

# L'Oceano Artico - 2 (OA)

**Circolazione  
Masse d'acqua e processi di convezione**

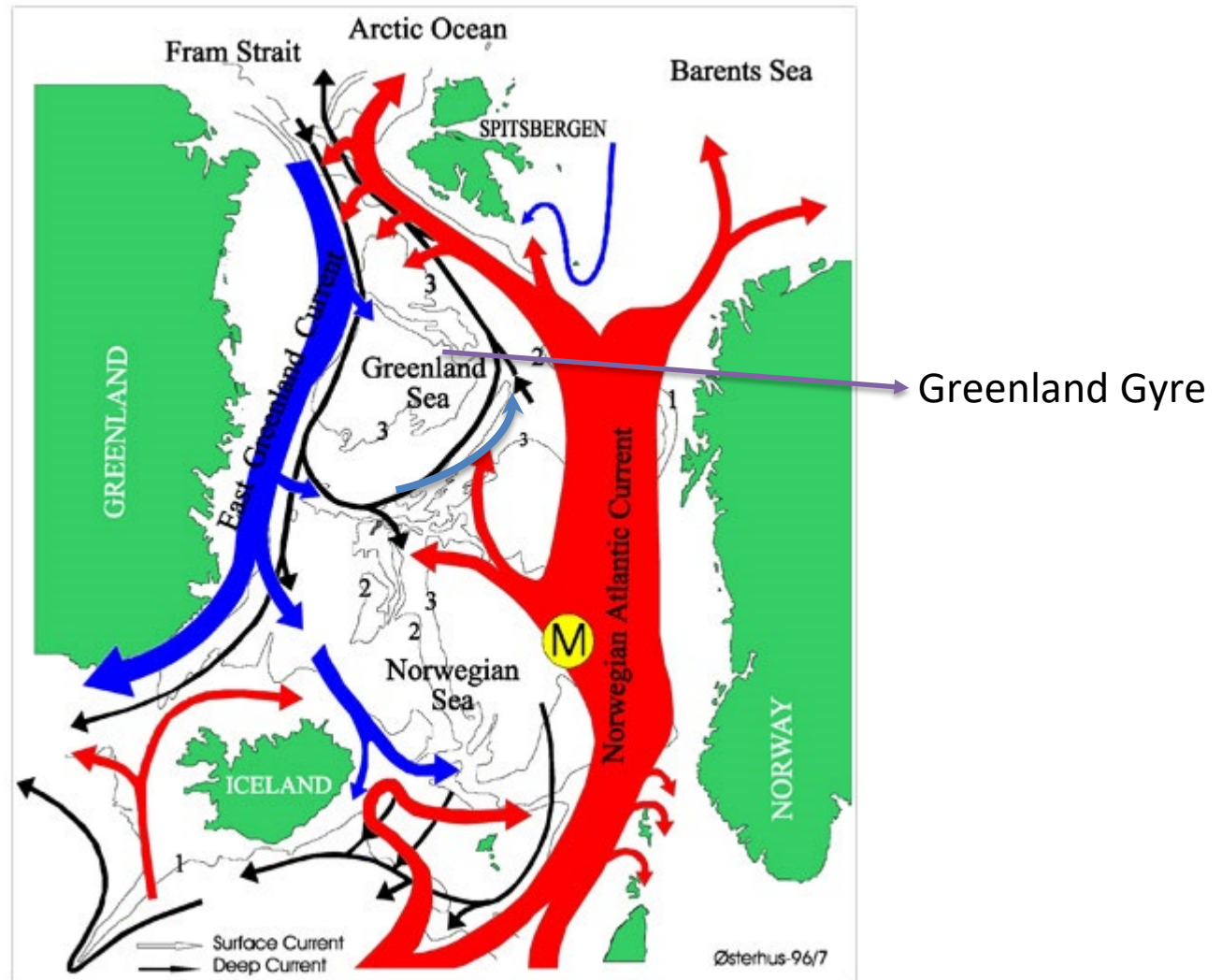


# Mari Nordici (MN)

- Il rinnovo delle acque più dense dell'emisfero Settentrionale avviene nel mare di Groenlandia (mdG)
- Le acque che si formano nel mdG sono più dense di quelle che si formano nel mar Artico, perché risentono dell'effetto delle acque più salate provenienti dall'Oceano Atlantico
- Le acque dense del mar Artico sono meno salate ma comunque contribuiscono al processo di formazione nel mdG determinando le caratteristiche finali della massa d'acqua che poi valicherà le selle e raggiungerà l'Atlantico settentrionale.
- Le acque che superano la dorsale Groenlandia-Scozia, diventano il cuore della NADW ma non sono le acque di fondo dei Mari Nordici.
- La convezione nei Mari Nordici si ferma attualmente a quote intermedie
- Nella formazione di NADW contano i processi che avvengono a prof. comparabili con quella della sella (c.a. 600 m)

# Circolazione nei MN

- La circolazione media nei MN è ciclonica



# Masse d'acqua dei MN

La descrizione delle masse d'acqua nel MN è complicata in quanto sia per fattori locali (flussi atmosfera-oceano), che scambi con i bacini oceanici adiacenti (in particolare in superficie ) i parametri caratteristici variano nel tempo.

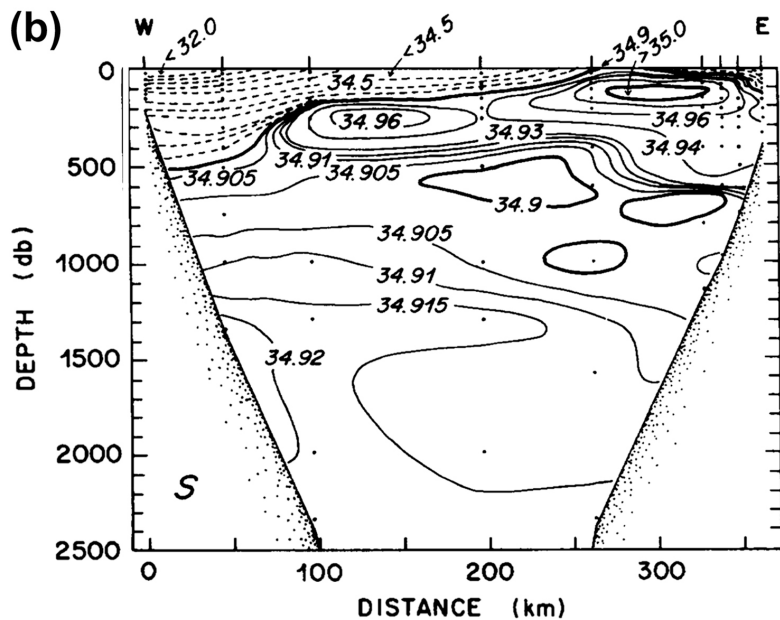
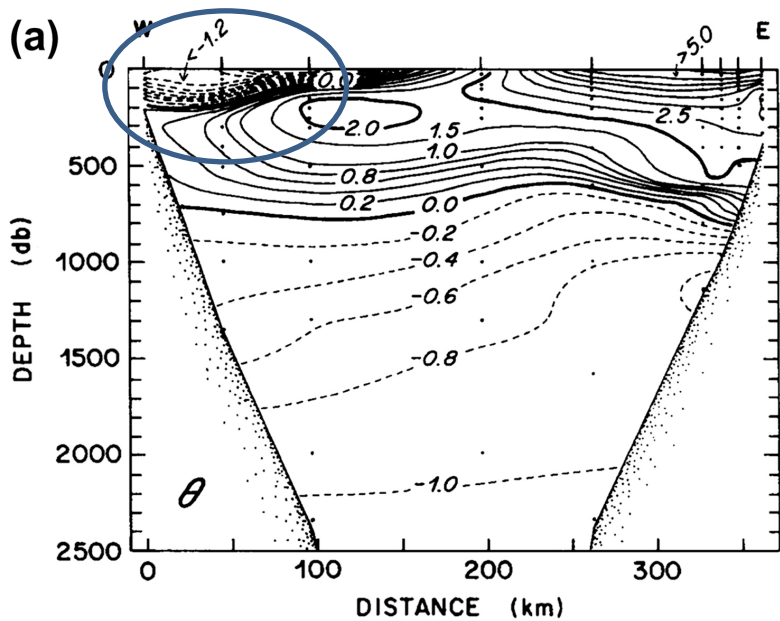
TABLE S12.1 Major Nordic Seas Water Masses

