The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

‘Tanah perkuburan’ paus laut dalam sebenarnya arkib lima juta tahun

Satu kertas Nature melaporkan kepekatan besar whale fall dan fosil paus di Zon Diamantina di tenggara Lautan Hindi: lima komuniti whale fall moden, ratusan sisa cetacea fosil, dan umur isotop strontium yang mencecah kira-kira 5.3 juta tahun. Perkara menariknya bukan bahawa paus memilih tempat untuk mati, atau satu bencana menghasilkan tanah perkuburan. Bukti menunjuk kepada arkib laut dalam yang terbina lama melalui kematian paus biasa, bangkai yang tenggelam, aktiviti mencari makan paus berparuh yang sukar, topografi dasar laut dan pengawetan luar biasa baik. Ia membuka tingkap langka ke dalam ekosistem whale fall laut dalam; ia tidak bermakna laut dalam kini telah dipetakan atau difahami.

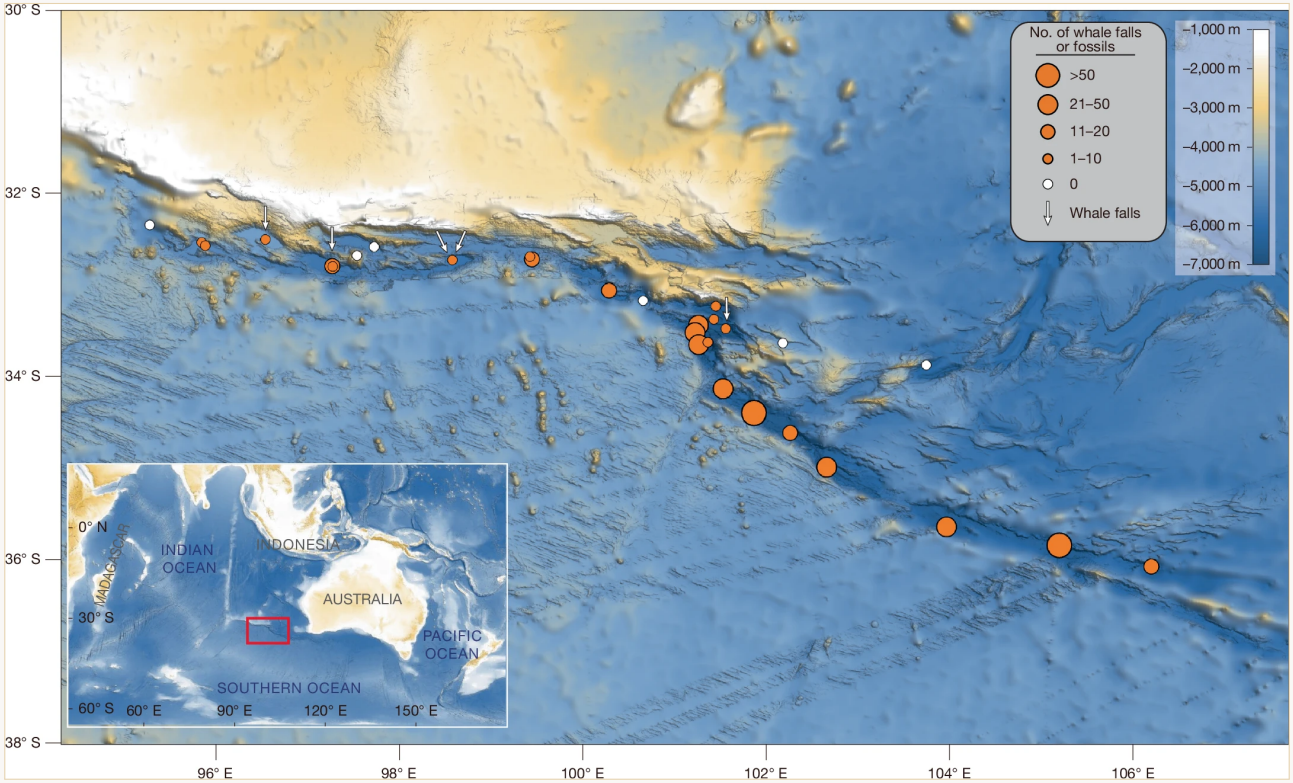
Written by Laura Nesso · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *A 5.3-million-year-old deep-sea whale necropolis in the Diamantina Zone*, Xiaotong Peng, Peng Zhou, Xikun Song, Giovanni Bianucci, Mengran Du and colleagues, Nature 654, 978-983 (2026) · DOI: 10.1038/s41586-026-10546-z

