

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Teil I Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Wischhofstr. 1-3, 24148 Kiel

Förderkennzeichen: 03G0294A

Projektleiter: Michael Riedel, PhD

Vorhabenbezeichnung: CLOCKS: Die Cascadia Subduktionszone vor Vancouver
Island: Ausdehnung der seismogenen Zone, Bruchverhalten an der Deformationsfront, und
nördliche Begrenzung der Subduktion

Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2022 bis 31.10.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0294A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Aufgaben im Rahmen des Forschungsprojektes CLOCKS umfassten eine Reihe von geophysikalischen Messungen vor der Westküste von Vancouver Island, British Columbia, Kanada, zur Bestimmung der Beschaffenheit und tektonischer Eigenschaften der nördlichen Cascadia Subduktionszone. Die Ausdehnung der verhakten Juan de Fuca Plattengrenze steht dabei im Mittelpunkt, da diese Ausdehnung die Magnitude des nächsten möglichen Subduktions-Erdbebens bestimmt. Ein großes Erdbeben der Magnitude $M > 8.5$ wird in absehbarer Zeit an der Cascadia Subduktionszone erwartet. Das Datum des letzten Bebens bei Cascadia wurde durch Tsunami-Aufzeichnungen auf den 26. Januar 1700 bestimmt. Die Wiederkehrrate dieser Ereignisse variiert zwischen 250 und ~1000 Jahren. Die maximal mögliche seewärtige Grenze der Bruchzone ist die Deformationsfront und die co-seismische Verschiebung entlang der Spitze des Akkretionskeils (slip-to-toe) wird untersucht. Die landseitige Ausdehnung der seismogenen Zone basiert auf thermischen Modellen, wobei die 350°C -Isotherme als tiefste Ausdehnung verwendet wird. Die Bruchzone kann an der Ober- und Untergrenze allerdings Übergangszonen aufweisen. Diese Übergangszonen besser zu kartieren ist eine Aufgabe des Vorhabens CLOCKS. Ein zweiter Schwerpunkt des Vorhabens ist die Explorer Platte und das Winona-Becken. Ob die Explorer Platte dabei subduziert wird, oder durch Transpression unter Vancouver Island geschoben wird und tektonisch zerschert wird, und ob es auf der Explorer Platte von der Juan de Fuca Platte entkoppelte Subduktions-Erdbeben gibt wird anhand detaillierter geophysikalischer Messungen untersucht.

2. Ablauf des Vorhabens

Der vorgelegte Zeitplan wurde eingehalten. Während des Zeitraumes zwischen dem Projektbeginn bis zur Ausfahrt SO294 (01.06.22 – 13.09.22) standen die Vorbereitungen und Planungen im Fokus der Arbeiten, u. A. die technischen Vorbereitungen für den Einsatz der Geräte zum Schutz der Meeressäuger (PAM – passives akustisches Monitoring System), sowie Besprechungen mit kanadischen Behörden zu den Auflagen zum Schutz der Meeressäuger. Gemäß Auflagen wurden Gespräche mit Vertretern der lokalen Fischerei-Industrie, der kanadischen Navy und der indigenen Bevölkerung von Vancouver Island durchgeführt. Die Fahrt SO294 (**13.09.22 – 27.10.22**) erfolgte von Vancouver, Kanada, nach Port Hueneme, CA, USA. Der erste Teil von SO294 wurde für Arbeiten des Nebennutzer-Programmes (03G0294B) genutzt. Im Anschluss daran erfolgten alle Arbeiten des Projektes CLOCKS. Zusätzlich zu den aktiven refraktions-seismischen Vermessungen, wurden während SO294 Langzeit-OBS von GEOMAR und JAMSTEC im Arbeitsgebiet ausgelegt. Diese wurden in einer Bergungsfahrt vom 26. Juni bis 10. Juli 2023 mit dem kanadischen Küstenwachtschiff CCGS John P. Tully geborgen. Im zweiten Jahr der Projektlaufzeit (**01.01.2023 - 31.12.2023**) stand Daten-Analyse im Mittelpunkt (Bearbeitung der hydroakustischen Daten, Analyse der Magnetotellurik-Daten, Analyse und Beprobung der Sedimentkerne, Porenwasser-Analyse, Refraktions- und Reflektions-Daten Processing, Bearbeitung der Wärmestrom-Daten). Die letzten Monate der Projektlaufzeit (**01.01.2024 - 31.10.2024**) wurden zur Sichtung und Bearbeitung der seismologischen Daten genutzt. Im Vordergrund stand dabei ein Abgleich aller Daten bei allen Nutzern (GEOMAR, GSC, JAMSTEC) und eine erste Analyse zu Erdbeben-Lokationen.

3. Wesentliche Ergebnisse

I. Verteilung der natürlichen Seismizität

Die natürlichen Seismizität entlang der nördlichen Cascadia Subduktionszone konnte bestimmt werden. Der vorläufige automatisierte Erdbeben-Katalog umfasst 568 Events. Eine räumliche Häufung der Seismizität entlang der Nootka-Störung ist ersichtlich. Zusätzlich ist die Explorer-Platte seismisch aktiv, wohin gegen die Juan de Fuca Platte a-seismisch verhakt ist.

II. Proto-Störungen entlang der Deformationsfront

Entlang der Deformationsfront der Juan de Fuca Platte sind markante Änderungen der Beschaffenheit der Hauptstörungs-Aufschubung ersichtlich. Ein Wechsel der Vergenz der Störung korreliert mit der Fragmentierung der Deformationsfront und dem Auftreten von Proto-Störungen. Solche Proto-Störungen können einen großen Anteil der sich aufbauenden Spannungen auffangen und somit das Geogefahren-Potential verändern.

III. Magnetotellurik

Die Marinen- und Land-MT-Stationen auf Vancouver Island wurden in einem Profil zusammen ausgewertet. Im Widerstandsmodell ist eine Korrelation der Lage der abtauchenden Juan de Fuca erkennbar. Zusätzlich setzt sich Vancouver Island als Gebiet mit hohem Widerstand gegenüber dem westlich gelegenen sedimentären Akkretionskeil mit geringem Widerstand ab. Ein Gebiet mit niedrigem Widerstand am östlichen Rand von Vancouver Island ist mit einer Störungszone verbunden und bildet den Übergang vom kristallin-metamorphischen Gestein von Vancouver Island zum östlichen Georgia-Becken mit Sedimenten der Nanaimo-Gruppe. Eine gute Übereinstimmung der Lage der kontinentalen Moho mit dem MT-basierten Widerstandsprofil ist ebenfalls ersichtlich.

IV. Erdbebenrate der Explorer Platte

Insgesamt wurden zwölf Sedimentkerne an Hangrutschungen im Winona-Becken gewonnen. Alle Sedimentkerne zeigen Turbidit-Ablagerungen. Bis Ende des Projektzeitraumes wurden 14 Proben zur ¹⁴C Datierung entnommen. Das Altersmodell zeigt eine konstante Sedimentationsrate innerhalb der oberen 150 cm. Die einzelnen acht datierten Turbidite können mit ähnlichen Ablagerungen auf der Juan de Fuca Platte korreliert werden.

SO294 - CLOCKS

Die Cascadia Subduktionszone vor Vancouver Island: Ausdehnung der seismogenen Zone, Bruchverhalten an der Deformationsfront, und nördliche Begrenzung der Subduktion

Förderkennzeichen:
03G0294A

Michael Riedel, PhD
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel



Gefördert vom

**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0294A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Abschlussbericht des Vorhabens 03G0294A CLOCKS

Zuwendungsempfänger:	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Wischhofstr. 1-3, 24148 Kiel
Förderkennzeichen:	03G0294A
Projektleiter:	Michael Riedel, PhD
Vorhabenbezeichnung:	CLOCKS: Die Cascadia Subduktionszone vor Vancouver Island: Ausdehnung der seismogenen Zone, Bruchverhalten an der Deformationsfront, und nördliche Begrenzung der Subduktion
Laufzeit des Vorhabens:	01.05.2022 bis 31.10.2024
Berichtszeitraum:	01.05.2022 bis 31.10.2024

I.1 Aufgabenstellung

Die Aufgaben im Rahmen des Forschungsprojektes CLOCKS (Cascadia Subduktionszone) umfassten eine Reihe verschiedenster geophysikalischer Messungen und Untersuchungen vor der Westküste von Vancouver Island, British Columbia, Kanada zur Bestimmung der Beschaffenheit und tektonischer Eigenschaften der nördlichen Cascadia Subduktionszone. Die Ausdehnung der verhakten Juan de Fuca Plattengrenze („locked zone“) steht dabei im Mittelpunkt, da diese Ausdehnung die Größe (Magnitude) des nächsten möglichen Subduktions-Erdbebens maßgeblich bestimmt. Ein zweiter Schwerpunkt des Vorhabens ist auf die Explorer Platte und dem Winona-Becken fokussiert, welche durch die Nootka-Störung von der Juan de Fuca Platte getrennt ist. Ob die Explorer Platte dabei normal subduziert wird, oder durch Transpression unter Vancouver Island geschoben wird und dabei tektonisch zerschert wird, und ob es auf der Explorer Platte von der Juan de Fuca Platte entkoppelte Subduktions-Erdbeben gibt wird anhand detaillierter geophysikalischer Messungen untersucht.

I.2 Voraussetzungen

Die Ausfahrt SO294 war ursprünglich mit dem Zielhafen San Diego angesetzt, welches aber während der Fahrt auf den Hafen in Port Hueneme, CA, USA geändert werden musste. Daraus ergaben sich einige logistische Probleme zur Entladung und Verschickung der wissenschaftlichen Geräte und Änderungen der Reise-Planung, was aber erfolgreich von allen Beteiligten gemeistert wurde. Dank einer strikten Einhaltung aller covid-19 Maßnahmen vor und während der ersten 10 Tage an Bord der Reise konnte Ausfahrt SO294 ohne Einschränkungen durch covid-19 Erkrankungen durchgeführt werden. Auflagen der kanadischen Behörden (Fisheries and Ocean Canada (DFO), Geological Survey of Canada (GSC), Fischerei-Industrie, und kanadische und US-amerikanische Navy) setzten strikte Grenzen und Regeln für die Durchführung der Fahrt, welche alle eingehalten wurden.

I.3 Planung und Ablauf

Während des Zeitraumes zwischen dem Projektbeginn bis zur Ausfahrt SO294 (01.06.22 – 13.09.22) standen die letzten Vorbereitungen und Planungen im Fokus der Arbeiten. Neben Verschiffung der benötigten Geräte sind hier besonders die technischen Vorbereitungen für den Einsatz spezieller Geräte zum Schutz der Meeressäuger (PAM –

passives akustisches Monitoring System der kanadischen Firma JASCO), sowie Besprechungen mit kanadischen Behörden (Fisheries and Ocean Canada, DFO) zu den Auflagen zum Schutz der Meeressäuger zu nennen. Des Weiteren wurden gemäß Auflagen Gespräche mit Vertretern der lokalen Fischerei-Industrie (13 verschiedene Organisationen) zur optimalen Koordination aller Arbeiten (vor allem zum Aussetzen von Langzeit-Beobachtungsstationen mit Verankerungen) und der kanadischen Navy durchgeführt. Ein weiterer Schwerpunkt während der Planungsphase im Vorfeld der Ausfahrt betraf eine enge Konsultation mit der indigenen Bevölkerung von Vancouver Island. Hierzu wurden die 17 verantwortlichen Gruppen (Abb. 1) individuell kontaktiert. Zusätzlich haben wir eng mit Vertretern des Nuuchahnulth Tribal Council zusammengearbeitet, welches 13 betroffenen indigene Völker repräsentiert. Im Vorfeld von SO294 haben wir mehrere Treffen online organisiert, um spezielle Rückfragen zu ermöglichen. Diese Arbeiten wurden mit unseren Partnern vor Ort vom Geological Survey of Canada (GSC) und Ocean Networks Canada (ONC) durchgeführt.

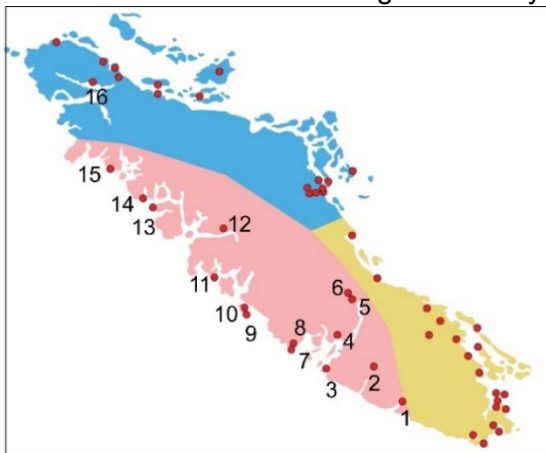


Abbildung 1: Karte der Lage der indigenen Völker auf Vancouver Island, die in das Arbeitsgebiet von SO294 fallen. Diese sind in drei Regionen unterteilt: Gelb: Coast Salish, Rosa: Nuuchahnulth, Blau: Kwakiutl. 1: Pacheedaht, 2: Ditidaht, 3: Huu-ay-aht, 4: Uchucklesaht, 5: Hupačasath, 6: Tseshaht, 7: Toquaht, 8: Yuuluʔifʔath, 9: Tla-o-qui-aht, 10: Ahousaht, 11: Hesquiaht, 12: Yuquot Mowachaht/Muchalaht, 13: Nuchatlaht, 14: Ehattesaht, 15: Ka:ʔyu:kʔtʔhʔ/Che:kʔtlesʔetʔh, 16: Quatsino.

Durch die Konsultationen und sich daraus ergebenden zusätzlichen Auflagen, haben wir ein intensives Medien- und Outreach-Programm entwickelt, welches neben verschiedenen Beiträgen auf sozialen Medien und Blogs auch ein interaktives Lernprogramm mit Schulen mit einem Fokus auf indigenen Bevölkerung beinhaltete. Hierbei sei das Engagement von Sarah-Marie Kröger (damals Studierende der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel) hervorzuheben.

Die Fahrt SO294 (**13.09.22 – 27.10.22**) erfolgte von Vancouver, Kanada, nach Port Hueneme, CA, USA. Zum Auftakt fand am 10. September ein Empfang des Generalkonsuls der Bundesrepublik Deutschland in Vancouver, Marc Eichhorn, sowie des Kapitäns des Forschungsschiffs SONNE, Tilo Birnbaum, am Pembina Canada Terminal in Vancouver statt, an dem auch die Direktorin des GSC-Pacific, Dr. Sonia Talwar, teilgenommen hat.

