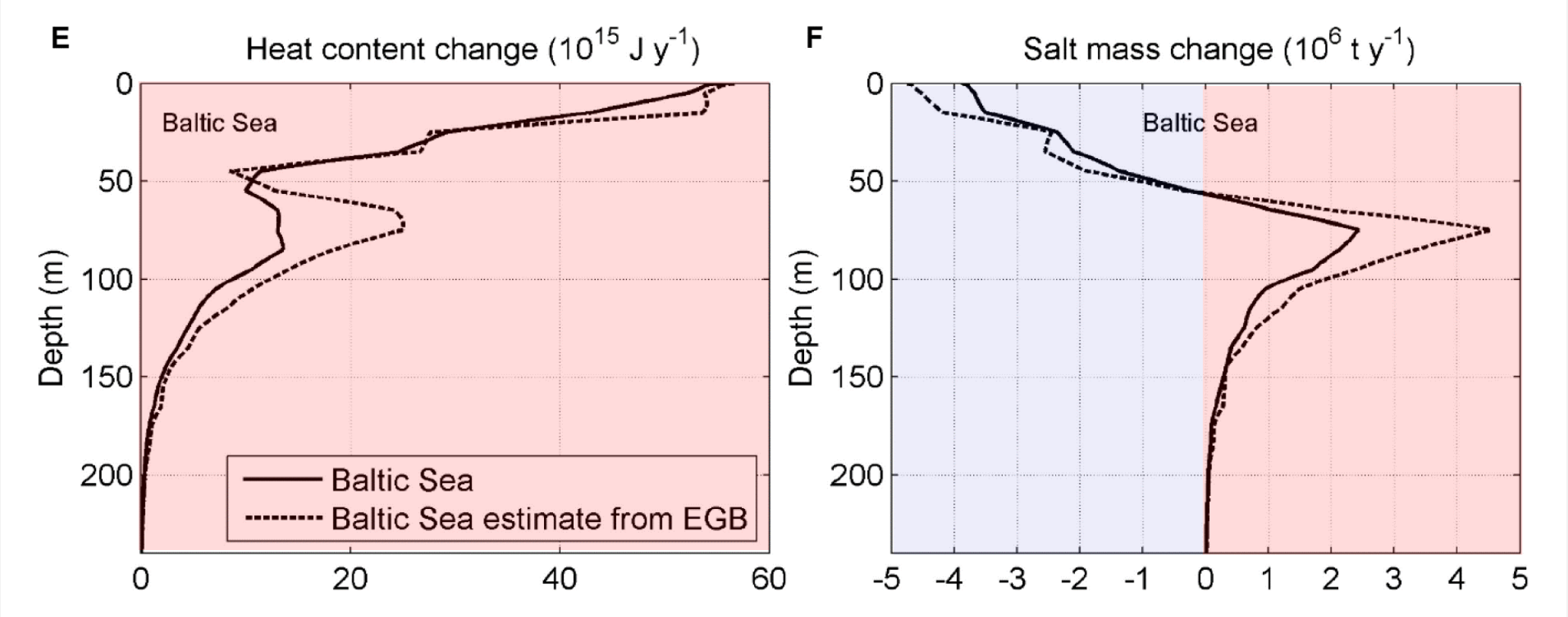
$$W > R_d = \frac{c}{f} = \frac{\sqrt{g'h}}{f}$$

- tuuletrasnport ülemises Ekmani kihis $\Rightarrow$ allpool on vastupidised kompensatsioonivoolud
- halokliini tõus pidevuse tõttu $w_i(z,t) = \frac{1}{A_i}\int_z^{H_i}(q^-_{i+1/2} - q^+_{i-1/2})dz$ on tasakaalus halokliini erosiooniga
- segunemine toimub halokliinis peamiselt siselainete tõttu $K_i^V = \frac{\alpha}{N_i}$

Läänemere veesamba kihistuse 35 aasta trendid

Koguhulga sügavusprofiilid: temperatuur ja soolsus on integreeritud üle sügavusele vastava pindala. Nendest on määratud joonistel olevad trendid.

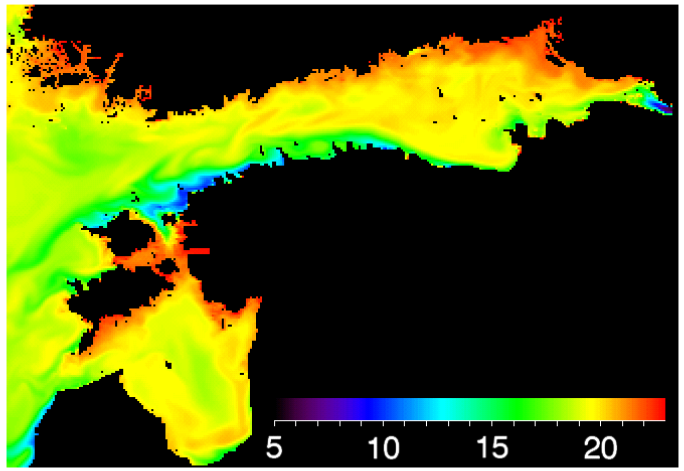
Tugevam kihistus = pinnatemperatuur on kasvanud rohkem kui süvakihtides.
pinnasoolsus on kahanenud ja halokliini soolsus on kasvanud.



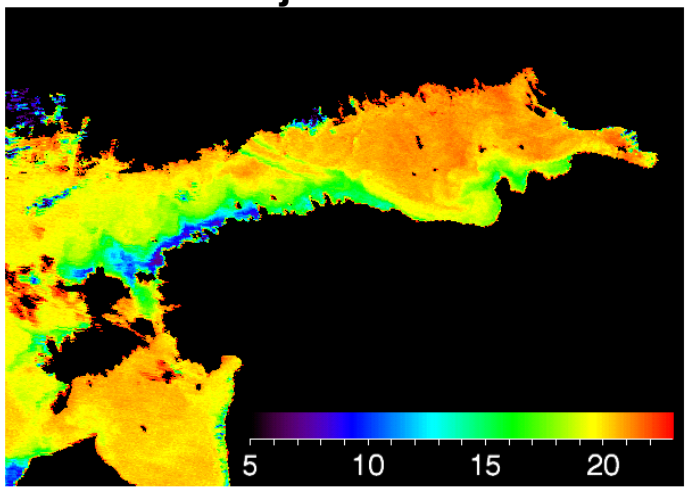
Liblik, T. and Lips, U., **2019**. Stratification has strengthened in the Baltic Sea–an analysis of 35 years of observational data. Frontiers in Earth Science, 7, p.174.

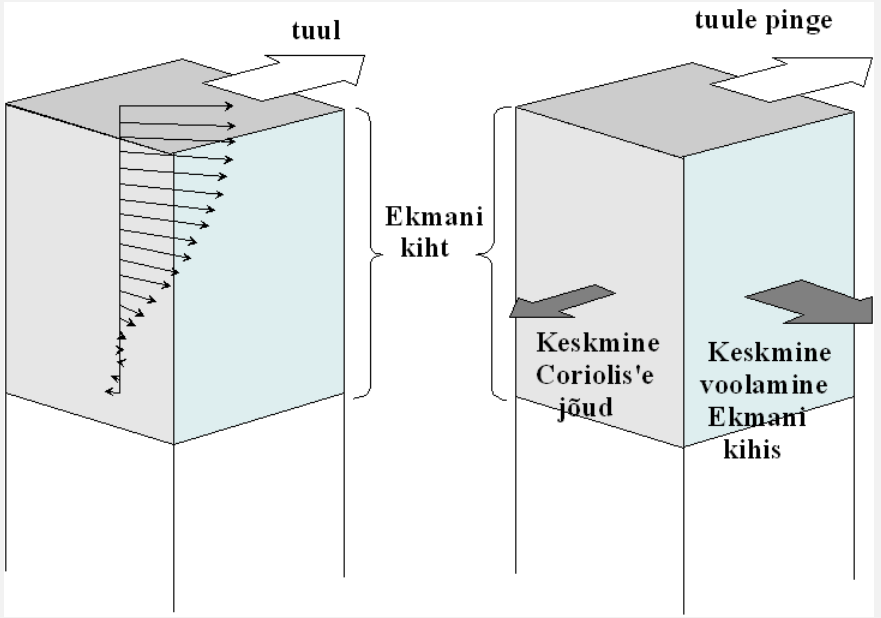
Apvelling toob külma vee ranna ääres pinnakihti