Dasar laut menyimpan tulang-tulang itu

Kebanyakan whale fall hilang ke dalam masalah perakaunan gelap. Seekor paus mati, tenggelam, memberi makan ledakan hidupan laut dalam, kemudian rekodnya berselerak, tertimbus atau dimakan. Saintis tahu whale fall ialah oasis ekologi, tetapi arkibnya tipis: kebanyakan tapak yang diketahui terasing, cetek berbanding palung paling dalam, atau terlalu muda untuk memberitahu banyak tentang masa geologi yang panjang.

Zon Diamantina mengubah skala masalah itu. Dalam satu kertas Nature baharu, Xiaotong Peng, Peng Zhou, Xikun Song, Giovanni Bianucci, Mengran Du dan rakan-rakan melaporkan kepekatan whale fall dan fosil paus yang panjang dan dalam di tenggara Lautan Hindi. Tapak itu memanjang kira-kira 1,200 kilometer di sepanjang dasar laut dan berada pada kedalaman kira-kira 4,600-7,000 meter. Merentas 32 selaman dengan kapal selam berpenghuni *Fendouzhe*, pasukan mendokumentasikan 485 tapak fosil paus dan whale fall aktif; dalam abstrak mereka meringkaskan penemuan sebagai lima komuniti whale fall semula jadi moden ditambah 476 cetacea fosil. Itu ialah dua kiraan kertas yang berbeza, bukan penambahan mudah: 485 ialah rekod pada peringkat tapak, manakala 476 ialah jumlah cetacea fosil yang digunakan dalam abstrak.



Nature Fig. 1 memetakan pemerhatian Zon Diamantina: bulatan jingga menandakan selaman apabila fosil paus atau whale fall dilihat, saiz bulatan mencerminkan berapa banyak sisa paus direkodkan bagi setiap selaman, anak panah putih menandakan whale fall sulfofilik aktif, dan bulatan putih menandakan selaman tanpa sisa paus yang diperhatikan. Rajah diterbitkan semula secara penuh dan tidak diubah: tiada potongan, tindihan, pelabelan semula, pewarnaan semula atau lukisan semula.

Peng et al. / Nature 654, 978-983 (2026), DOI 10.1038/s41586-026-10546-z · CC BY-NC-ND 4.0; base map: GMRT — Ryan et al., Geochem. Geophys. Geosyst. 10, Q03014 (2009) · CC BY 4.0 CC BY-NC-ND 4.0

Paus berparuh True ialah saudara hidup kepada paus berparuh penyelam dalam yang dibincangkan dalam kertas. Foto ini ialah konteks, bukan salah satu fosil Diamantina: intinya ialah paus berparuh sukar dikesan dan mencari makan di kedalaman, jadi arkib tulang mereka di dasar laut boleh menyimpan bukti yang sering terlepas daripada pemerhatian di permukaan.

Roland Edler / PeerJ / Wikimedia Commons CC BY 4.0

Bahan tertua yang ditarikhkan mencapai 5.26 juta tahun, sebab kertas itu menyebutnya nekropolis paus berusia 5.3 juta tahun. Frasa itu memang jelas dan kuat. Ia juga frasa yang paling memerlukan kehati-hatian.

Ini bukan bukti bahawa paus sengaja pergi ke sana untuk mati. Ini bukan satu peristiwa kematian beramai-ramai. Ini bukan tanah perkuburan dalam erti manusia. Ini ialah tempat bangkai dan tulang berkumpul, kekal terdedah, mengalami mineralisasi dan menjadi boleh dibaca.

Apa yang dilakukan oleh para penulis

- Meninjau Zon Diamantina dengan 32 selaman kapal selam *Fendouzhe* dari R/V *Tansuoyihao*.
- Merekod fosil paus dan komuniti whale fall aktif sepanjang kira-kira 1,200 kilometer dasar laut.
- Menggunakan video *in situ* dan spesimen yang dikumpul untuk mengenal pasti komuniti yang hidup pada whale fall moden.
- Menganalisis 43 spesimen fosil yang dibawa naik, mengenal pasti lima spesies paus berparuh dan satu spesies paus balin.
- Menentukan umur 33 spesimen tulang fosil menggunakan nisbah isotop strontium, kaedah yang membandingkan tandatangan kimia seperti air laut yang terawet dalam fosil dengan sejarah air laut yang diketahui.
- Menghubungkan pemerhatian dengan data sumber awam: imej *in situ* asal dan pemasangan

genom mikrob disimpan dalam Science Data Bank, manakala imej spesies whale fall yang dikaji berada dalam MorphoBank.