Vor Beginn der wissenschaftlichen Fahrt wurden alle Beteiligten vor Betreten des Forschungsschiffes auf covid-19 getestet. Da keine Infektionen vorlagen und auch während der ersten 10 Tage auf See niemand erkrankte, konnten die Schutz-Maßnahmen nach dem 10. Arbeitstag auf See aufgehoben werden. Nach Auslaufen konnten die Forschungsarbeiten direkt aufgenommen werden (Beginn am 14.09. 2022), welcher allerdings kurz unterbrochen wurden, um benötigtes und leider zu spät angeliefertes Material in Vancouver aufzunehmen (15.09.2022). Die dadurch nötige zusätzliche Durchfahrt der Juan de Fuca Straße wurde für gezielte Messungen in Kooperation mit Fisheries and Ocean Canada und dem Geological Survey of Canada genutzt. Hierbei wurden Messungen zu Gasaustritten an der Swiftsure-Bank vorgenommen (Kehew et al., 2023). Dies diente gleichzeitig auch für den ersten Test des PAM-Gerätes zum Schutz von Meeressäugern. Der erste Teil von SO294 wurde dann dank eines optimalen Wetterfensters für Arbeiten des Nebennutzer-Programmes (03G0294B) genutzt. Im Anschluss daran erfolgten alle weiteren Arbeiten des Projektes CLOCKS.

Während der Fahrt wurden von Bord aus zwei online Outreach-Events mit Unterstützung von ONC erfolgreich durchgeführt. Am 21.09.2022 wurden die Zeballos Elementary Secondary School, Ehattesaht First Nations, und die Kyuquot First Nations Elementary Secondary School mit einbezogen. Das zweite Outreach-Event am 21. Oktober 2022 erreichte dann insgesamt fünf verschiedene Schulen auf Vancouver Island mit 110 registrierten Nutzern.

Am Ende der Fahrt wurden dann gemäß Auflagen sämtliche Daten der aktiven refraktions-seismischen Vermessungen mit Ozeanboden-Seismometern (OBS) zur Prüfung an die kanadische und US-Amerikanische Navy übergeben. Während dieser Prüfung hatte die Wissenschaft keinen Zugang zu den refraktions-seismischen OBS-Daten. Die OBS-Daten wurden am 26. Januar 2023 dann zurück an das GEOMAR geliefert und konnten ab diesem Datum bearbeitet werden. Zusätzlich zu den aktiven refraktions-seismischen Vermessungen und OBS-Geräte-Einsatz, wurden während SO294 Langzeit-OBS von GEOMAR (sechs OBS) und JMASTEC (20 OBS) im Arbeitsgebiet zur Vermessung der lokalen Seismizität ausgelegt. Diese wurden in einer Bergungsfahrt vom 26. Juni bis 10. Juli 2023 mit dem kanadischen Küstenwachtschiff CCGS John P. Tully geborgen (Douglas et al., 2024). Gemäß Auflagen der Navy wurden diese Langzeit-Daten ebenfalls zur Prüfung übergeben. Während dieser Prüfung hatte die Wissenschaft keinen Zugang zu den seismologischen OBS-Daten. Am 01. März 2024 wurden die Langzeit-OBS-Daten an das GEOMAR zur finalen Nutzung wieder übergeben. Dabei wurden von der Navy an verschiedenen Stellen im Beobachtungszeitraum Daten gelöscht (Tabelle 1). Nach Überprüfung zur Lesbarkeit der Daten wurden diese dann an alle beteiligten Institute in Kanada und Japan übergeben.

Tabelle 1: Angaben zu den gelöschten Intervallen aus den Langzeit- OBS-Daten.

OBS-Station		Beginn Aufzeichnung	Ende Aufzeichnung	Anzahl Stunden gelöscht	% Daten gelöscht
SO294-36	OBSBB1	18-Sep-22	6/29/2023	262	0.96%
SO294-37	OBSBB2	18-Sep-22	6/29/2023	280	1.02%
SO294-38	OBSBB3	18-Sep-22	6/29/2023	499	1.82%
SO294-39	OBSBB4	18-Sep-22	6/29/2023	635	2.32%
SO294-40	OBSBB5	18-Sep-22	4/18/2023	26	0.13%
SO294-41	OBSBB6	18-Sep-22	6/29/2023	642	2.35%
SO294-106	JCN01	27-Sep-22	7/1/2023	114	0.43%
SO294-107	JCN02	27-Sep-22	7/1/2023	126	0.47%
SO294-105	JCN03	27-Sep-22	7/1/2023	202	0.76%
SO294-104	JCN04	27-Sep-22	7/1/2023	143	0.54%
SO294-99	JCN05	27-Sep-22	6/30/2023	192	0.72%
SO294-100	JCN06	27-Sep-22	6/30/2023	222	0.83%
SO294-98	JCN07	27-Sep-22	6/30/2023	154	0.58%
SO294-96	JCN08	27-Sep-22	6/30/2023	243	0.91%
SO294-94	JCN09	27-Sep-22	6/30/2023	223	0.84%
SO294-95	JCN10	27-Sep-22	6/30/2023	124	0.47%
SO294-93	JCN11	27-Sep-22	6/30/2023	299	1.12%
SO294-32	JCS01	20-Sep-22	6/28/2023	276	1.02%
SO294-34	JCS02	20-Sep-22	6/28/2023	232	0.86%
SO294-43	JCS03	21-Sep-22	6/28/2023	204	0.76%
SO294-04	JCS04	18-Sep-22	6/29/2023	196	0.72%
SO294-06	JCS05	18-Sep-22	6/28/2023	238	0.87%
SO294-08	JCS06	18-Sep-22	6/28/2023	378	1.39%
SO294-33	JCS07	21-Sep-22	6/29/2023	377	1.39%
SO294-31	JCS08	21-Sep-22	6/28/2023	334	1.24%
SO294-03	JCS09	21-Sep-22	6/28/2023	262	0.97%

Nach Beendigung der Ausfahrt SO294 wurden alle Sedimentkerne zur weiteren Bearbeitung und Beprobung an das Labor des Geological Survey of Canada in Sidney, BC, überführt. Für einen kostengünstigeren Rücktransport der gewonnenen Porenwasserproben aus den Sedimentkernen von SO294 wurden diese in Absprache mit dem Schiff und Fahrtleitung am Ende von Expedition SO295 zurückgeführt und am GEOMAR anschließend weiter vermessen. Zeitgleich wurde bis Ende 2022 der Fahrtbericht finalisiert und veröffentlicht (Riedel et al., 2022) sowie alle Metadaten und bathymetrischen Daten den entsprechenden Datenbanken wie im Datenmanagementplan dargelegt zur Verfügung gestellt.

Im zweiten Jahr der Projektlaufzeit (**01.01.2023 - 31.12.2023**) stand die Analyse der Daten im Mittelpunkt der Projektarbeiten. Im Rahmen der Datenauswertung wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Analyse der bathymetrischen EM710 und EM122 Daten zum backscatter Processing (samt Übergabe der Ergebnisse an die kanadischen Behörden laut Auflagen);
- Analyse der EM710 Wassersäulen Daten, Swiftsure-Bank (Kehew et al., 2023);
- Analyse der akustischen EM122 Wassersäulen Daten zur Bestimmung von natürlichen Gasaustritten, Vorbereitung zur Kooperation mit DFO und dem 2023 NepDep-Projekt (<https://www.nepdep.com/>) und Tauchfahrten mit dem ROV ROPOS;
- Magnetotellurik (MT) Daten-Bearbeitung und Inversion (Franz, 2023);
- Vermessung der Porenwasser-Proben aus Sedimentkernen;
- Vermessung der physikalischen Sedimenteigenschaften (im GSC-Labor, Kanada) und Entnahme von Proben zur weiteren ¹⁴C-Analyse und Altersbestimmung von Hangrutschungen (Enkin et al., in preparation);
- Processing der Reflektions-seismischen Profile entlang der Deformationsfront (Schäfer et al., in preparation);
- Re-Lokalisierung der OBS-Stationen für Refraktions-Seismische Arbeiten und Beginn der Arbeiten zur 3D-Tomographie;
- Processing der Wärmefluss-Daten;

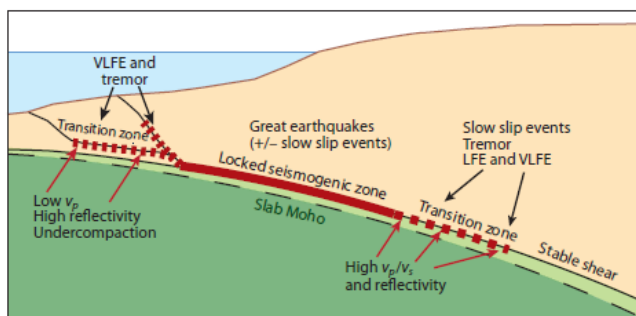
Am 19. Januar 2023 erfolgte folgend den Auflagen für SO294 ein online-Treffen mit Repräsentanten der indigenen Völker und beteiligten kanadischen Behörden (GSC, ONC) über die Nutzung, Verarbeitung und Veröffentlichung der von SO294 gewonnenen Daten durchgeführt. Zudem wurde folgend den neuesten FAIR Daten-Management Bestimmungen ein technischer Fahrtbericht erstellt (Riedel et al., 2024).

Die letzten Monate der Projektlaufzeit (**01.01.2024 - 31.10.2024**) wurden zur Sichtung und Bearbeitung der seismologischen Daten genutzt. Im Vordergrund stand dabei ein Abgleich aller Daten bei allen Nutzern (GEOMAR, GSC, JAMSTEC) und eine erste Analyse zu Erdbeben-Lokationen. Weiterführende Arbeiten zum Processing der Reflektions-Seismischen Daten (Tiefen-Migration) und Interpretation erfolgten zur Unterstützung eines neuen IODP3-Antrags zur Installation von Bohrloch-Observatorien vor Vancouver Island (#25/440, Sun et al., 2025).

I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Ein großes Erdbeben der Magnitude $M > 8,5$, vergleichbar in Größe und Auswirkung mit Ereignissen vor Sumatra (2004), Chile (2010) und Japan (2011), wird in absehbarer Zeit entlang der Cascadia-Subduktionszone erwartet. Das Datum des jüngsten Subduktions-Bebens bei Cascadia wurde durch Tsunami-Aufzeichnungen in Japan auf den 26. Januar 1700 festgelegt (Satake et al., 1996). Die Wiederkehrrate dieser Ereignisse über den ganzen Cascadia-Kontinentalrand von Cap Mendocino (Kalifornien) bis zum nördlichen Ende von Vancouver Island (British Columbia) gesehen variiert zwischen 250 und ~1000 Jahren. Dies

wurde anhand von Turbiditen definiert, welche in den letzten 10.000 Jahren vor den Küsten von Oregon, Washington und Vancouver Island abgelagert wurden (Atwater, 1987; Goldfinger et al., 2012). Mit dichten urbanen Zentren wie Seattle, Vancouver oder Victoria wird ein solches Subduktions-Beben in Verbindung mit einem Tsunami verheerende Auswirkungen auf die Region haben, wie das Ereignis 2011 vor Japan gezeigt hat. Die Arbeiten der Expedition SO294 haben deswegen einen hohen sozioökonomischen Stellenwert und werden die seismische Risikobewertung, das Katastrophenmanagement und die Schadensbegrenzung verbessern können. Die Ergebnisse aus diesem Projekt sind zudem auch auf andere Kontinentalränder und Subduktionszonen übertragbar (Chile, Japan, Neuseeland). Die maximal mögliche seewärtige Grenze der Bruchzone ist die Deformationsfront und die co-seismische Verschiebung entlang der Spitze des Akkretionskeils ("slip-to-toe") wurde unter anderem für des Tohoku-Oki Erdbeben 2011 vor Japan dokumentiert (z.B. Kodaira et al., 2012). Die abwärts gerichtete landseitige Ausdehnung der seismogenen Zone basiert üblicherweise auf thermischen Modellen, wobei die 350°C-Isotherme als tiefste mögliche Ausdehnung für Gesteine zur Akkumulation seismischer Belastung verwendet wird. Wie im konzeptionellen Modell von Saffer and Tobin (2011) dargestellt (Abb. 2), kann die Bruchzone



an der Ober- und Untergrenze Übergangszonen aufweisen, abhängig von Temperatur, den physikalischen Eigenschaften der Sedimente, oder dem Fluiddruck entlang der Störungszone.

Abbildung 2. Konzeptionelles Modell einer seismogenen Zone einer Subduktionszone (nach Saffer and Tobin, 2011).

Mit den neuen Daten von Ausfahrt SO294 ist es möglich aktuelle Forschungsfragen zur Struktur und Eigenschaften der seismogenen Zone am nördlichen Cascadia Kontinentalrand zu beantworten und physikalische Parameter zu bestimmen, die ihre Ausdehnung kontrollieren. Hierbei sind folgende Daten essentiell: (i) amphibisches MT-Profil, (ii) seismologische Langzeit-Messungen, (iii) 2D- und 3D-Refraktions-Tomographie, sowie (iv) hoch-auflösende Reflektions-Seismik entlang der fragmentierten Deformationsfront.

Der nördliche Cascadia Kontinentalrand ist eine tektonische Melange im Übergang von der subduzierenden Juan de Fuca Platte, der Nootka-Störung, der sich nördlich anschließenden Explorer-Platte und dem Winona-Becken, bis zum Übergang zur reinen Queen-Charlotte Transformstörung im Norden. Ein Nachteil bei der bisherigen Daten-Interpretation war eine fehlende hochauflösende Meeresbodentopographie im Arbeitsgebiet. Strukturgeologische und geophysikalische Arbeiten zur Natur dieser Nordgrenze der Subduktion vor Vancouver Island basierten bisher entweder auf land-gestützten Daten und Stations-Analysen mit tele-seismischen Erdbeben (Cassidy et al., 1998; Audet et al., 2008) oder alten marinen OBS-Daten und Reflektions-Seismischen Profilen (Au and Clowes, 1982; Hasselgreen and Clowes, 1995). Mit den neuen Daten von SO294 können nun neue Interpretationen zur Subduktion der Explorer Platte und Verteilung der Transpression erfolgen. Hierbei sind folgende neue Daten essentiell: (i) neue und erstmalig vorliegende hochauflösende Meeresbodentopographie und Backscatter, (ii) marine seismologische Langzeit-Messungen, (iii) 2D- und 3D-Refraktions-Tomographie, (iv) hochauflösende Reflektions-Seismik im Winona-Becken, (v) Wärmefluss-Daten, und (vi) Bestimmung der Wiederkehrrate von Erdbeben mittels Turbidit-Ablagerungen aus Sedimentkernen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben CLOCKS erfolgt in enger Kooperation und Zusammenarbeit mit verschiedenen Instituten und Organisationen in Kanada und Japan. Die wissenschaftliche Kooperation mit dem GSC fokussiert sich auf die Auswertung und Bearbeitung der Sedimentkerne (Analysen im GSC Sediment-Labor in Sidney, BC), Beprobung und ¹⁴C Altersbestimmungen. Zudem waren zwei Vertreter des GSC mit an Bord während SO294 (T. Sun, K. Douglas). Der GSC hat des Weiteren Schiffszeit mit CCGS John P. Tully und Personal zur Bergung der Langzeit-OBS gestellt (26.6. – 10.7. 2023) und war bei allen Konsultationen mit der indigenen Bevölkerung beteiligt. Die Kooperation mit ONC war hauptsächlich für das Nebennutzer-Projekt (FKZ 03G0294B) relevant, aber auch bei allen Konsultationen mit der indigenen Bevölkerung. Während SO24 war eine Wissenschaftlerin von ONC an Bord (E. Minicola). Zusätzlich hat ONC die Bergung der sechs Ozean-Boden Drucksensoren finanziert (siehe unten). Eine enge Kooperation mit der University of Alberta (UofA, Edmonton) verläuft für das Magnetotellurik (MT) Projekt. Wissenschaftler: innen von UofA haben im Vorfeld zu SO294 MT-Messungen an Land durchgeführt, welche das marine Profile von SO294 von der Küste über Vancouver Island hinweg verlängern. Die marinen und land-basierten Daten werden gemeinsam bearbeitet (Franz, 2023; Reeck et al., in preparation).