HIROMB mudelprognoos

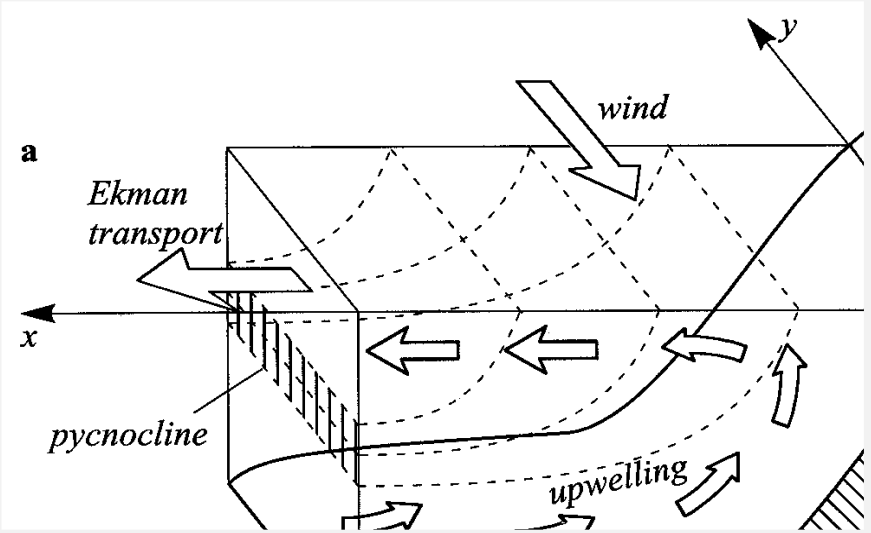


MODIS sat-kujutis



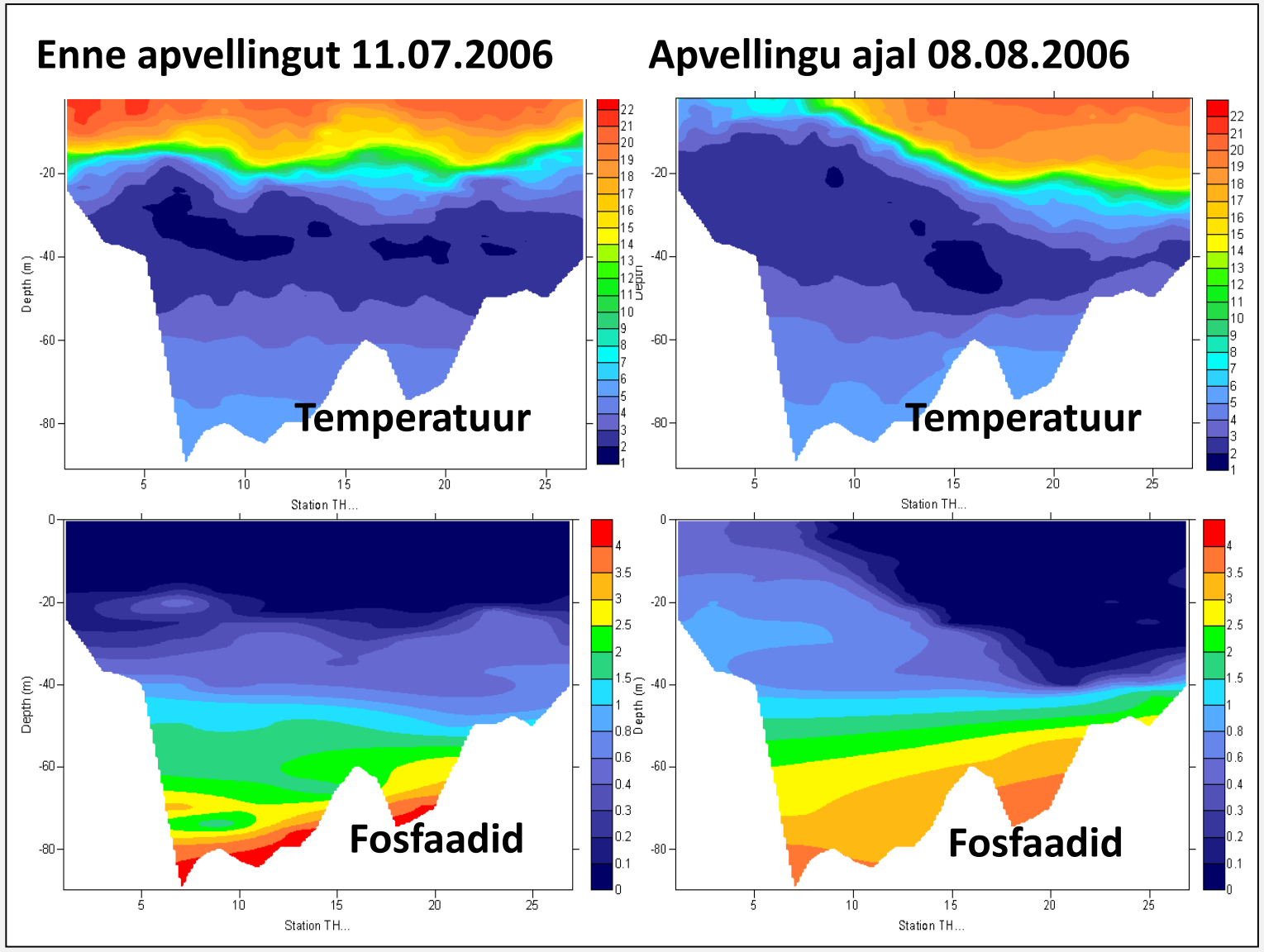


Maa pöörlemise mõjul **veepinna hoovus kaldub tuule suunast paremale**. Sügavusega triivhoovus kahaneb, kuid tema suund kaldub veelgi rohkem tuule suunast paremale. Veetransport on ülakihis tuule suunaga risti.



Kui Ekmani transport puhub pinnakihi vee ranna äärest eemale, siis **altpoolt tuleb külm ja toitainerikas vesi pinnakihti**. Soome lahe Eesti rannikul tekib apvelling idatuulte korral.

Apvellingu mõju toitainete ringele



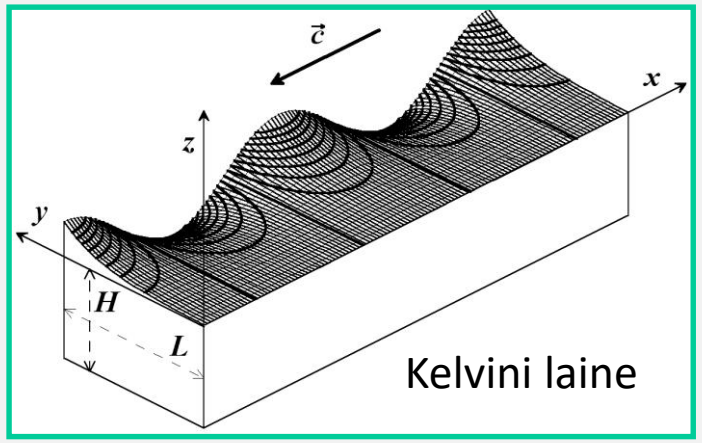
Apvellingus oli 20 m kihis fosfaatide kasv 0,3-0,4 µmol/l. Piirkonna suurus – 20 km lai rannatsooni riba pikkusega 100 km

Hinnatud vertikaalvoog on 400-600 tonni P, mis on võrdne ca 1 kuu sissekandega jõgede poolt.

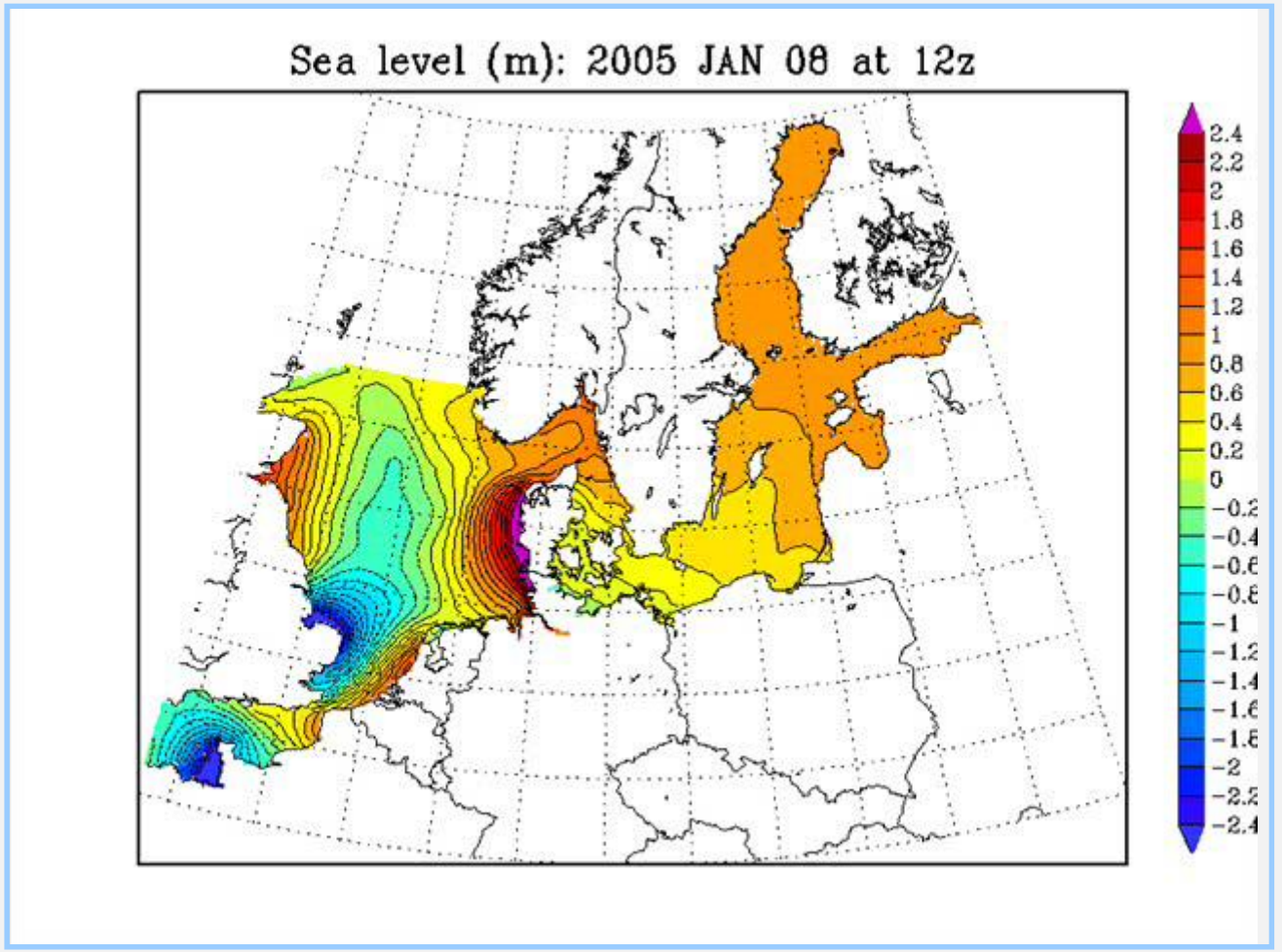
Lips, I., Lips, U. and Liblik, T., 2009. Consequences of coastal upwelling events on physical and chemical patterns in the central Gulf of Finland (Baltic Sea). *Continental Shelf Research*, *29*(15), pp.1836-1847.

Veetaseme dünaamika

Madala vee võrrandid, kus on arvestatud:
1) **veepinna kalle mõjuva tuule tõttu** – mida pikem on tuule mõju all olev mereala, seda suurem on veetasemete vahe;
2) **pikad gravitatsioonilised lained**, pikkus on sadu km, kui periood on suurem kui 14 tundi, siis tekivad Kelvini lained – kõrgus kahaneb rannast eemaldudes, lained liiguvad vastupäeva (vt tõus-mõõn Põhjameres)
3) veepinna kalle ja pikad lained toimuvad **keskmise veetaseme foonil**, mis on määratud globaalsete ja suuremastaabiliste protsessidega



