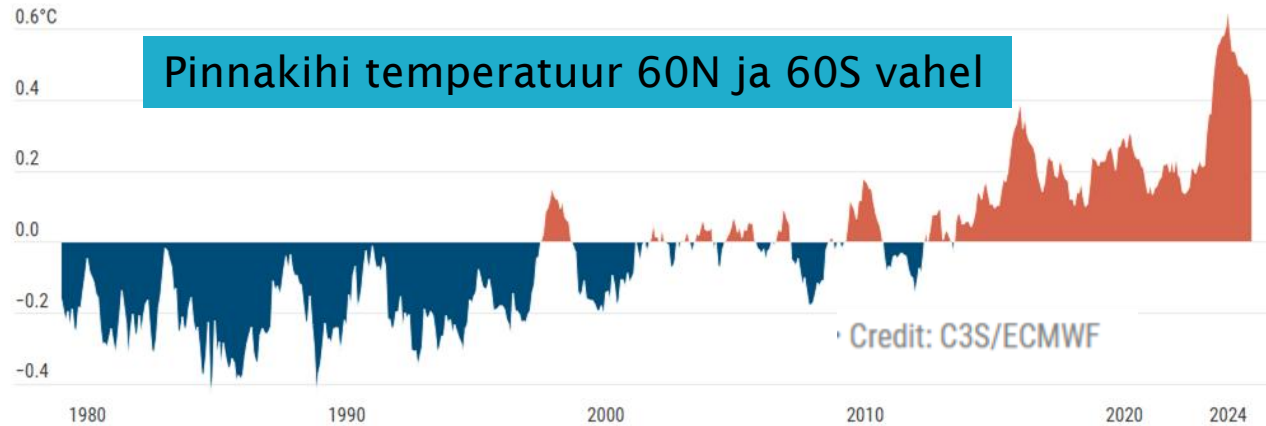


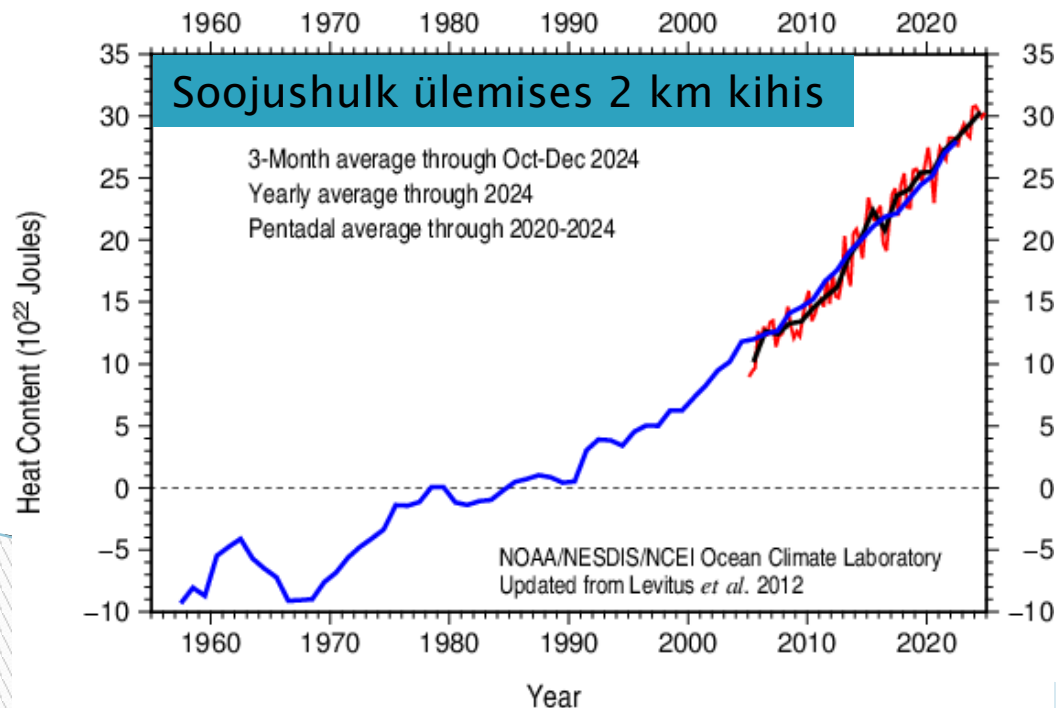
Läänemere süvakiht muutuv kliimas

Taavi Liblik

Kliimasoojenemine ookeanis

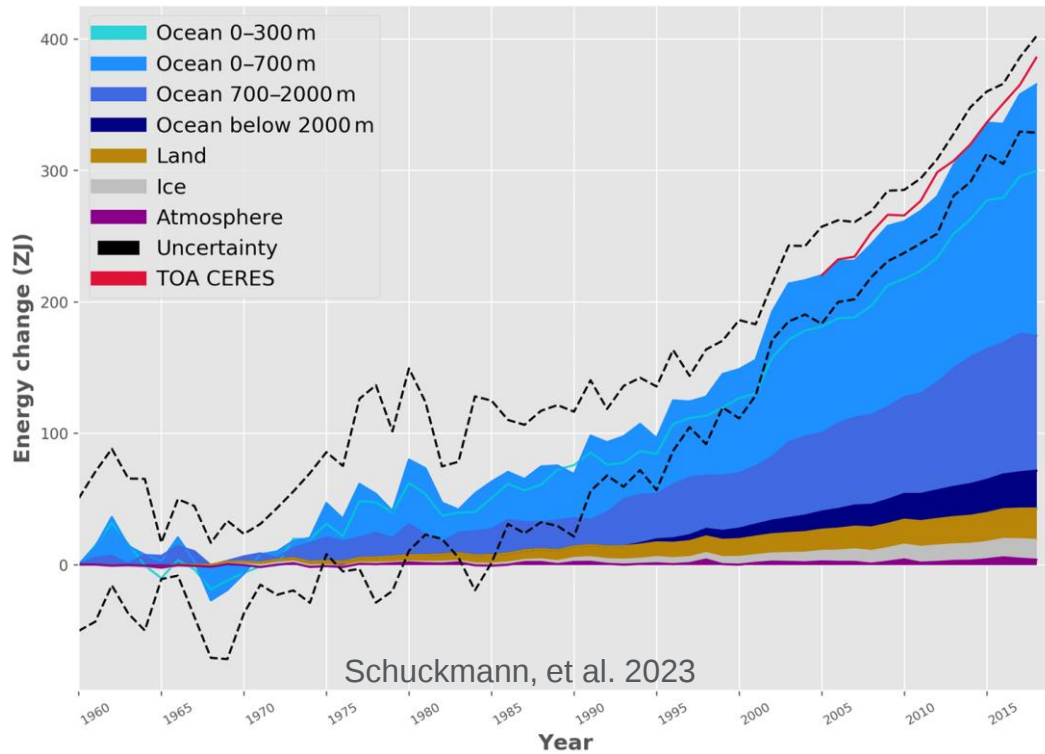


Ookeani pinnakihi temperatuuri ajaline käik on varieeruv, kuid selgelt tõusutrendis.

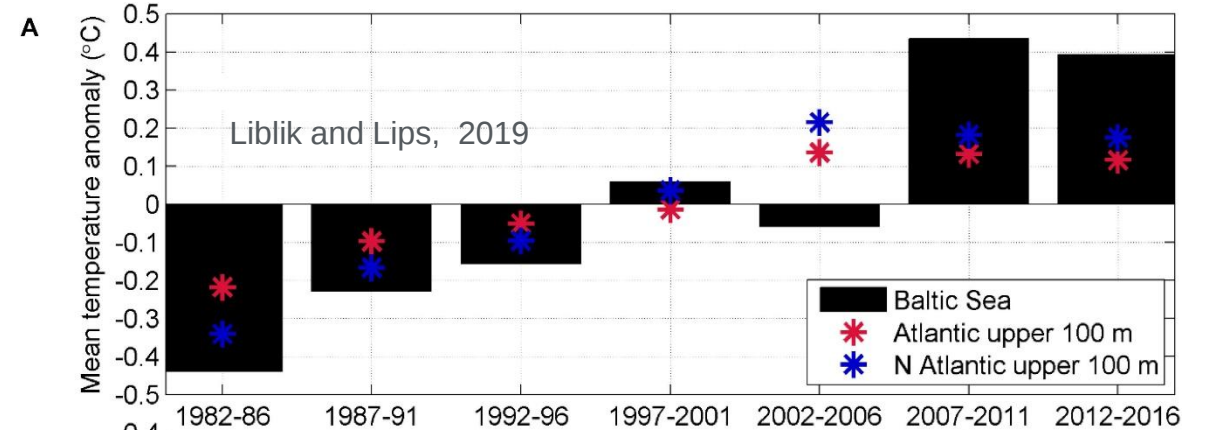


Soojushulk ookeani ülemises 2 km kihis on selgelt tõusuteel.