	Water Mass	Acronym	Depth	Characteristic Properties	Source
superficie	Polar (Arctic) Surface Water	PSW (ASW)	Surface to 25–50 m	–1.5 to –1.9 °C 28 to 33.5 psu (polar mixed layer and halocline) S: 28 to 33.5	Local (associated with sea ice) and inflow from Arctic
	Atlantic Water	AW	200–900 m	>3 °C >34.9 psu ( $\theta$ and salinity maximum)	Norwegian Atlantic Current flow
intermedia	Arctic Intermediate Water	AIW	Upper ocean to 1200 m	–1.2 °C, 34.88 psu (salinity minimum at ~800 m)	Intermediate depth convection in the Greenland and Iceland Seas
	Upper Polar Deep Water	uPDW	800–1500 m (Nordic Seas)	–0.5–0 °C 34.85 to 34.9 psu (salinity minimum)	Upper Polar Deep Water from the Arctic Ocean
profonda	Arctic Ocean Deep Water	AODW	2000 m to bottom	–0.53 °C, >34.95 psu –0.4 to –0.2 °C	Canadian and Eurasian Basin Deep Waters from the Arctic Ocean
	Greenland Sea Deep Water	GSDW	2000 m to bottom	<–1.2 °C 34.88–34.90 psu	Greenland Sea deep convection
	Norwegian Sea Deep Water	NSDW	2000 m to bottom	–1.055 °C, 34.91 psu	GSDW and mixing

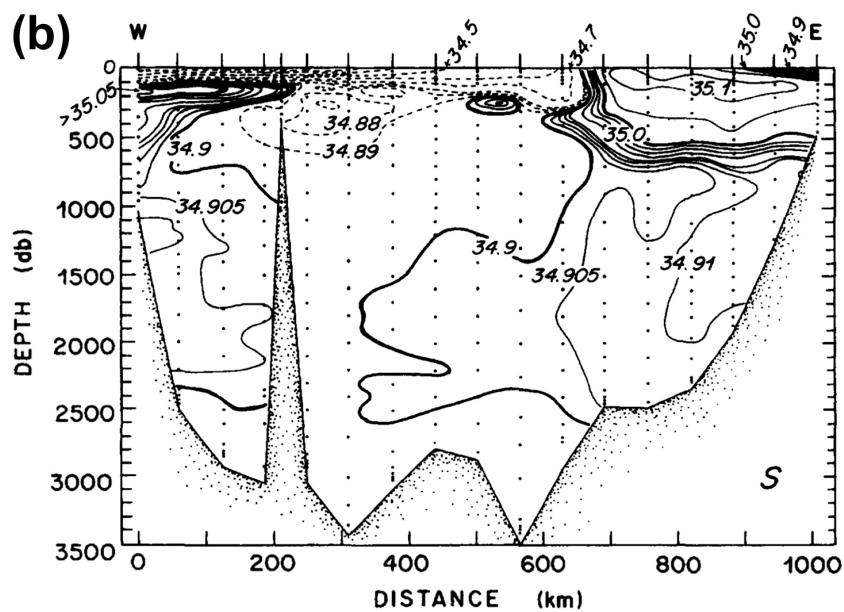
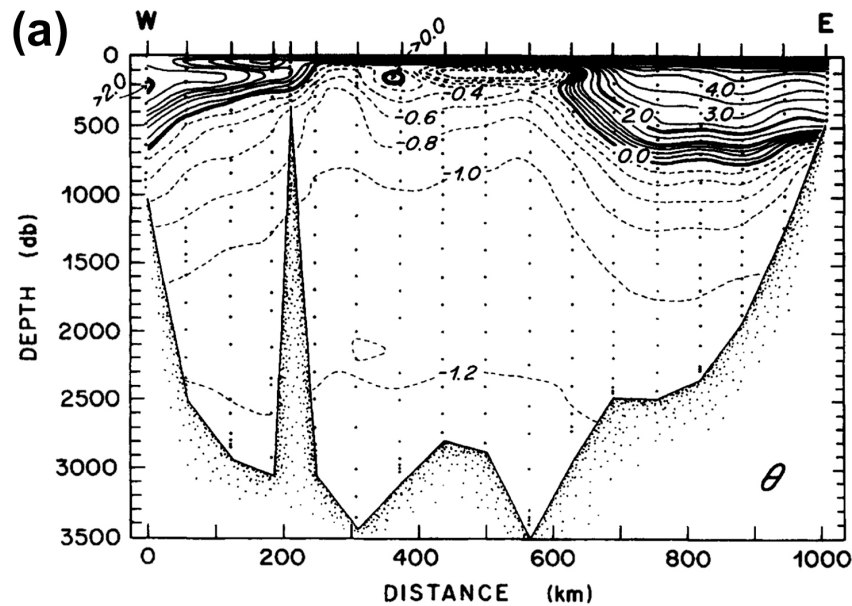
Source: After Aagaard, Swift, and Gillett, 1985 and Ruedels et al., 2005.

# Acque superficiali

- Sono due ovvero la **Atlantic Water (AW)** calda e salata e la **Polar Surface Water (PSW)**, dolce e fredda
- AW entra da sud con la Norwegian Atlantic Current (NAC) a c.a. 7-9°C e 35.2 psu
- Nel suo percorso verso N si raffredda principalmente (alle Svalbard  $T \sim 1-3^{\circ}\text{C}$   $S \sim 35$ .)
- Per le sue “alte” temperature, durante l’inverno il mare di Norvegia non ghiaccia.
- La PSW segue il percorso contrario (da N verso S) sul versante opposto trasportata dalla Eastern Greenland Current (EGC) con  $T < -1.5^{\circ}\text{C}$  e  $S < 34$  psu



(a) Potential temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and (b) salinity in the Fram Strait in 1980.

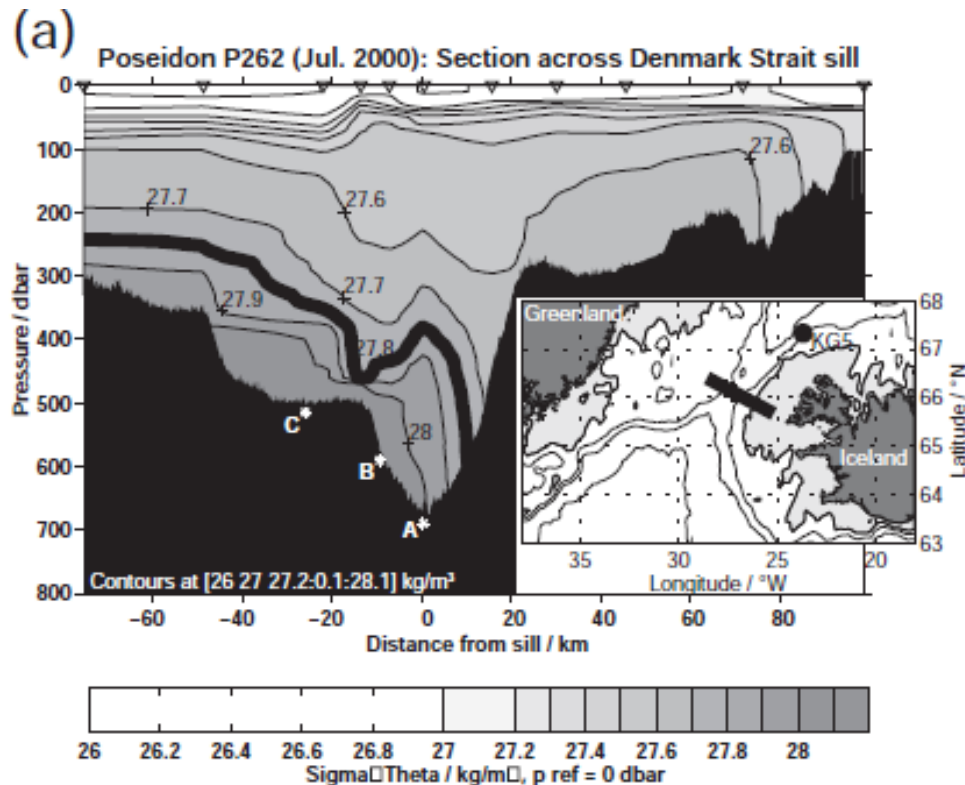


(a) Potential temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and (b) salinity across the southern Greenland Sea at  $73.5^{\circ}\text{N}$  in 1985.