Kelvini laine

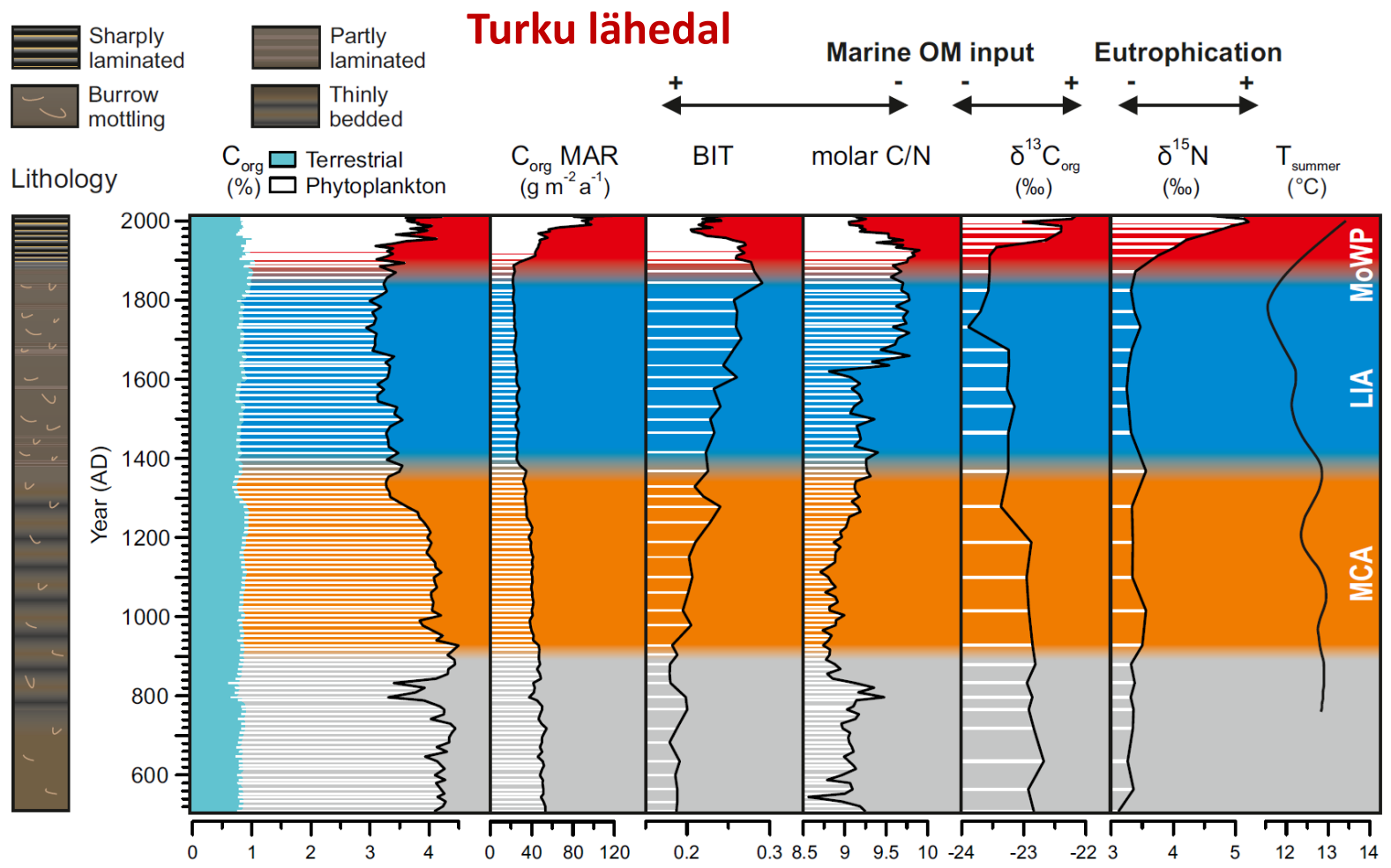


http://ocean.dmi.dk/

2005.a. jaanuaris oli Rootsi ja Pärnu veetaseme max vahe 2.60 m

Rekordilise veetaseme tõusu põhjuseks oli Läänemere eelnevalt kõrge veetase, tugeva tuule tekiytatud veepinna kalle ning võimalik resonants tormimustri liikumise ja veetaseme pika laine vahel

Eutrofeerumine: 1500 aasta rekonstruktsioon



Kuigi rannikumere hapnikutingimused on läbi erinevate kliimaperioodide muutunud, **kaasaegne hüpoksia on läbi ajaloo pretsedenditu.**

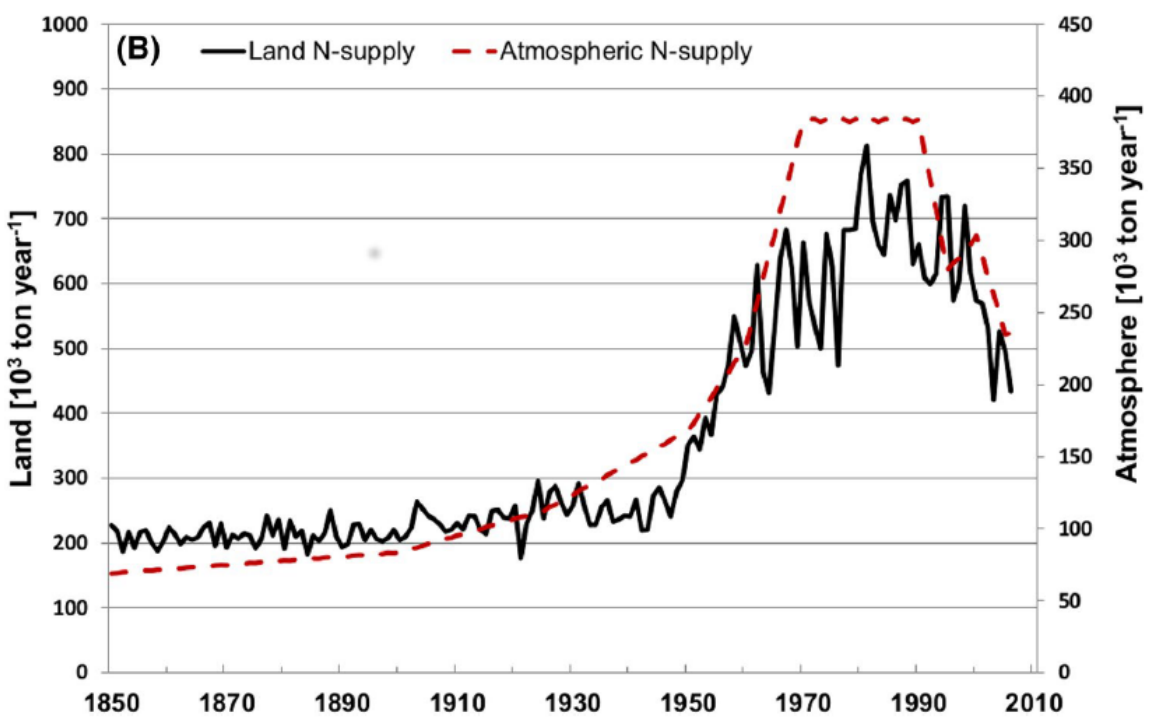
- **C_{org} – orgaanilise aine sisaldus**
- **BIT – maismaalt pärineva orgaanilise aine indikaator**
- **molar C/N – süsiniku ja lämmastiku molaarne suhe**
- **$\delta^{13}C_{org}$ – isotoop: sette orgaaniline süsinik**
- **$\delta^{15}N$ – isotoop: sette orgaaniline lämmastik**

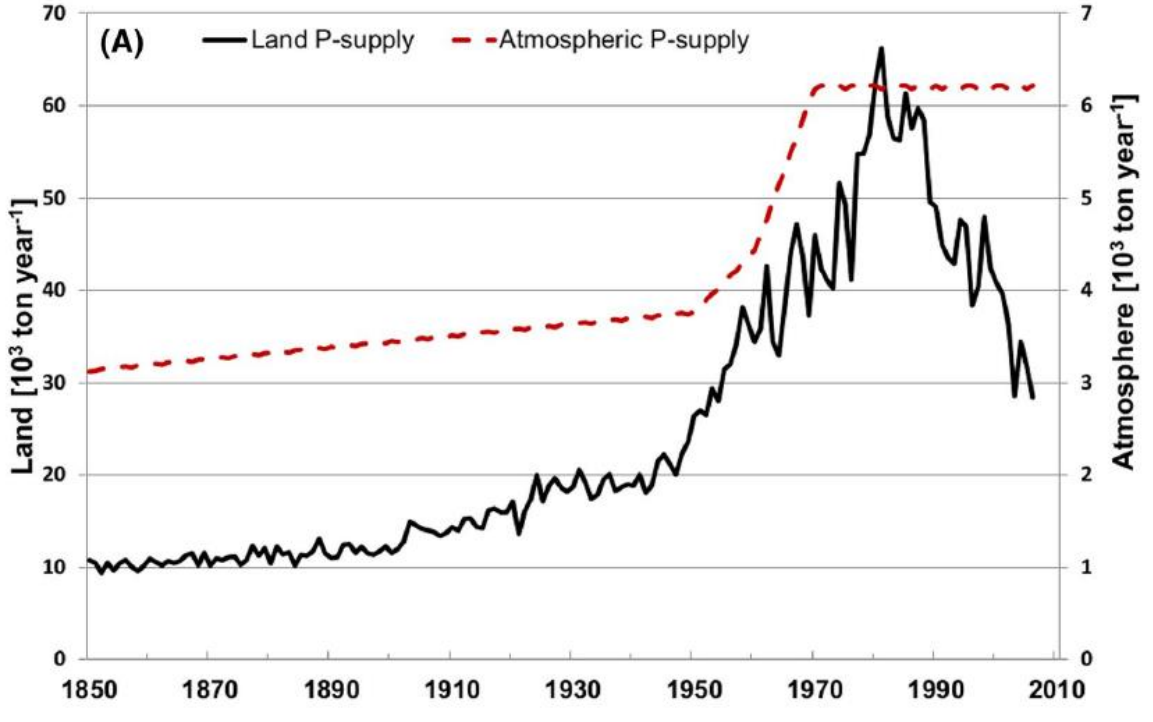
Jokinen, S.A., Virtasalo, J.J., Jilbert, T., Kaiser, J., Dellwig, O., Arz, H.W., Hänninen, J., Arppe, L., Collander, M. and Saarinen, T., **2018**. A 1500-year multiproxy record of coastal hypoxia from the northern Baltic Sea indicates unprecedented deoxygenation over the 20th century. Biogeosciences, 15(13), pp.3975-4001.

Eutrofeerumine: lämmastiku ja fosfori sissekanne

Enne N ja P sissekande vaatluste algust (ca 1960) on tulemused arvutatud ökoloogilise mudeli ERGOM abil, kasutades jõgede voolu rekonstruktsiooni.

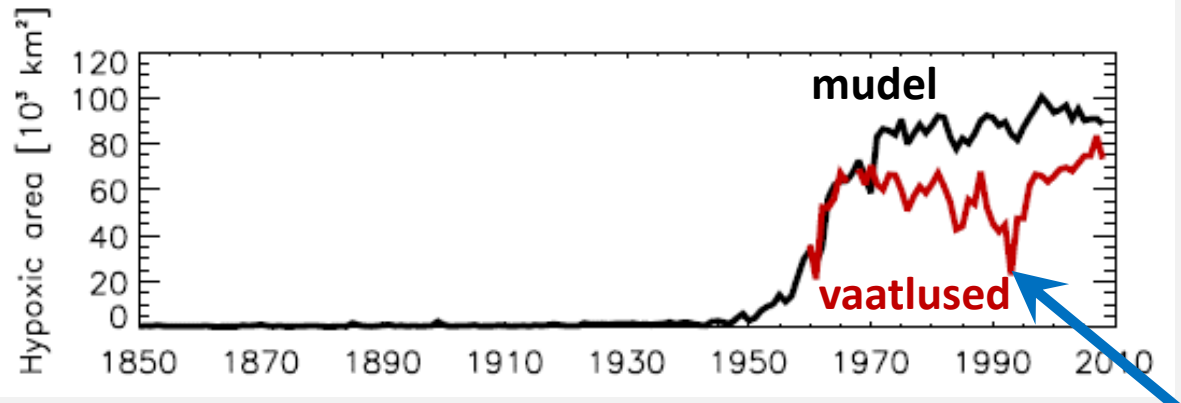
Alates ca 1990 on sissekanne vähenenud: (1) sissekande reguleerimine, (2) sotsiaal-majanduslikud muutused endise idabloki maades.



