

Från kallt till varmt – Norsk oceanografisk forskning i Weddellhavet, Antarktis

Nansen Minneforelesning
10. oktober 2019

av førsteamanuensis Elin Dareljus og professor emeritus Arne Foldvik,
Geofysisk institutt, Universitetet i Bergen

Vita vidder, snö, is och evig kyla. Antarktis är vackert, vilt och väldigt viktigt när vi försöker förstå hur havet, atmosfären och allt annat som påverkar vårt klimat hänger samman. Här bildas det tunga, kalla antarktiska bottenvatten som återfinns i djupet av stora delar av våra världshav. Här finns de miljontals kubikmeter med is som, om de smälter, lägger stora kustnära och idag tätbefolkade områden under vatten.

Norsk oceanografisk forskning i Antarktis och speciellt Weddellhavet har lång tradition – den inleddes när oceanografen Håkon Mosby steg ombord på forskningsskeppet *Norvegia* 1927 och pågår fortfarande, med aktivt norskt deltagande i flera stora internationella projekt. Medan den tidiga forskningen fokuserade på det kalla antarktiska bottenvattnet (1–3) har forskningen de senaste åren kommit att handla allt mer om smältande shelfisar och det «varma» vattnet (4). Därav titeln på föredraget: «Från kallt till varmt».

Men innan vi beger oss tillbaka i historien och jakten på ursprunget till det antarktiska bottenvattnet ska vi redogöra för ett litet experiment som blev genomfört under föreläsningen: Två grönfärgade isbitar las i var sitt glas, där det ena innehöll saltvatten och det andra vanligt kranvatten. Publiken blev därefter tillfrågade om vilken isbit som skulle smälta fortast. De flesta var eniga om att isen i det «salta» glaset skulle smälta först – och de flesta hade därmed fel (Figur 1).

Blandingen av avkyllt saltvatten och smält färskvatten från isen är lättare än saltvattnet (5) – i vårt glas blir den kalla smältvattenblandningen därför kvar i ytan och isolerar isbiten från det «varma» vattnet under. När is smälter på stort djup under en shelfis blir effekten den motsatta – smältvattenblandningen är också här lättare än det omgivande vattnet, och stiger därför uppåt längst undersidan på shelfisen och nytt, varmt vatten kan strömma till.



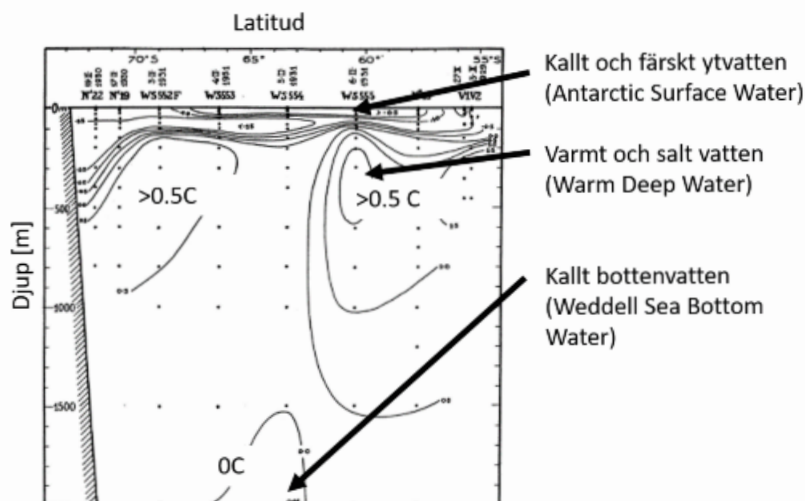
Figur 1: I glaset med färskvatten (till vänster) avger vattnet närmast isbiten värme till den smältande isen. När det kyls av ökar dess densitet och vattnet sjunker ner till botten av glaset. Nytt varmt vatten kommer kontakt med isen som därmed kontinuerligt tillförs värme och smälter. Den gröna färgen från isbiten blandas ut i hela glaset. I glaset med saltvatten (till höger), bestäms vattnets densitet av både vattnets temperatur och dess salthalt. Vattnet närmast isbiten kyls av, men det blir samtidigt färskare då det blandas med smältvatten från isbiten. Salthaltens påverkan på densiteten är större än temperaturens (5) och den kalla smältvattenblandningen blir liggande i ytan och «isolerar» isbiten från det varma vattnet under. Isbiten smälter därför långsammare i det salta glaset än i det färska. (Photo: M. Glessmer).