# Acque Intermedie

- Oltre alle due indicate in tabelle si aggiunge una terza massa d'acqua intermedia ovvero un prodotto della AW che ancora relativamente calda ( $T > 2^\circ\text{C}$ ) e salata ( $S \sim 35\text{psu}$ ). Si trova sotto la PSW
- La **Arctic Intermediate Water (AIW)** si trova centrata a c.a. 800m con  $T \sim -1.2^\circ\text{C}$  e  $S \sim 34.88\text{psu}$
- AIW è quindi caratterizzata da un minimo in salinità che si osserva sotto il massimo della AW
- AIW proviene da N, attraverso lo stretto di Fram e si modifica per convenzione quando entra nel mdG.

- La terza acqua intermedia è la **upper Polar Deep Water (uPDW)**
- Anch'essa entra attraverso lo stretto di Fram seguendo il flusso della EGC.
- La sua estensione è limitata alla zona dello stretto di Fram
- E' caratterizzata da  $T \sim 0$  e  $-0.5^{\circ}\text{C}$  e  $S \sim 34.85\text{-}34.9$  psu





# Acque Profonde

- Si distinguono tre masse d'acqua :
- **Greenland Sea Deep Water (GSDW)** occupa lo strato di fondo a  $T < -1.2^{\circ}\text{C}$  e  $S < 34.896$  psu. Si forma in seguito a convezioni (intermittenti) nel gyre della Groenlandia.
- **Arctic Ocean Deep Water (AODW)** è l'acqua profonda più salata dei MN.  $S > 34.92$  psu e risulta dal rilascio di brina che avviene nei settori della piattaforma continentale del mar Artico
- Entra nei MN come western boundary current profonda
- **Norwegian Sea Deep Water (NSDW)** è un mix delle precedenti DW. Nel settore nord ed orientale del mdG fa da barriera al passaggio delle GSDW nel mar Artico

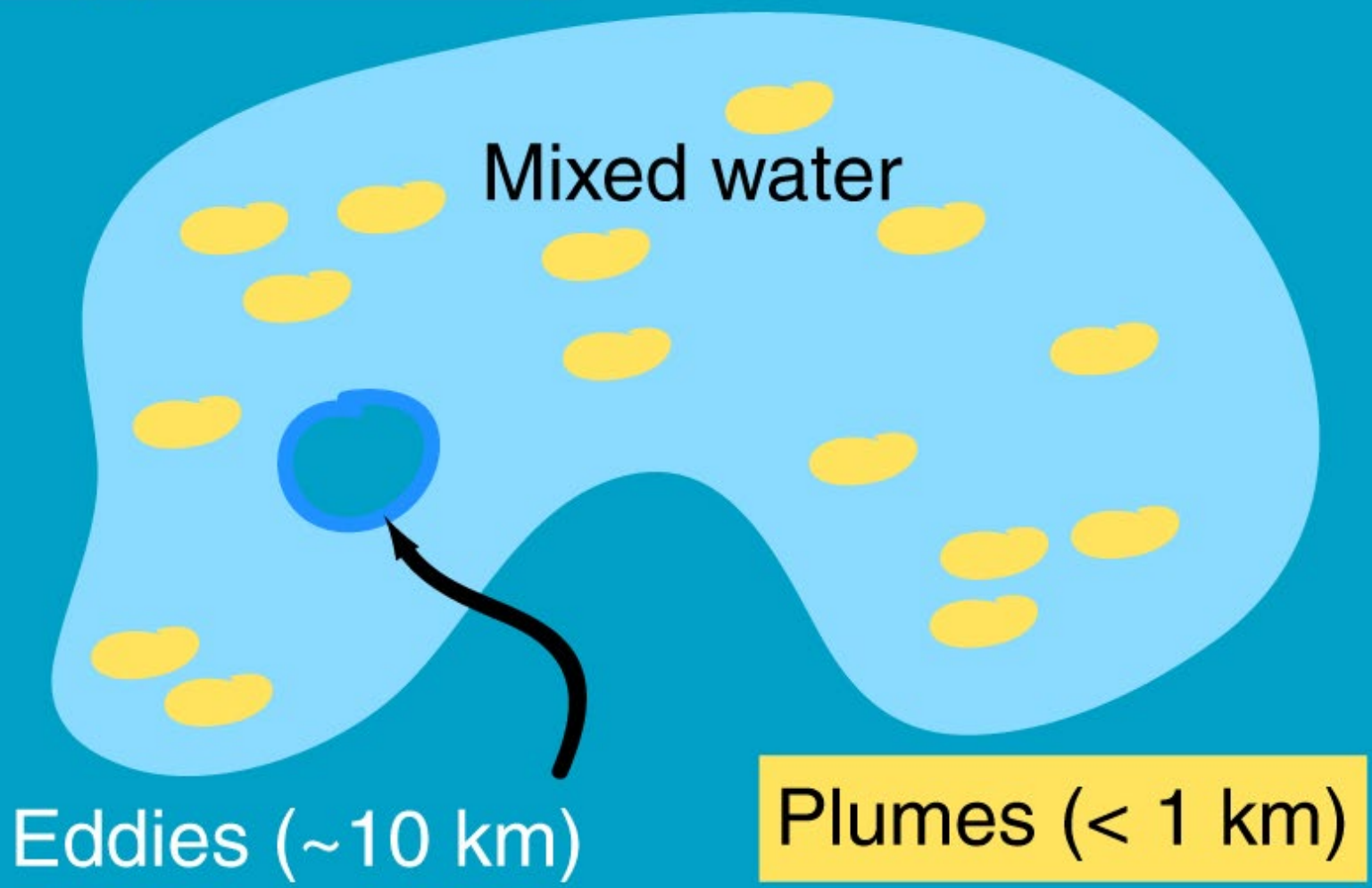
## Convezione verticale e formazione di acqua densa

- Il mdG è stato da sempre considerato come il sito di rinnovo delle acque profonde che, con le acque intermedie, vanno a costituire il nucleo della NADW una volta entrata in Atlantico
- Dati di O<sub>2</sub> confermano il rinnovo con valori osservati nei mari di Groenlandia e Norvegia intorno 6-7.5 ml/L a cui corrisponde un tempo di residenza di c.a. 40 anni
- La formazione di DW nei MN avviene come processo di convezione in oceano aperto
- Solo in Artico il rilascio di brina contribuisce al processo di formazione di DW

- Dati misurati nella prima metà del secolo scorso, hanno messo in evidenza processi di convezione che coinvolgevano tutta la verticale
- Oltre al mdG, ci sono altre due zone dove avviene convezione profonda ovvero il Boreas Basin (in prossimità dello stretto di Fram) ed il mare di Islanda
- Celle convettive o *camini* rinnovano le acque dense dei MN. Sono strutture di dimensioni pari a c.a. 100 km all'interno delle quali si osservano *plume* convettive di dimensioni pari a c.a. 1 Km.

Chimney (50-100 km)

Stratified water



**FIGURE S7.39** (From Talley et al. 2011)

Processes in a deep convection region. After Marshall and Schott (1999).