Ookeani roll kliimasoojenemises



90% globaalsest inimtekkelisest soojenemisest avaldub ookeanis.



Läänemere temperatuuri tõus on võrreldes avaookeaniga olnud oluliselt kiirem.

Soojenemise mõjud ookeanis

Stratifikatsiooni tugevnemine

Liustikke mahu ja jääkatte vähenemine

Veetaseme tõus

Muutused hoovustes

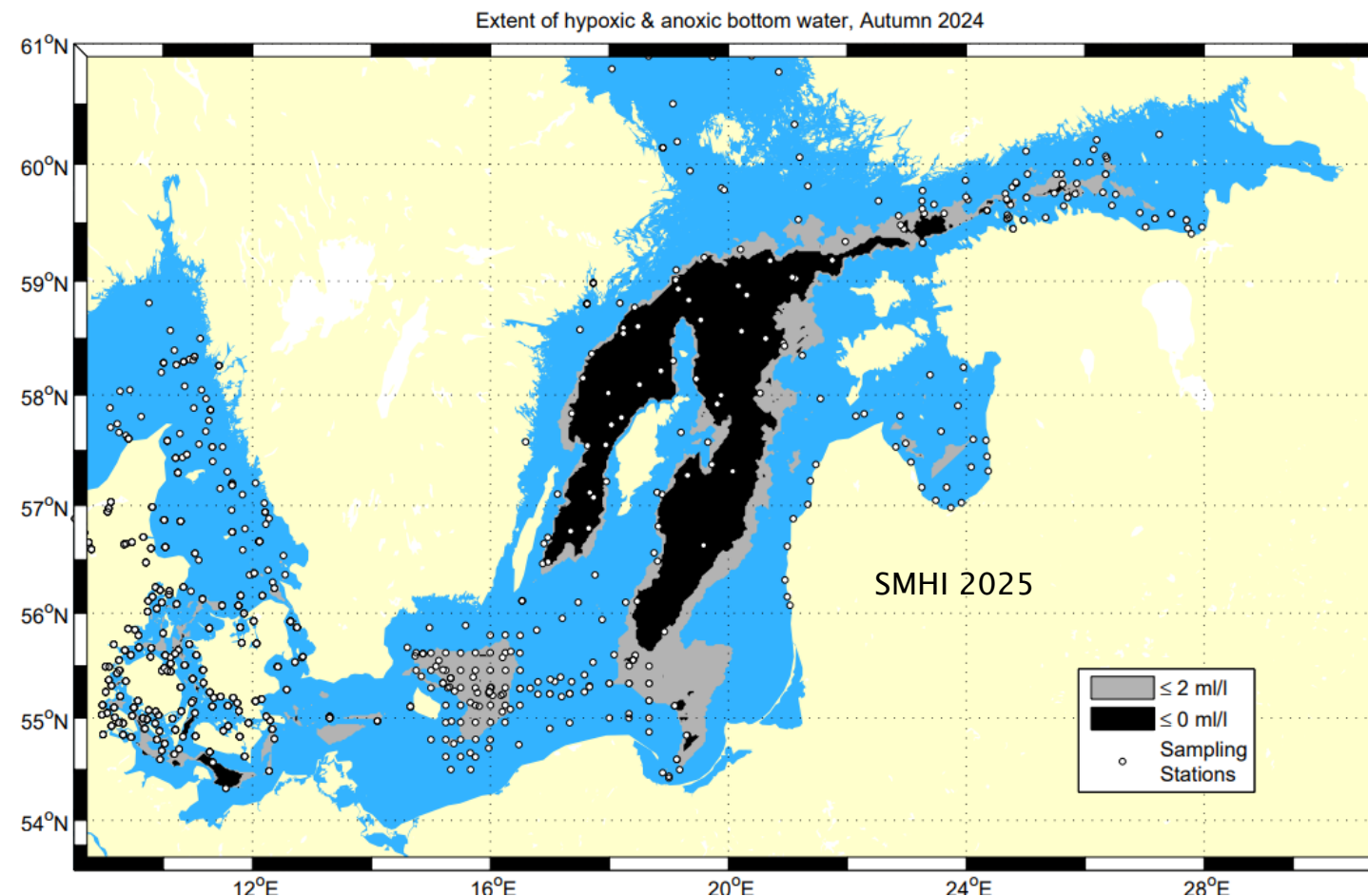
Hapestumine

Hapnikupuuduse süvenemine

Muutused toitaineringes

Elupaikade muutumine/kadumine

Jne.



Avaookean

Suur roll Maa kliimasüsteemis, sh. mõjutab ka Läänemerd.

Kliimamuutused ja selle mõjud avalduvad aeglaselt ja esialgu mitte väga tugevalt, kuid kestavad kauem.

Maismaalt pärit inimtegevuse otsene mõju tagasihoidlikum.

Läänemeri

Roll Maa kliimasüsteemis tagasihoidlik.

Kliimamuutused ja selle mõjud avalduvad kiiremini ja tugevamini.

Kohalik inimtegevuse otsene mõju väga oluline.

Läänemeri on kliimamuutuste ja lokaalse inimmõju „katsebassein“.

Läänemeri

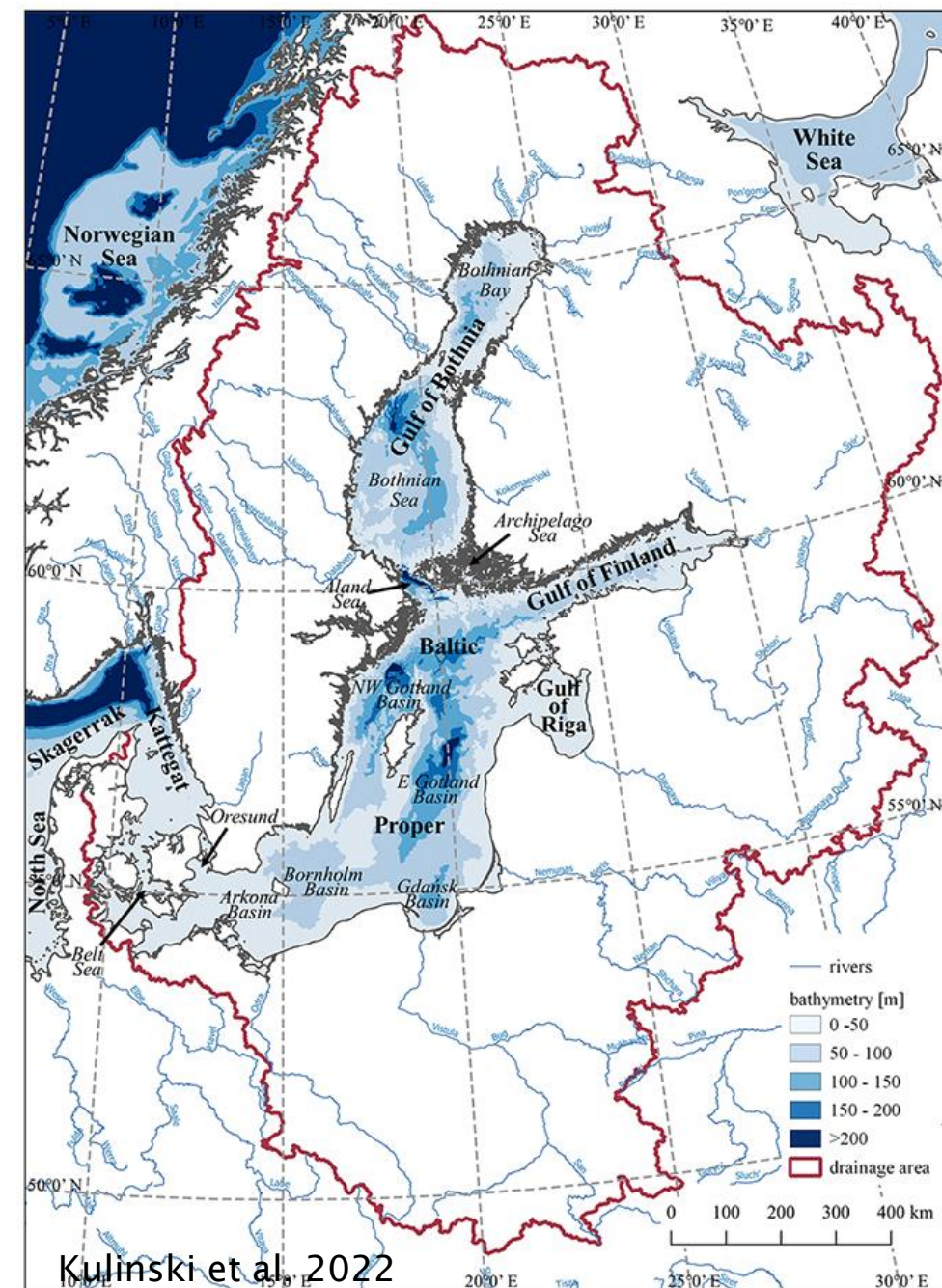
Väga piiratud veevahetus Põhjamerega.