Jakten på Antarktisk bunnvann

När oceanograferna började mäta temperaturen i havet så insåg man till sin förvåning att vattnet i djuphavet var kallt! Även vid ekvatorn, där ytvattnet inbjuder till bad året runt, så avtar temperaturen ner i djupet och på stora djup (4000–5000 m) närmar sig temperaturen 0 °C. Så småningom kunde forskarna spåra upp källan till det kalla vattnet. Det kommer från Antarktis och det sydliga Weddellhavet (6) och vattenmassan fick därför namnet «ant-

arktiskt bottenvatten» (AABW). Bottenvattnets syrekoncentration (O_2) visade att det förnyas kontinuerligt – men var och hur det skedde visste oceanograferna inte.

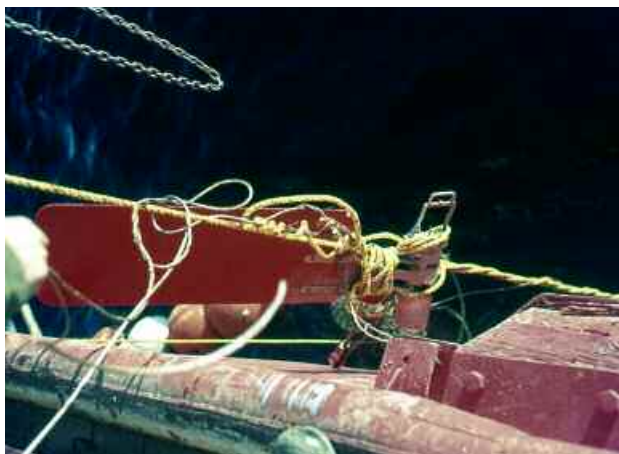
När oceanografen H. Mosby år 1927 steg ombord på den ombyggda säl-fångstskutan *Norvegia* var han väl medveten om mysteriet med det antarktiska bottenvattnet. Baserat på observationerna han gjorde ombord (Figur 2) föreslog han att bottenvattnet bildades under vintern över den vida och grunda kontinentalsockeln i södra Weddellhavet. När havsisen fryser så skiljs den största delen av saltet i vattnet som fryser ut och salthalten i vattnet under isen ökar. Om detta sker på grunt vatten kan salthalten – och därmed densiteten – öka så mycket att vattnet på kontinental sockeln blir tillräckligt tungt för att strömma ut och sjunka ner längst kontinentalslutningen till botten av Weddellhavet (1). Men det var än så länge omöjligt för H. Mosby att få sina teorier bekräftade med observationer. Det södra Weddellhavet är extremt otillgängligt – isen ligger tjock stora delar av året och det är bara möjligt att nå dit med forsknings skepp under korta perioder om sommaren. På den tiden kunde oceanografer bara observera havet när de var på plats med båt. De instrument som vi idag använder på våra riggar för att registrera vad som sker efter att vi rest tillbaka till kontoret var ännu inte utvecklade. Här skulle norska oceanografer med H. Mosby i spetsen komma att göra en stor insats.



Figur 2: Temperatur sektion ifrån kusten (till vänster) och norrut ut i Weddellhavet. Modifierad från Mosby (1934).