Eine enge Zusammenarbeit mit DFO erfolgte im Anschluss an SO294 im Rahmen des Northeast Pacific Deep-Sea Exploration Projects (NepDep) (<https://www.nepdep.com/>) welches zum Schwerpunkt die Erforschung zu Leben in der Tiefsee und Biodiversität hat. Durch die besonderen Entdeckungen während der Ausfahrt SO294 von neuen und sehr intensiven Gasaustritten vor Vancouver Island, wurden zur Erkundung dieser Stellen, welche generell als Lokationen mit potentiell sehr hoher Biodiversität gelten, drei Tauchgänge im Juni 2023 mit dem ROV ROPOS an Bord CGGS John P. Tully durchgeführt.

Kollaboration zusammen mit JAMSTEC erfolgt im Rahmen der seismologischen Langzeitbeobachtungen. JAMSTEC hat für SO294 insgesamt 20 OBS und in Zusammenarbeit mit der Universität Tokio und Kobe Universität sechs Ozeanboden-Druck (OBP) Sensoren zur Verfügung gestellt. An der Ausfahrt SO294 nahmen aus Japan drei Wissenschaftler teil (K. Obana, T. Takahashi, T. Shirai). Diese Kollaboration erfolgt seit 2010 (damals nur zwischen dem GSC und JAMSTEC) zu ähnlichen Kampagnen (Scherwath et al., 2011; Obana et al., 2015; Hutchinson et al., 2019, 2023). Die 26 Langzeit OBS von SO294 wurden alle im Sommer 2023 geborgen. Fünf der eingesetzten sechs OBP-Instrumente wurden 2024 während einer ONC-Ausfahrt geborgen. Das letzte ODP-Instrument, welches sich nicht selbständig vom Boden gelöst hatte, soll 2025 mithilfe eines ROVs während einer weiteren Ausfahrt von ONC geborgen werden.

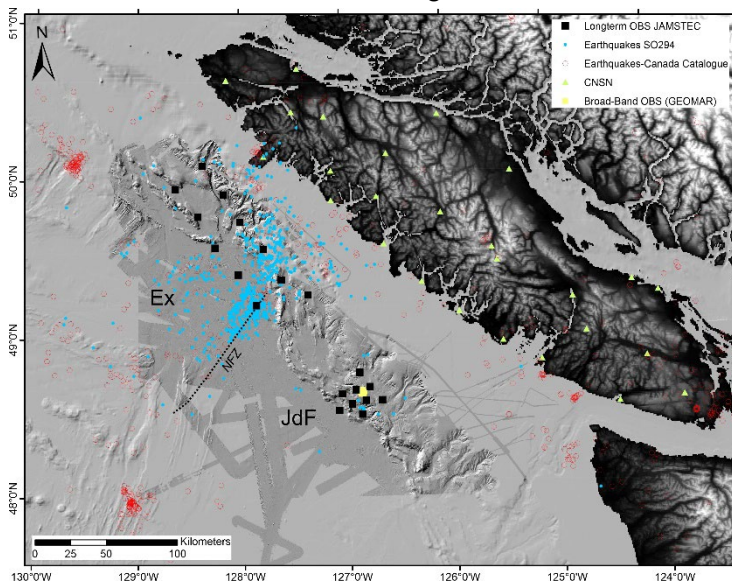
II.1 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Hauptergebnisse des Vorhabens dargestellt:

- i) Natürliche Seismizität vor Vancouver Island
- ii) Reflektionsseismik entlang der Deformationsfront
- iii) Refraktions-Seismik und Tomographie
- iv) Magnetotellurik
- v) Hangrutschungen im Winona-Becken und Datierung von Subduktions-Erdbeben
- vi) Wärmefluss im Winona-Becken
- vii) Kartierung von natürlichen Gasaustritten

i) Natürliche Seismizität vor Vancouver Island

Ein Schwerpunkt von SO294 war die Weiterführung der Kooperation zur Erfassung der natürlichen Seismizität entlang der nördlichen Cascadia Subduktionszone über die Nootka-Störung hinaus in das nördlich gelegene Winona-Becken. Insgesamt wurden 20 Geräte von JAMSTEC und acht Geräte vom GEOMAR eingesetzt. Da die Daten nach der Bergung im Sommer 2023 zuerst von der kanadischen und US-amerikanischen Navy kontrolliert wurden, standen die Daten erst ab April 2024 zur Verfügung. Für sämtliche OBS Seismogramme wurden P und S Phasen mit einem neuronalen Netzwerk, trainiert mit OBS Einsatzzeiten (Bornstein, et al., 2024) bestimmt, zu einzelnen Erdbebenereignissen assoziiert (Zhang et al., 2019) und lokalisiert (Lomax et al., 2000). Der automatisierte Katalog beinhaltet 568 (Abb. 3) Erdbeben basierend auf 9,871 Ankunftszeiten die auf mindestens 8 Stationen beobachtet wurden. Eine räumliche Häufung der natürlichen Seismizität entlang der Nootka-Störung ist



hierbei ersichtlich. Zusätzlich ist die Explorer-Platte seismisch aktiv, wohin gegen die Juan de Fuca Platte südlich der Nootka-Störung a-seismisch ist (verhakt, bzw. „locked“).

Abbildung 3. Karte mit Erdbeben im Zeitraum von 09/22 – 06/23. Die meiste Seismizität verläuft entlang der Nootka Störung (NFZ) und der Explorer Platte (Ex), wohingegen die Juan de Fuca Platte (JdF) nur sehr wenige Erdbeben aufweist. (blau: detektiert mit SO294; rot: detektiert nur mit Landstationen).

ii) Reflektionsseismik entlang der Deformationsfront

Während SO294 wurden an Bord seismische Reflektions-Daten in einem simplen

Prozessing bearbeitet, welches hauptsächlich zur Qualitäts-Kontrolle und einer ersten groben Interpretation diene. Im Nachgang zur Ausfahrt werden die Daten im Rahmen einer Doktorarbeit neu prozessiert. Ein Sub-Projekt benutzt dazu die Daten entlang der Deformationsfront der Juan de Fuca Platte (Schäfer et al., in preparation). Eine genauere Bearbeitung hat dabei ergeben, dass die Vergenz der Hauptstörung sich systematisch ändert (Abb. 4). Zusätzlich zeigen die Daten markante Störungen im Sediment westlich (seewwärts) der Deformationsfront, sogenannte Proto-Störungen, oder „Proto-Thrusts“.

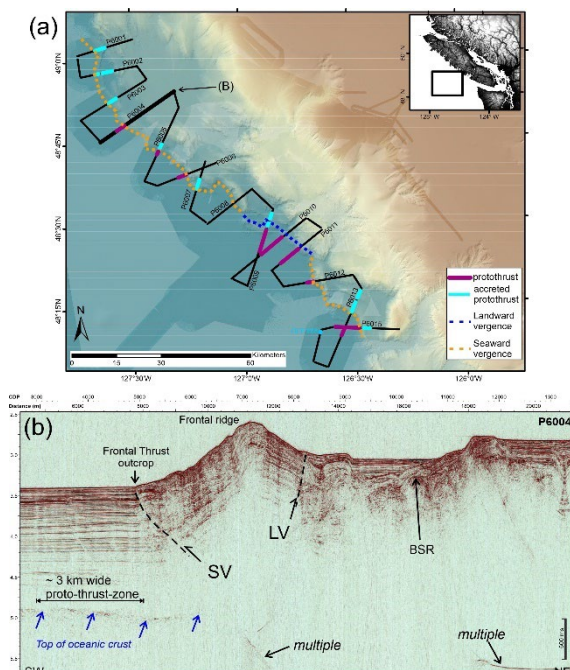


Abbildung 4. (A) Karte der Verteilung von Proto-Störungen entlang der Deformationsfront. (B) Line P6004 mit Proto-Störungen.

Diese Art von Störungen werden auch an anderen Subduktionszonen beobachtet, z.B. an der Hikurangi Subduktionszone vor Neu Seeland (Barnes et al., 2018). Studien dort legen nahe, dass die Proto-Störungen einen großen Anteil der sich aufbauenden Spannungen auffangen und somit das Gefahren-Potential eines Subduktions-Erdbebens verändern könnten. Studien der SO294-Daten ergeben ähnliche Größenordnungen in der Magnitude der Proto-Störungen wie vor Neu Seeland belegt (Schäfer et al., 2025). Weitere Datenbearbeitung und Vergleichs-Studien zu anderen Subduktionszonen werden derzeit noch durchgeführt.

iii) Refraktions-Seismik und 3D Tomographie

Die OBS-Daten für Refraktions-Seismik im Winona-Becken (Profile P2000-P2002, P3000-P3002) wurden im Projekt-Zeitraum noch nicht vollständig analysiert. Im ersten Bearbeitungsschritt nach dem Erhalt der Daten von der kanadischen und US-amerikanischen Navy (Januar 2023) wurden eine allgemeine Qualitätsprüfung der Daten durchgeführt. Danach wurden die OBS entlang der Schuss-Linien neu lokalisiert, da die OBS nach dem Absetzen vom Schiff üblicherweise einige hundert Meter beim Fallen durch die Wassersäule verdriften. Da die Datenaufzeichnung auf die OBS-Daten und lange Laufzeiten optimiert wurde, ist das Abbild der Streamer-Sektion nicht optimal. Wir haben deswegen die OBS-Daten für ein Mirror-Imaging genutzt, welches die Reflektion der ozeanischen Kruste schärfer abbildet. Damit kann

ein Startmodell generiert werden, welches dann iterativ verbessert wird. Eine erste Analyse entlang des Profils P2000 wurde durchgeführt (Abb. 5).

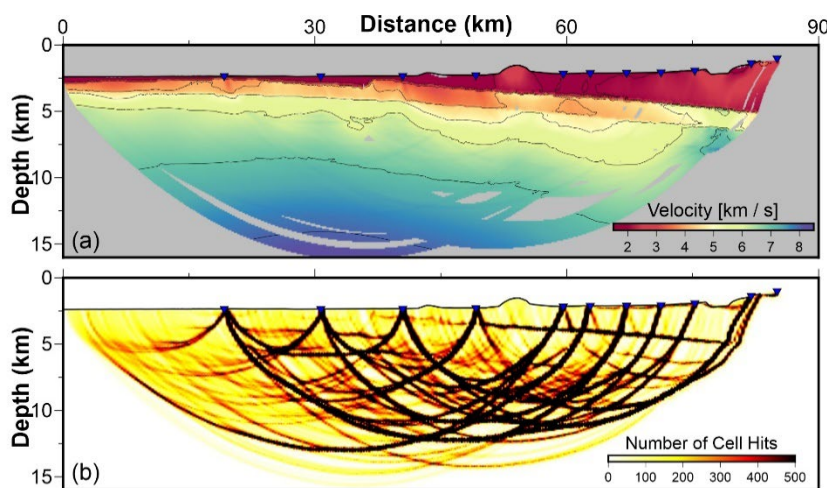


Abbildung 5. (a) P-Wellen Geschwindigkeits-Modell für Profile P2000 im Winona-Becken. (b) Strahl-dichte des Modelles.

Hier ist allerdings zu beachten, dass ein endgültiges Ergebnis der Geschwindigkeits-Analysen noch nicht vorliegt, da das Profil durch OBS Stationen aus der Langzeit-Messung noch verdichtet wird (Daten dazu liegen erst seit April 2024 vor), und zusätzlich mit Landstations-Daten nach Osten erweitert wird. Hierzu wurden in Kooperation mit dem GSC Daten der Landstationen im Zeitraum der aktiven seismischen Messungen mit den Schuss-Zeiten abgeglichen und refraktions-seismische Sektionen erstellt (Abb. 6).

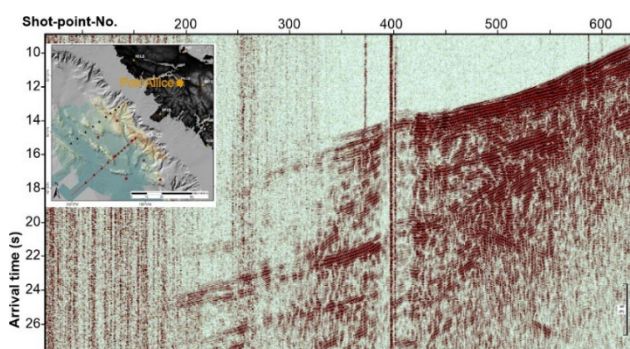
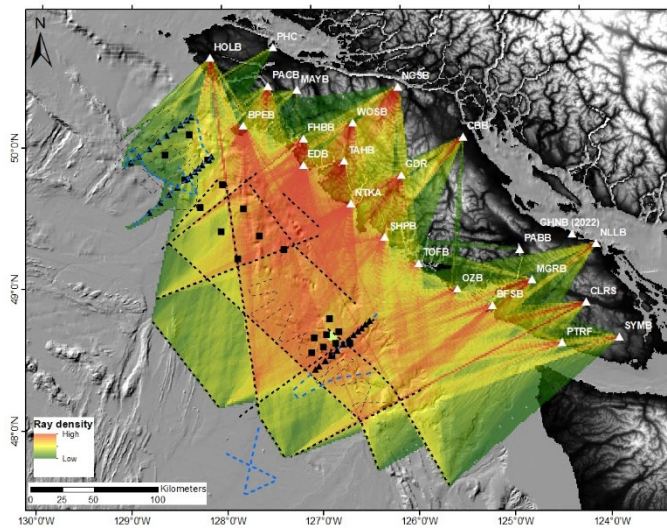


Abbildung 6. Beispiel einer Schuss-Sektion der Landstation Port Alice auf Vancouver Island des Profils P2000.

Zusätzlich zu einzelnen 2D Profilen zur Interpretation der Subduktion der Juan de Fuca and Explorer Platten werden Arbeiten zu einer 3D Tomographie durchgeführt. Hierbei werden seismische Daten von der Ausfahrt SO294 und CASIE21 (Carbotte et al., 2021) verwendet. Schusszeiten der beiden Ausfahrten wurden dazu mit den Landstationen korreliert um Schuss-



Sektionen zu erteilen, aus denen dann die Ersteinsätze bestimmt wurden. In einem ersten Ansatz wurde die Strahl-Abdeckung bestimmt (Abb. 7) welche erkennen lässt, welche Bereiche durch die aktiven seismischen Signale abgedeckt werden. Hinzu kommen in einem zweiten Arbeitsschritt die Ersteinsätze der Langzeit-OBS und Aufzeichnung der Erdbeben in dem Arbeitsgebiet.