# Come si formano le DW e BW

- Si formano durante l'inverno quando la superficie dell'oceano interagisce con la fredda atmosfera polare ed accade che :
  1. si raffreddano : perdita di calore e/o evaporazione
  2. aumento di salinità : per evaporazione e formazione di ghiaccio (*brine rejection*)

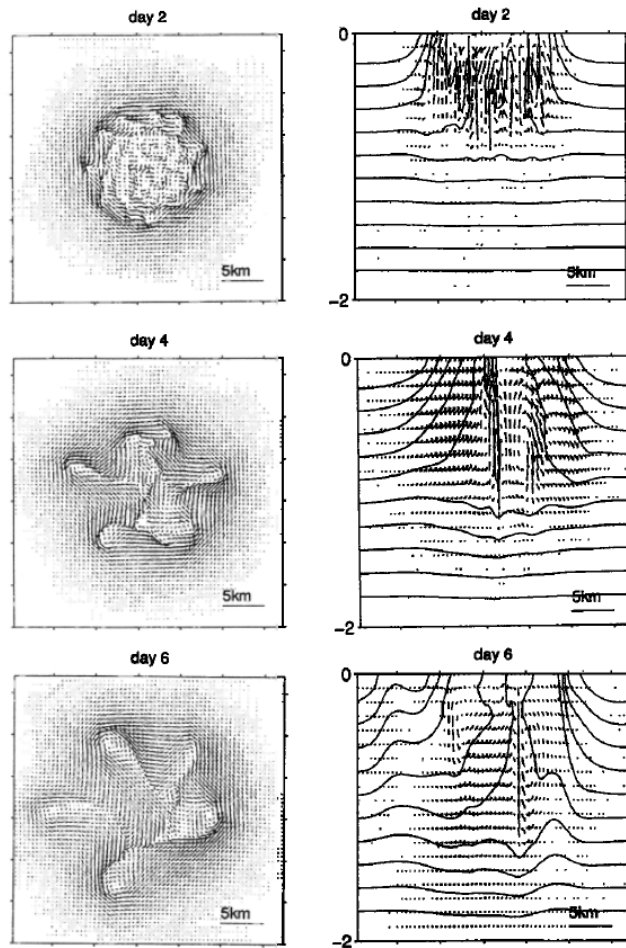
# Condizioni necessarie per la formazione di DW e BW

- 1) Forte perdita di calore dell'oceano durante l'inverno
- 2) Debole stratificazione al picnoclino
- 3) Un rialzo (*dome shape*) del picnoclino associato ad una circolazione ciclonica.

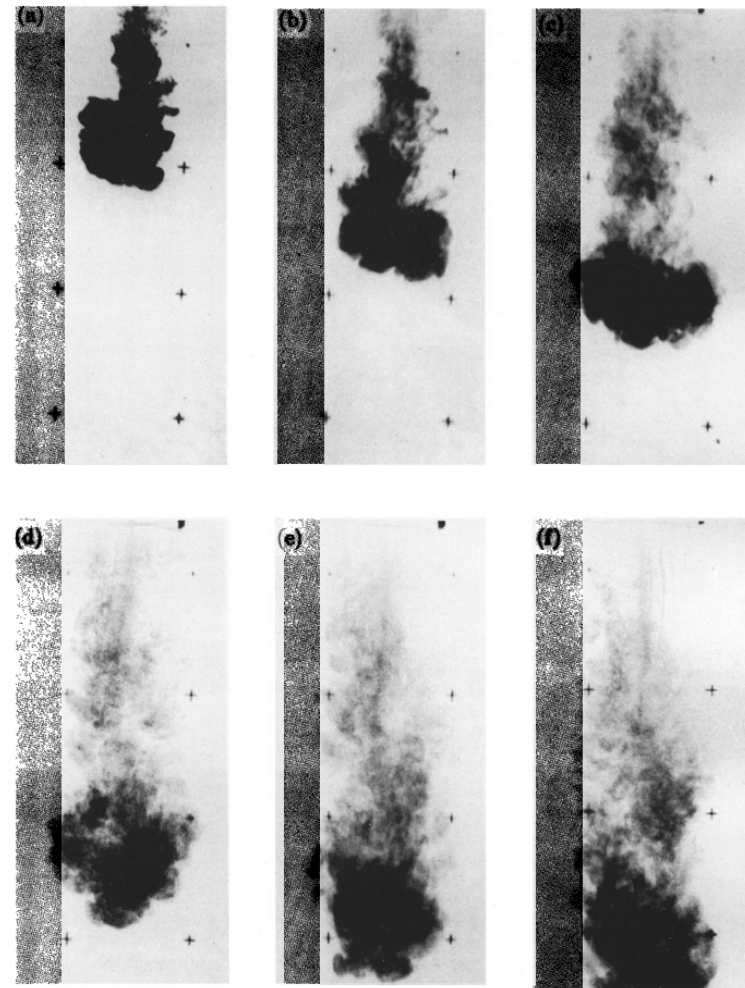
I punti 2 e 3 sono considerati come **pre-condizioni** per la convezione profonda

# Fasi della convezione profonda

- Sono individuabili 4 fasi successive :
  - 1) Precondizione
  - 2) Convezione violenta
  - 3) Scambi laterali
  - 4) Ri-stratificazione
- La **precondizione** è legata alla circolazione ciclonica
- La **fase convettiva** è innescata dal raffreddamento invernale e conseguente affioramento delle isopiche. Durante la convezione sono state misurate vel. vert. fino a 10 cm/s
- **Gli scambi laterali** avvengono a causa della pendenza delle isopiche che si innalzano verso il *camino*
- Terminata la convezione inizia il processo di **ri-stratificazione** che dura da settimane a mesi



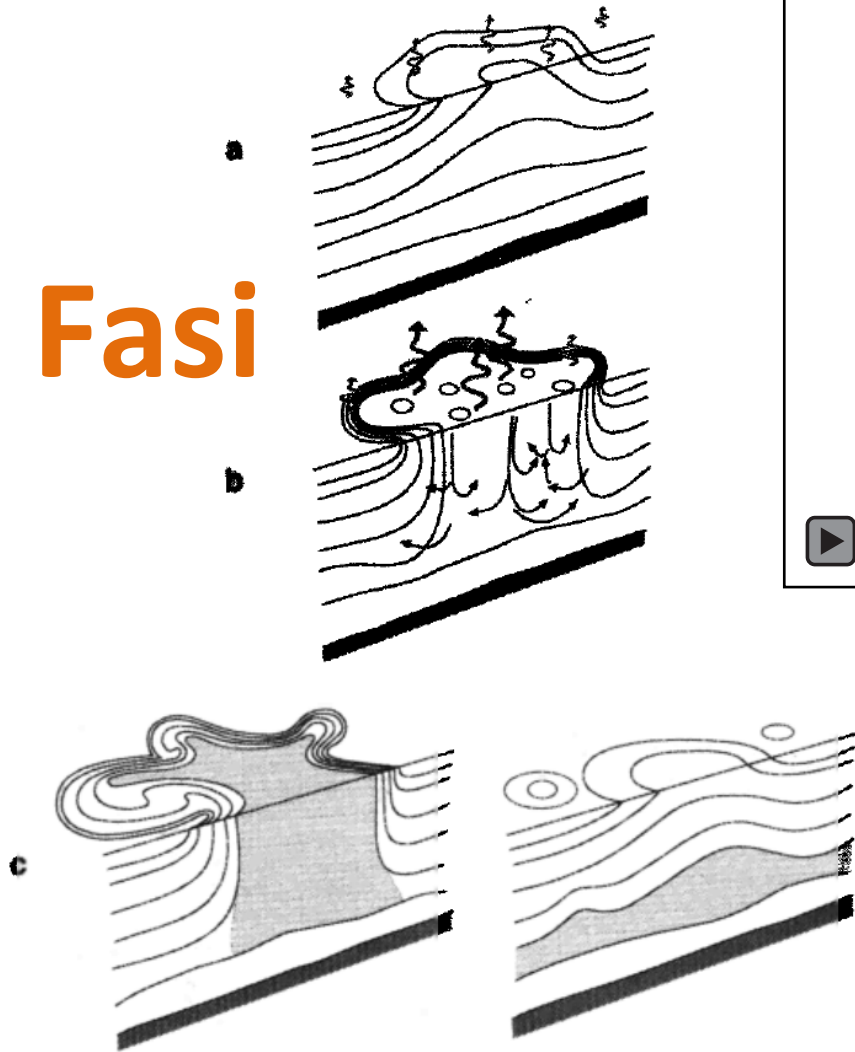
**Figure 34.** A numerical simulation of a mixed patch induced by a localized but extended patch of cooling applied to the surface of a resting, stratified ocean at days 2, 4, and 6. Plan views at the surface are shown on the left, with hydrographic sections through the evolving mixed patch on the right.