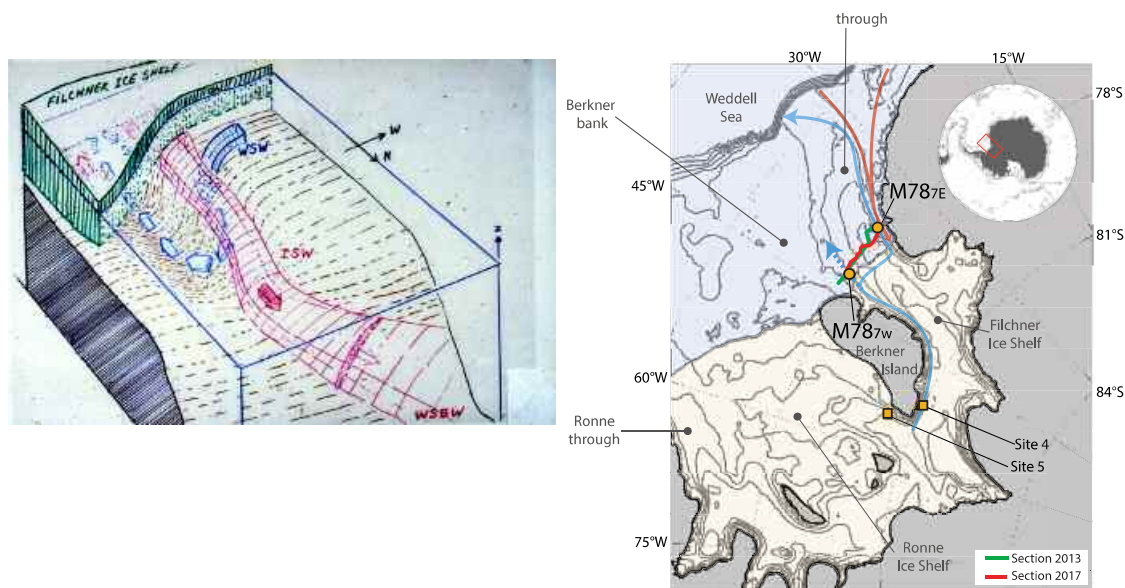
Många år senare, 1955, lyckades H. Mosby få NATO att finansiera ett projekt med mål att i Bergen konstruera ett instrument som på tusen meters djup skulle kunna registrera vattnets fart, riktning, temperatur och konduktivitet (från vilken salthalt kan beräknas) under ett helt år (7). Oceanografen T. Kvinge (UiB) och konstruktören I. Aanderaa (CMR) var centrala i projektet och ett par år senare såg den första «Aanderaa Recording Current Meter» (RCM4) dagens ljus. Instrumenten testades grundligt – och när US Science Foundation, motiverade av H. Mosby och hans teorier om antarktisk bottenvatten, skickade iväg sin största isbrytare Glacier på en forskningsexpedition till södra Weddellhavet 1963 fanns T. Kvinge och fyra nya RCM4 med ombord. Instrumenten sattes ut i fyra riggar. Alla riggarna var utrustade med en nyutvecklad elektronisk utlösare, som vid signal från ytan skulle kapa en kabel på riggen så att ankarvikten släpptes och instrumentet steg upp till ytan. Som back-up lades det ut en lång bottenlina för att man vid behov skulle kunna dragga upp riggarna.

Enligt planen skulle riggarna plockas upp året efter, men isförhållandena gjorde att det inte var möjligt varken 1969 eller 1970. Först 1973, under en ny expedition med Glacier ledd av T.D. Foster från Scripps Institute for Oceanography kunde två av riggarna draggas upp (Figur 3). De två instrumenten hade registrerat mer än ett år med så gott som perfekta mätningar – vilket med god marginal var nytt världsrekord! Tidsserierna gav ny och viktig information om hydrografi, strömmar och tidvatten (8), men inget bevis för systematisk utströmning av tungt, kallt vatten från kontinentalsockeln. Det antarktiska bottenvattnet förblev ett mysterium i ytterligare ett par år.



Figur 3: Först 1973 kunde två av riggarna med de nya strömmätarna RCM4 draggas upp. Här är en RCM4 på väg ombord efter fem år nere i djupet. Foto: A. Foldvik.

De norska oceanografer som var med på expeditionen 1973 – (T. Kvinge och A. Foldvik, båda från universitetet i Bergen –) hade, förutom bärgningen av riggarna, som mål att undersöka de hydrografiska förhållandena i närheten av den 400 meter djupa isfronten på Filchner-Ronne shelfisen (Figur 4b). Isfronten tornar upp sig som en vägg av is tvärs över av Filchner Rännan på 78°S. Här fann Foldvik & Kvinge tjocka lager med extremt kallt vatten. På 400 meters djup uppmättes temperaturer runt -2.2°C , vilket bevisade att havsvattnet måste ha kylts av i djupet, under shelfisen. I ytan kan havsvatten nämligen inte bli kallare än -1.9°C innan det fryser, men då fryspunkten sjunker med ökande tryck kan vatten i kontakt med is på stort djup kylas ner ytterligare. Kunde det nyupptäckta shelfisvattnet (Ice Shelf Water, ISW, Figur 4) utgöra källan till det antarktiska bottenvattnet? Det hade de rätta hydrografiska egenskaperna, men producerades det i tillräckligt stor mängd? Under expeditionen togs ett flertal hydrografiska snitt på tvärs av kontinentalslutningen norr om Filchner Rännan – men expeditionens ledare,