Abbildung 7. Strahlabdeckung des Arbeitsgebietes durch aktive seismische

Daten aus dem Projekt CLOCKS von SO294 und CASIE21.

iv) Magnetotellurik (MT)

Die Rohdaten der SO294 MT Stationen wurden im ersten Bearbeitungsschritt vorprozessiert (Ausgleich von Gerätebewegungen, Amplituden-Korrektur von Ausreißern). Ein weiterer Bearbeitungsschritt beinhaltet die Rotation der gemessenen Magnetfelddaten relativ zum Vancouver Island Magnetik Observatorium VIC (<https://geomag.nrcan.gc.ca/obs/vic-en.php>). Die marinen Daten von SO294 werden gemeinsam mit den Land-Daten der UofA Arbeitsgruppe von Prof. Martyn Unsworth, sowie Stationen früherer Messkampagnen (LITHOPROBE) bearbeitet. Das Programm jif3D (Moorkamp et al., 2011) wurde zur Inversion der MT-Daten genutzt. Zuerst wurde ausgehend von der Geometrie der Stationen und allgemeiner geologischen Struktur der Subduktionszone eine Inversion mit synthetischen Daten durchgeführt, um allgemeine Auflösungs- und Genauigkeitsgrenzen zu bestimmen. Im Anschluss daran wurden zwölf Inversionen mit unterschiedlichen Start-Modellen durchgeführt. Das beste Ergebnis ist in Abbildung 8 dargestellt. Auffallend hierbei ist die Korrelation der Lage der abtauchenden Juan der Fuca Platte mit dem Widerstandsmodell. Zusätzlich setzt sich Vancouver Island als Gebiet mit hohem Widerstand gegenüber dem westlich gelegenen sedimentären Akkretionskeil mit geringem Widerstand ab. Ein Gebiet mit niedrigem Widerstand am östlichen Rand von Vancouver Island ist mit einer Störungszone verbunden und bildet den Übergang vom kristallin-metamorphischen Gestein von Vancouver Island zum weiter östlich gelegenen Georgia-Becken mit den Sedimenten der Nanaimo-Gruppe (Mustard, 1994). Im Vergleich zur Interpretation der LITHOPROBE-Daten (Hyndman, 1995) fällt eine gute Übereinstimmung der Lage der kontinentalen Moho mit dem MT-basierten Widerstandsprofil auf. In weiteren noch folgenden Arbeitsschritten werden Informationen über das Temperatur-Feld der Cascadia Subduktionszone (z. B., Hyndman and Wang, 1995) zur Verbesserung der Interpretation des MT-Profiles und Korrelation mit Erdbeben und ETS-Daten (Kao et al., 2009) herangezogen.

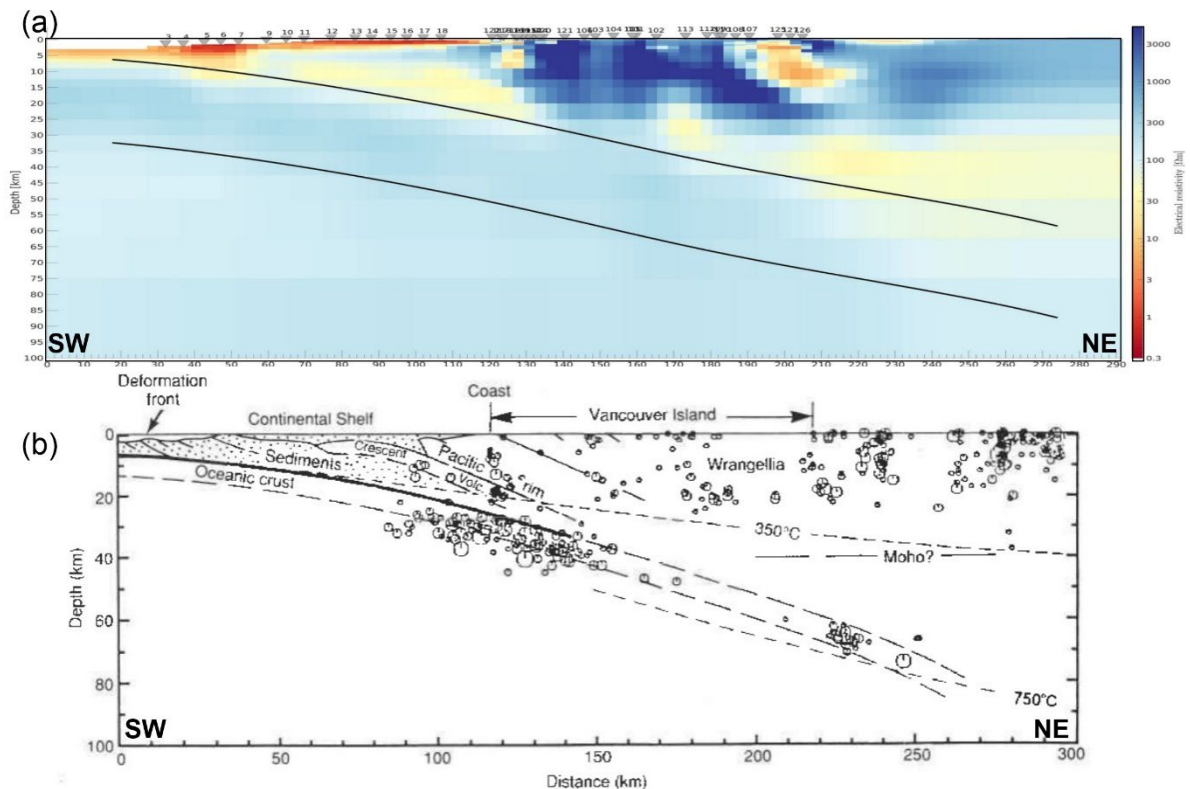
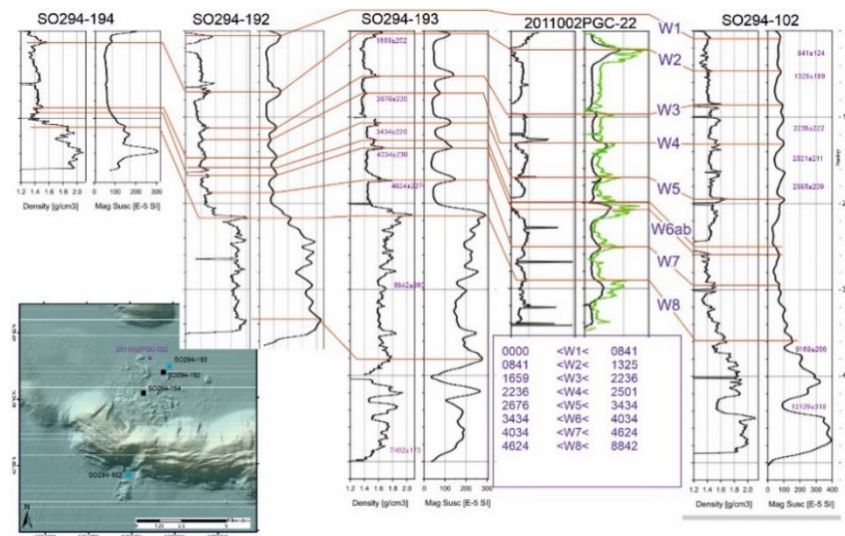


Abbildung 8. (a) Widerstandsprofil aus den MT-Daten entlang des Profils über den Akkretionskeil (marin) und Vancouver Island (terrestrisch). Zum Vergleich sind die Ober- und Untergrenze der ozeanischen Platte als schwarzen Linien eingezeichnet (Franz, 2023; Reeck et al., in preparation). (b) Interpretiertes Profil über die Cascadia Subduktionszone mit Erdbeben-Lokationen bis 1994 (von Hyndman, 1995).

v) Hangrutschungen im Winona-Becken und Datierung von Subduktions-Erdbeben

Insgesamt wurden während SO294 zwölf Sedimentkerne an Hangrutschungen gewonnen. An allen Kernen wurden mit einem Multi-Sensor Kern-Logger hoch-auflösende Bilder der Kern-Oberflächen sowie physikalische Eigenschaften vermessen (Dichte, magnetische Suszeptibilität, und P-Wellen Geschwindigkeit). Zusätzlich wurden X-Ray Bilder der Kerne vor der Kernteilung in Arbeits- und Archiv-Hälften aufgenommen um eine bessere Interpretation der physikalischen Eigenschaften zu ermöglichen. Die Kern-Positionen sind weit von der Küste entfernt (~70 km) und nicht innerhalb von Canyons, was einen Sedimenteintrag direkt von Land ausschließt. Zusätzlich liegen alle Positionen in einer Wassertiefe von > 2200 m, also weit unterhalb der Wellen-Anregungsgrenze für Turbidite, so dass diese nur durch Erschütterungen des Untergrundes von Erdbeben ausgelöst werden können. Alle gewonnenen Sedimentkerne zeigen klare Turbidit-Ablagerungen zwischen hemipelagischen Sedimenten oberhalb der Ablagerung der Hauptrutschung. Bis Ende des Projektzeitraumes wurden 14 Sedimentproben aus den Kernen GC-01 (SO294_102) und GC-10 (SO294_193) zur Analyse von Foraminiferen und ¹⁴C Radio-Karbon Datierung entnommen. Die beiden selektierten Sedimentkerne liegen zu beiden Seiten des Akkretionsrückens im südlichen Winona-Becken (Abb. 9). Die Kohlenstoff Reservoir Kompilation von Schmuck et al. (2021) wurde für die OxCal Alterskalibrierung herangezogen. Das sich daraus resultierende Altersmodell zeigt eine erstaunlich konstante Sedimentationsrate innerhalb der oberen 150 cm (Abb. 10). Die einzelnen acht datierten Turbidite (W1 – W8) können mit ähnlichen („zeitgleichen“) Ablagerungen weiter südlich auf der Jun de Fuca Platte korreliert werden (Abb. 11), aber nicht alle bekannten Turbidite-Events finden sich auch in den Sedimentablagerung

im Winona-Becken. Ob es sich hier um einen Sampling-bias handelt, oder ob tatsächlich Erdbeben auf der Explorer-Platte entkoppelt von der Juan de Fuca-Platte sind (und somit separat Hangrutschungen auslösen) lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht mit Sicherheit sagen. Es sind zusätzlich 20 weitere Proben in Bearbeitung, die das Altersmodell und Interpretation verfeinern werden.



Interpretation verfeinern werden.

Abbildung 9. Karte des südlichen Akkretionsrückens im Winona-Becken und Korrelation der Profile physikalischer Eigenschaften (Dichte, links; magnetische Suszeptibilität, rechts) der Kerne von SO294 und Station 22 einer vorherigen Ausfahrt des GSC (2011). Acht Turbidite wurden datiert bisher (W1 – W8).

An dieser Stelle sei die Kollaboration mit Dr. Mary McGann (USGS Menlo Park) zur Bestimmung und Selektion von Foraminiferen, sowie mit Dr. John Southon (University of California, Irvine) für die ¹⁴C Labor-Analytik hervorgehoben, die eine kostengünstigere Proben-Analytik ermöglichen.

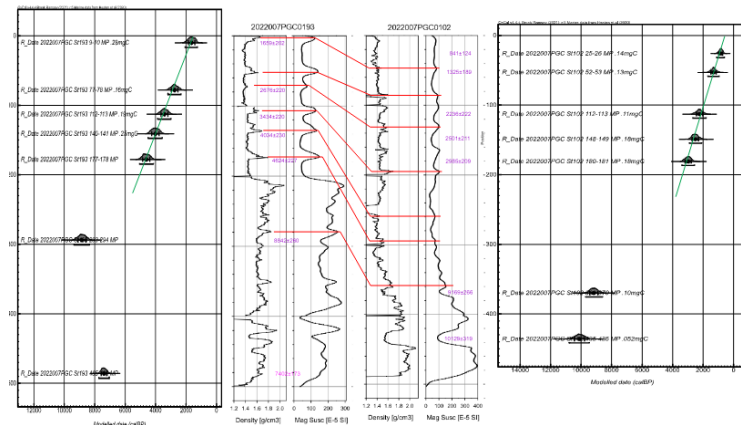


Abbildung 10. Alters-Modell für die Hangrutschungen am südlichen Akkretionsrückens im Winona-Becken. Das Alter der Rutschungen beträgt ca. 8000 – 10,000 Jahre.

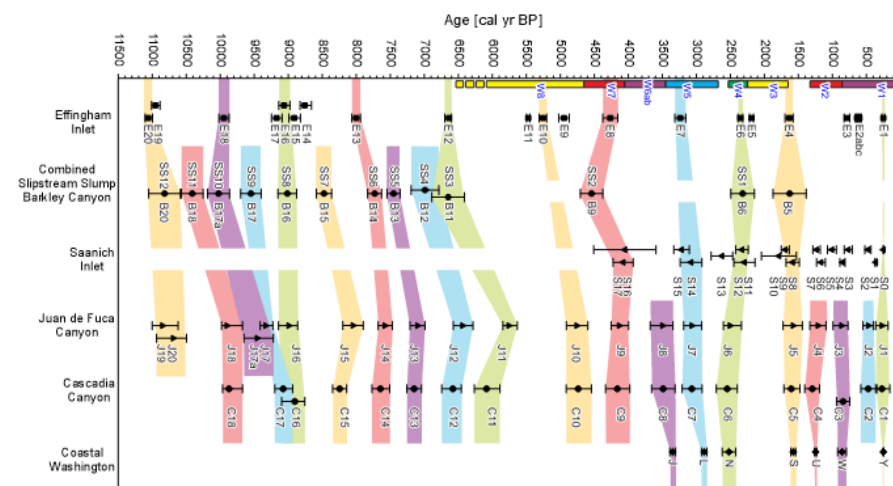


Abbildung 11. Korrelation der Alter von Turbiditen (W1 – W8) im Winona-Becken zu Beobachtungen entlang der > 250 km südlich gelegenen Juan de Fuca Platte (modified after Hamilton et al., 2015).

Zusätzlich zu den ^{14}C -Datierungen können Porenwasser-Profile von Sulfat, Chlorid und Bromid (Abb. 12) sowie verschiedener Kationen (Abb. 13) zur Bestimmung von zeitabhängigen Prozessen genutzt werden. Die meisten Sulfat-Profile in den Sedimenten zeigen einen linearen Trend mit der Tiefe im Sediment (Abb. 12a), welches auf rein diffusive Prozesse hindeutet. Allerdings sind bei mehreren Kernen auffällige Knickpunkte in den Profilen zu erkennen (GC-04, GC-05, GC-10), welche darauf hindeuten, dass nicht-diffusive Prozesse eine Rolle spielen, allen voran solche, die durch Hangrutschungen erzeugt werden (Hensen et al., 2003).