Riimveeline ja madal.

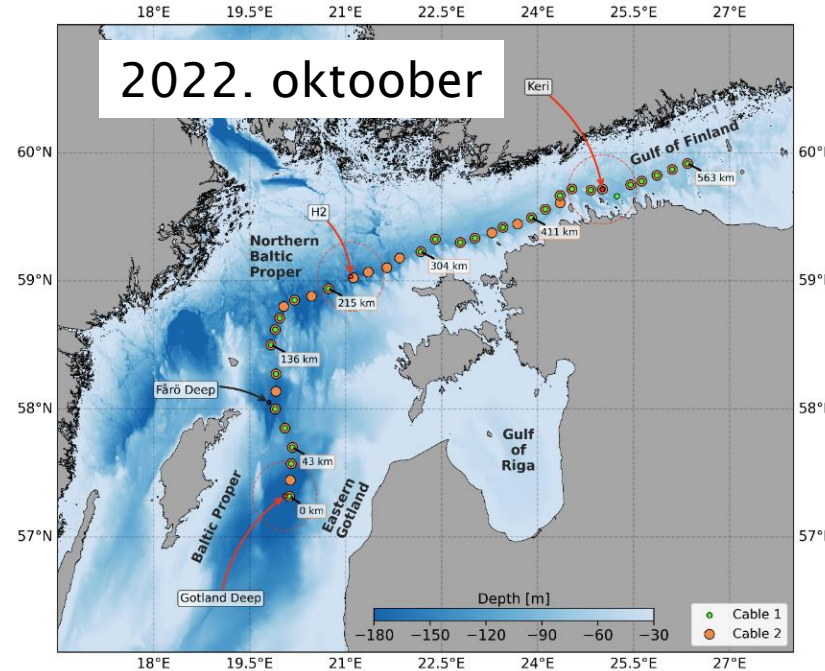
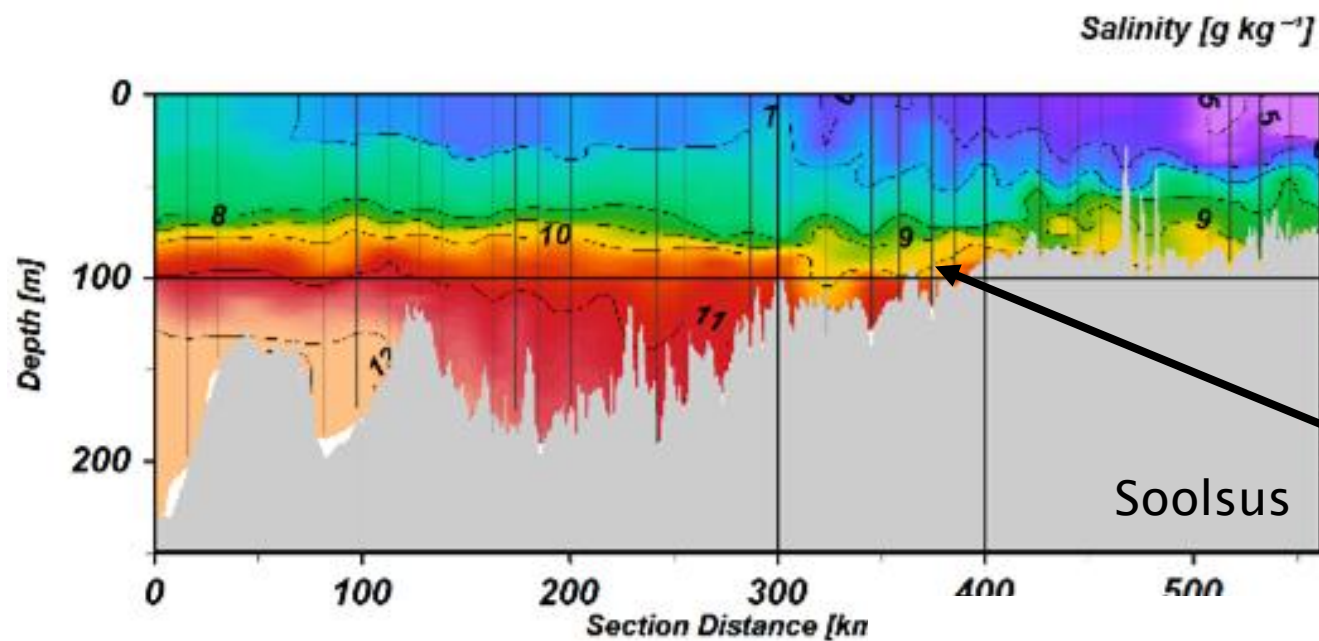
Suur valgala arvestatava inimõjuga.

Tugevad horisontaalsed ja vertikaalsed gradiendid.

Protsesside simuleerimine suur väljakutse. Mesomastaapi protsessid ca 10-korda väiksemad võrreldes ookeaniga.