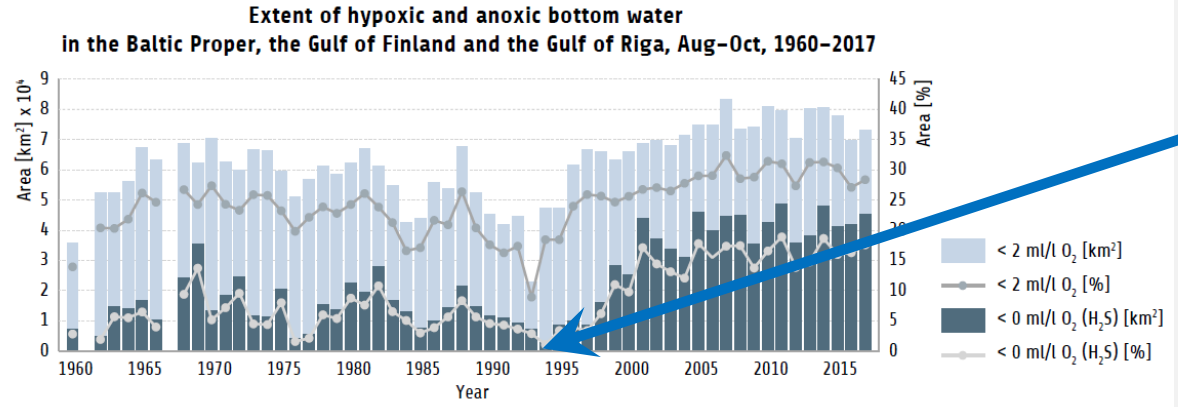


Meier, H.E.M., Eilola, K., Almroth-Rosell, E., Schimanke, S., Kniebusch, M., Höglund, A., Pemberton, P., Liu, Y., Väli, G. and Saraiva, S., **2019**. Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. Climate Dynamics, 53(1), pp.1145-1166.

Eutrofeerumine: hapnikuvaegusega piirkonna pindala (1)



Meier, H.E.M., Eilola, K., Almroth-Rosell, E., Schimanke, S., Kniebusch, M., Höglund, A., Pemberton, P., Liu, Y., Väli, G. and Saraiva, S., **2019**. Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. Climate Dynamics, 53(1), pp.1145-1166.



HELCOM (**2018**): State of the Baltic Sea – Second HELCOM holistic assessment 2011-2016. Baltic Sea Environment Proceedings 155.

Eutrofeerumise oluline kasv alates ca 1950 – 1960.

Seisundi paranemist pole näha, kuigi toitainete sissekanne on kahanenud.

1993 suur sissevool (MB)

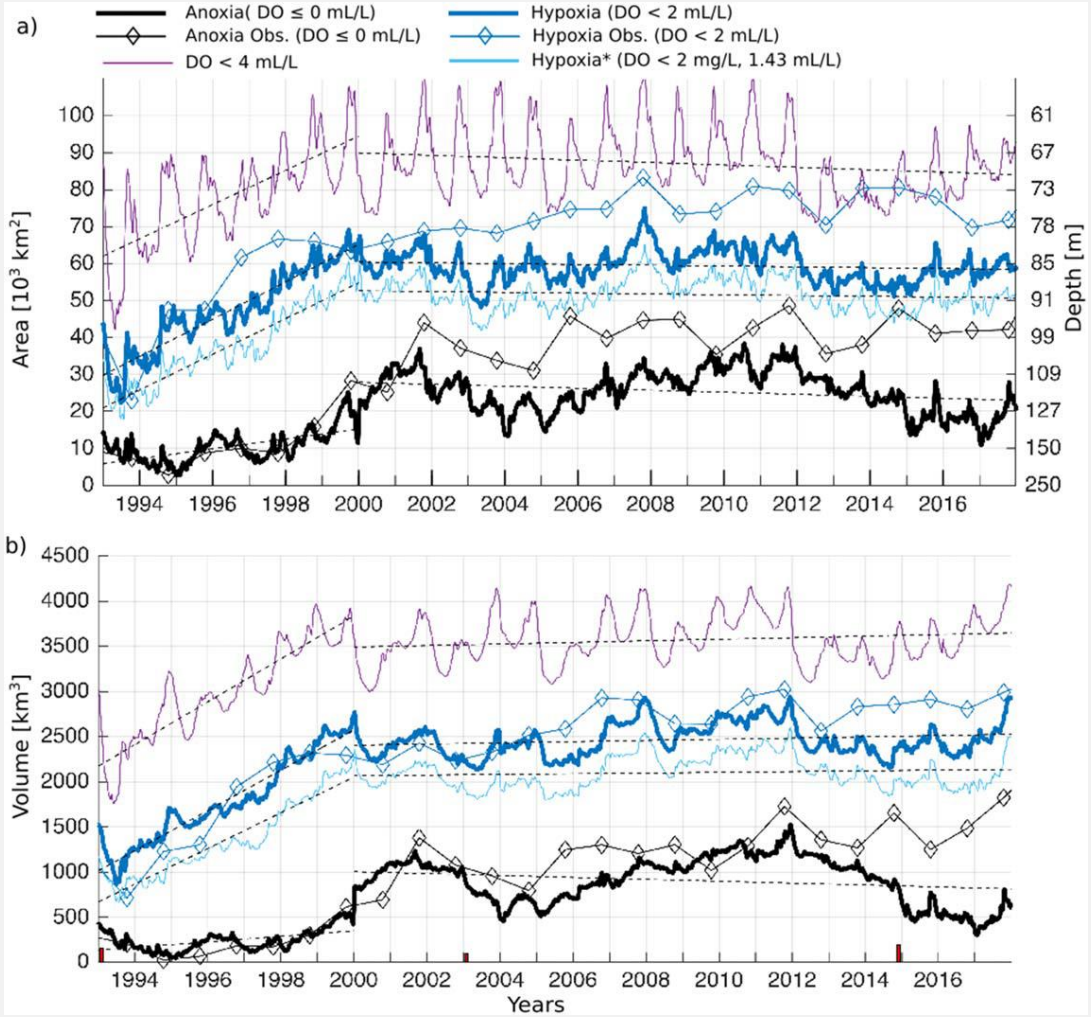
Eutrofeerumine: hapnikuvaegusega piirkonna pindala (2)

Kasutatud on uusimaid andmeid vaatlusi assimileeriva järelanalüüsi mudeli tulemustest (COPERNICUS mereteenus).

Hapnikuvaegus kasvas kuni ca 2000 ning edaspidi on jäänud püsivale tasemele.

Suurte sissevoolude (MBI) mõju ei kajastu selgelt, peale sissevoolu (näiteks 2014 talvel) hüpoksiline pindala kasvab kiiresti.

= > Looduslikud protsessid toimuvad keerukamalt kui arvati.

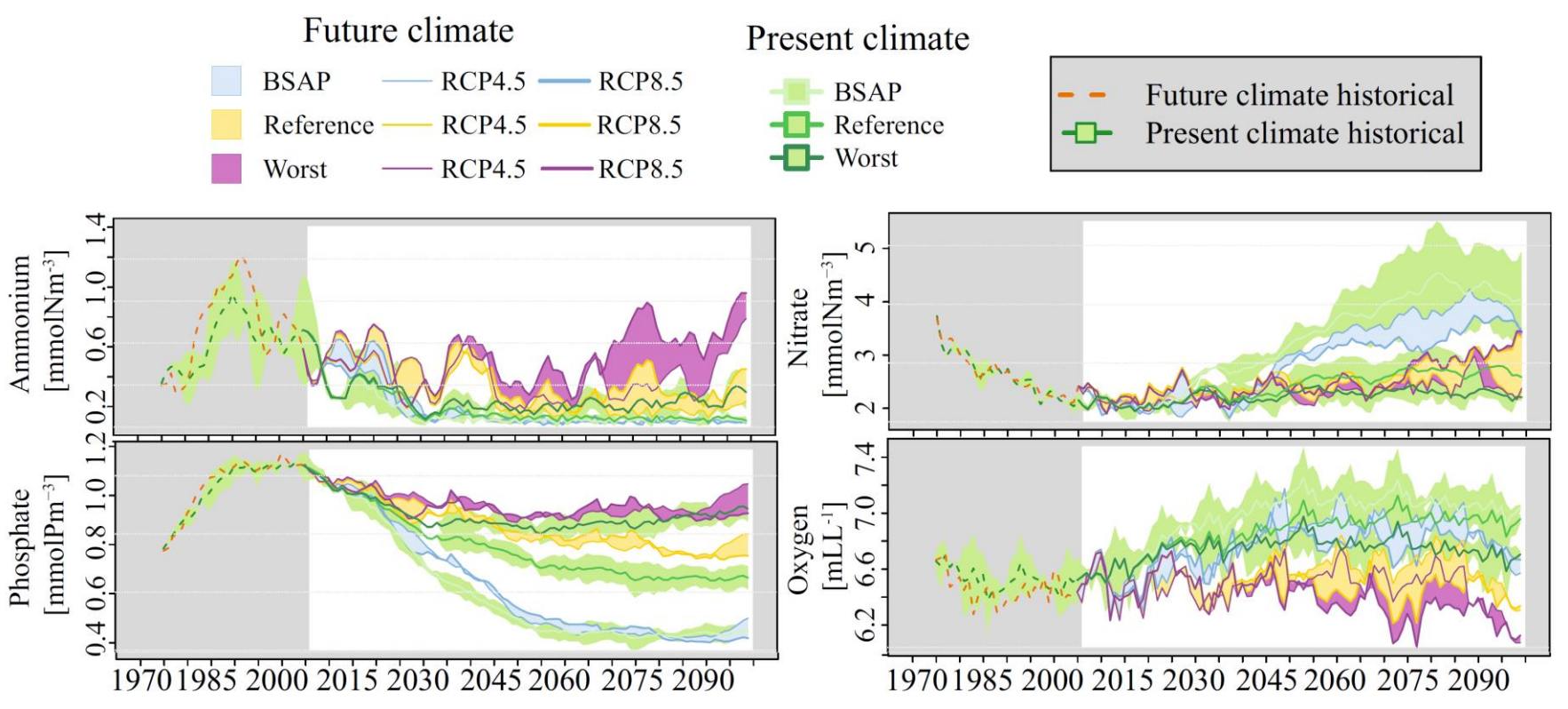


Kõuts, M., Maljutenko, I., Elken, J., Liu, Y., Hansson, M., Viktorsson, L. and Raudsepp, U., **2021**. Recent regime of persistent hypoxia in the Baltic Sea. Environmental Research Communications, 3(7), p.075004.

Toitainete ja hapniku projektsioonid kuni 2100

Kliima stsenaariumitele lisanduvad reostuskoormuse stsenaariumid: BSAP – HELCOM Läänemere tegevuskava, Reference – koormus jätkub nii nagu praegu, Worst – toitainete koormus kasvab.