Figur 4: A. Foldviks skiss från 1970-talet som visar hur han tänkte sig utströmningen av shelfisvattnet (till vänster). Till höger en kartor som visar vår bild av cirkulationen idag (från Darelius & Sallée, 2018,). Blåa pilar visar hur kallt shelfisvattnet (ISW) strömmar och röda pilar visar inströmningen av varmt djupvatten (WDW).

E.C. Carmack & T.D. Foster, konstaterade något år senare i Deep Sea Research (9) att «...there is no evidence of any major flow of ISW into the deep ocean or on to the western continental shelf».

A. Foldvik var inte tilfreds med deras slutsats vad gällde shelfisvattnet, och han skriver senare:

Jeg mistenkte at det negative resultatet skyldtes metodefeil. Isbryteren Glacier var et meget stort skip (8500 ton, 95m langt, 23m bredt), vanskelig å manøvrere og med noe tungvinte kommandoforhold mellom skipsledelse og forskere. CTD-vinsjen ble operert av mannskapet etter at forskerne hadde gitt ønsket posisjon. Prosedyren var at stasjonsdypet ble avlest fra ekkoloddet, etter korreksjon for temperatur. Dette stasjonsdypet ble så fratrukket en sikkerhetsmargin (ca. 40 meter) og angav lengden på kabelen som firedes ut. I praksis var det imidlertid ikke mulig å si hvor nær bunnen observasjonen ble tatt. Bestemmelsen av stasjonsdyp ble foretatt før målingen startet. I løpet av måletiden (typisk ca. 30 min) driver skipet med vind og strøm, kanskje 1 kilometer eller mer, og bunn-dypet kan da endre seg med flere ti-talls meter nær den bratte kontinent-skråningen. I tillegg vil kabelen og instrumentet drive i forhold til skipet, så det faktiske instrumentdyp er mindre enn lengden på kabelen som fires ut. Helt i starten av Glacier 1973-74 ekspedisjonen tapte man de fleste Nansen vannhenterne med termometere under dårlig vær. Årsaken var brudd i den helt nye rustfrie kabelen, og dette gjorde nok også sitt til øket forsiktighet ved utfiring av CTD utstyret. Privat uttrykte T.D. Foster til meg at han ikke ville utelukke at CTD instrumentet kunne ha blitt stoppet 100 meter eller mer fra bunnen.

När den första norska expeditionen till Antarktis efter andra världskriget planerades fick A. Foldvik godkänt ett forskningsprogram som fokuserade på bottenvattnensproblematiken. Redan 1976 var han tillbaka i södra Weddellhavet, den här gången ombord på en liten isbrytare med namn Polarsirkel. Med om bord fanns en transportabel elektrisk vinch utrustad med 3200 m kabel som man låtit bygga i Danmark. Planerna var stora: tre snitt med totalt 12 strömmätare skulle sättas ut på kontinentalslutningen väst om Filchner Rännan. När alla glaciologer, geologer, ornitologer och zoologer och deras utrustning hade blivit satta i land på vad de trodde var en shelfis i Dronning Maud land (det var ett isberg, men det är en helt annan historia) kunde Foldviks sätta sina planer i verket. För att inte upprepa misstaget från Glacier tog Foldvik själv kommandot över CTD-vinchen och såg till att det på varje

station matades ut så mycket kabel att instrumentet kördes i botten. «Det var en kalkylerad risk som vi var tvungna att ta» säger han, och skriver vidare:

Vi ønsket å gjennomføre et CTD snitt som startet fra dyphavet vest for Filchner renna og arbeide oss opp kontinentalskråningen. For å være sikker på at den kalde strømmen med isbrevann ikke skulle unnsnippe vår oppmerksomhet ble stasjonene lagt tett med ca 200 meter dybdeintervall. Den første stasjonen, på 2526 meter dyp, viste den kjente strukturen med kaldt og relativt ferskt vinter vann over det varmere Weddell dypvann. Nær bunnen endret temperaturgradienten seg litt og antydte blanding med kaldere vannmasser, Stasjon 25 på 2318 meter dyp viste det samme billedet, men her var temperaturgradienten i de nederste 200 meter over bunnen markert sterkere. På stasjon 26 var laget med sterk temperaturgradient bare 60-70 meter tykk, men temperaturen her hadde avtatt med nesten 1°C. Så kom stasjon 27 på 1943 meter dyp med den store sensasjonen: Temperaturen nær bunnen avtok ca 2°C over 150 meter og bunntemperaturen var lavere enn frysepunktet i overflaten. Vi hadde dermed vist at isbrevannet forlot Filchner renna! Det var nær midnatt 24. januar 1977 og toktlederen følte seg som en 20-åring!

I løpet av natten og dagene som kom måtte planene for strømmålingsprogrammet endres og tilpasses observert hydrografi og topografi samt antagelser om hastigheten på isbrevannet. Senteret for strømmen lå nær stasjon #28 på 1421 meter dyp. Her ble et 200 meter tykt overgangslag separert fra et homogent 100 meter tykt bunnlag med temperatur -1.97°C.

Arne Foldvik hade upptäckt «Filchner utströmningen» (Filchner Overflow), en «underhavsälv» som transporterar mer än 1.5 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) shelfisvatten ner i djuphavet – det är åtta gånger mer vatten än den mäktiga floden Amazonas. Nyheten skulle säkert platsat på första sidan i Nature – men Arne valde att skriva om sitt fynd i den mer blygsamma «Naturen» och senare i Polar Institutets tidskrift «Polar Research» (2).

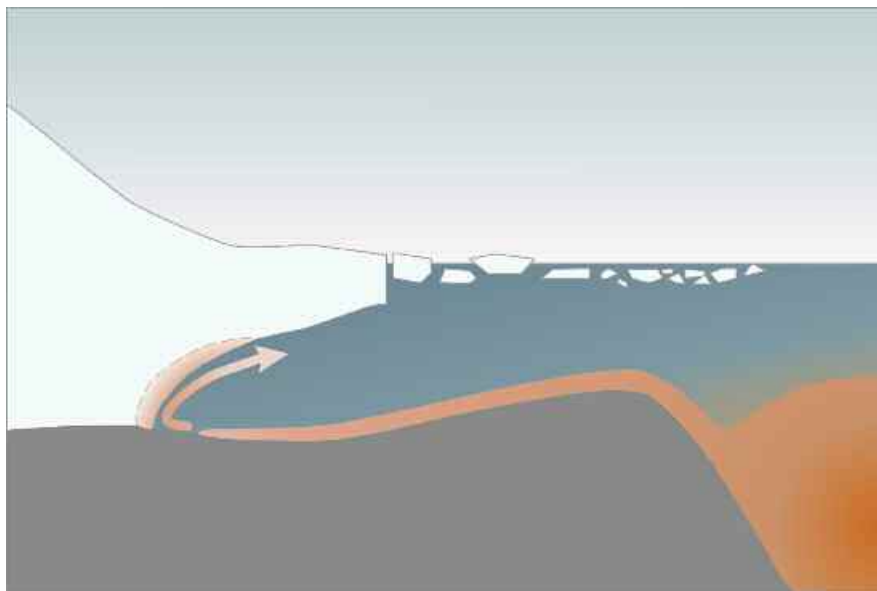
Sedan upptäckten 1976 har det genomförts ett stort antal norska och internationella forskningsprojekt där utströmningen av shelfisvatten från Filchner shelfisen varit i centrum. Under de sista åren har till exempel I. Fer mätt och beskrivit turbulens i området (10) medan E. Darelius studerat betydelsen av topografin för utströmningen (11) och K. Daae variabilitet i utströmningen och dess samband med vind (12) och tidvatten (13). S. Østerhus

(NORCE) har sört för att det gjorts kontinuerliga mätningar – självklart med hjälp av strömmätare från Aanderaa – av utströmningen från Filchner rännen. Tillsammans med kollegor från British Antarctic Survey (UK) och Alfred Wegener Institutet (Tyskland) har han varit med om att borra hål genom den flera hundra meter tjocka Filchner-Ronne shelfisen för att sätta ut instrument (Aanderaa igen!) i vattnet under isen.