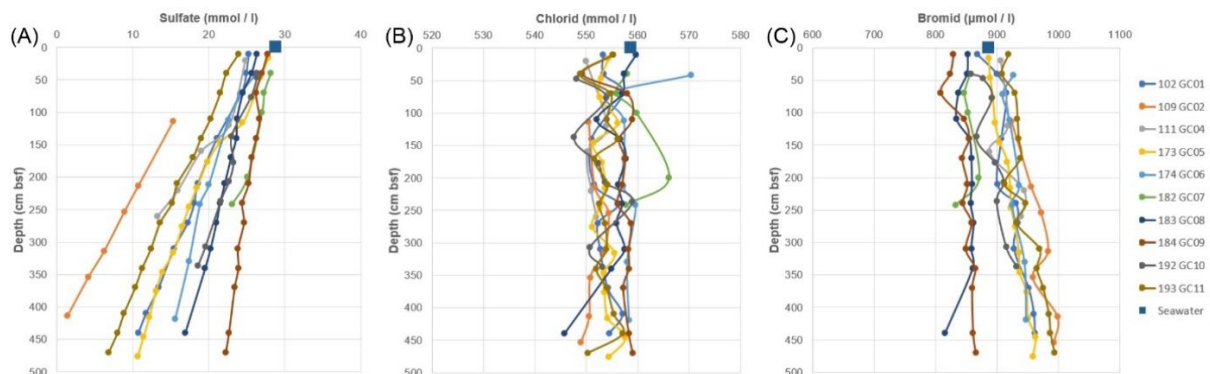


Abbildung 12. Ergebnisse der Porenwasser-Analysen: (a) Sulfat-, (b) Bromide-, (c) Chloride-Gehalt. Der jeweilige Seewasser-Wert (0 cm unter dem Meeresboden) ist angegeben.

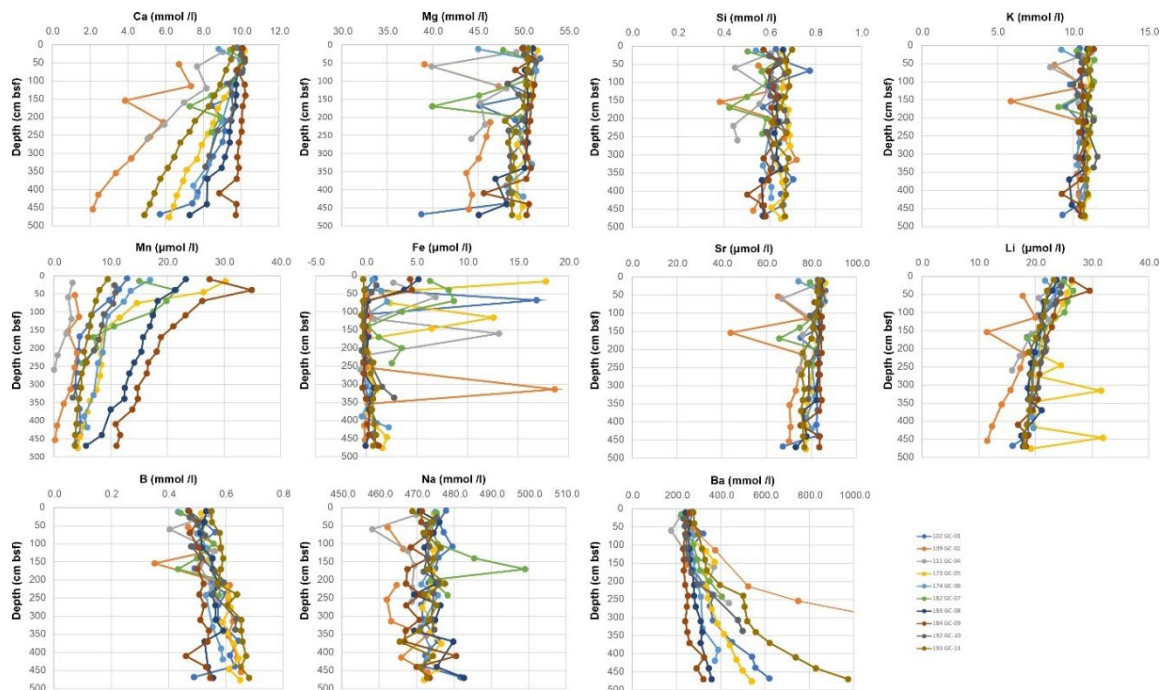


Abbildung 13. Kationen-Konzentrationen aus Porenwasser-Proben der Sedimentkerne von SO294.

vi) Wärmefluss im Winona-Becken

Entlang der zwei Haupt-Linien mit Refraktions-Seismischen Daten im Winona-Becken wurden Wärmefluss-Daten erhoben. Der Wärmestrom nimmt graduell von Westen nach Osten ab (Abb. 14). Diese Abnahme geht zum einen mit einer zunehmenden Tiefe der ozeanischen Kruste der Explorer-Platte einher, ist aber auch ein Resultat zunehmender Sedimentmächtigkeiten im Winona-Becken. Zusätzlich zu den Wärmefluss-Daten kann die Basis der Gashydrat-Stabilitätsgrenze zur Abschätzung des Wärmestroms herangezogen werden. Diese Grenze wird seismisch durch den Meeresboden-simulierenden Reflektor („bottom-simulating-reflector“, BSR) erkannt. Der BSR liegt im Winona-Becken nach Westen hin immer tiefer unter dem Meeresboden (Abb. 14), was durch die Abnahme des Wärmeflusses bedingt ist. Eine Umrechnung von BSR-Tiefe zu Wärmefluss wurde bisher nicht durchgeführt, da hierzu weitere Informationen aus den Geschwindigkeits-Profilen der OBS-Daten benötigt werden, und anschließend eine Korrektur des Wärmeflusses aufgrund der komplexen Bathymetrie erfolgen muss.

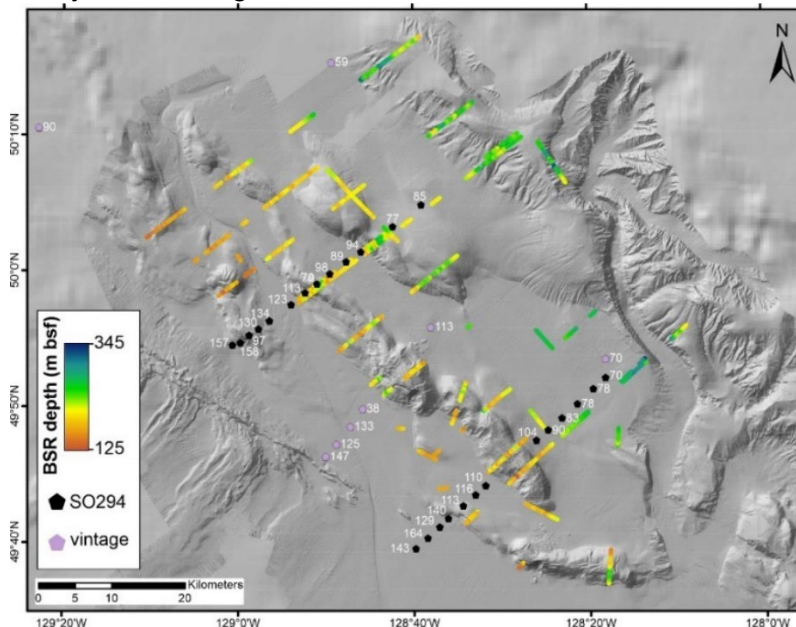
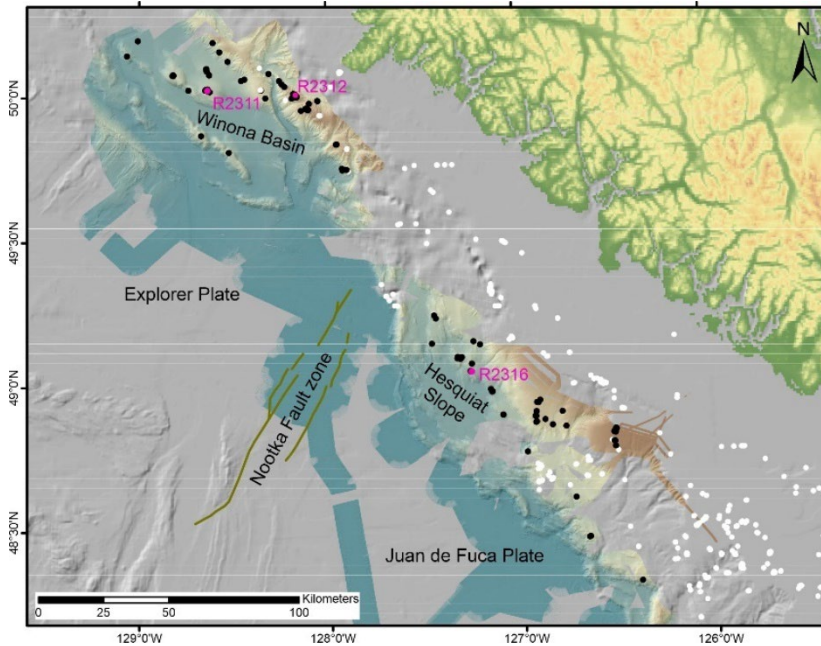


Abbildung 14. Karte des Winona-Beckens mit Meeresboden (grau schattiert), SO294-basierten Wärmefluss-Daten, und Daten der globalen Wärmefluss-Datenbank (Global Heat Flow Data Assessment Group, 2024). Zusätzlich wird die Tiefe des BSR als Basis der Gashydrat-Stabilität entlang der seismischen Reflektions-Profile gezeigt. Eine Zunahme der BSR-Tiefe nach Osten ist deutlich zu erkennen.

vii) Kartierung von natürlichen Gasaustritten

Vor Beginn der Ausfahrt SO294 waren verschiedene Studien zu natürlichen Gasaustritten vor Vancouver Island durchgeführt worden (z.B. Römer et al., 2016; Marcon et al., 2022). Die Auswertung aller bis 2016 öffentlich zugänglichen akustischen Daten vor Vancouver Island zeigte eine nach Süden zunehmende Häufigkeit der Gasaustritts-Stellen (Riedel et al., 2018). Die neuen Daten von SO294 hingegen zeigen, dass diese Häufigkeitsverteilung eventuell auch durch ungenügende Datenabdeckung als durch natürliche Prozesse bedingt ist (Abb. 15). Die EM122 und EM710 Wassersäulen-Daten erbrachten 171 neue Lokationen mit Gasaustritten (Douglas et al., 2024). Zwei dieser Stellen zeigten die bisher akustisch stärksten Gasaustritte, wo die Gasblasen bis fast an die Meeresoberfläche zu sehen waren. Das ist äußerst ungewöhnlich, da meistens Gasblasen nur bis in eine Tiefe von ca. 400 m unter der Meeresoberfläche akustisch zu sehen sind, weil das der Obergrenze der natürlichen Gashydrat-Stabilitätszone entspricht (Abb. 16). Gasblasen sind mit einer dünnen Haut aus Gashydrat umzogen, welche die akustische Rückstreuung

stark erhöht. Sobald sich diese Haut auflöst, reduziert sich die akustische Rückstreuung, und das Gas geht in Lösung oder wird oxidiert und wird somit akustisch „unsichtbar“. Durch Kollaboration mit DFO im Rahmen des NepDep-Projektes wurden drei dieser Stellen mit dem



ROV ROPOS näher untersucht und Gashydrate am Meeresboden gefunden (Abb. 16).

Abbildung 15. Karte mit Gasaustritten vor Vancouver Island (weiß: Riedel et al., 2018; schwarz: neu kartiert von SO294). Zwei Stellen mit markanten Gasaustritten im Winona-Becken und am Hesquiat Hang wurden 2023 mit dem ROV ROPOS untersucht und es wurden Gashydrate am Meeresboden gefunden.

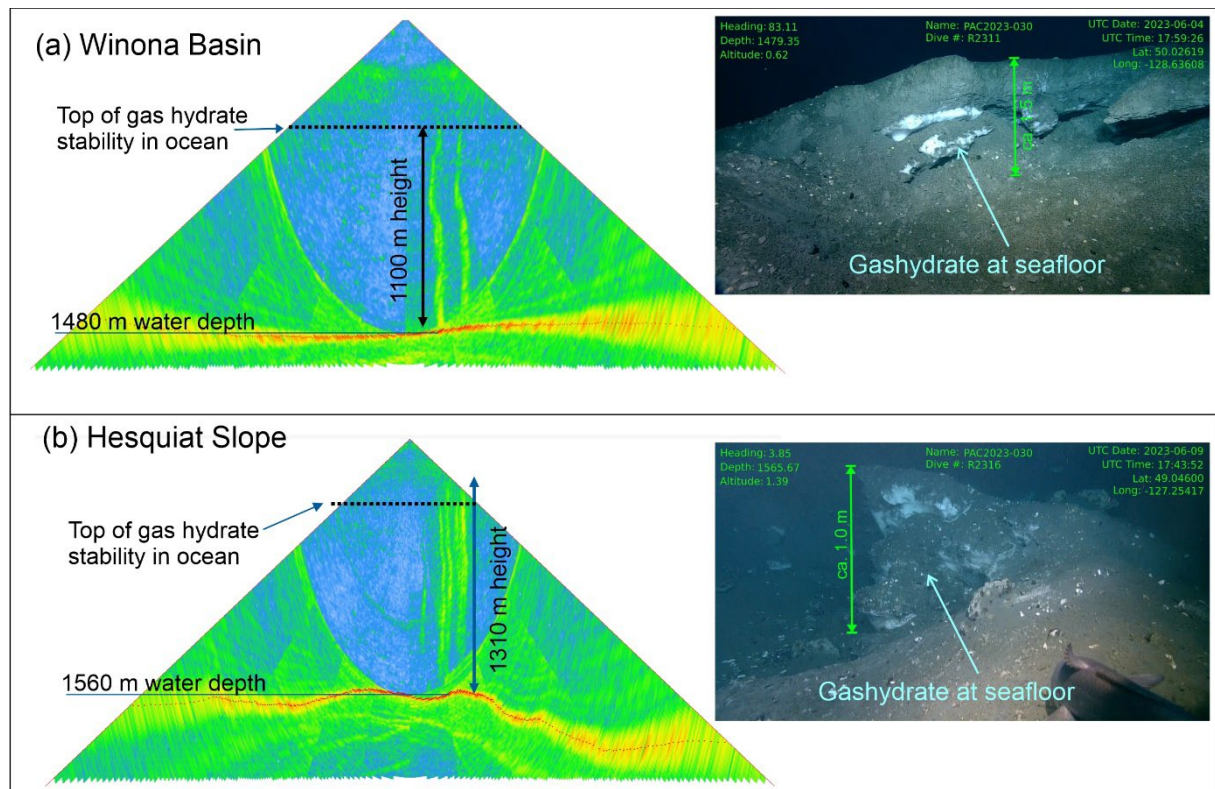


Abbildung 16. Beispiel der Wassersäulen-Daten aus dem EM122 (links) und Bilder des ROV ROPOS von Gashydratvorkommen am Meeresboden (rechts). (a) Im Winona-Becken, Tauchgang R2311. (b) Am Hesquiat-Hang, Tauchgang R2316.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlungsmäßigen Nachweises

Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten (Position 0850): Gesamtkosten 340,353 €

Die Hauptausgaben für das Vorhaben waren die visuelle Walbeobachtung mit 113,800 € Gesamtkosten (Firma LGL) sowie der Einsatz eines passiv-akustischen Monitoring PAM-Systems mit entstandenen Kosten von 129,218€ (JASCO). Beide Kostenpunkte waren für die Durchführung des Vorhabens essentiell, da ohne Walbeobachtung keine akustischen Quellen hätten eingesetzt werden können (Auflagen der kanadischen Behörden). Dabei wurden drei Technikerinnen von JASCO zum Betrieb des PAM-Systems sowie fünf Beobachter*innen zur visuellen Überwachung eingesetzt. Alle weiteren Kosten in Position 0850 entfielen auf Transportkosten (Container, Luftfracht). Position 0850 hat eine Aufstockung in Höhe von 30,230 € von Seiten des Mittelgebers erfahren, um zumindest teilweise die extrem gestiegenen Kosten durch die Ukraine-Krise aufzufangen.