Apa yang mereka temui

- **Kepekatan besar dan dalam.** Para penulis melaporkan 485 tapak fosil paus dan whale fall aktif di Zon Diamantina, dengan pemerhatian pada kira-kira 4,600-7,000 meter dalam jadual tambahan.
- **Lima whale fall aktif.** Lima tapak aktif berada pada peringkat sulfofilik: tulang dilitupi tikar mikrob dan cacing pengorek tulang, apabila tenaga kimia daripada penguraian menyokong komuniti khusus.
- **Komuniti hidup yang padat.** Fauna berkaitan merangkumi 35 takson makrofauna yang dikenal pasti, didominasi anelid, krustasea dan moluska. Cacing pemakan tulang, gastropod, bivalvia vesikomiid dan bintang rapuh mendominasi haiwan lebih besar, dengan kepadatan tempatan dilaporkan sehingga 2,840 individu per meter persegi.
- **Arkib fosil paus berparuh.** 43 fosil yang dibawa naik termasuk spesies paus berparuh hidup yang diketahui dari rantau itu, bentuk pupus seperti *Pterocetus* dan *Izikoziphius*, serta beberapa sisa paus balin. Satu spesimen diterangkan sebagai spesies baharu, *Pterocetus diamantinae*.
- **Julat masa yang panjang.** Daripada 33 tulang fosil yang diuji untuk isotop strontium, 25 menghasilkan umur antara 0.12 dan 5.26 juta tahun. Tarikh tertua menunjukkan peristiwa whale fall di rantau ini sekurang-kurangnya sejak Pliosen Awal.

Mengapa begitu banyak paus di sana?

Jawapan kertas itu bukan satu sebab mudah. Ia ialah lapisan beberapa penapis yang munasabah.

Sesetengah bangkai mungkin datang daripada paus balin yang bergerak melalui koridor migrasi luas. Paus minke dan sei mencari makan berhampiran permukaan, bukan pada kedalaman 6 atau 7 kilometer, jadi tulang mereka pada kedalaman itu paling baik difahami sebagai bangkai yang tenggelam selepas mati.

Paus berparuh berbeza. Mereka pakar penyelaman dalam, mencari sotong dan ikan dalam persekitaran dasar laut yang curam dan dalam. Zon Diamantina tepat landskap seperti itu: kedalaman ekstrem, topografi berbentuk V yang kompleks, dan mangsa yang diperhatikan ketika selaman. Para penulis berhujah bahawa kematian biasa, risiko fisiologi mencari makan di kedalaman, dan mungkin keletihan maut atau tekanan penyahmampatan semuanya boleh menambah sisa ke dasar laut.

Kemudian dasar laut menyimpannya. Topografi zon boleh menyalurkan bangkai yang tenggelam. Kadar sedimentasi rendah membolehkan tulang kekal terdedah lama. Rostrum paus berparuh yang padat sangat tahan terhadap pemusnahan. Oksida feromangan dan pemendakan karbonat boleh membantu mengawet bahan rangka. Gabungkan semuanya dan “tanah perkuburan” menjadi kurang misteri: bukan tempat yang dipilih paus, tetapi tempat apabila kematian lebih berkemungkinan meninggalkan rekod.

Apa yang tidak dibuktikan oleh kajian ini

- Ia **tidak** menunjukkan tanah perkuburan paus yang disengajakan. “Nekropolis” ialah metafora untuk pengumpulan tersebut, bukan bukti tingkah laku.
- Ia **tidak** menunjukkan satu bencana kematian besar-besaran. Tarikh merentasi berjuta-juta tahun, dan para penulis menerangkan arkib berumur panjang yang dibina daripada peristiwa berulang.
- Ia **tidak** bermakna laut dalam kini telah dipetakan dengan baik. Tapak ini ditemui melalui kerja kapal selam yang jarang dan mahal dalam satu koridor geologi; kertas itu penting tepat kerana rekod seperti ini biasanya jarang.
- Ia **tidak** menjadikan setiap spesies dalam komuniti itu spesies baharu. Para penulis mengatakan banyak takson yang diperoleh mungkin baharu, tetapi kebanyakannya hanya dikenal pasti hingga genus atau famili; hanya satu bivalvia vesikomiid dapat ditetapkan dengan yakin pada aras spesies melalui perbandingan barcoding.
- Ia **tidak** menentukan punca penuh setiap kematian paus. Para penulis mencadangkan penjelasan yang berkonvergensi: migrasi, pencarian makanan dalam, topografi, pengawetan dan sedimentasi. Itu tidak sama dengan membuktikan mekanisme kematian setiap haiwan.