«Varmt» vatten på kontinentalsockeln

De förändringar i Antarktis som satelliterna på senare tid gjort oss medvetna om har gjort att den oceanografiska forskningen i södra Weddellhavet skiftat fokus. Shelfisarna och den antarktiska inlandsisen, framför allt i västantarktis, har blivit tunnare och förlorat massa sedan satellit mätningarna började, och förändringarna går allt fortare (14, 15). Avsmältningen i västantarktis förklaras i stor grad av förändringar i havet; mer och varmare vatten strömmar in i håligheten under shelfisen som då i snabbare takt smälter underifrån (16, Figur 5). I det södra Weddellhavet är den stora Filchner-Ronne shelfisen till en viss grad skyddad från det varma vattnet som återfinnes i den djupa Weddellbassängen norr om den breda kontinentalsockeln (WDW, se Fig 2). Avsmältningen från shelfisen är därmed i dag låg. Numeriska studier (17, 18) antyder emellertid att situationen, på grund av förändringar i havsis och vind, kan komma att förändras i en relativt snar framtid. Framtidssimuleringar visar att kontinentalsockeln i södra Weddellhavet och håligheten under Filchner-Ronne shelfisen skulle kunna översvämmas med «varmt» vatten redan under nästa århundrade – med en dramatisk ökning i avsmältning som följd. Under senare år har därför flera stora projekt startats upp med mål att öka vår förståelse för hur det varma vattnet tar sig upp på kontinentalsockeln och in under shelfisen. Vi vet redan i dag att varje sommar, när vindarna är svagare och termoklinen inte i lika stor grad trycks ner mot kusten, strömmar det in varmt vatten på kontinentalsockeln öster om Filchner rännen (19, 20). Minst ett år har det nått helt in till shelfisen i söder (4). Det är troligen inte en ny företeelse – Foldvik observerade också varmt vatten i det här området i sina mätningar från sjuttio-talet (21). Vi har ännu inte data underlag för att kunna säga något om möjliga förändringar i den varma inströmningen.

Den tekniska utvecklingen har gjort stora framsteg efter 1968 och RCM4. Vi kan i dag göra observationer på platser och tidpunkter där ingen trott att det gick att göra mätningar. Med hjälp av varmtvattenborrar kan vi borra oss igenom den flera hundra meter tjocka shelfisen för att installera instru-



Figur 5: Varmt vatten från djuphavet kan i vissa områden runt Antarktis, till exempel i Amundsen havet, strömma in i håligheten under shelfisen och smälta stora mängder is i området runt grundningslinjen (zonen där inlandsisen börjar flyta och blir till shelfis). Vattnet under Filchner-Ronne shelfisen är idag tyngre än det varma djupvattnet och det har därmed inte möjlighet att nå grundningslinjen. Illustration: K. Daae.

menter. Självgående undervattensfarkoster (AUVs) kan skickas in under shelfisen, fullastade med instrumenter, och vi kan utrusta sälar med instrumentförsedda «hattar» så att de samlar in data genom en hel Antarkisk vinter: varje gång de simmar ner till botten för att söka föda registreras salt- och temperaturprofiler som sedan skickas hem via satellit när de ligger på isen och vilar (Figur 6).

År 2021 reser S. Østerhus och E. Darelius söderut igen, den här gången ombord på den tyska isbrytaren Polarstern. Under den internationella expeditionen ska mer än tjugo riggars tas upp och sättas ut. Med i packningen kommer det att finnas både nya «säl-hattar» och förhoppningsvis en engelsk AUV. Vi kan med andra ord förvänta oss mycket spännande oceanografisk forskning från Weddelhavet i åren som kommer, både från norska oceanografer och andra.



Figur 6: En Weddellsäl. En CTD-sensor med antenn kan klistras på sälen, som då samlar in data varje gång den dyker ner till botten för att leta mat. Datan skickas hem via satellit när sälen ligger på isen och vilar. Foto: E. Darelius.



Figur7: Shelfisfront i södra Weddellhavet. Foto: E. Darelius.



Figur 8: Forsknings skeppet R.V. Shackleton under en norsk forsknings-
expedition i södra Weddellhavet 2013. Foto: E. Darelius.