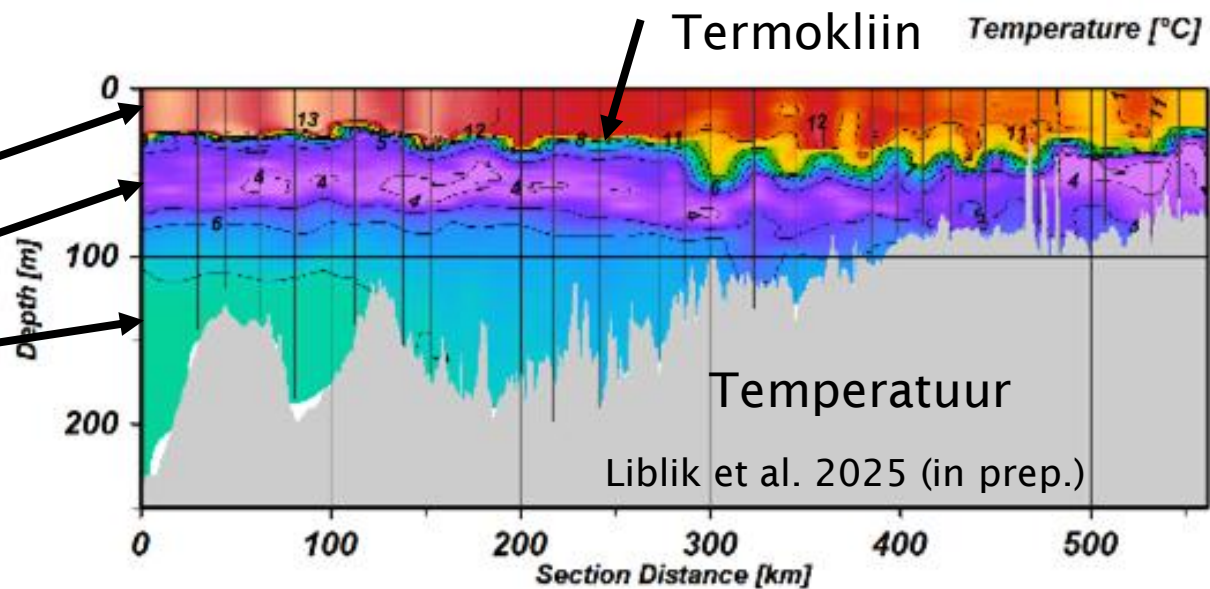
Läänemere veekihid



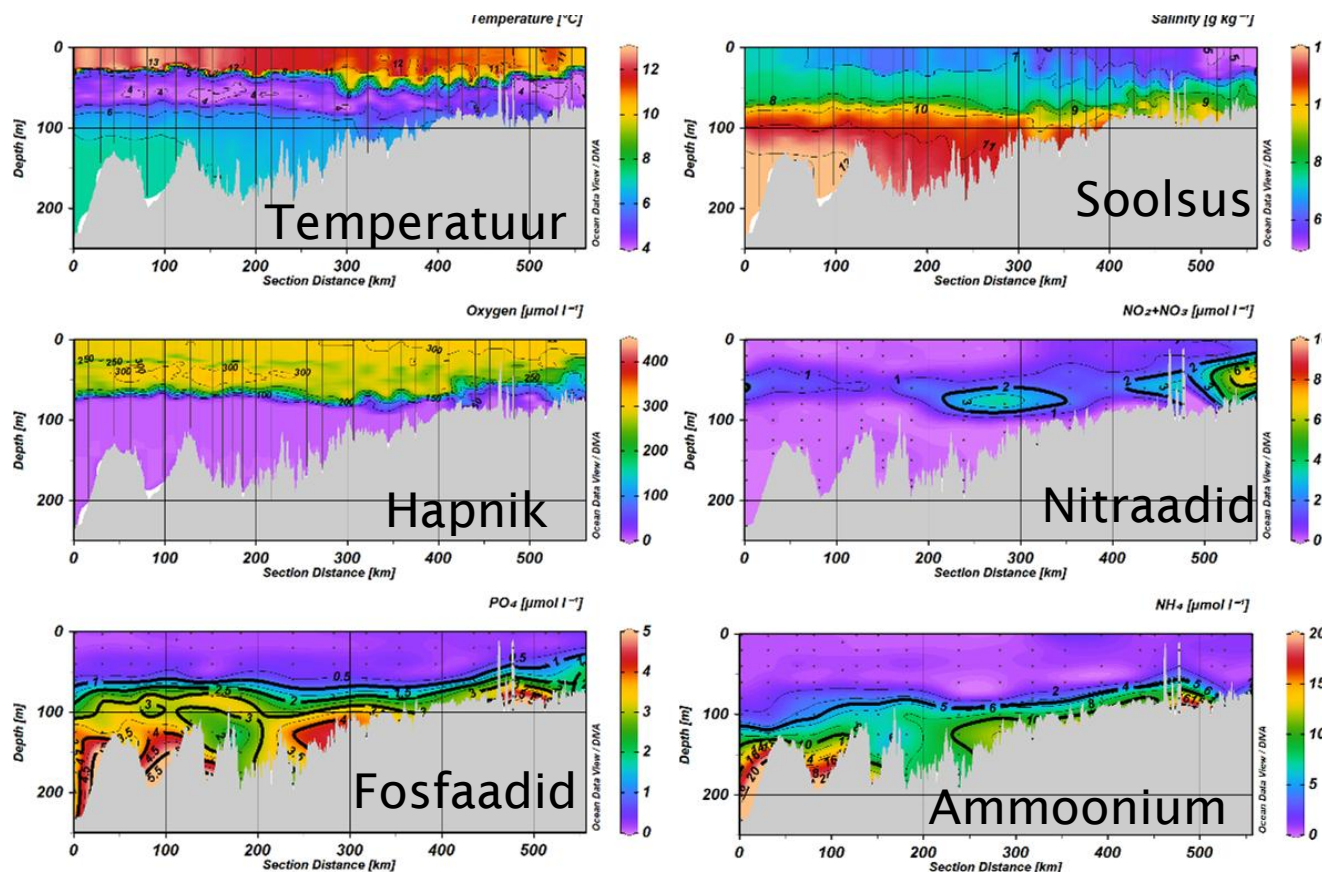
Soe ülemine kiht

Külm vahekiht

Süvakiht

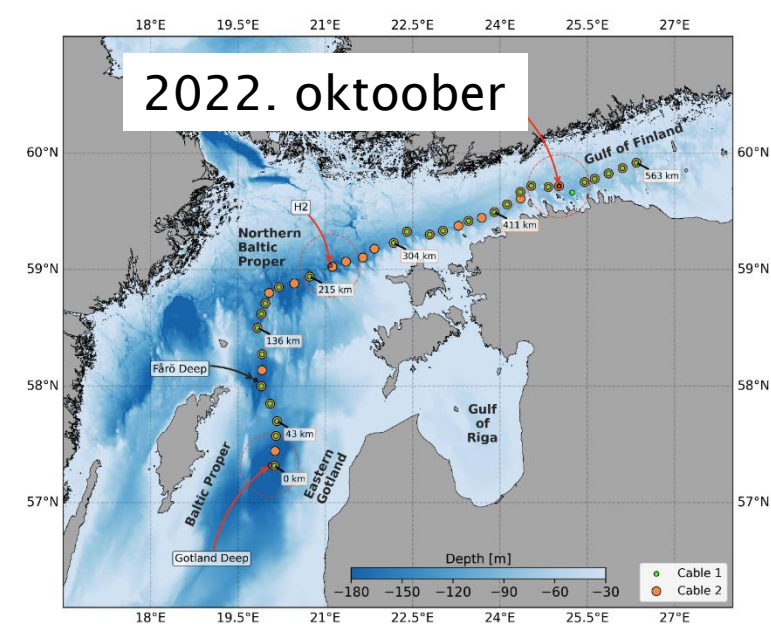


Läänemere veekihid



Liblik et al. 2025 (in prep.)

Hapnikuvaestes tingimustes eraldub settest veesambasse varem mattunud fosfor, mis hoogustab primaarproduksiooni, detriidi settimist ja omakorda hapnikupuudust.



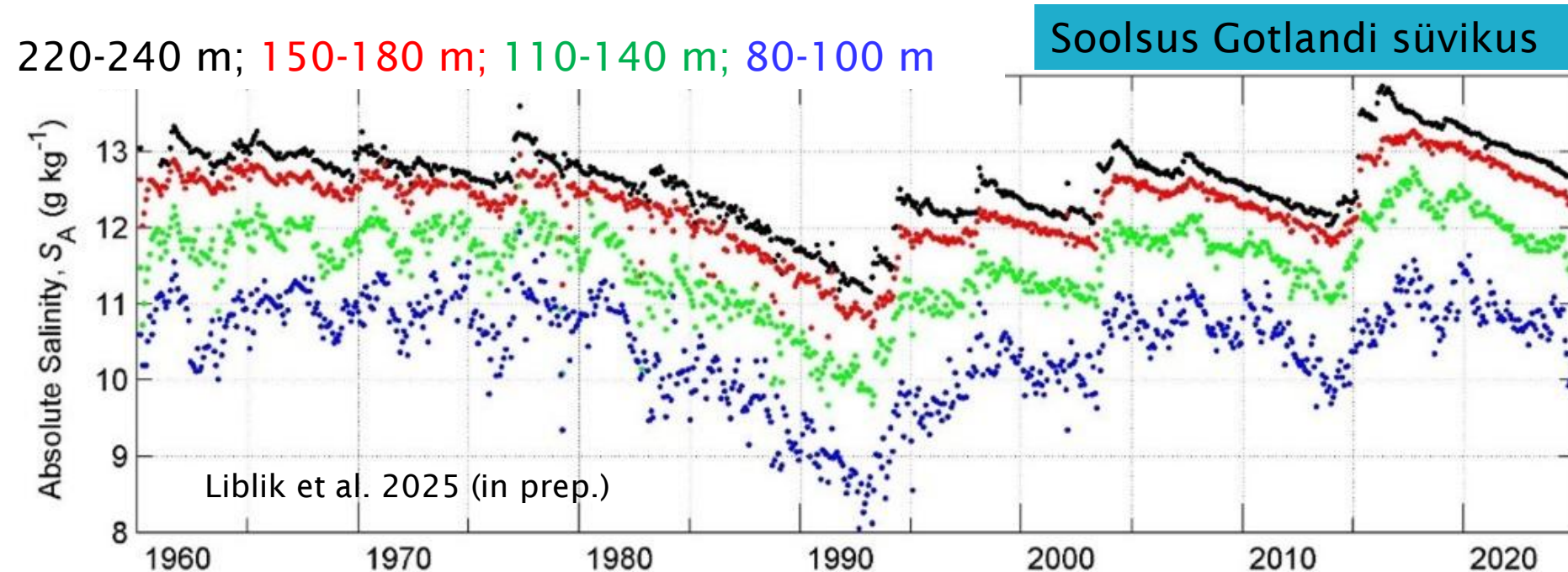
Soolsuse ja temperatuuri struktuur paneb paika ka biogeokeemilised jaotused ja pelaagiliste elupaikade tingimused.