Personalkosten (Position 0837): entstandene Kosten von 193,381 €.

Diese Position umfasst die Personalkosten für eine E13 Doktoranden-Stelle (75%), die mit Frau Wiebke Schäfer besetzt wurde. Frau Schäfer ist mit der seismischen Reflektions-Datenanalyse und Auswertung befasst. Weiterhin umfasste die Aufgabe der Doktorandin die Bearbeitung der OBS-Stationen der Refraktions-Linien (inkl. Stations-Korrekturen, Laufzeit-Definition, Vorwärts-Modellierung für Startmodell). Des Weiteren wurden aus Position 0837 eine E13 Post Doc Stelle (100%) für Frau Dr. Gesa Franz gestellt. Arbeiten von Frau Dr. Franz umfassten die Durchführung der MT-Messungen auf See, sowie die Datenbearbeitung nach der Ausfahrt. Zusätzlich umfasst Position 0837 alle Gehälter für die Teilnahme der studentischen Hilfswissenschaftler des GEOMAR an der Ausfahrt. Die studentischen Hilfswissenschaftler waren neben den Zuarbeiten an Bord zum Einsatz der verschiedenen Geräte auch für die Kontrolle der seismischen und bathymetrischen Datenerfassung verantwortlich. Hierzu war die Unterstützung der studentischen Hilfskräfte durch das Personal der GEOMAR-Grundausrüstung (Dr. Cord Papenberg, Dr. Anke Dannowski, Dr. Ingo Klauke) erforderlich.

Reisekosten (Position 0838): entstandene Kosten von 61,377 €.

Die Position beinhaltet die Reisekosten für die Teilnehmer der Ausfahrt SO294, sowie Reisen zum US-Konsulat und entstandene Kosten zum Erwerb des B1-B2 Visums. Der Großteil der Reisekosten musste dabei für die Flüge Deutschland-Kanada und USA-Deutschland aufgewandt werden. Um sicherzustellen, dass alle Fahrtteilnehmer aufgrund der langen Flugverbindung rechtzeitig vor Fahrtbeginn ankamen, musste eine Übernachtung in Vancouver eingeplant werden. Zum Aufbau der Geräte an Bord des FS SONNE und Vorbereitungen und Testen der seismischen Datenerfassung war die Unterstützung durch Personal der GEOMAR-Grundausrüstung (Dr. Jörg Bialas) vor Ort in Vancouver erforderlich. Position 0838 hat eine Aufstockung in Höhe von insgesamt 6,425.25 € von Seiten des Mittelgebers erfahren, um die Extrakosten für die B1-B2 Visa durch kurzfristige Verlegung des Zielhafens von Vancouver in die USA durch die Leitstelle aufzufangen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren umfänglich notwendig, um die Ziele des Vorhabens zu erreichen. Im Folgenden werden einzelne Methoden zusammenfassend beschrieben, wobei eine räumliche Trennung nach Arbeitsgebieten nicht notwendig ist.

II.3.1 Erfassung der natürlichen Seismizität (AP 11, 12)

Die Erfassung der räumlichen Verteilung und Magnitude von Erdbeben gibt Aufschluss über die natürlichen Prozesse zu ihrer Entstehung sowie erlaubt die Kartierung von Störungen die für eine umfängliche Geogefahren-Analyse und anschließende Risikobeurteilung benötigt werden. Da die Erfassung von Erdbeben mit Landstationen limitiert ist (schlechtes Signal-Rausch Verhältnis, große Distanz zu Erdbeben auf ozeanischen Platten) müssen Ozeanbodenseismometer über den Erdbeben-Epizentren auf dem Meeresboden verteilt eingesetzt werden. Das hohe Signal-Rausch Verhältnis der Instrumente am Meeresboden (wegen einer Entkopplung von Wind und Wellen, und keine menschlichen Störsignalen durch Industrie und Verkehr) sowie eine kleinere Distanz zu den Epizentren erlaubt die Detektion selbst kleinster Erdbeben, welche somit eine genauere Beschreibung der natürlichen Seismizität erlaubt. Zudem ist ein Einsatz nur über einen längeren Zeitraum sinnvoll, um eine statische relevante Summe an Beben zu erfassen, d.h. Einsätze nur über den Zeitraum einer Ausfahrt (für SO294 ca. 5 Wochen) ist nicht zielführend. Deswegen wurden für das Vorhaben CLOCKS insgesamt 26 OBS über zwei Arbeitsgebiete verteilt ausgesetzt (Abb. 17). Die Auslage der Breitband-Geräte des GEOMARs in einem kleinräumigen Array dient zur Erfassung von nieder-frequenten Erdbeben („very low frequency events: VLFE“). Die räumliche Lage der kurz-periodischen Geräte von JAMSTEC dienen der allgemeinen Detektion von Erdbeben im höher-frequenten Frequenzspektrum. Die während der Ausfahrt SO294 geleisteten Arbeiten in Bezug auf die Erfassung der natürlichen Seismizität waren daher angemessen und notwendig. Die Bergung der Geräte wurde im Juni/Juli 2023 durch den Projektpartner GSC finanziert und mit dem kanadischen Schiff CCGS John P. Tully erfolgreich durchgeführt (AP 3.2). Anschließende Arbeiten (nachdem die Daten von der Navy kontrolliert wurden) zur Daten-Kontrolle (AP 3.1) und Formatierungen auf ein von allen Projektpartnern nutzbares Datenformat („mseed“) waren notwendig und angemessen um eine wissenschaftliche Analyse der Daten zu ermöglichen.

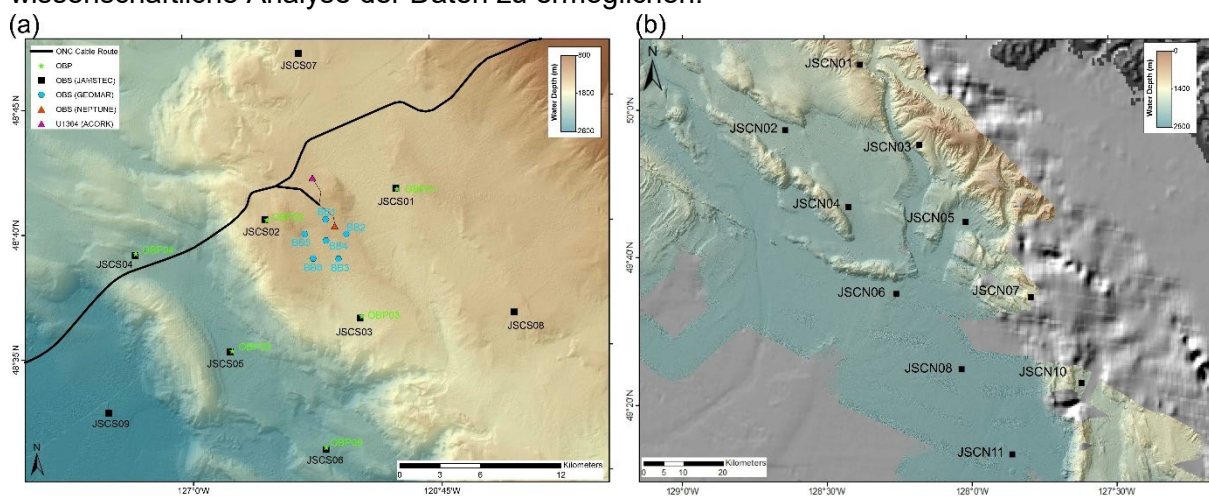


Abbildung 17. (a) Lage der Langzeit-OBS und Druck-Sensoren im südlichen Arbeitsgebiet der Juan de Fuca Platte. (b) Lage der Langzeit-OBS im nördlichen Arbeitsgebiet der Explorer Platte

II.3.2 Refraktions-Seismik (AP 5, 10)

Die während der Ausfahrt SO294 geleisteten seismischen Arbeiten zur Refraktions-Methodik mit Einsatz von OBS waren notwendig, um Informationen über die Lage der ozeanischen Plattengrenze in der Nähe zur Deformationsfront (Explorer Platte und Winona-Becken und Juan de Fuca Platte) zu bestimmen. Fragen zur Subduktion, Verhakung der Platten und mögliche „slip-to-toe“ Events, also Erdbebenbrüche entlang der Plattengrenze bis an die Deformationsfront, können nur dann nachgewiesen werden, wenn eine möglichst genaue Lage der abtauchenden ozeanischen Platte bekannt ist. Da die Methode der Reflektions-Seismik bei der im Vorhaben eingesetzten kurzen Streamerlänge (< 300 m) und kleiner Volumina der Luftpulser nur ein schwaches Abbild der Oberkruste ermöglicht (bei einer Eindringtiefe von weniger als 2 km) müssen Refraktions-Methodiken mit OBS angewendet werden, die eine tiefere Eindringung der seismischen Signale bis zu 15 km ermöglichen (siehe Abb. 5 des Profils P2000 im Winona-Becken). Insgesamt wurden 20 OBS vom GEOMAR für das Vorhaben mobilisiert. Als seismische Quelle wurden ein Array aus sechs Luftpulser mit einem Gesamtvolumen von 2840 in³ (~46 Liter) genutzt. Diese Größe der seismischen Quelle ist notwendig um eine Ausbreitung der Signale in den Untergrund von bis zu ~20 km und Laufzeitlängen von ~100 km zu den Landstationen zu gewährleisten. Der Einsatz einer solchen Quelle erfordert im Gegenzug eine strikte Kontrolle der unmittelbaren Umgebung des Forschungsschiffes zum Schutz vorhandener Meeressäuger. Für diese Arbeiten wurden 20 Geräte entlang von zwei Profilen im Winona-Becken der Explorer Platte (Abb. 18a) eingesetzt, und zwölf entlang des Zentral-Profiles am Akkretionskeil der Juan de Fuca Platte (Abb. 18b). Der Einsatz dieser Geräte war angemessen um die Fragestellungen in beiden Arbeitsgebieten hinreichend zu beantworten. Auswertungen der Daten und geleistete Arbeiten erfolgen im Rahmen einer Doktorarbeit (Wiebke Schäfer).

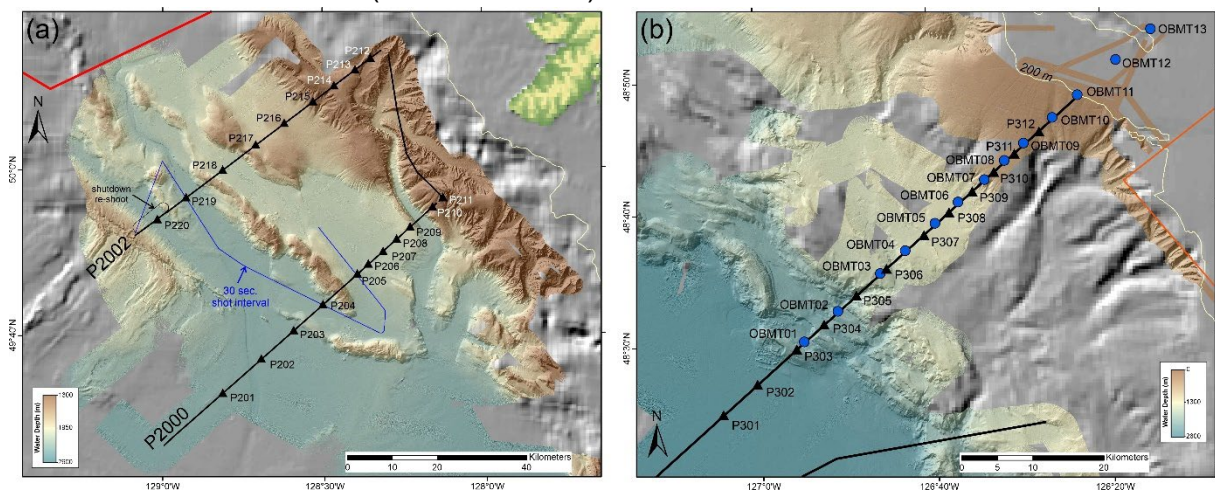
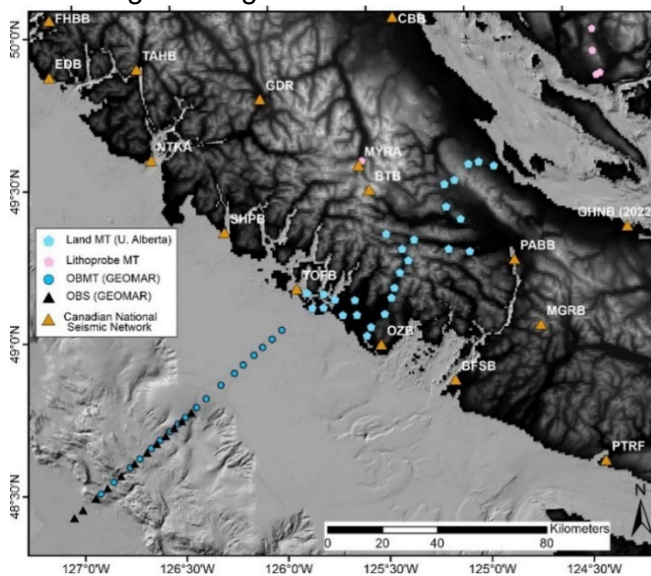


Abbildung 18. (a) Lage der Refraktions-Profile P2000 und P2002 im Winona-Becken, Explorer Platte. Zusätzlich wurden Daten für die 3D-Tomographie entlang von Querprofilen erfasst. (b) Lage des Refraktions-Profiles P7000 über den Akkretionskeil der Juan de Fuca Platte (kombiniert mit MT-Profil).