Sejauh mana kukuh buktinya?

Bukti bagi tapak itu sendiri kuat: pemerhatian langsung kapal selam, ratusan rekod yang dipetakan, spesimen fizikal, pengenalpastian genetik untuk sesetengah haiwan, dan pentarikhan isotop tulang fosil. Dakwaan paling kuat ialah pemerhatian: tapak itu wujud; ia dalam; ia luas; komuniti whale fall aktif ada; dan sebahagian bahan fosil berusia berjuta-juta tahun.

Dakwaan penjelasan semestinya lebih lembut. Kertas itu boleh menunjukkan di mana sisa berada, apa sebahagiannya, berapa umur sebahagiannya, dan apa yang hidup pada whale fall aktif. Ia tidak boleh memainkan semula kematian. Asal-usul yang dicadangkan ialah pembinaan semula daripada ekologi, fisiologi, bentuk dasar laut dan keadaan pengawetan. Itulah paleoekologi biasa: kuat, tetapi dibina daripada jejak yang saling menguatkan dan bukan pemerhatian langsung peristiwa asal.

Mengapa ia penting

Whale fall ialah jamuan singkat yang boleh menjadi habitat berumur panjang. Ia menghubungkan haiwan permukaan dengan dasar laut dalam, membawa karbon, tulang dan tenaga kimia ke persekitaran yang kekurangan makanan. Ia juga bertindak seperti pulau bagi haiwan khusus: cacing yang mengorek tulang, bivalvia dengan simbion pengoksida sulfur, bintang rapuh dan gastropod yang boleh berkumpul di sekitar sisa.

Zon Diamantina menambah dimensi masa kepada gambaran itu. Ia mencadangkan bahawa sesetengah dasar laut dalam boleh mengawet ekosistem whale fall bukan sekadar sebagai peristiwa

berselerak, tetapi sebagai arkib ekologi dan evolusi paus. Paus berparuh terkenal sukar dikaji kerana hidup dan mencari makan jauh daripada pandangan; pengumpulan tulang mereka di dasar laut boleh mendedahkan spesies, taburan dan sejarah evolusi yang terlepas daripada pemerhatian permukaan.

Cerita bersihnya bukan “saintis menemui tanah perkuburan paus di lautan.” Ia lebih aneh dan lebih berguna: satu koridor geologi laut dalam mengawet cukup banyak kematian paus untuk menukar ekosistem yang biasanya sekejap menjadi satu rekod.

Ringkasan utama

Penyelidik yang meninjau Zon Diamantina di tenggara Lautan Hindi melaporkan pengumpulan whale fall dan fosil paus laut dalam yang sangat besar: 485 tapak dan whale fall aktif yang direkodkan sepanjang kira-kira 1,200 kilometer, pada kedalaman hingga kira-kira 7,000 meter, dengan tarikh fosil hingga 5.26 juta tahun. Tapak ini menempatkan komuniti whale fall khusus dan mengawet garis keturunan paus moden dan pupus, khususnya paus berparuh. Hasilnya ialah arkib laut dalam yang jarang, bukan tanah perkuburan literal, bukan satu peristiwa kematian beramai-ramai, dan bukan bukti bahawa laut dalam kini telah difahami. Dakwaan penting lebih sempit dan lebih kuat: dalam keadaan dasar laut yang tepat, kematian paus boleh meninggalkan rekod yang bertahan berjuta-juta tahun.

Sumber

Peng et al., A 5.3-million-year-old deep-sea whale necropolis in the Diamantina Zone, Nature 654, 978-983 (2026)
https://doi.org/10.1038/s41586-026-10546-z

Science Data Bank dataset for the original in situ images and microbial MAGs
https://doi.org/10.57760/sciencedb.28830

MorphoBank project P6064 — original images of investigated whale-fall species
https://morphobank.org/permalink/?P6064