Halokliini all on hapnikuvaene vesi

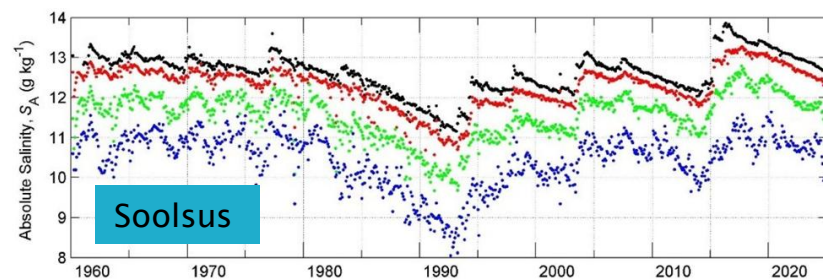
Hapnikuvaene vesi on ammooniumi- ja fosfaatiderikas.

Läänemere süvakiht al. 1960

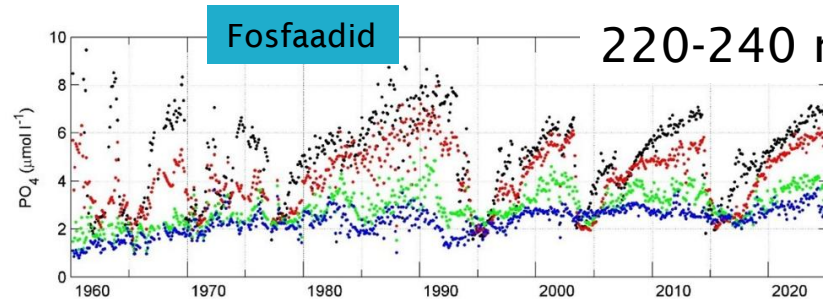
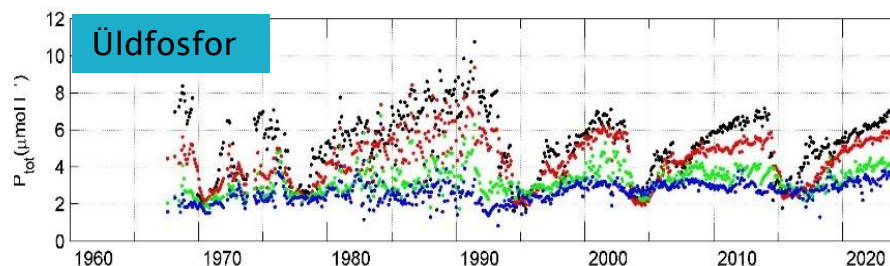
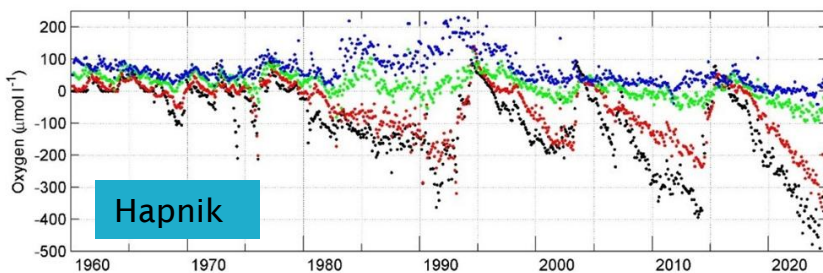
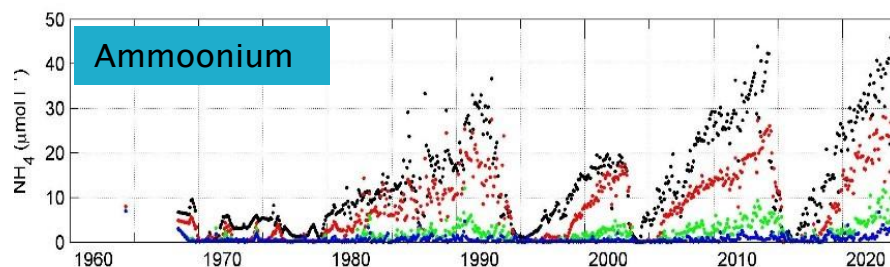
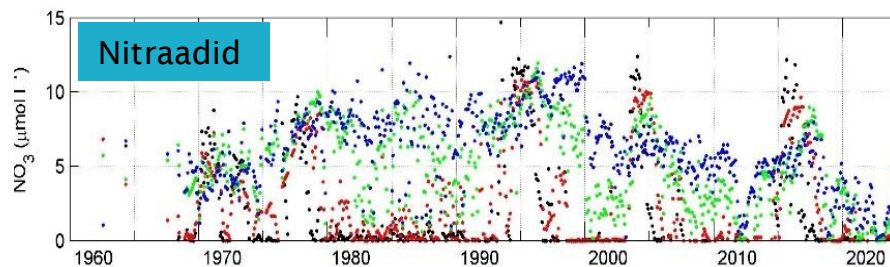
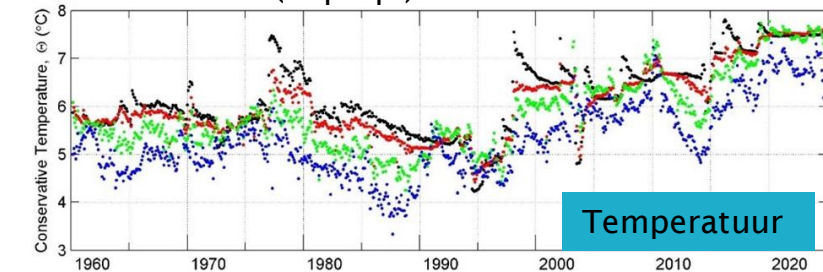
- Läänemere süvakihi tingimusi kujundavad suhteliselt harva esinevad suured Põhjamere vee sissevoolud.
- Sissevoolude vahelisel ajal esinevad stagnatsiooniperioodid.
- Sissevoolud toimuvad väga spetsiifilise atmosfääri nähtuste jada korral. Viimased tugevad sissevoolud- 2014-2016.



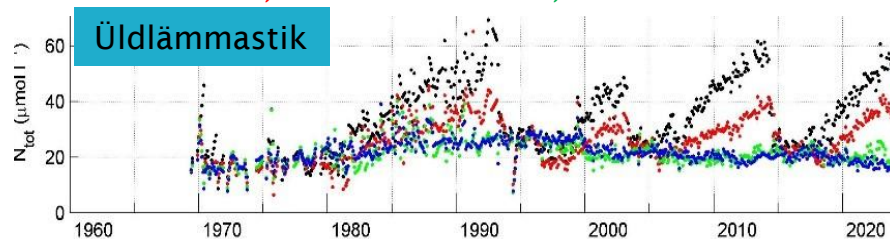
Läänemere süvakiht al. 1960



Liblik et al. 2025 (in prep.)



220-240 m; 150-180 m; 110-140 m; 80-100 m



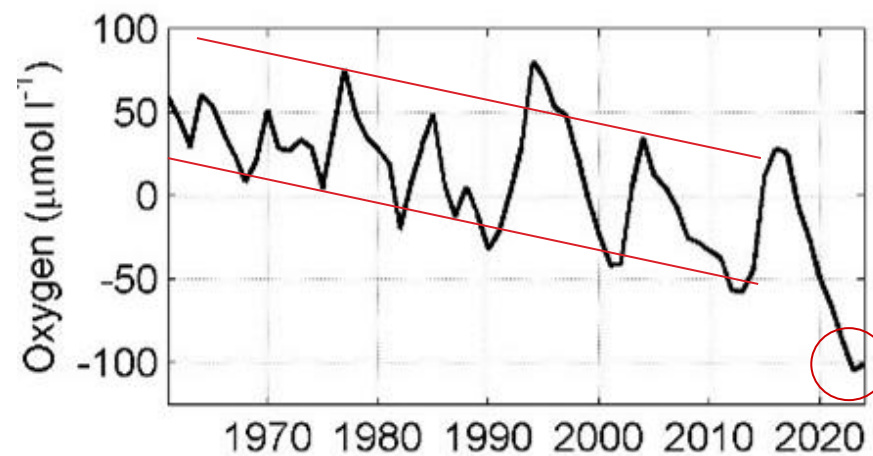
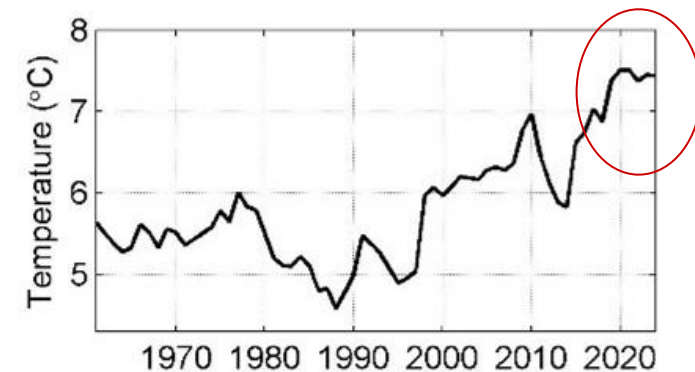
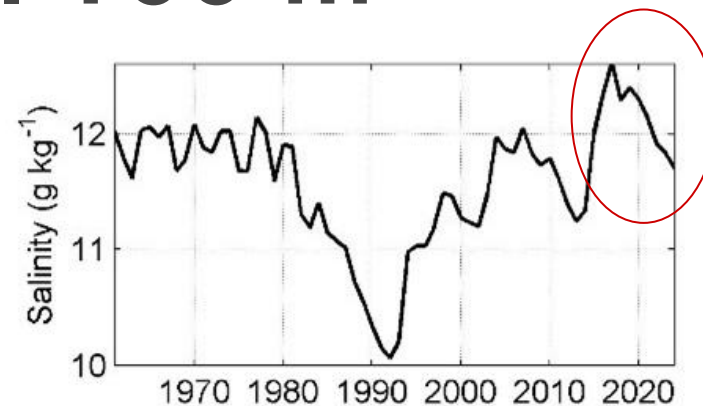
Ruumikeskmised aegread Ida-Gotlandi basseinis allpool 100 m