1. H. Mosby, The waters of the Atlantic Antarctic Ocean (1934).
2. A. Foldvik, T. Gammelsrød, T. Tørresen, Hydrographic Observations from the Weddell Sea during the Norwegian antarctic Research Expedition 1976/1977. *Polar Res.* **3**, 177–193 (1985).
3. A. Foldvik *et al.*, Ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea. *J. Geophys. Res.* **109** (2004).
4. E. Darelius, I. Fer, K.W. Nicholls, Observed vulnerability of Filchner-Ronne Ice Shelf to wind-driven inflow of warm deep water. *Nat. Commun.* **7**:12300 (2016), doi:10.1038/ncomms12300.
5. H. Gade, Melting of ice in sea water: A primitive model with application to the Antarctic ice shelf and icebergs. *J. Phys. Oceanogr.* **9**, 189–198 (1979).
6. W. Brennecke, Die ozeanographischen Arbeiten der deutschen antarktischen Expedition 1911–1912. *Aus dem Ark. der Dtsch. Seewarte.* **39**, 214 (1921).
7. S. Østerhus, in *Røtter*, K.O. Aslaksen, A.H.S. Tandberg, K. Rio, J. Høyer, Eds. (Universitetsmuseet i Bergen, Bergen, Norway, 2019; <https://www.nordisktrykk.no/FLIP/2402-UMB-flip/mobile/index.html>).
8. A. Foldvik, T. Kvinge, T. Tørresen, Bottom currents near the continental shelf break in the Weddell Sea. *Oceanol. Antarct. Cont. Shelf.* **43** (1985).
9. E.C. Carmack, T.D. Foster, Circulation and distribution of ocean-

- graphic properties near the Filchner Ice Shelf. *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.* **22**, 77–90 (1975).
10. I. Fer, E. Darelius, K. B. Daae, Observations of energetic turbulence on the Weddell Sea continental slope. *Geophys. Res. Lett.* **43**, 760–766 (2016).
 11. E. Darelius, A. K. Wåhlin, Downward flow of dense water leaning on a submarine ridge. *Deep. Res. Part I-Oceanographic Res. Pap.* **54**, 1173–1188 (2007).
 12. K. Daae, E. Darelius, I. Fer, S. Østerhus, S. Ryan, Wind-driven recirculation of the slope current in the Filchner Trough, Weddell Sea. *J. Geophys. Res. – Ocean.* (2018), doi:DOI 10.1002/2017JC013579.
 13. K. Daae, I. Fer, E. Darelius, Variability and Mixing of the Filchner Overflow Plume on the Continental Slope, Weddell Sea. *J. Phys. Oceanogr.* **49**, 3–20 (2018).
 14. IMBIEteam, Mass balance of the Antarctic ice sheet from 1992 to 2017. *Nature.* **558**, 219–222 (2018).
 15. F.S. Paolo, H. A. Fricker, L. Padman, Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science (80-.).* **348**, 327–332 (2015).
 16. H.D. Pritchard *et al.*, Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature.* **484**, 502–505 (2012).
 17. H.H. Hellmer, F. Kauker, R. Timmermann, J. Determann, J. Rae, Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current. *Nature.* **485**, 225–228 (2012).
 18. H.H. Hellmer *et al.*, The fate of the southern Weddell Sea continental shelf in a warming climate. *J. Clim.* **30** (2017), doi:10.1175/JCLI-D-16-0420.1.
 19. M. Årthun, K.W. Nicholls, K. Makinson, M.A. Fedak, L. Boehme, Seasonal inflow of warm water onto the southern Weddell Sea continental shelf, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.* **39**, L17601 (2012).
 20. S. Ryan, T. Hattermann, E. Darelius, M. Schröder, Seasonal Cycle of Hydrography on the Eastern Shelf of the Filchner Trough, Weddell Sea, Antarctica. *J. Geophys. Res. – Ocean.* **122** (2017), doi:10.1002/2017JC012916.
 21. A. Foldvik, T. Gammelsrød, T. Tørresen, Circulation and water masses on the southern Weddell Sea shelf. *Oceanol. Antarct. Cont. Shelf – Antarct. Res. Ser.* **43**, 5–20 (1985).