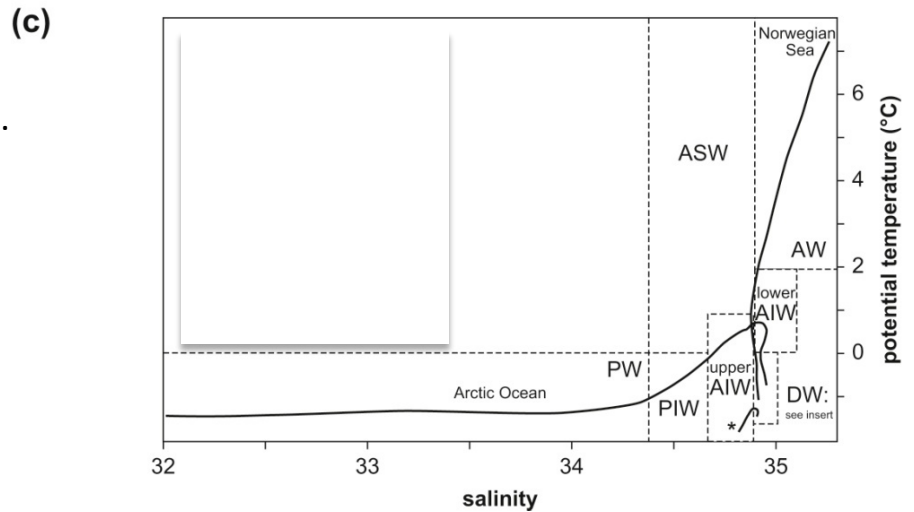
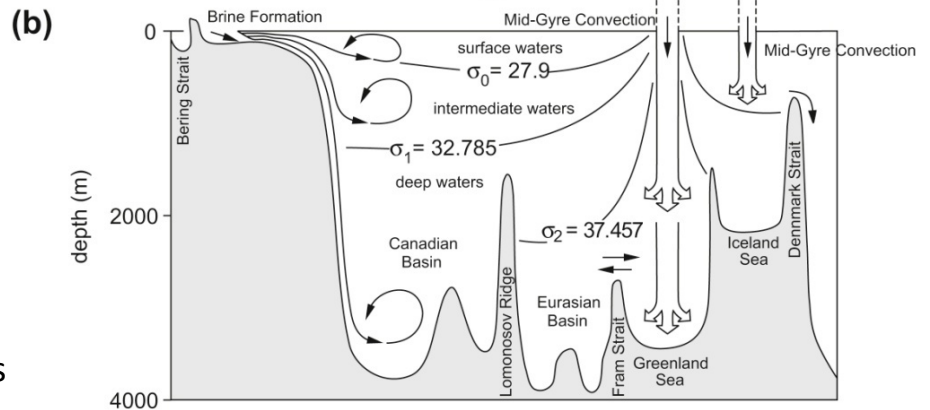
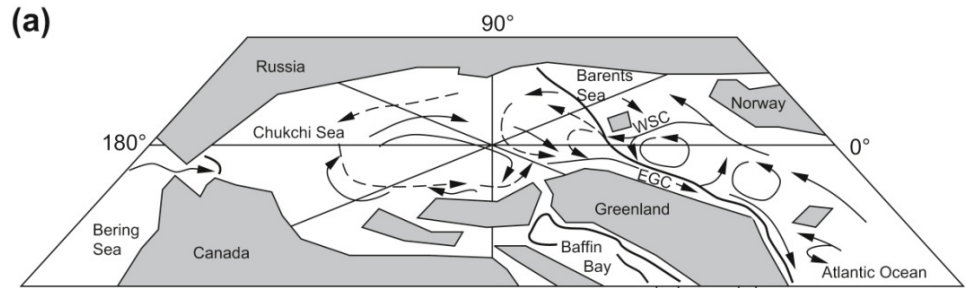
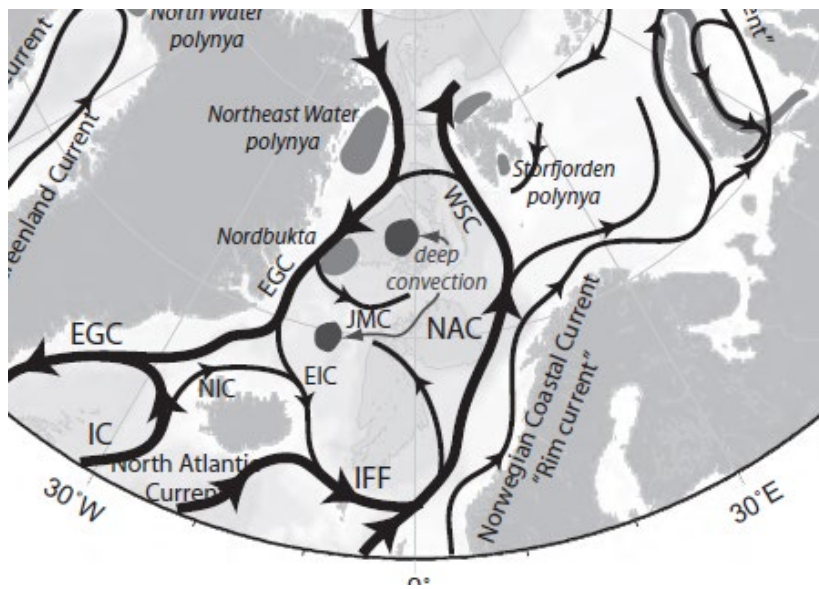
**Figure 20.** A sequence of photographs from a laboratory experiment carried out by Helfrich [1994]. The effects of rotation are evident in Figures 20d through 20f. The radius remains nearly constant, and the front falls to form a columnar structure, which ultimately undergoes geostrophic adjustment to form an anticyclonic conical eddy of dense fluid on the tank bottom.



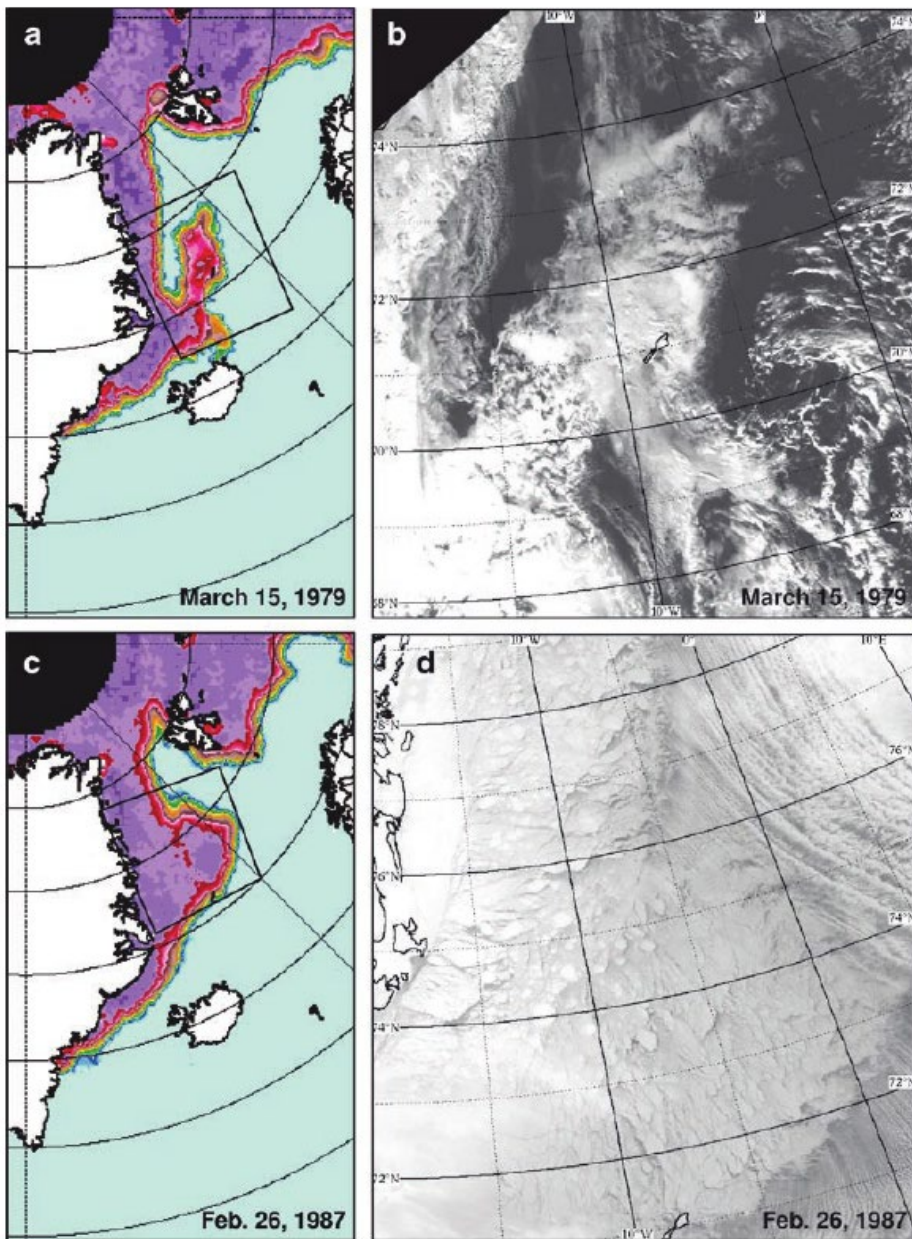
# Le 4 Fasi



**Figure 3.** Schematic diagram of the three phases of open-ocean deep convection: (a) preconditioning, (b) deep convection, and (c) lateral exchange and spreading. Buoyancy flux through the sea surface is represented by curly arrows, and the underlying stratification/outcrops is shown by continuous lines. The volume of fluid mixed by convection is shaded.