Viimane sissevoolude kaskaad tõstis Läänemere soolsuse kõrgeimale tasemele alates 1960ndatest.

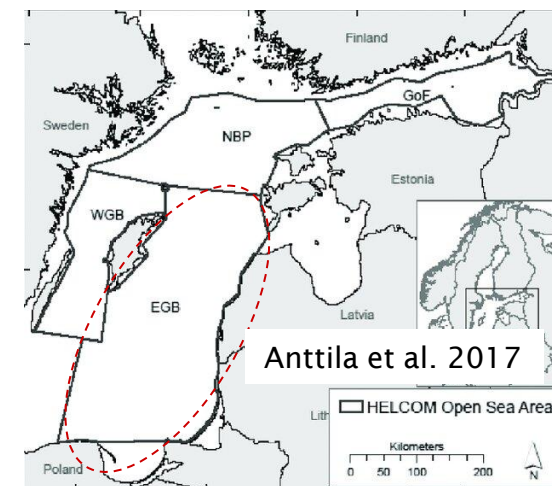
1993. aastani kestnud stagnatsiooni vältel temperatuur langes, edaspidiste stagnatsioonide jooksul on tõusnud. Ka suurte sissevoolude temperatuur on tõusnud.

Hapniku sisalduse maksimumid sissevoolude järel ja hapnikupuudujääk stagnatsioonide lõpus on olnud langevas trendis.

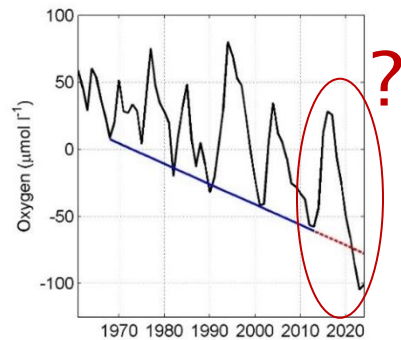
Viimase stagnatsiooni hapnikupuudujääk on langenud trendist veelgi „sügavamale“.



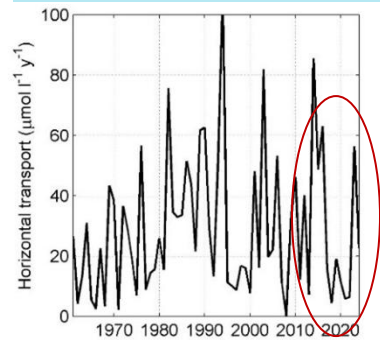
Liblik et al. 2025 (in prep.)



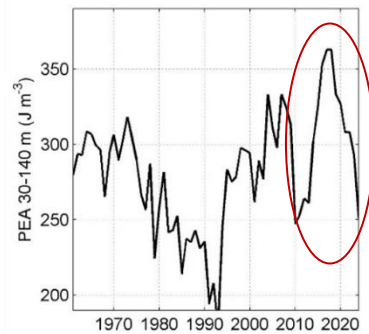
Erakordselt suure hapnikupuuduse põhjused



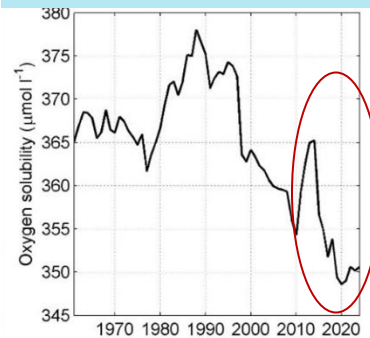
Nõrk horisontaalne hapniku transport



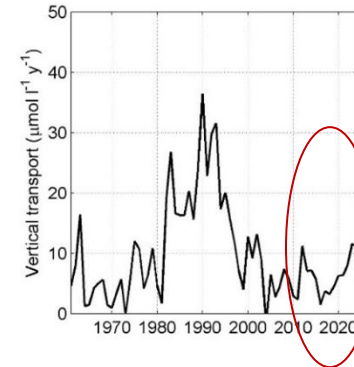
Tugev stratifikatsioon



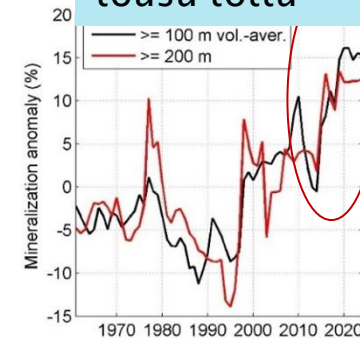
Hapniku madal küllastustase T-tõusu tõttu



Nõrk vertikaalne hapniku transport



Kõrgem hapnikutarbimine T-tõusu tõttu

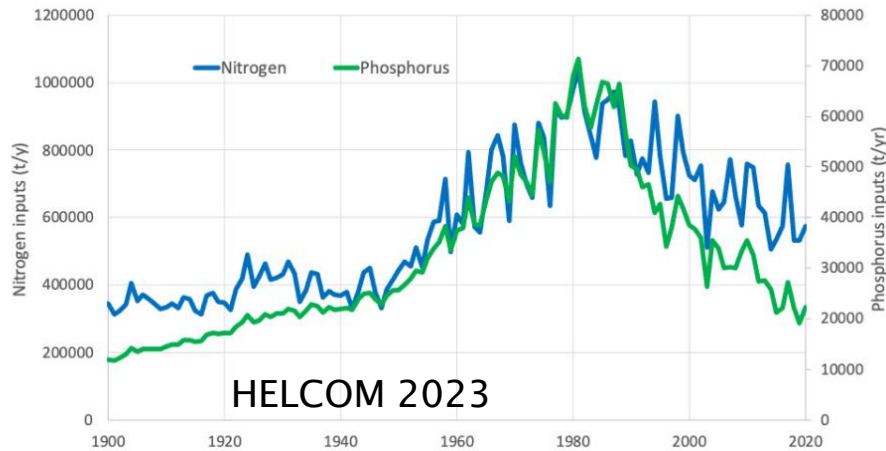


Liblik et al. 2025 (in prep.)

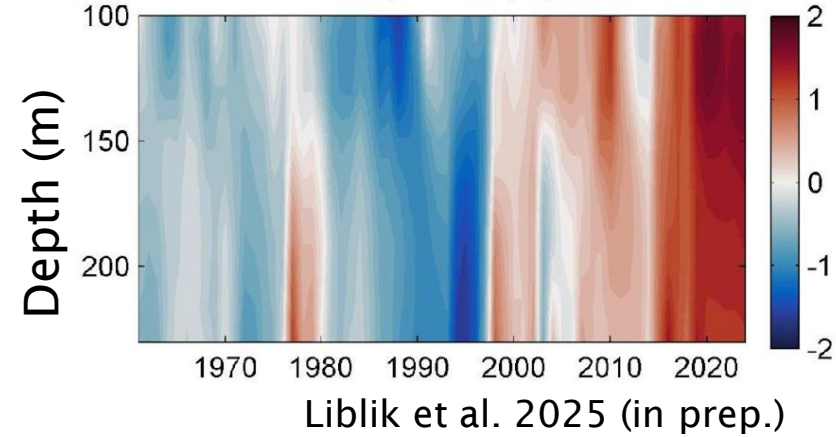
Pikaajaline ülemäärane toitainete koormus + soojenemine

Kas olukord võiks paraneda?