II.3.3 Magnetotellurik (AP 4)

Da auch die Refraktions-seismischen OBS-Daten nur eine beschränkte Eindringtiefe ermöglichen (15 – 20 km), unsere Fragestellungen zur Lage der verhakten seismogene Zone geologisch aber bis in Tiefen von bis zu 40 km reichen, muss eine andere Messmethodik herangezogen werden, welche geophysikalische Rückschlüsse auf diese tiefen Prozesse erlaubt, nämlich Magnetotellurik. Zu diesem Zweck wurden alle verfügbaren MT-Geräte des GEOMARs zur Durchführung des Vorhabens mobilisiert. Durch Kollaboration mit der

University of Alberta (Prof. Martyn Unsworth) wurden zusätzlich Land-MT Stationen auf Vancouver Island ausgebracht, um das Zentralprofil vom marinen Teil über dem Akkretionskeil nach Osten zu verlängern. Die Land-Stationen wurden dabei entlang vorhandener Straßen und Forstwegen ausgebracht, was eine nicht ganz lineare Auslage zur Folge hat (Abb. 19). Zusätzlich wurden Stationen von der LITHOPROBE Kampagne auf dem Festland mit einbezogen. Auswertungen der Daten ist komplex und die geleisteten Arbeiten erforderten Erfahrung im Umgang mit MT-Geräten auf See und mit der Datenauswertung mit der Inversions-Methode, weswegen die Anstellung von Frau Dr. Gesa Franz als Post-Doc notwendig und angemessen war. Der Einsatz der marinen MT-Geräte beschränkte sich dabei



auf einen Zeitraum von ca. 4 Wochen während der Ausfahrt SO294. Zur Beantwortung der Fragestellungen zur tiefen Untergrundstruktur und Lage der seismogenen Zone (siehe Abb. 8) war daher der Einsatz von MT-Geräten notwendig und angemessen.

Abbildung 19. Lage der MT-Geräte und OBS entlang des Zentral-Profiles auf der Juan de Fuca-Platte.

II.3.4 Reflektions-Seismik und PARASOUND (AP 6, 8, 9)

Die bisher beschriebenen Methoden zur Seismizität, Refraktions-Seismik und MT dienen zur Abbildung tektonischer Prozesse im tieferen Untergrund (> 2 km Tiefe). Tektonische Spannungen und damit verbundene Geogefahren die vor allem rezent aktiv sind, bilden sich dagegen gerade im flachen Untergrund ab. Hierzu ist es notwendig hochauflösende Reflektionsseismik in Kombination mit dem PARASOUND Sedimentecholot zu nutzen. Für die Ausfahrt SO294 wurde ein Mehrkanal-Streamer des GEOMAR mit einem Hydrophon-Abstand von 1.56 m über eine Gesamtlänge von 290 m eingesetzt. Als akustische Quelle diente hier eine einzelne GI-Luftkanone (Volumen 355 in³, ~6 Liter). Auch bei der Nutzung der GI Luftkanone wurde ein striktes Programm zum Schutz der Meeressäuger durchgeführt. Mit einem Frequenzbereich der seismischen Quelle von 10 – 400 Hz und bei typischen seismischen Geschwindigkeiten im oberen Sediment von ~ 1600 m/ ergibt sich daraus eine vertikale Auflösungsgrenze von ca. 2 m. Diese ist ausreichend und angemessen zur Kartierung von Störungen im flachen Untergrund (siehe dazu Abb. 4 der Proto-Störungen). Zusätzlich ermöglicht der Einsatz eines hochauflösenden Mehrkanal-Streamers Studien zu Gashydraten. Gashydrate im Untergrund werden seismisch durch den BSR erkannt (Kapitel II.1.vi, Abb. 20).

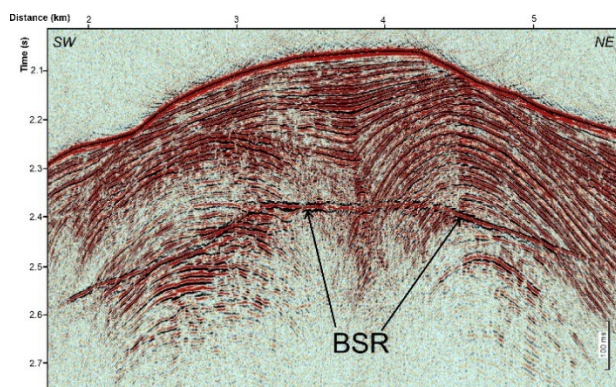


Abbildung 20. Beispiel eines BSR im Winona-Becken in Reflektions-Seismischen Daten.

Aus solchen Beobachtungen lassen sich dann wiederum Rückschlüsse auf den Wärmefluss gewinnen (siehe Abschnitt II.3.6), welche für tektonische Interpretationen notwendig sind. Die seismischen Mehrkanal-Daten werden dabei durch Aufzeichnungen mit dem PARASOUND-System komplettiert. Das Parasound ermöglicht bei einer mittleren Frequenz von ~3 kHz eine vertikale Auflösungsgrenze von ca. 0.25 m, wobei die Eindringung des PARASOUND-Systems in den Untergrund auf typischerweise 60 – 80 m begrenzt ist. Allerdings ermöglichen die PARASOUND-Daten somit Aussagen zu rezenten tektonischen Prozessen, wie anhand der neu entdeckten Blatt-Verschiebung quer durch den Akkretionskeil am Hesquiat-Hang, oder der den Meeresboden durchbrechenden Hauptstörung an der Deformationsfront der Juan de Fuca Platte zu sehen ist (Abb. 21).

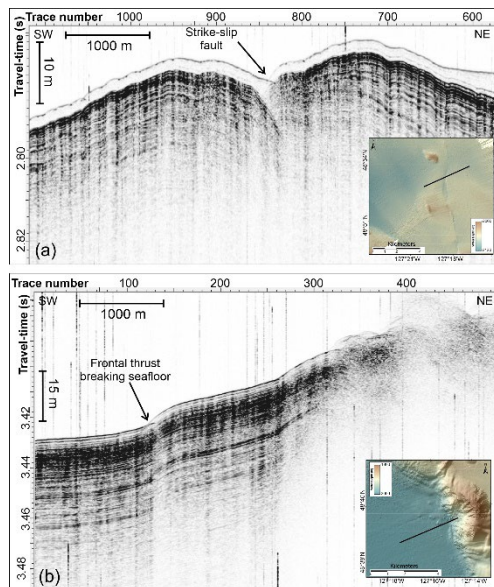
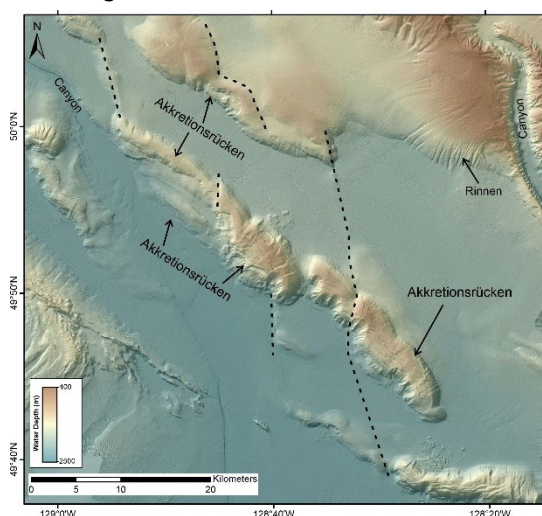


Abbildung 21. Beispiel von zwei PARASOUND Profilen zu rezent aktiven tektonischen Störungen. (a) Blattverschiebung am Hesquiat-Hang, Akkretionskeil der Juan de Fuca Platte, (b) Eine Hauptstörung, die an der Deformationsfront der Juan de Fuca Platte den Meeresboden durchbricht.

II.3.5 Hydroakustische Vermessungen (AP 13)

Während SO294 wurden die Fächerlote EM122 (> 1000 m Wassertiefe) und EM710 (< 1000 m Wassertiefe) zu hydroakustischen Vermessungen eingesetzt. Bathymetrische Kartierungen sind ein essentieller Teil mariner Forschung. Die Arbeiten zur Analyse und Auswertung der Daten waren notwendig, um eine Abschätzung der Oberflächendeformation in den Untersuchungsgebieten zu erhalten und somit Rückschlüsse auf den tektonischen Zustand der Plattengrenzen zu ermöglichen. Die Arbeiten waren zudem notwendig, da weite Teile des Arbeitsgebietes vor allem im Winona-Becken bisher nicht hochauflösend kartiert worden



waren. Aus Abbildung 22 wird weiterhin ersichtlich, dass die Kartierungen angemessen sind, um Hinweise auf tektonische Spannungen und Deformationen im Untergrund Hinweise zu erhalten. Im Fall der Kartierung des Winona-Beckens sei auf eine klare Transpression-Dynamik mit markanten Blattverschiebungen hingewiesen, welche vorher nicht bekannt war.

Abbildung 22. Neue bathymetrische Karte des Winona-Beckens mit markanten Blattverschiebungen (gestrichelte Linien), die zu einem Versatz und Aufbrechen der Akkretionsrücken führt.

Neben der Notwendigkeit den Meeresboden so genau wie möglich im Vorfeld der OBS- und MT-Kampagnen zu kartieren, um eine optimale Absatz-Position für die Geräte zu gewährleisten, liefern die EM122 und EM710 zusätzliche Daten über die Wassersäule, um mögliche Gasaustritte zu kartieren. Diese Methode wurde hinlänglich während und nach der

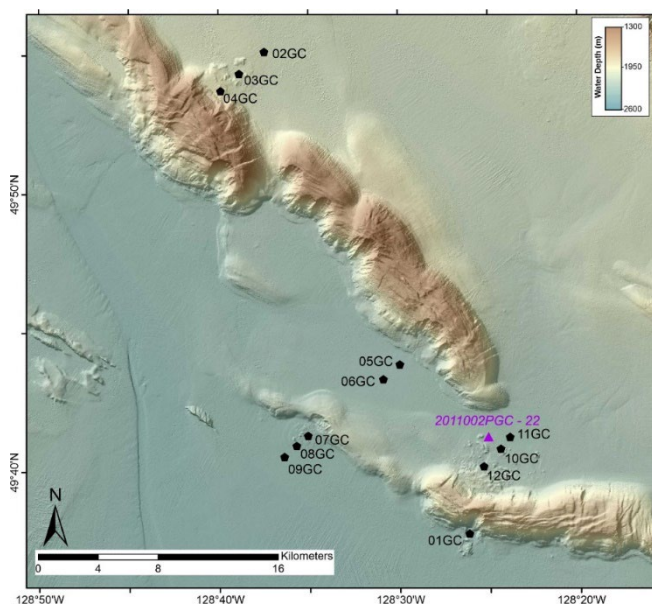
Ausfahrt SO294 genutzt und >150 neue Gasaustrittsstellen wurden kartiert (Abb. 15, 16). Dadurch wurden Entdeckungen zu bisher nicht bekannten Gashydrat-Vorkommen und Biodiversität am Meeresboden während der 2023 durchgeführten Ausfahrt im Rahmen des NepDep-Projektes erst möglich, und hebt die Bedeutung von hydrographischen Kartierungen und deren Notwendigkeit noch einmal besonders hervor.

II.3.6 Wärmefluss (AP 7)

Neben seismischen Methoden zur Abbildung der ozeanischen Kruste können auch Wärmefluss-Daten genutzt werden, um indirekt Einblicke auf Subduktions-Prozesse zu ermöglichen. Dabei erweist sich der Einsatz einer Wärmestromlanze als effektiv, logistisch einfach im Einsatz, und zielführend. Während der Ausfahrt SO294 wurden Messungen an insgesamt 36 Stationen in vier Profil-Auslagen durchgeführt. Ein Hauptziel war hierbei das Winona-Becken (siehe Abb. 14) wo die Lage der Explorer Platte im Vorfeld nicht genau bekannt war. Zur Dateninterpretation wird ein thermisches Modell zur konduktiven Wärmestromleitung benutzt, um aus den einzelnen Wärmestromdaten und deren räumliche Änderung auf die Plattengrenze im Untergrund zu schließen. Eine Abnahme des Wärmestroms nach Osten, wie im Winona-Becken bestimmt (Abb. 14), deutet auf einen Subduktionsprozess der Explorer Platte hin. Außerdem sind Wärmestromdaten essentiell notwendig zur Auswertung der Reflektions-Seismik Daten im Hinblick auf das Vorkommen von Gashydraten. Die Gashydratstabilitätszone ist hauptsächlich abhängig vom thermischen Gradienten und Druck. Die Beobachtung eines BSRs in seismischen Daten (Abb. 20) wird hierbei mit den Wärmestromdaten verifiziert. Die Verwendung der Wärmestromlanze und Methodik ist daher angemessen und als zusätzlicher Parameter in einer geophysikalischen Interpretation der Daten notwendig.

II.3.6 Sedimentkern-Analysen (AP 14, 15)

Zur Bestimmung der Wiederholungsrate von starken Subduktionsbeben werden typischerweise markante Ablagerungen im Sediment, sogenannte Turbidite, benutzt (z.B. Atwater, 1987). Um auszuschließen, dass solche Turbidite durch Prozesse wie z.B. Sedimenteintrag von Land oder Wellenbewegungen im flachen Wasser entstanden sind, müssen Kernpositionen gefunden werden, die unabhängig von diesen Einflüssen sind.



Basierend auf vorhergehende Studien (Hamilton et al., 2015) eignen sich submarine Hangrutschungen ideal für solche Zwecke. Deswegen wurden basierend auf den während SO294 neu erfassten hydroakustischen Daten der Meeresbodentopographie, Rückstreuung ('backscatter'), und PARASOUND-Daten verschiedene Hangrutschungen im Winona-Becken ausgewählt und insgesamt wurden 12 Sedimentkerne gewonnen (Abb. 23).

Abbildung 23. Lage der zwölf Sedimentkerne im Winona-Becken an prominenten Hangrutschungen.

Dazu wurden ein 5 m langes Schwerelot benutzt, welches angemessen und notwendig zur Durchführung dieser Studien ist. Eine Länge von 5 m ist ausreichend, um bei den erwarteten Sedimentationsraten eine Eindringung zu gewährleisten die für eine ^{14}C Datierung ausreichend ist (jünger als ca. 40,000 Jahre). Zur weiteren Interpretation der Sedimentkerne wurden Proben des Porenwassers mit Rhizonen gewonnen und im Anschluss an die Ausfahrt SO294 wurden diese Proben für Anionen und Kationen-Konzentrationen am GEOMAR vermessen (siehe Abb. 12, 13). Diese Methodik ist angemessen zur Beantwortung für Fragstellungen zur jüngeren Sedimentationsgeschichte (z.B. Erosion durch eine Rutschung), die auf Diffusions-Prozessen von Ionen im Porenwasser fundieren. Alle Sedimentkerne wurden am Ende von SO294 an das Labor des GSC in Sidney, BC, verschickt und dort vermessen und beprobt. Dies ist angemessen, da der Kollaborationspartner GSC über ein komplett-ausgestattetes Labor zur Messung physikalischer Eigenschaften verfügt, und eine Beprobung vor Ort mit anschließender ^{14}C Datierung kostengünstiger ist, als der Verbleib und Bearbeitung der Kerne am GEOMAR.