Overall schematic of (a) circulation, (b) water mass layers and transformation sites, and (c) water masses in potential temperature-salinity. Deep convection in the Greenland Sea in (b) has been replaced by mid-depth convection since the 1980s. Acronyms in (a): EGC, East Greenland Current; WSC, West Spitsbergen Current. Acronyms in (c): AW, Atlantic Water; AIW, Arctic Intermediate Water; ASW, Arctic Surface Water; DW, Deep Water; PIW, Polar Intermediate Water; PW, Polar Water.



- Odden e' una regione di ghiaccio quasi permanente formato localmente ma anche per un contributo di pack ice trasportato in quella regione dalla EGC.
- Nordbukta e' zona di formazione di polynya con caratteristiche miste tra polynya a calore latente e sensibile
- La relazione tra convezione profonda e la presenza di ghiaccio marino e' molto probabilmente legata al rilascio di brina
- Al fine di descrivere il processo di convezione e' necessario avere misure ad una risoluzione confortabile con le strutture interne ai camini e non con i camini stessi

Fig. 8.13 Spatial characteristics of the Odden as observed on 15 March 1979 by (a) SSM/I and (b) AVHRR and on 26 February 1987 by (c) SSM/I and (d) AVHRR sensors. The shape, extent and ice cover of the Odden depends on many factors including wind, temperature and ocean current. From Comiso et al (2001) with permission of the American Geophysical Union

A metà degli anni 70' si è osservato una interruzione della convezione profonda con una processo che invece ha interessato quote a prof. intermedia

Anche a metà anni 80 si è riscontrato lo stesso fenomeno

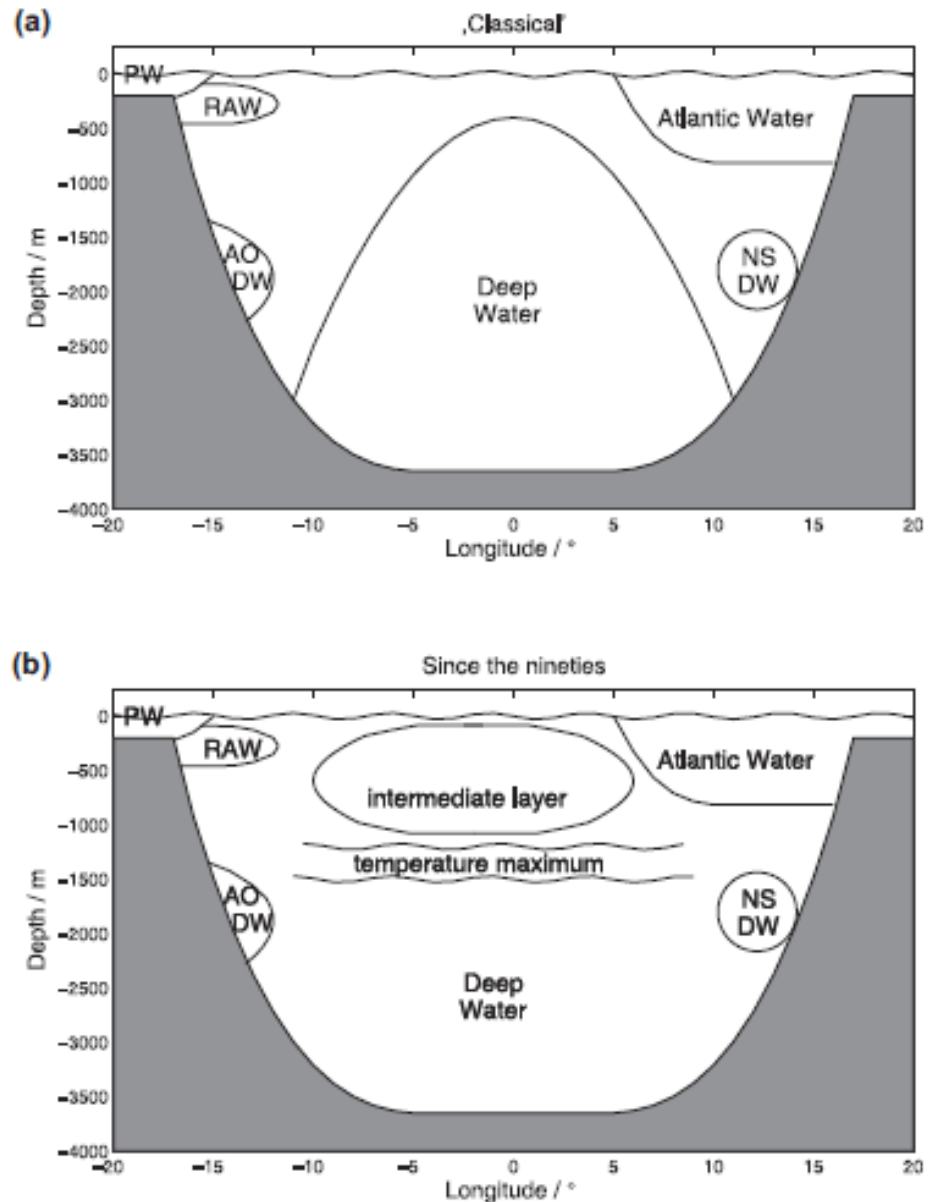
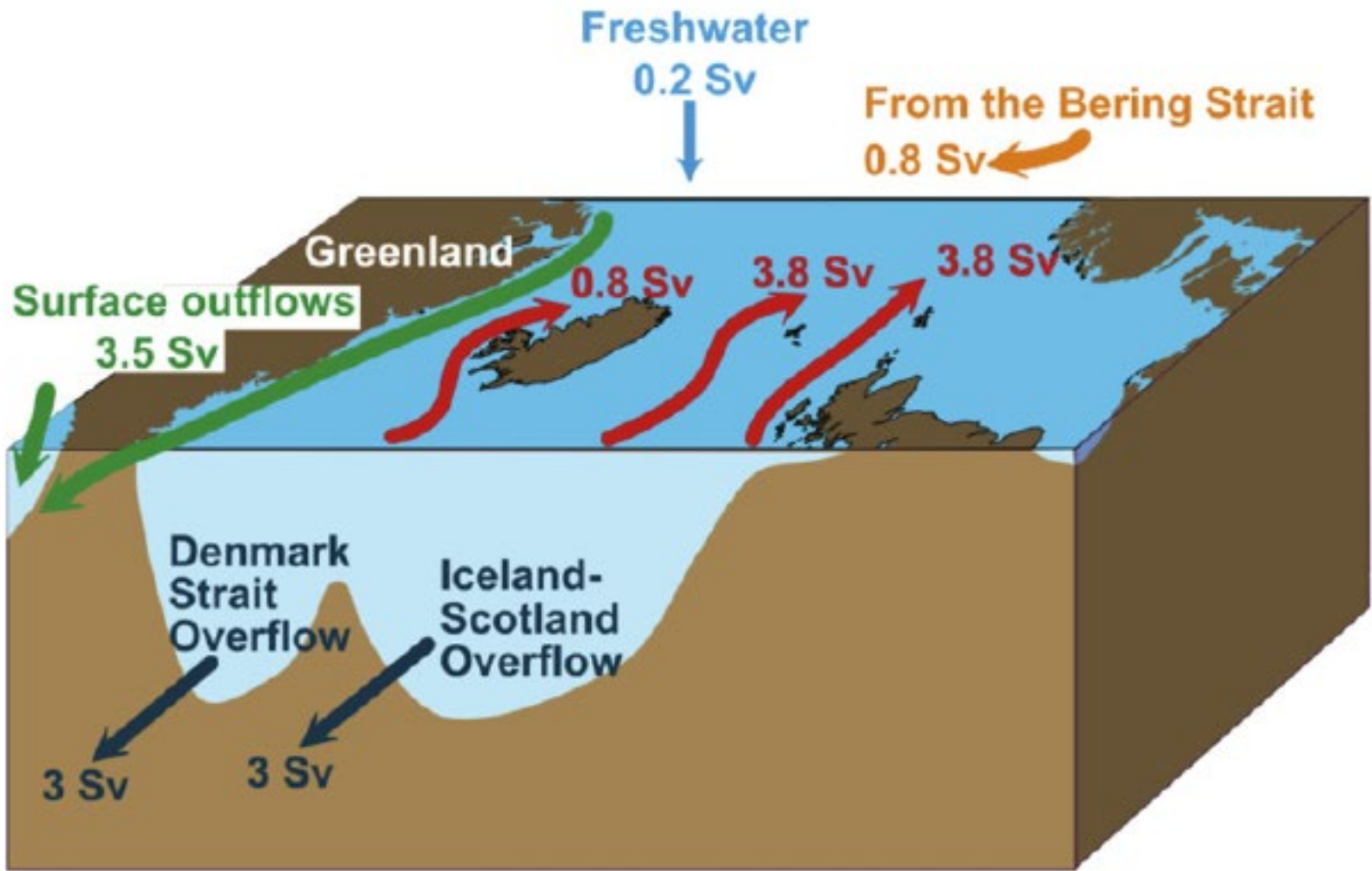