Tänu 30 aasta jooksul rakendatud piirangutele, mere seisund paraneb, välja arvatud reostuse kasvu korral.



Keskmised väärtused üle kogu Läänemere.

Praegune kliima: 1976 - 2005

Tuleviku kliima stsenaariumid:

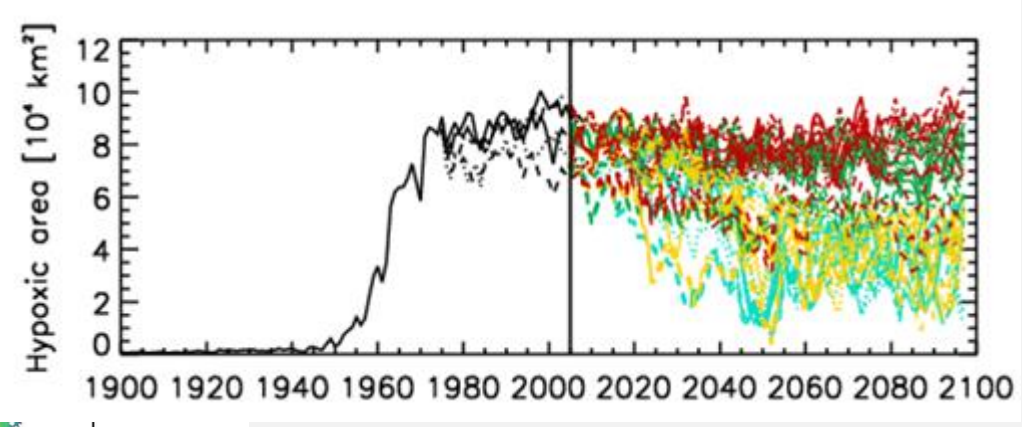
RCP8.5 – suurem õhutemperatuuri, sademete ja õhuniiskuse kasv kui RCP4.5.

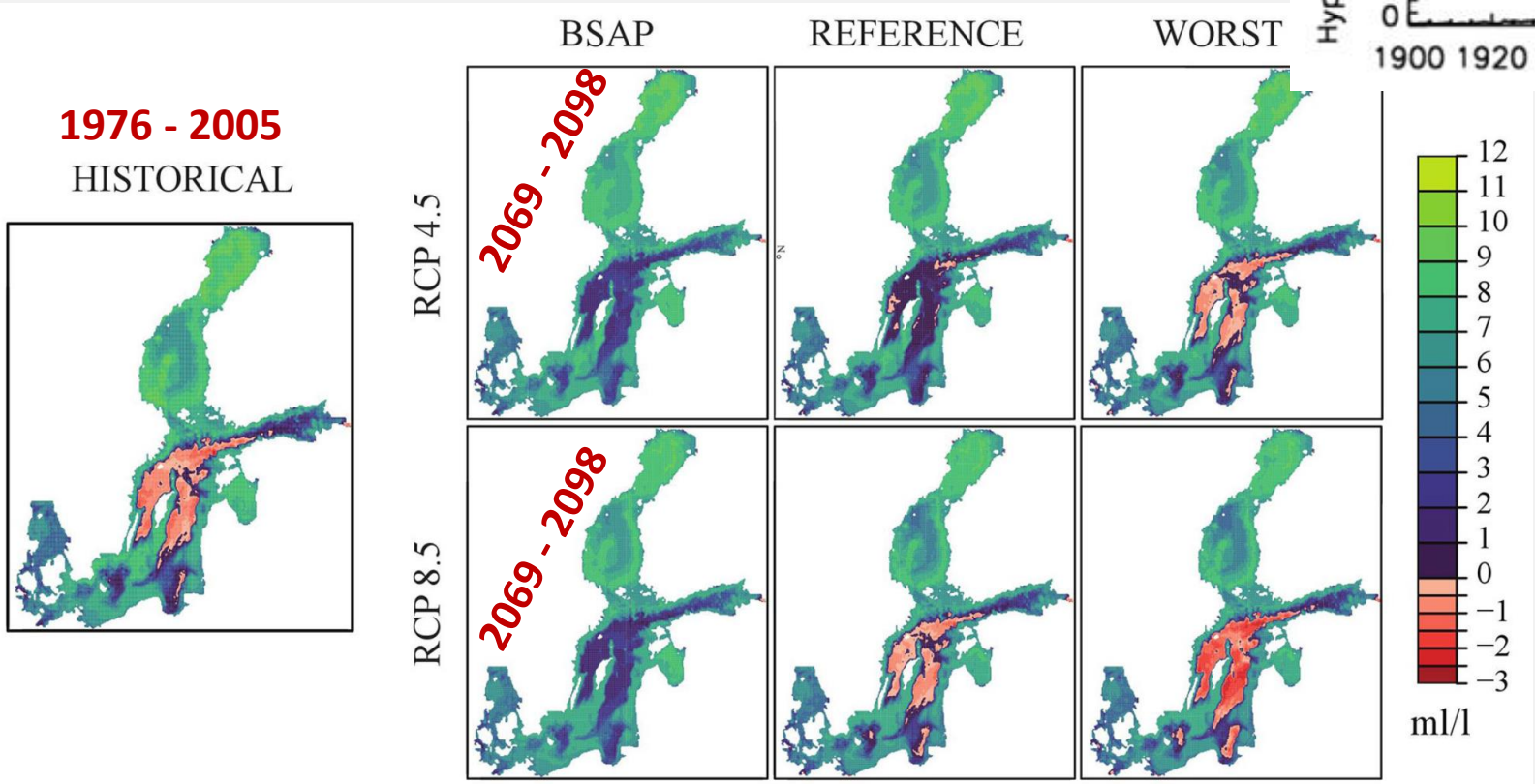
Meri läheb RCP8.5 korral soojemaks ja magedamaks kui RCP4.5 korral.

Saraiva, S., Meier, H.M., Andersson, H., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R. and Eilola, K., **2019**. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. Climate Dynamics, 52(5), pp.3369-3387.

Hapnikuvaegusega piirkonna muutuste projektsioonid

Võrreldes praeguse olukorraga, **tänu 30 aasta jooksul rakendatud piirangutele, põhjalähedased hapnikutingimused paranevad, välja arvatud reostuse kasvu korral.**

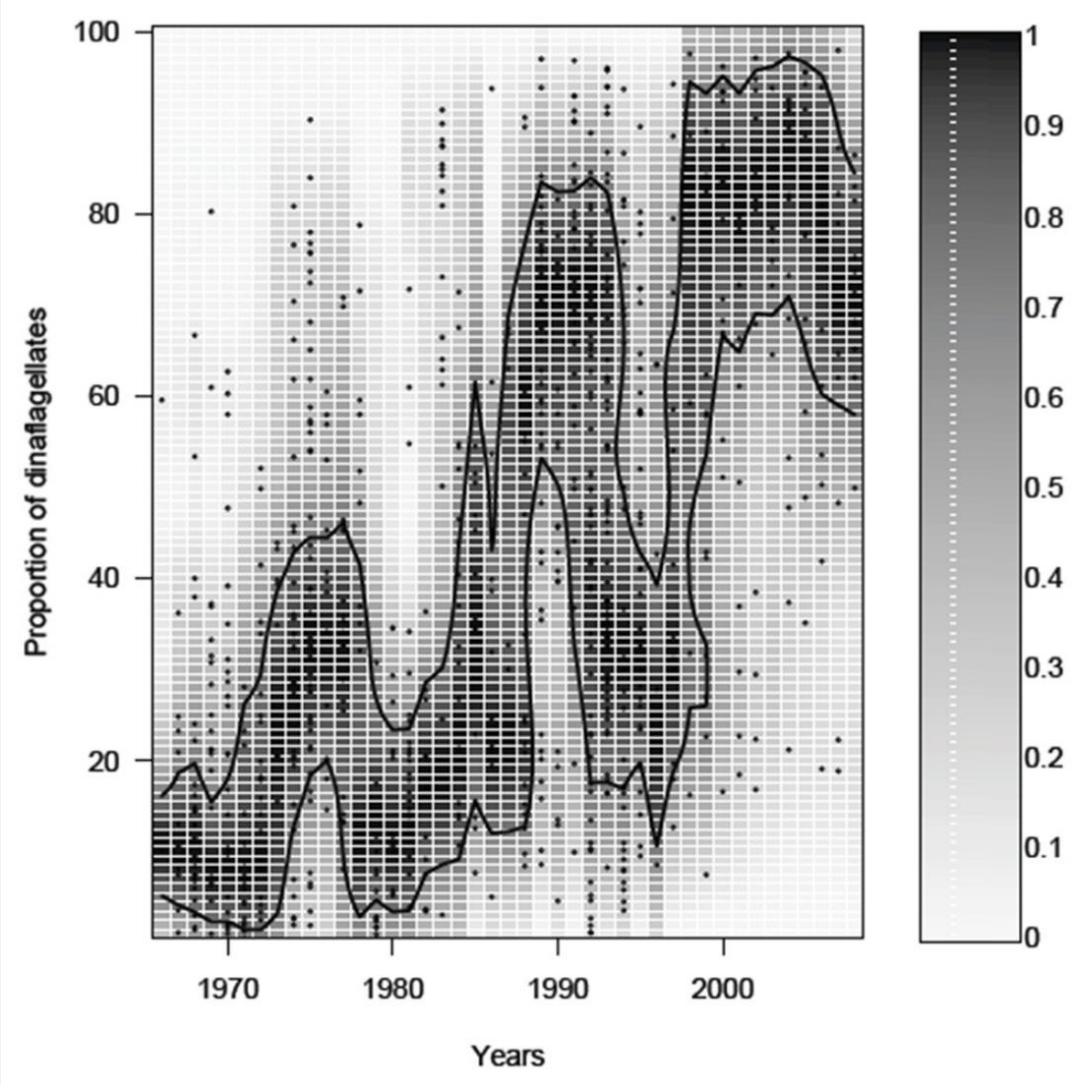




Hüpoksia (O_2 < 2 ml/l) piirkond ei kasva, halval juhul kasvab anoksia (väävelvesiniku) piirkond

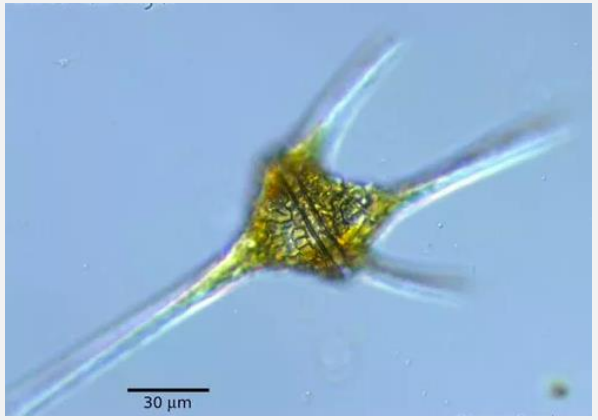
Saraiva, S., Meier, H.E., Andersson, H., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R. and Eilola, K., **2019**. Uncertainties in projections of the Baltic Sea ecosystem driven by an ensemble of global climate models. Frontiers in Earth Science, 6, p.244.