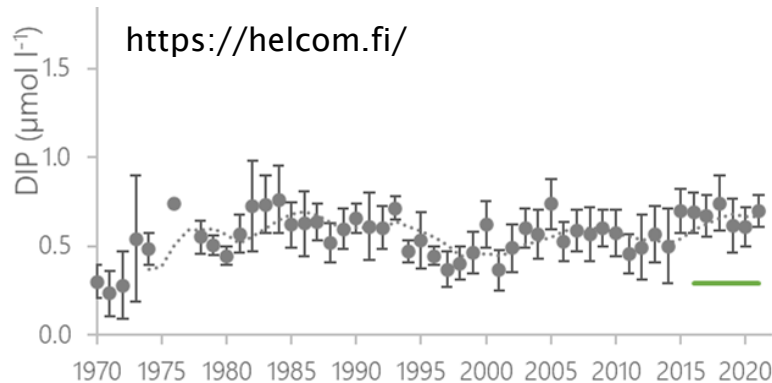
Toitainete koormus Läänemerre



Temperatuur Gotlandi süvikus 100-240 m



Talvine fosfaatide sisaldus ülemises kihis



Hapnikutingimuste paranemiseks peaks:

- suurenema horisontaalne transport ja/või
- suurenema vertikaalne transport ja/või
- vähenema hapniku tarbimine allpool halokliini.

Millised on väljavaated – hor. transport?

- Horisontaalse transpordi positiivne mõju on tänu kõrgemale temperatuurile pärsitud.
- Suure sissevoolu toimumine on praktiliselt prognoosimatu. Valmidus süvakihi „vana“ vee asenduseks värske sissevoolu veega on olemas.
- Ida-Gotlandi basseinis peaks anoksia kadumiseks >100 m veemassi lisanduma $2.5 \cdot 10^6$ t hapnikku. Viimase 70 aasta suurima sissevooluga (2014. dets.) saabus Läänemerre $2.04 \cdot 10^6$ t hapniku. **Seega praegust anoksilist olukorda kogu süvakihi ei kaotaks ka väga suur sissevool.**
- Uus sissevool vähendaks hapniku puudujääki ajutiselt (paariks aastaks), kuid edaspidi hakkaks hapniku defitsiit tõenäoliselt uuesti kiirelt tõusma.

Millised on väljavaated – vertikaalne transport?

Pikk stagnatsioon enne 1993. a. näitas, et stratifikatsiooni piisavalt nõrgenedes võib süvakihti toimuda arvestatav vertikaalne hapniku transport.

80ndate lõpus, 90ndate algul paranesid Soome lahes süvakihi hapnikutingimused.

Kui uusi sissevoole ei saabu võib vertikaalse transpordi suurenemine aset leida, kuid arvestades praeguseid olusid mitte varem kui 3-9 aasta pärast.

Millised on väljavaated – tarbimine?

Kliima- ja toitainete koormuste stsenaariumitega tehtavad simulatsioonid näitavad:

- Läänemere Tegevuskava rakendamisel hapnikutingimused paranevad, kuid selleks kulub aastakümneid.
- kliima soojenemine pigem pärsib hapnikutingimuste paranemist. Sama näitavad setteprofiilidest määratud aegread, nt. keskaegsel soojaperioodil esines Läänemeres hapnikupuudus.

Nii kliima mõju kui ka Läänemere biogeokeemiline modelleerimine on **äärmiselt suure määramatusega**.

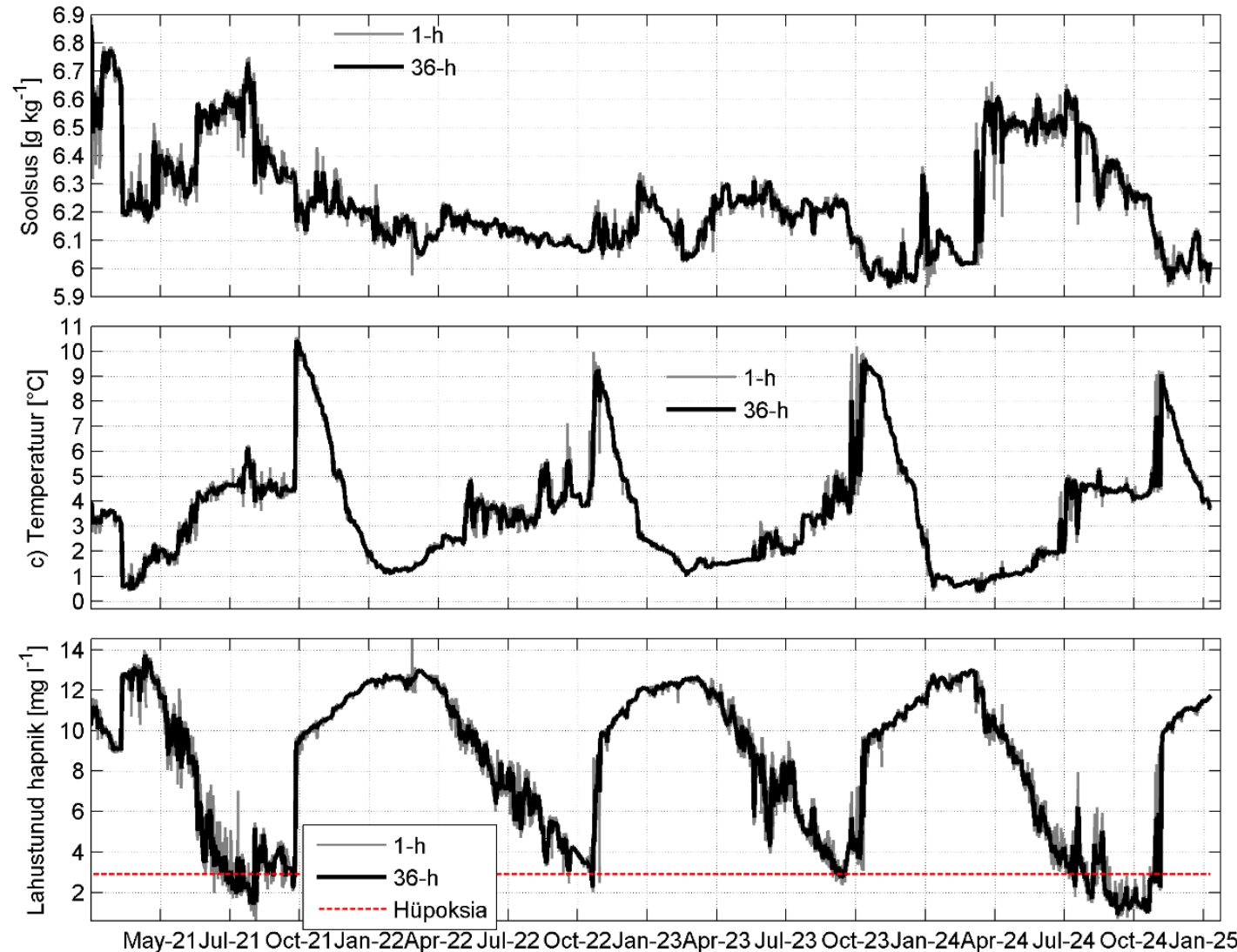
Määramatuse põhjused

- Määramatus atmosfääri tingimuste stsenaariumites;
- On ebaselge, kas ja kuidas muutub vee- ja ainevahetus Põhjamerega;
- Puudujäägid mere sisemistest protsessidest arusaamises.