FIGURE S12.2 Classical and recent structure of the Nordic Seas water column: (a) with deep convection and (b) with intermediate depth convection. PW, Polar Water; RAW, Return Atlantic Water; AODW, Arctic Ocean Deep Water; and NSDW, Norwegian Sea Deep Water. Source: From Ronski and Budfus (2005b).

- Dopo il 1980 metà da dati osservati è stata riscontrata una diminuzione del tasso di formazione di GSDW pari ad un fattore 5
- Le cause sarebbero da ascrivere ad una diminuzione di salinità nei MN (in realtà non riscontrata...)
- La contrazione della produzione di GSDW ha effetti sulla temp. dei bacini profondi dell'Artico.
- È stato osservato che dal 1972 al 1996 la temp. mdG al di sotto de 2000 m di prof. è cresciuta da -1.31 a -1.12 °C. Nel mar di Norvegia è cresciuta da -0.97 a -0.87 °C

- Come conseguenza le acque profonde del mdG sono diventate meno dense di quelle del mar di Norv.
- L'inversione del grad di densità ha determinato una inversione del flusso tra i due bacini prima diretto verso il mar di Norv. successivamente verso il mdG (dopo l'inizio degli anni 90')
- Si è osservato una diminuzione del limite superiore di NSDW di oltre 100m
- Come conseguenza finale : cambia la composizione del flusso che attraverso il Greenland-Scotland ridge, si riversa nell'oceano Atlantico.

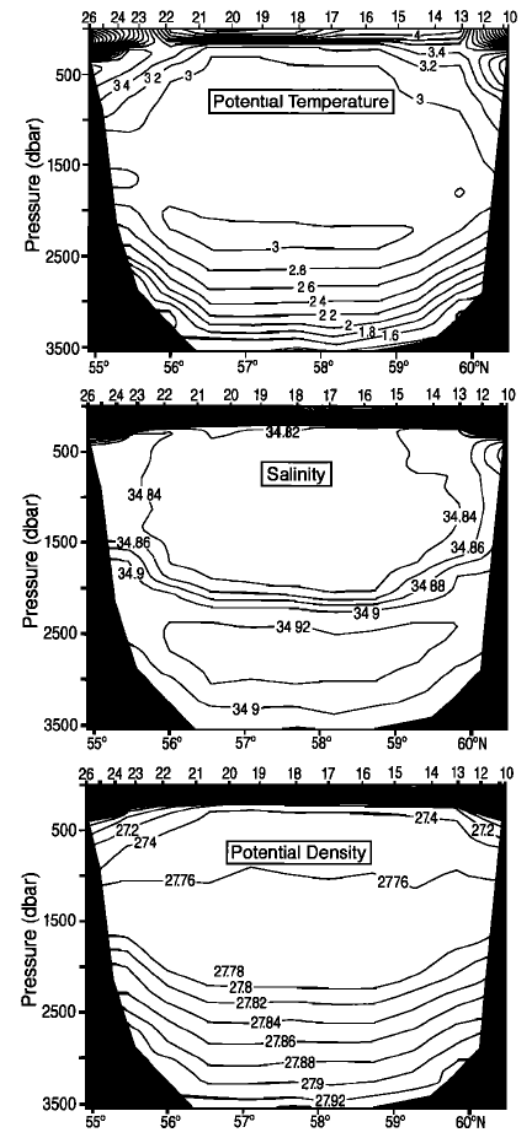
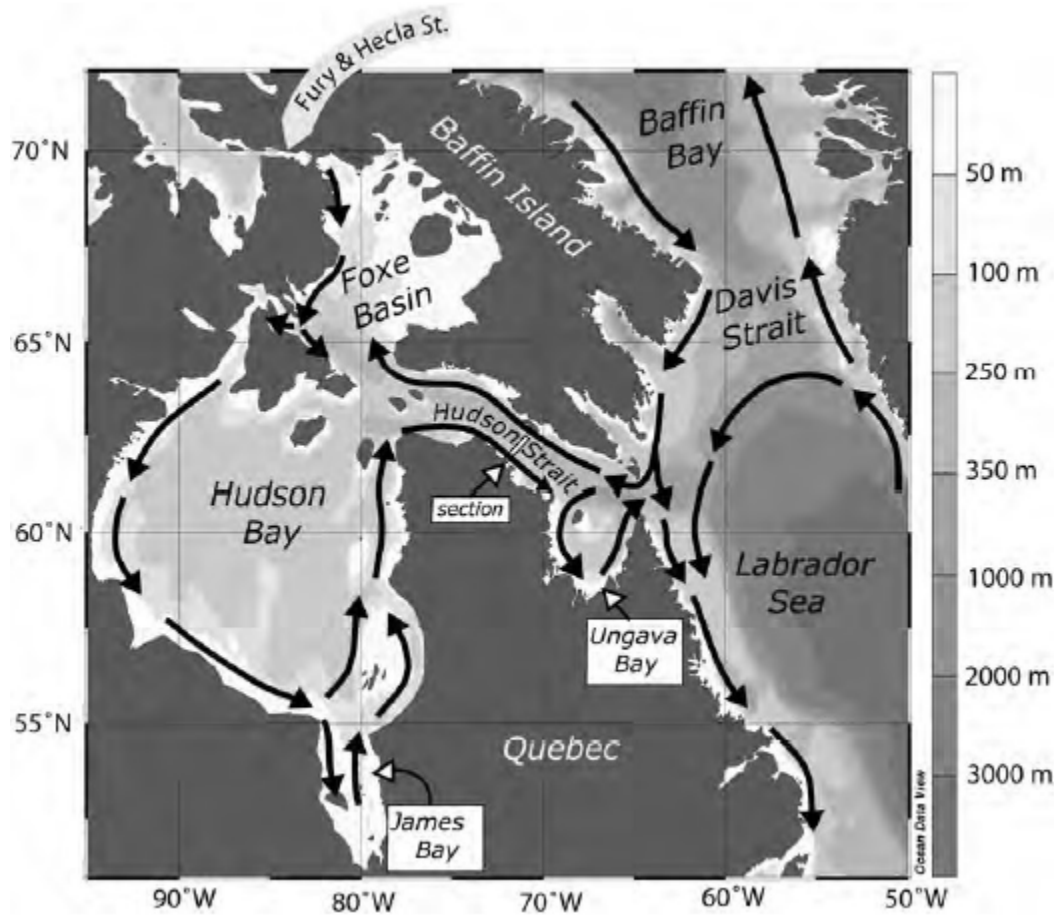