Zusammenfassend haben all diese Arbeiten dazu geführt, dass eine Neubewertung und verbesserte Interpretation der Geogefahren vor Vancouver Island möglich sein wird. Alle Arbeiten waren notwendig und angemessen zum Erreichen der Projektziele.

II.4 Voraussichtliche Verwertung

Eine konkrete wirtschaftliche Verwertung ist nicht vorgesehen, da GEOMAR nicht wirtschaftlich tätig ist. Die wissenschaftlich-technische Verwertung umfasst die Integration von seismischen und anderer Datensätzen sowie Beiträge zur verbesserten Modellierung von Erdbeben und damit einhergehenden Geogefahren. Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Projektes erlauben durch die internationale Einbindung der Partnerorganisationen in Kanada und Japan eine breite Verwertung. Die neu erfassten bathymetrische Daten (vor allem im Winona-Becken) wurden von wissenschaftlich tätigen Gruppen der indigenen Bevölkerung auf Vancouver Island angefordert und zur verbesserten Flut- und Tsunami-Modellierung der betroffenen Küstenregionen genutzt.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Ergebnisse des Vorhabens So294 wurden direkt in die Vorbereitung und Durchführung zweier Ausfahrten der kanadischen Kollegen vom Fisheries and Ocean Canada ein (Projekt NepDep) genutzt, welche sich hauptsächlich thematisch mit Biodiversität im tiefen Ozean beschäftigen. Zusätzlich tragen Ergebnisse von SO294 zu einem IODP3-Antrag bei, welcher ein Bohrloch-Observatorium über die gesamte Juan de Fuca Platte umfasst.

II.6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen

- Douglas, K., Coté, M., Riedel, M., Podhorodeski, A., Obana, K., 2024. 2023003PGC cruise report: northern Cascadia Subduction Zone international research expedition, offshore British Columbia. Geological Survey of Canada, Open File, 90072 . Natural Resources Canada, 124 pp. ISBN ISBN 978-0-660-69064-3 DOI 10.4095/332361.
- Franz, G., 2023. CLOCKS Magnetotelluric Survey preliminary report, 79 pp.
- Kehew, J., Douglas, K.L., Riedel, M., Klaucke, I., Norgard, T., DuPreez, C., Li, Z., Stacey, C., 2023. Swiftsure Bank water column survey SO294, offshore British Columbia. Geological Survey of Canada Open File, 8943 . 54 pp. DOI 10.4095/331402.
- Riedel, M., Bialas, J., Klein, E., Papenberg, C., Berndt, J., 2024. Technical Report for Raw 2D MCS Reflection Data, R/V Sonne Cruise 294, Vancouver (Canada) – Port Hueneme (USA), 13/09/22 – 27/10/23. GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany, 37 pp. DOI 10.3289/TR_2D-MCS_SO294.
- Riedel, M. and all Cruise Participants, 2022. CLOCKS: Northern Cascadia: Extent of locked zone, prism deformation, slip-to-toe, and the edge of subduction, and CASCADIA CO2: Seismic multi-parameter study at a possible site for CO2 storage in basalt in the Cascadia Basin utilizing shear wave events (secondary user), Cruise No. SO294, 13.09. 2022 - 27.10. 2022, Vancouver (Canada) - Port Hueneme (USA), CLOCKS & CCO2. SONNE-Berichte, SO294. Bonn, 150 pp. DOI 10.48433/cr_so294.

Präsentationen:

- Douglas, K., Riedel, M., Du Preez, C., Stacey, C.D., 2024. Mapping Canada's West Coast Cold Seeps: new data for informed assessment, Proceedings of the 2024 International Symposium on Marine Geological and Biological Habitat Mapping (GeoHab '24), Arendal, Norway, May 6-10, 2024
- Riedel, M., 2023. Results from Expedition SO294 – CLOCKS, Oral presentation (online), at the Geological Survey of Canada – Pacific Geoscience Centre, January 13, 2023.
- Riedel, M., 2024. Results from Expedition SO294 – CLOCKS and NepDep Expeditions, oral presentation (in person) at Ocean Networks Canada, Victoria, BC, Canada on July 12, 2023.
- Schäfer, W., Riedel, M., Douglas, K.L., Klaucke, I., Klein, E., 2024. A segmented deformation front at the northern Cascadia subduction zone, Canada: Results from Expedition SO294 CLOCKS, Poster presented at the JAMSTEC-GSC-UTIG workshop on subduction zone dynamics, Austin, TX, USA,
- Schäfer, W., Riedel, M., Crutchley, G., Kopp, H., 2025. The role of protothrusts in strain accumulation along the northern Cascadia subduction zone, Proceedings of the 85th annual meeting of the German Geophysical Society, Bochum, Germany, February 24 – 27, 2025, p. 104, O-GD-01.
- Shiobara, H., Sugioka, H., Obana, K., Takahashi, T., Sun, T., Wang, K., Schaeffer, A.J., Hobbs, T.E., Stacey, C.D., Douglas, K.L., Riedel, M., 2024. Ocean bottom pressure gauge array observation for detecting slow earthquakes with a wide frequency range at Southwestern off the Vancouver Island, American Geophysical Union Annual meeting, December 9 – 13, 2024, Washington, DC, USA, available online: <https://agu.confex.com/agu/agu24/meetingapp.cgi/Paper/1607267>

In Bearbeitung

- Reeck, K., Jegen-Kulsar, M., Unsworth, M., Riedel, M., Franz, G. (in preparation). An amphibious Magnetotelluric – transect across central Vancouver Island.
- Schäfer, W., Riedel, M., Papenberg, C. (in preparation). The role of protothrusts in strain accumulation along the northern Cascadia subduction zone, *Journal of Geophysical research – Solid Earth*.

Geplant

- Riedel, M., Schäfer, W., Douglas, K., et al., Giant gas venting and massive seafloor gas hydrate outcrops in the Winona Basin and Hesquiat Slope off Vancouver Island
- Schäfer, W., Riedel, M., Douglas, K., et al., Gas hydrates in the Winona Basin revisited – new constraints from BSR-observations, heat-flow measurements and seafloor video-observations.
- Schäfer, W., Riedel, M., Dannowski, A., et al., Refraction seismic imaging in the Winona Basin and mapping of the Explorer Plate
- Riedel, M., Carbotte, S., Lange, D., Kopp, H., et al., 3D seismic tomography from the CLOCKS and CASIE projects
- Riedel, M., Papenberg, C., Hannay, D., et al., Machine-learning of marine mammal calls on ocean-bottom seismometers constrained by passive acoustic monitoring recordings
- Enkin, R., Douglas, K., Riedel, M., et al. Timing of submarine slope failures in the Winona Basin, Explorer Plate

II.7 Literaturangaben

- Atwater, B.F., 1987. Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State. *Science*, 236:942–944, doi: 10.1126/science.236.4804.942.
- Au, D., Clowes, R.M., 1982. Crustal structure from an OBS survey of the Nootka fault zone off western Canada. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 68, 27–47, doi: 10.1111/j.1365-246X.1982.tb06960.x.
- Audet, P., Bostock, M.G., Mercier, J.-P., Cassidy, J.F., 2008. Morphology of the Explorer–Juan de Fuca slab edge in northern Cascadia: Imaging plate capture at a ridge-trench-transform triple junction, *Geology*, Vol. 36; no. 11; p. 895–898; doi: 10.1130/G25356A.
- Barnes, P.M., Ghisetti, F.C., Ellis, S., Morgan, J.K., 2018. The role of protothrusts in frontal accretion and accommodation of plate convergence, Hikurangi subduction margin, New Zealand. *Geosphere* 14 (2): 440–468. <https://doi.org/10.1130/GES01552.1>
- Bornstein, T., Lange, D., Münchmeyer, J., Woollam, J., Rietbrock, A., Barcheck, G., Grevemeyer, I., Tilmann, F., 2024. PickBlue: Seismic Phase Picking for Ocean Bottom Seismometers With Deep Learning. *Earth and Space Science* 11, e2023EA003332. <https://doi.org/10.1029/2023EA003332>
- Cassidy, J.F., Ellis, R.M., Karavas, C., Rogers, G.C., 1998. The northern limit of the subducted Juan de Fuca plate system, *J. Geophys. Res.*, 103, B11, 26,949–26,961. <https://doi.org/10.1029/98JB02140>
- Global Heat Flow Data Assessment Group, 2024. The Global Heat Flow Database: Release 2024. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/fidgeo.2024.014>
- Goldfinger, C., Nelson, C.H., Morey, A., Johnson, J.E., Gutierrez-Pastor, J., Eriksson, A.T., Karabanov, E., Patton, J., Gracia, E., Enkin, R., 2012. Turbidite Event History: Methods and Implications for Holocene Paleoseismicity of the Cascadia Subduction Zone, USGS Professional Paper (1661-F), 184 pp, doi: 10.3133/pp1661F.

- Carbotte, S.M., Han, S., Boston, B., 2021. Cascadia Seismic Imaging Experiment - CASIE21 R/V Marcus G Langseth MGL2104 Cruise Report, 31 pp.
- Hamilton, T. S., Enkin, R. J., Riedel, M. , Rogers, G. C., Pohlman, J. W., Benway, H. M. und Calvert, A., 2015. Slipstream: an early Holocene slump and turbidite record from the frontal ridge of the Cascadia accretionary wedge off western Canada and paleoseismic implications. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 52 (6). pp. 405-430. DOI 10.1139/cjes-2014-0131.
- Hasselgren, E.O., Clowes, R.M., 1995. Crustal structure of northern Juan de Fuca plate from multichannel reflection data. *J. Geophys. Res.* 100, 6469– 6486, doi: 10.1029/94JB02941.
- Hensen, C., Zabel, M., Pfeifer, K., Schwenk, T., Kasten, S., Riedinger, N., Schulz, H.D., Boetius, A., 2003. Control of sulfate pore-water profiles by sedimentary events and the significance of anaerobic oxidation of methane for the burial of sulfur in marine sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(14), 2631-2647, [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00199-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00199-6).
- Hutchinson, J., Kao, H., Spence, G.D., Obana, K., Wang, K., Kodaira, S., 2019. Seismic Characteristics of the Nootka Fault Zone: Results from the Seafloor Earthquake Array Japan–Canada Cascadia Experiment (SeaJade). *Bulletin of the Seismological Society of America* 2019, 109 (6): 2252–2276. <https://doi.org/10.1785/0120190008>
- Hutchinson, J., Kao, H., Riedel, M., Obana, K., Wang, K., Kodaira, S., Takahashi, T., Yamamoto, Y., 2023. Tectonic evolution of the Nootka fault zone and deformation of the shallow subducted Explorer plate in northern Cascadia as revealed by earthquake distributions and seismic tomography. *Scientific Rep.*, 13, 7873, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33310-z>.
- Hyndman, R.D., 1995. The LITHOPROBE corridor across the Vancouver Island continental margin: the structural and tectonic consequences of subduction, *Can. J. Earth Sc.*, 32(10), 1777-1802. <https://doi.org/10.1139/e95-138>
- Hyndman, R.D., Wang, K., 1995. The rupture zone of Cascadia great earthquakes from current deformation and thermal regime. *J. Geophys. Res.* 100, 22133–22154. <https://doi.org/10.1029/95JB01970>
- Kao, H., Shan, S.-J., Dragert, H., Rogers, G., 2009. Northern Cascadia episodic tremor and slip: A decade of tremor observations from 1997 to 2007, *J. Geophys. Res.*, 114, B00A12, <https://doi.org/10.1029/2008JB006046>.
- Kodaira, S., No., T., Nakamura, Y., Fujiwara, T., Kaiho, Y., Miura, S., Takahashi, N., Kaneda, Y., Taira, A., 2012. Coseismic fault rupture at the trench axis during the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature Geoscience*, 5, 646 – 650, doi:10.1038/NCEO1547.
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P., Berge-Thierry, C., 2000. Probabilistic Earthquake Location in 3D and Layered Models, in: Thurber, C.H., Rabinowitz, N. (Eds.), *Advances in Seismic Event Location*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 101–134.
- Marcon, Y., Römer, M., Scherwath, M., Riedel, M. , Dølven, K.O., Heesemann, M., 2022. Variability of Marine Methane Bubble Emissions on the Clayoquot Slope, Offshore Vancouver Island, Between 2017 and 2021. *Frontiers in Earth Science*, 10, 864809. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.864809>.
- Moorkamp, M., Heincke, B., Jegen, M., Roberts, A.W., Hobbs, R.W., 2011. A framework for 3-D joint inversion of MT, gravity and seismic refraction data, *Geophys. J. Int.* (184), 477-493, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04856.x>
- Mustard, P.S., 1994. The Upper Cretaceous Nanaimo Group, Georgia Basin. *Geology and geological hazards of the Vancouver region, southwestern British Columbia*. Edited by JWH Monger. Geological Survey of Canada, Bulletin 481, 27–95.

- Obana, K., Scherwath, M., Yamamoto, Y., Kodaira, S., Wang, K., Spence, G., Riedel, M. and Kao, H., 2015. Earthquake Activity in Northern Cascadia Subduction Zone Off Vancouver Island Revealed by Ocean-Bottom Seismograph Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105 (1). pp. 489-495. DOI 10.1785/0120140095.
- Riedel, M. , Scherwath, M., Römer, M., Veloso, M., Heesemann, M. und Spence, G.D., 2018. Distributed natural gas venting offshore along the Cascadia margin. *Nature Communications*, 9 (3264). doi: 10.1038/s41467-018-05736-x.
- Römer, M., Riedel, M. , Scherwath, M., Heesemann, M., Spence, G. (2016) Tidally controlled gas bubble emissions: A comprehensive study using long-term monitoring data from the NEPTUNE cabled observatory offshore Vancouver Island. *Geochem., Geophys. Geosys.* 17 (9). 3797-3814. <https://doi.org/10.1002/2016GC006528>.
- Saffer, D.M., Tobin, H.J., 2011. Hydrogeology and mechanics of subduction zone forearcs: fluid flow and pore pressure, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 39, 157-186. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133408>
- Scherwath, M., Spence, G., Obana, K., Kodaira, S., Wang, K., Riedel, M. , McGuire, J., Collins, J., 2011. Seafloor seismometers monitor northern Cascadia earthquakes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92 (47). <https://doi.org/10.1029/2011EO470001>.
- Schmuck, N., Reuther, J., Baichtal, J., Carlson, R.J., 2021. Quantifying marine reservoir effect variability along the northwest coast of North America. *Quaternary Research*. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.131>
- Sun, T. and 18 additional proponents, 2025. Northern Cascadia Borehole Observatories – A Plate-Scale Observatory Network to Study How Plate Boundaries Communicate, IODP3-Proposal, 47 pp.
- Zhang, M., Ellsworth, W.L., Beroza, G.C., 2019. Rapid earthquake association and location. *Seismological Research Letters*, 90(6), 2276 – 2284. <https://doi.org/10.1785/0220190052>