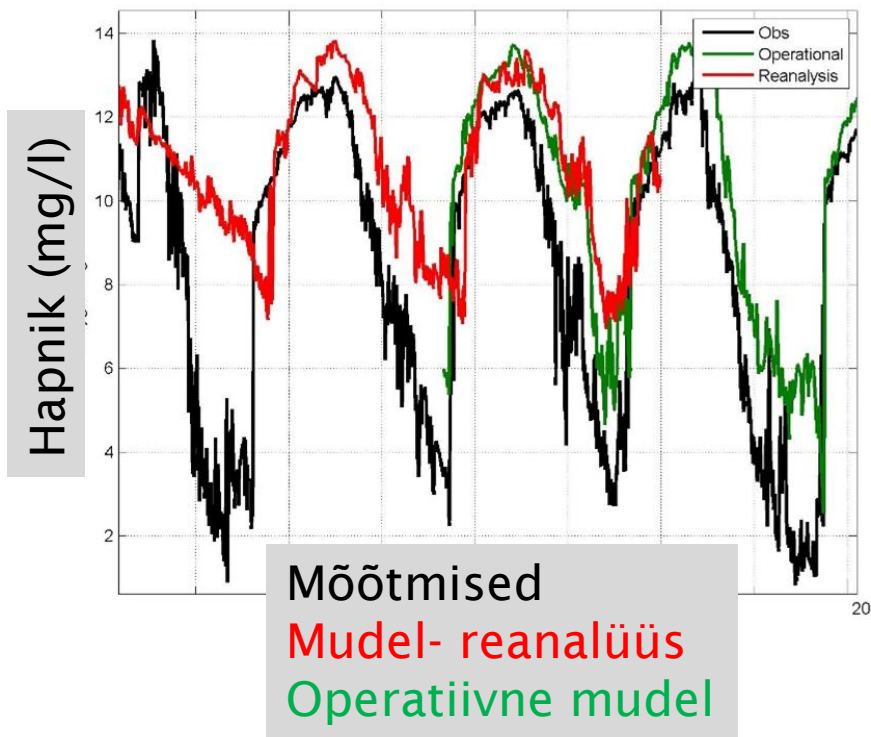
Puudujäägid ja soovitud arendusteks, (Liivi lahe näitel): I – puudulik vaatlussüsteem.

- Riiklik avamere seire toimub 5-6 korda aastas;
 - Liivi lahe hapnikutingimuste kohta riikliku seire andmete põhjal järeldusi teha ei saa.
-
- Eksperimentaalsed mõõtmised Ruhnu süvikus alates 2021 näitavad tugevat lühiajalist varieeruvust.

Peamistes basseinides tuleks alustada vähemalt ühes asukohas süvakihi pidevmõõtmistega.



Puudujäägid ja soovitusel arendusteks, (Liivi lahe näitel): II – puudulikud teadmised protsessidest.



	Päevade arv, mil Liivi lahe süvakihis esines hüpoksia		
	Mõõtmised	Copernicuse järelanalüüs	Copernicuse operatiivne teenus
2021	68	0	
2022	8	0	
2023	15	0	0
2024	102		3

- Paljude uurimist vajavate protsesside hulgast võiks välja tuua:
- Biogeokeemia- Arusaamine settes oleva **mobiilse fosfori varust**, **transpordist veesambasse** ning edasisest saatusest on kesine.
 - Füüsika- Arusaamine horisontaalse ja vertikaalse segunemise protsessidest, eriti mesomastaabi ja 3D turbulentsi vahel olevas **submesomastaabis** on kesine.

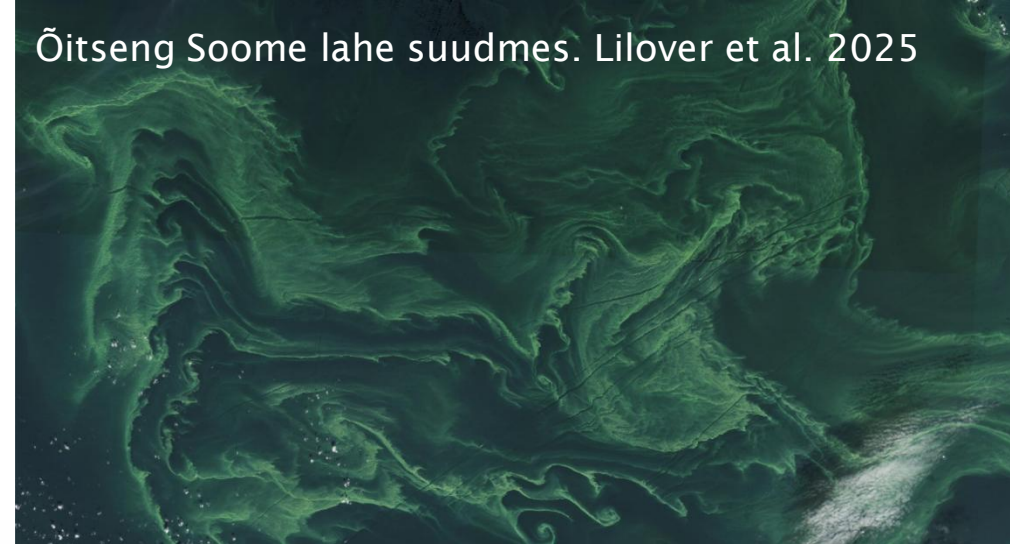
Puudujäägid ja soovitud arendusteks: II – puudulikud teadmised protsessidest.

Autonoomsete robotite ja profileerijate kasutusele võtmine ja arvutusvõimsuse kasv on võimaldanud uurida submesomastaapseid protsesse.

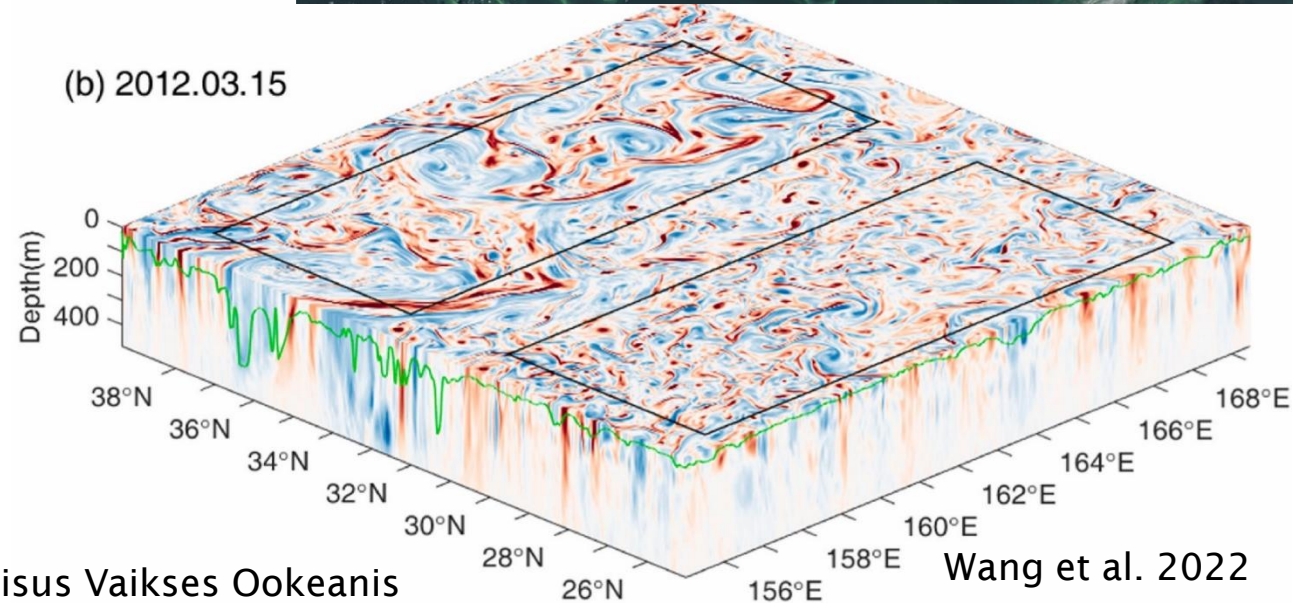
Tulemused näitavad, et submesomastaapi protsessid mõjutavad üheskoos oluliselt nii vertikaalset kui horisontaalset ainevahetust.

Submesomastaapi protsesside mõju meresüsteemi laiemalt vajab parametrizeerimist ja suuremastaabilistesse mudelites kirjeldamist.

Õitseng Soome lahe suudmes. Lilover et al. 2025



(b) 2012.03.15



Wang et al. 2022

Pööriselisus Vaikses Ookeanis

Kokkuvõte

- Läänemere süvakihtide temperatuur ja hapnikupuudus on mõõtmisajaloo kõrgeimal tasemel;
- Oma panus on siin inimtekkelisel eutrofeerumisel, kliimasoojenemisel ja looduslikul varieerumisel;
- Hinnangutes edasiste arengute kohta on palju määramatust.
- Vajalikud sammud:
 - Jätkusuutlikud pidevmõõtmised süvakihis.
 - Uuringud- submesomastaapi protsesside roll Läänemeres; settinud fosfori varud, eraldumine veesambasse ja edasine saatus.

Täna tähelepanu eest!

taavi.liblik@taltech.ee