Volume transport budget for the Nordic Seas. *Source: From Hansen et al. (2008).*

# Convezione nel Mar del Labrador

- Studiata sin dall'inizio del 900 da Wurst e Sverdrup
- Nel 1962 una spedizione del WHOI e non furono evidenziate volumi ampi ed omogenei in prof indicanti convezione nel precedente inverno
- Solo a meta anni 70' ci sono state le prime evidenze sperimentali riscontrando una colonna d'acqua omogenea fino alla prof di 2000m



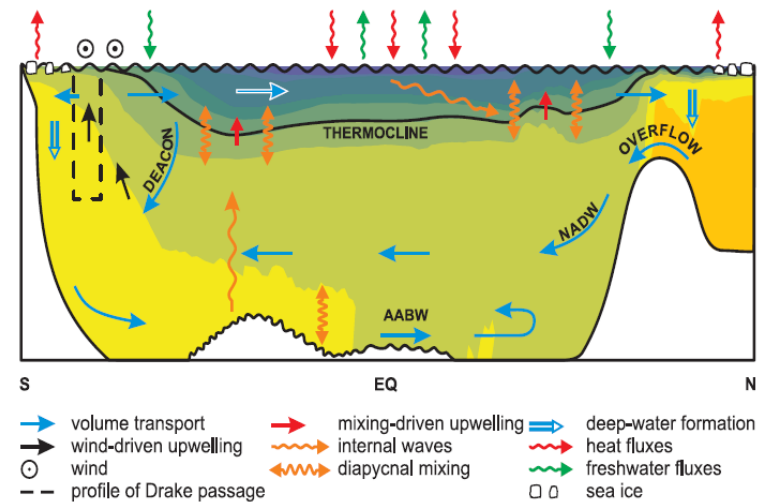


**Figure 7.** Sections of (top) potential temperature, (middle) salinity, and (bottom) potential density along the section in the Labrador Sea marked in Figure 5. Data from R/V *Dawson*, July 1990. Courtesy of Bedford Institute of Oceanography (A. Clarke, personal communication).

# Formazione di North Atlantic Deep Water (NADW)

- “It appears to be extremely difficult, if not quite impossible, to account for this degree of cold at the bottom of the sea in the torrid zone, on any other supposition than that of cold currents from the poles; and the utility of these currents in tempering the excessive heats of these climates is too evident to require any illustration”

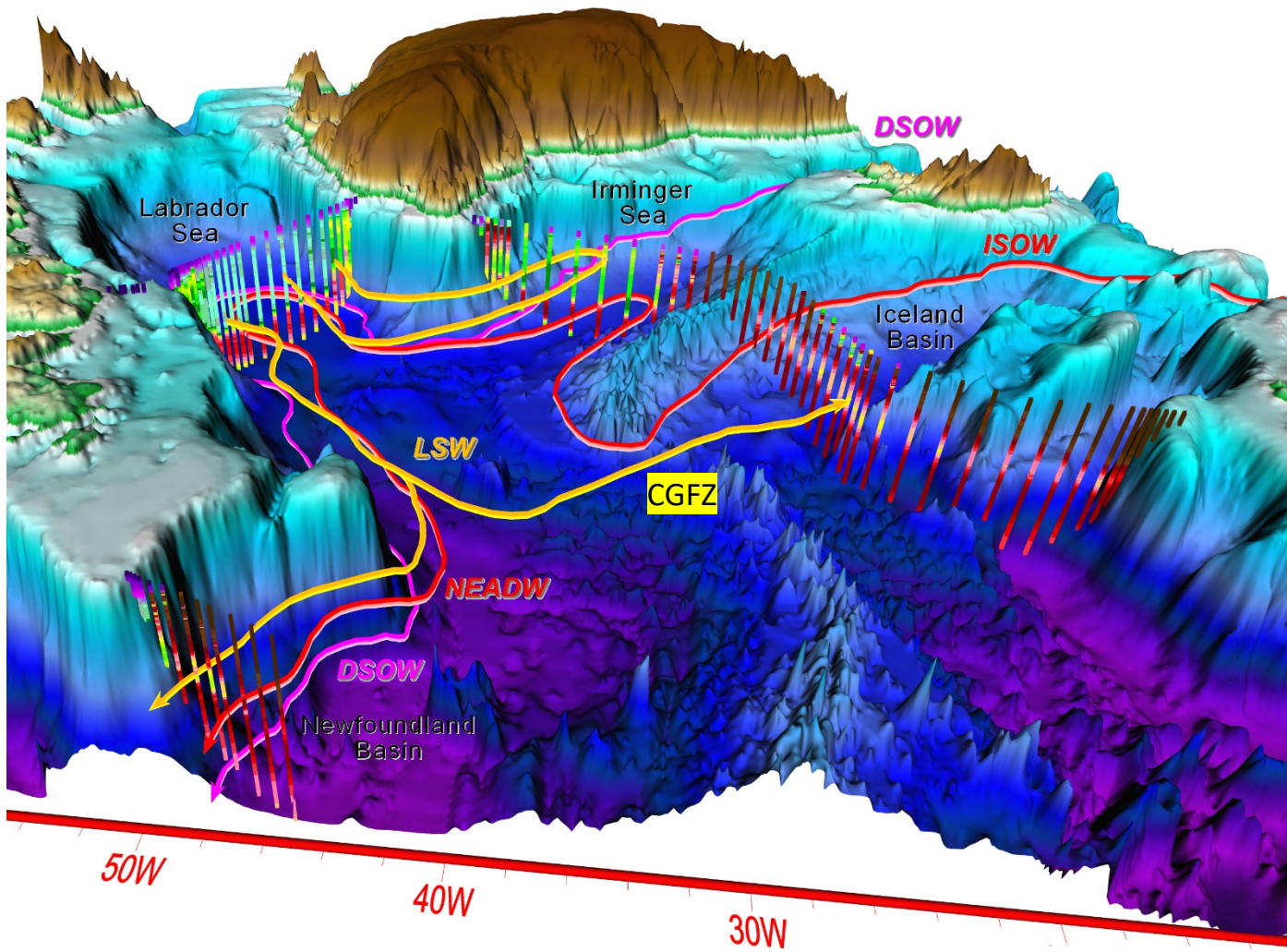
Sir Benjamin Thompson, 1797



**Fig. 2** Side view of the circulation in the Atlantic, showing various flow components and mechanisms discussed in the text. Color shading shows the observed density stratification, with lightest waters in blue and densest in orange. From [Kuhlbrodt, et al., submitted].

# Formazione di North Atlantic Deep Water (NADW)

- Nel mar del Labrador (MdL) si forma una componente meno densa di NADW chiamata quindi **Upper NADW**
- A seconda delle caratteristiche climatiche degli inverni nel MdL i valori delle LSW possono variare così come la densità e la profondità max raggiunta
- Durante la fase di scambi laterali, LSW si diffonde in tutto il MdL e nel mar di Irminger.
- Nei MN, durante la fase di overflow, il trasporto di volume, per entrainment, raddoppia
- ISOW e DSOW si uniscono nel mar di Irminger, continuando il percorso verso S come DWBC.
- ISOW e DSOW sono caratterizzati da valori diversi di T ed S ma entrambi sono anche indicate come **Lower NADW**
- UNADW contribuisce per un trasporto di volume tra 10 e 12 Sv mentre la LNADW per c.a. 15 Sv



- DSOW :Denmark Strait Overflow Water
- ISOW : Iceland Sea Overflow Water
- LSW: Labrador Sea Water
- NEADW:North East Atlantic Deep Water
- CGFZ:Charlie Gibbs Fracture Zone

Le acque di overflow, durante il processo di discesa nel Nord Atlantico, inglobano acque degli strati superiori, mescolandosi e pertanto cambiando i valori di T ed S rispetto ai valori precedenti l'attraversamento del ridge tra la Groenlandia e la penisola scandinava.

A photograph taken from the deck of a ship, looking out at the ocean during a sunset. The sun is a bright, glowing orb on the horizon, casting a shimmering path of light across the dark blue water. The sky is a mix of orange, yellow, and light blue, with a few wispy clouds. In the foreground, the ship's deck is visible, featuring a red metal railing and a dark surface with two circular hatches. The text "Buono Studio" is overlaid in the center of the image in a white, sans-serif font.

Buono Studio