Biodiversiteet: fütoplanktoni kevadõitsengu muutused



Fütoplanktoni kevadõitsengutes on dinoflagellaatide (vaguviburvetikate) osakaal kasvanud ning diatomeede (ränivetikate) osakaal kahanenud.

Dinoflagellaadid

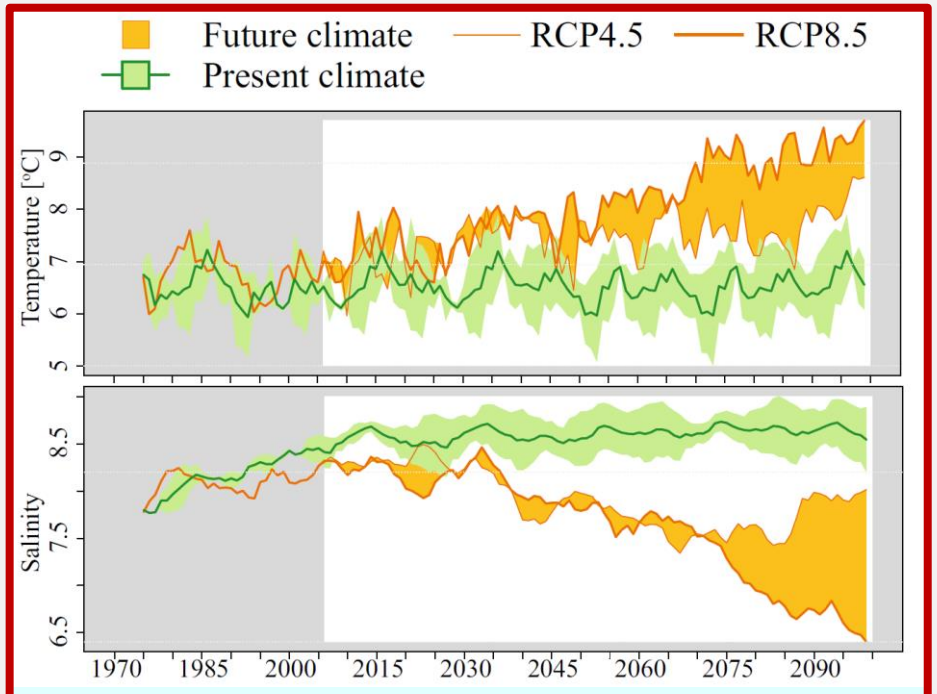


Diatomeed

Hüpotees: dinoflagellaatide kasv vähendab toitainete ülekannet settesse ning sekundaarset eutrofeerumnist

Spilling, K., Olli, K., Lehtoranta, J., Kremp, A., Tedesco, L., Tamelander, T., Klais, R., Peltonen, H. and Tamminen, T., **2018**. Shifting diatom—dinoflagellate dominance during spring bloom in the Baltic Sea and its potential effects on biogeochemical cycling. Frontiers in Marine Science, 5, p.327.

Biodiversiteet: soolsuse kahanemise mõju liikidele

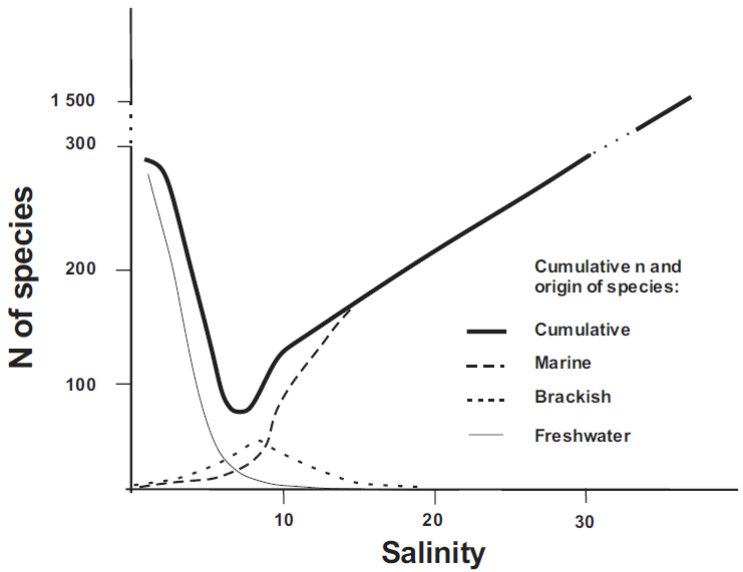


Saraiva, S., Meier, H.M., Andersson, H., Höglund, A., Dieterich, C., Gröger, M., Hordoir, R. and Eilola, K., **2019**. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. Climate Dynamics, 52(5), pp.3369-3387.

Kuni 2100 temperatuur kasvab ja soolsus kahaneb, eriti sooja ja niiske RCP8.5 korral.

Täpsustatud *Remane kõver* Läänemeres.

Enamus liike on kohandunud kas magevee või ookeani vee tingimustele. Soolsustel 5-7 on liikide arv minimaalne ja see soolsuse vahemik – **horohaliinikum paikneb praegu mere keskel**. Suurim liikide arv on fütoplanktonil, makrozoobentosel ja zooplanktonil.

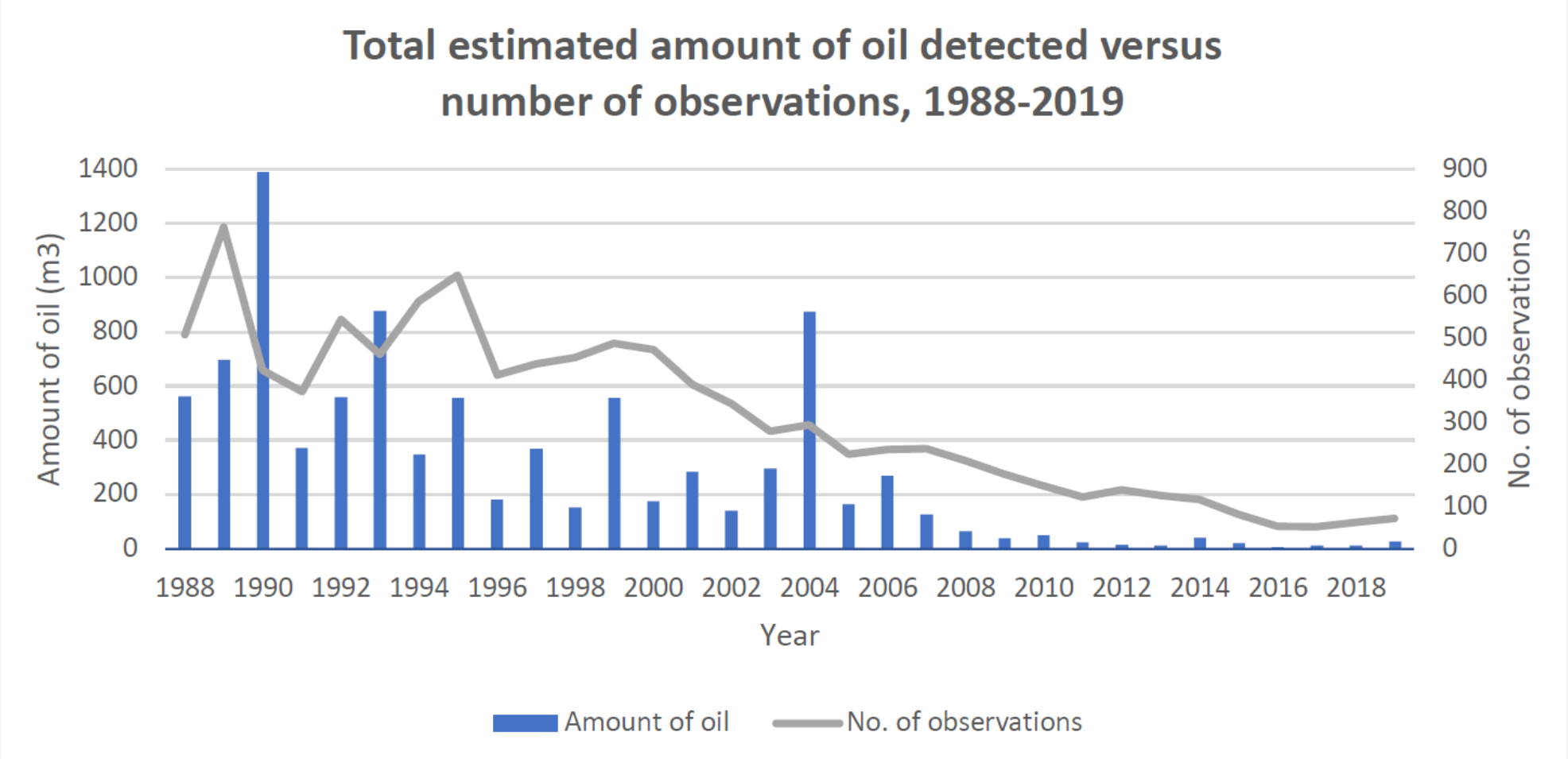


Vuorinen, I., Hänninen, J., Rajasilta, M., Laine, P., Eklund, J., Montesino-Pouzols, F., Corona, F., Junker, K., Meier, H.M. and Dippner, J.W., **2015**. Scenario simulations of future salinity and ecological consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas–implications for environmental monitoring. Ecological indicators, 50, pp.196-205.

Hüpotees: soolsuse kahanemine vähendab Läänemeres liikide arvukust; kuid samas, liigid võivad muutuvatele oludele kohaneda.

Vaatluslennukitelt avastatud naftareostus

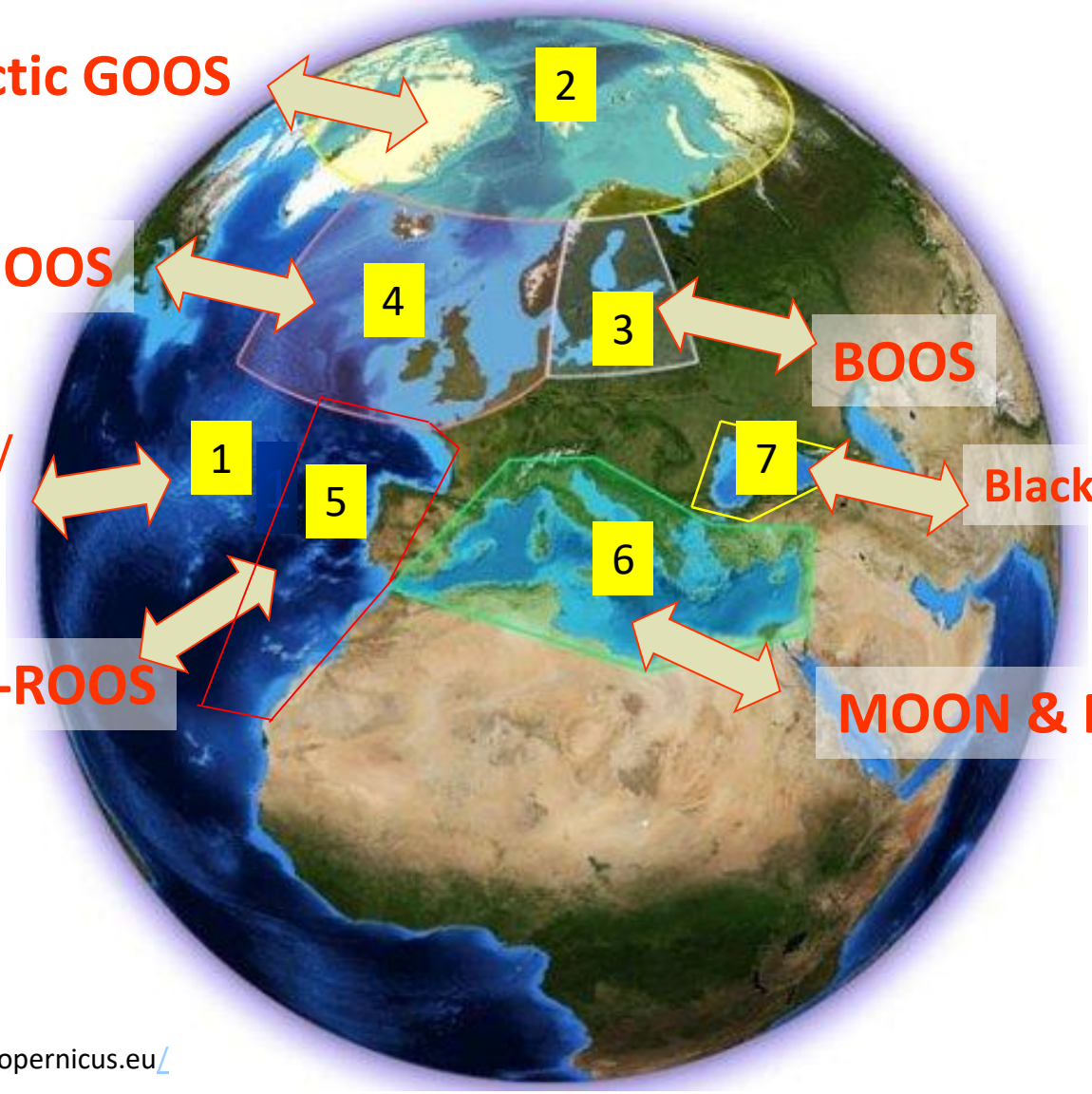
Kahanenud on nii intsidentide arv kui ka reostuse suurus.



HELCOM (**2020**). HELCOM Annual report on discharges observed during aerial surveillance in the Baltic Sea 2019

COPERNICUS mereteenuste regioonid

Marine Core Service



- 1. Global
- 2. Arctic
- 3. Baltic
- 4. NWS
- 5. IBI
- 6. Med Sea
- 7 Black Sea

Andmekogumid

***In situ* vaatlused**

- uurimislaevad
- automaatjaamad avamerel ja rannikul, ferriboks, allveeliugur, ARGO ujukid

Kaugseire

- SST, merejää, lainetus, veetase, meretuul
- klorofüll, sinivetikad, heljum, kiirgus

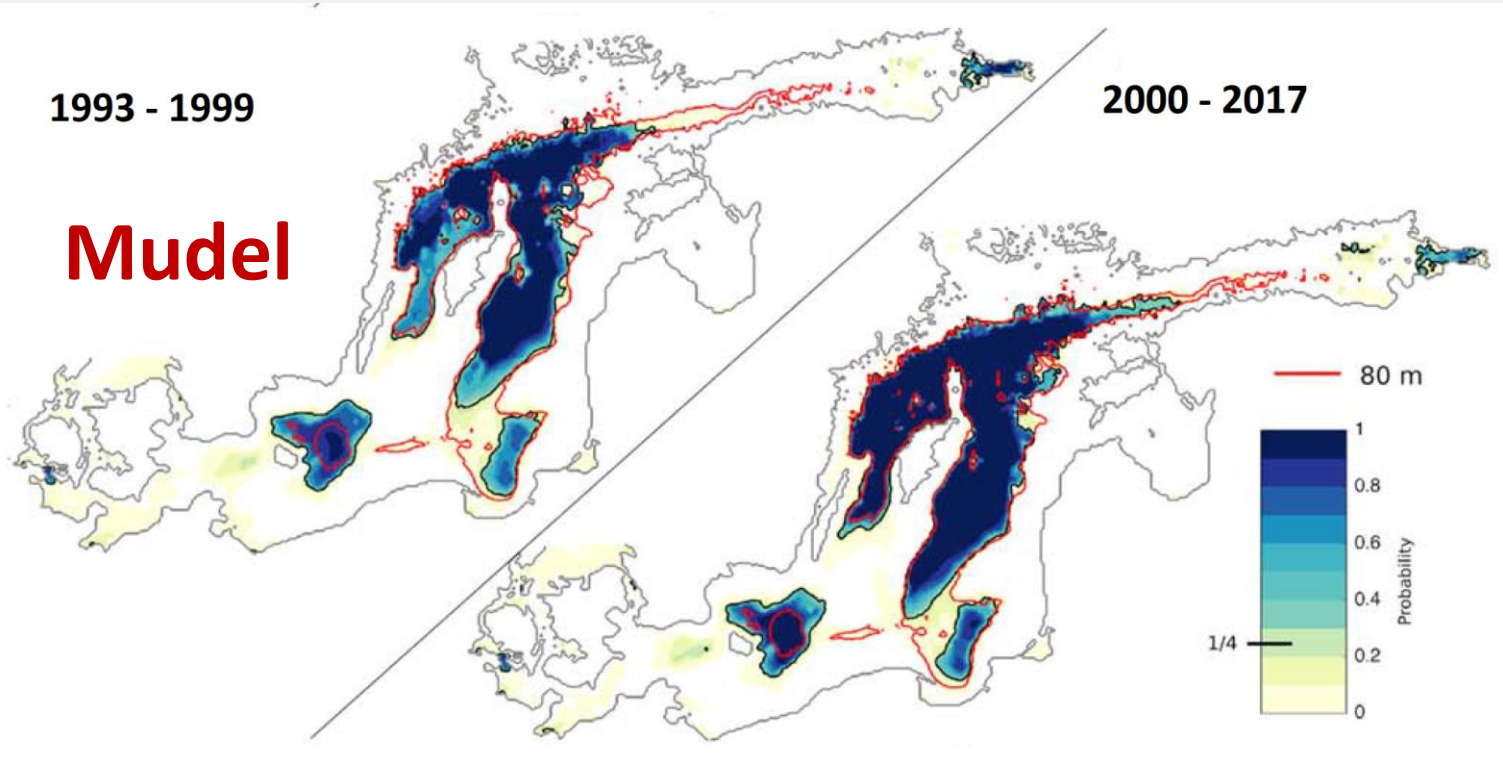
Mudelid

- operatiivne prognoos
- vaatlusi assimileeriv järelanalüüs
- kliima projektsioonid

http://marine.copernicus.eu/

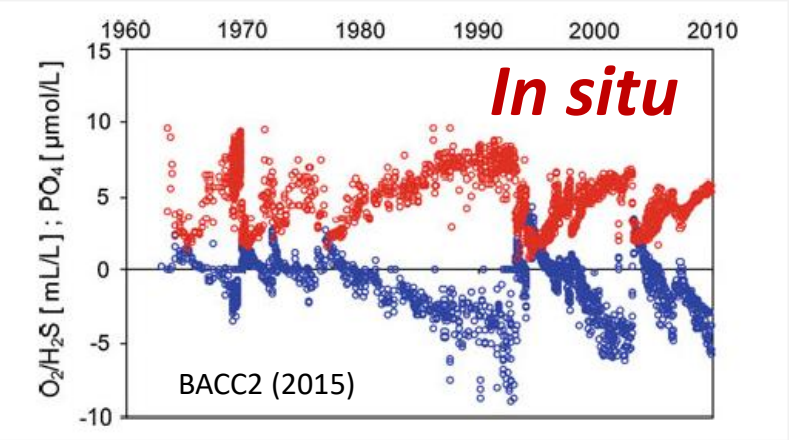
Andmete kooskasutus: eutrofeerumine Läänemeres

Hapnikupuuduse (O_2 < 2 ml/l) esinemise sagedus



Kõuts, M., Maljutenko, I., Elken, J., Liu, Y., Hansson, M., Viktorsson, L. and Raudsepp, U., **2021**. Recent regime of persistent hypoxia in the Baltic Sea. Environmental Research Communications, 3(7), p.075004.

Fosfor ja O_2/H_2S Gotlandi süviku põhjakihtides

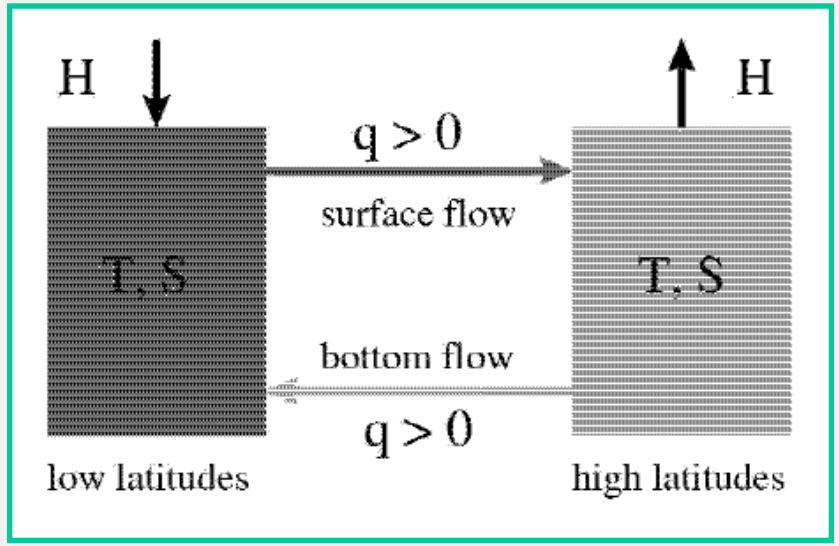


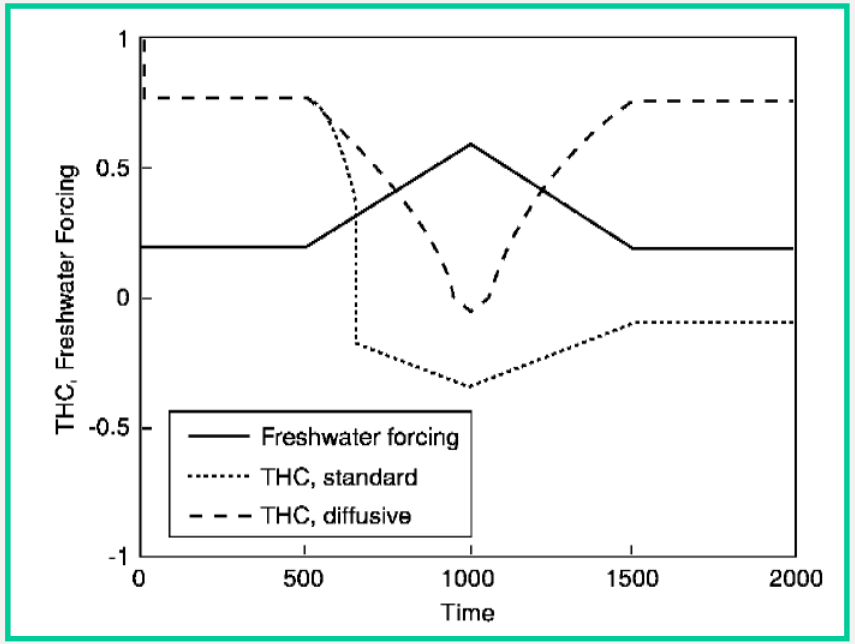
Mis saab Läänemerest edasi?

- Meri reageerib välismõjudele aeglaselt, kohati mitmekümne aastase hilinemisega. Alates ca 1990 rakendatud keskkonnahoiu meetmete mõju pole veel täielikult avaldunud. **TULEB OLLA KANNATLIK** ja jätkata mere säästlikku kasutamist – mere ökoloogiline **seisund hakkab paranema**.

- Mere hüvede ja teenuste jätkusuutliku kasutamise idee tingib vajaduse teha **teadmistepõhiseid otsuseid**, tuginedes nii mere praeguse kui ka tuleviku seisundi võimalikult veakindlale määramisele; varasemad intuitiivsed teadmised ei tarvitse uutes inimmõjude ja kliima muutuvates tingimustes olla piisavalt täpsed // **miks meri ei käitu nii nagu me arvasime?**
- Uusi teadmisi mere kohta võimaldavad **revolutsioonilised arengud *in situ* ja kaugseire vaatluste ja modelleerimise tehnoloogias, eriti biogeokeemiliste olekumuutujate osas**
- Mere kasutamise praktiliste küsimuste lahendamisel on vaja tõhustada **koostööd loodus- ja tehnikateadlaste vahel**, kuid sotsiaalteadlased peavad samuti kaasa aitama

Stommeli termohaliinse tsirkulatsiooni mudel

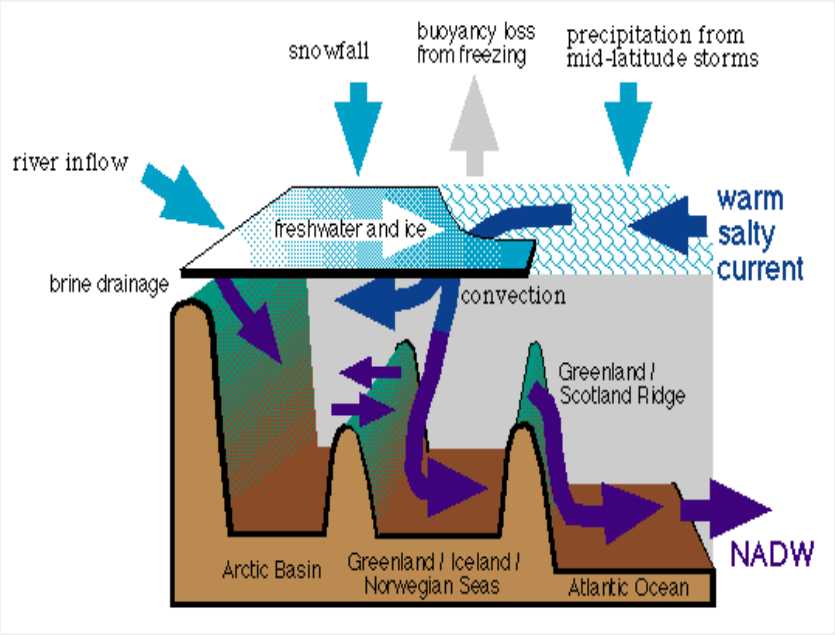




Veetranspordi q sõltuvust magevee juurdevoolust F kirjeldab ruutvõrrand

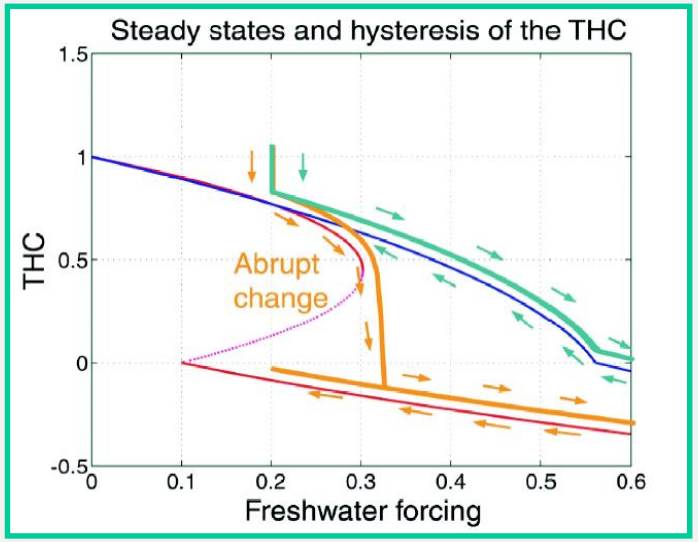
$$q^2 - k\alpha\Delta\tilde{T}q + Fk\beta = 0$$

Magevee juurdevoolu kasvamisel ja kahanemisel liigub süsteem mööda erinevaid olekutrajektoore. Väikese difusiooni korral on võimalikud järsud muutused

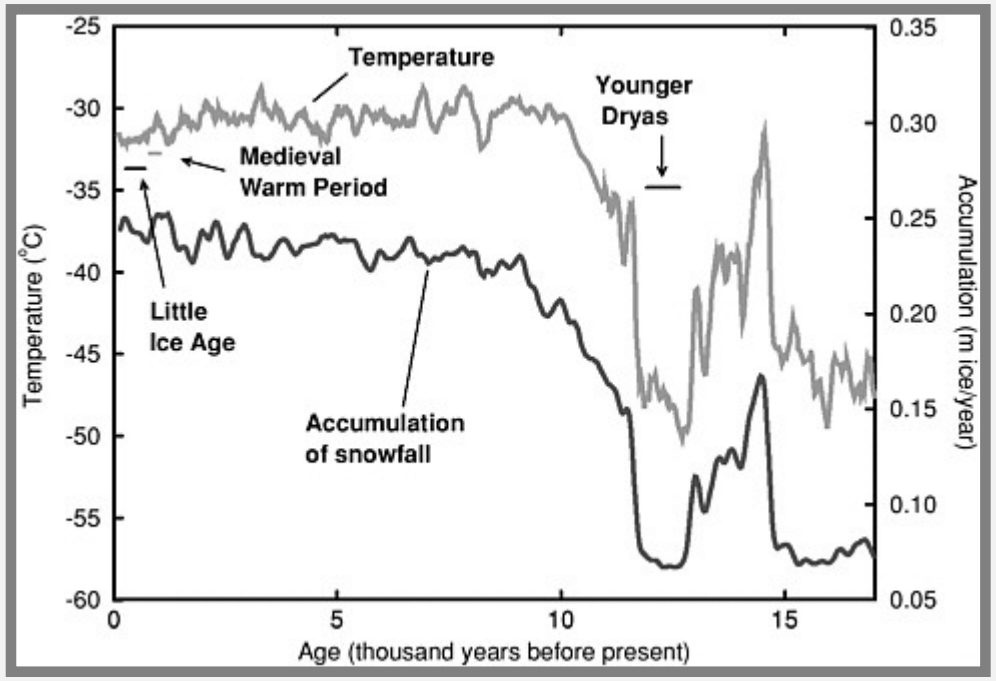


Tsirkulatsioon mõjutab otseselt kliimat

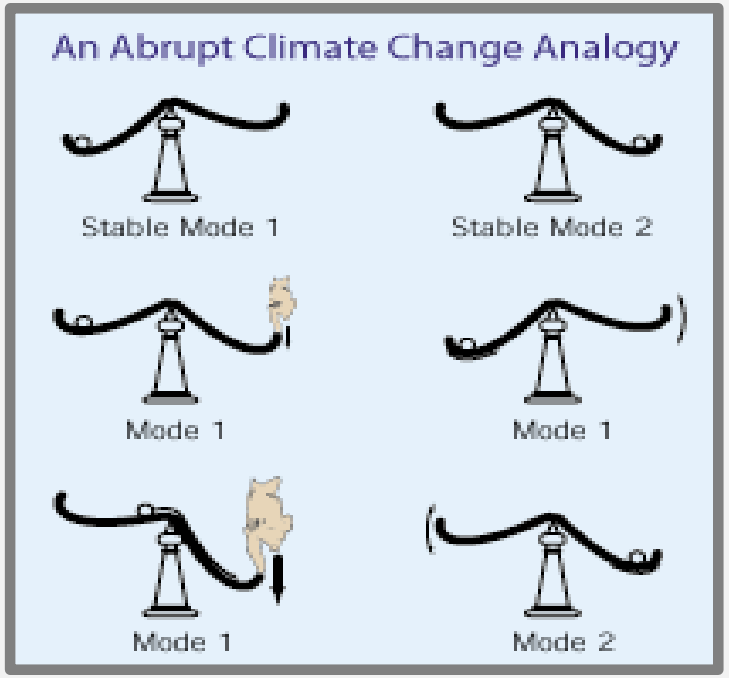
Magevee juurdevoolu kasvamisel ei saa Arktikas jahtunud vesi enam sukelduda ja tagasi voolata ning soe Põhja-Atlandi hoovus nõrgeneb



Kliima järsud muutused



Viimase 17000 aasta kliima rekonstruktsioon Gröönimaa jääpuurimiste andmete põhjal



Kiirete olekumuutuste mehaaniline analoog:
kui kõrvalekalle läheb üle kriitilise piiri, toimub võnkumine teise tasakaaluasendi ümber

Epiloog. Mereseisundi küsimused: meediakajastuste teemasid

- uute **sadamate** rajamine varem puutumatutesse kohtadesse
- **sinivetikate** vohamised, eutrofeerumine ja/või kliimamuutus?
- **kiirlaevade** “tapvad” lained Tallinna lahes
- **liiva kaevandamine** rannikumeres ohustab randade stabiilsust
- hukutavad **meretaseme tormitõusud** Pärnus ja teistes piirkondades
- **naftareostuse** riskid ja tegelikud juhtumid Soome lahes ja mujal
- Nord Stream **gaasijuhe**, keskkonnamõjud?
- ranniku- ja **avamere tuulepargid**, kas nad on ikka head?
- rasked **jääolud** panevad nõrgemad laevad seisma
- **madal meretase** paneb laevaühenduse saartega seisma
- **võõrliigid** meres teevad kohalikele mereliikidele liiga
- **surnud kalad** meres ja järvedes
- kas kalad on **dioksiiniga** mürgitatud?
- miks **suplusvesi** on mõnikord väga külm?
- **paha hais** rannikutel
- **kolibakterid** supelrandades