Project: **1022**

Project title: **The middle atmosphere in a changing climate - MACClim**

Principal investigator: **Hella Garny**

Report period: **2023-11-01 to 2024-10-31**

Im Projekt MACClim (bd1022) wurden im Jahr 2024 bis Dato (24.10.2024) ca. 6340 (einschließlich 1235 verfallenen) node-h Rechenzeit von insgesamt bewilligten 8017 node-h des Jahres 2024 verbraucht. Beantragt wurden für das Jahr 2024 Ressourcen für 1.) Simulationen zur Untersuchung stratosphärischer Variabilität in einem idealisiertem Model, und 2.) Simulation der Mesosphärischen Zirkulation mit UA-ICON.

Zu Punkt 1) wurden bestehende idealisierte Simulationen mit dem dynamischen Kernmodel EMIL (Garny et al, 2020) ausgewertet, welche bereits im Jahr 2023 durchgeführt wurden. Im Jahr 2024 wurden, anders als geplant, keine weiteren Simulationen durchgeführt. Dies ist begründet insbesondere damit, dass das von Philip Rupp (LMU) beantragte DFG Projekt zu dem Thema nicht bewilligt wurde. Trotzdem haben die Auswertungen der bestehenden Simulationen bereits interessante Ergebnisse geliefert. In den Simulationen wurden planetare Wellen der Wellenzahl 2 durch idealisierte Orographie, und Wellen mit Wellenzahl 1 durch ein zeitlich variables latentes Heizen erzeugt. Als Reaktion auf einen Puls in der Erzeugung von Welle 1 wird eine Abschwächung des Polarwirbels, und ebenfalls eine Abschwächung der Amplitude der Welle 2 simuliert. Derzeit werden die dynamischen Mechanismen untersucht, wie die Wellen 1 und 2 direkt über indirekt über die Polarwirbelstärke miteinander interagieren. Eine Publikation dazu ist in Vorbereitung (Rupp, Birner, Garny, in preparation).

Zu Punkt 2): Der bisherige (und bis Ende des Jahres geplante) Verbrauch von Rechenzeit im Jahr 2024, ebenso wie die verbrauchte Rechenzeit im letzten Quartal des Jahres 2023, wurde für diesen Punkt aufgewandt. Das Model Upper Atmosphere (UA)-ICON ist eine Erweiterung des operationellen Wettermodels ICON für die mittlere Atmosphäre, mit einem Oberrand des Models auf 150 km Höhe und einem erweitern Physik-Paket für mittelatmosphärische Prozesse (Borchert et al, 2019). Die Fragestellung ist die Rolle von Schwerewellenprozessen für die Simulation der Zirkulation der Mesosphäre/ unteren Thermosphäre (MLT) Region, sowie ihrer Vorhersagbarkeit. Dafür wurden Simulationen mit einer Auflösung von R2B7 (etwa 20 km horizontale Gitterweite) mit 250 vertikalen Schichten und R2B4 (etwa 160 km Gitterweite) mit 120 vertikalen Schichten durchgeführt und verglichen. Wie im Bericht des letzten Jahres beschrieben, konnte in den höher aufgelösten Simulationen ein deutlicher Effekt der in dieser Auflösung explizit simulierten Schwerewellen auf die mittleren Winde in der oberen Mesosphäre nachgewiesen werden.

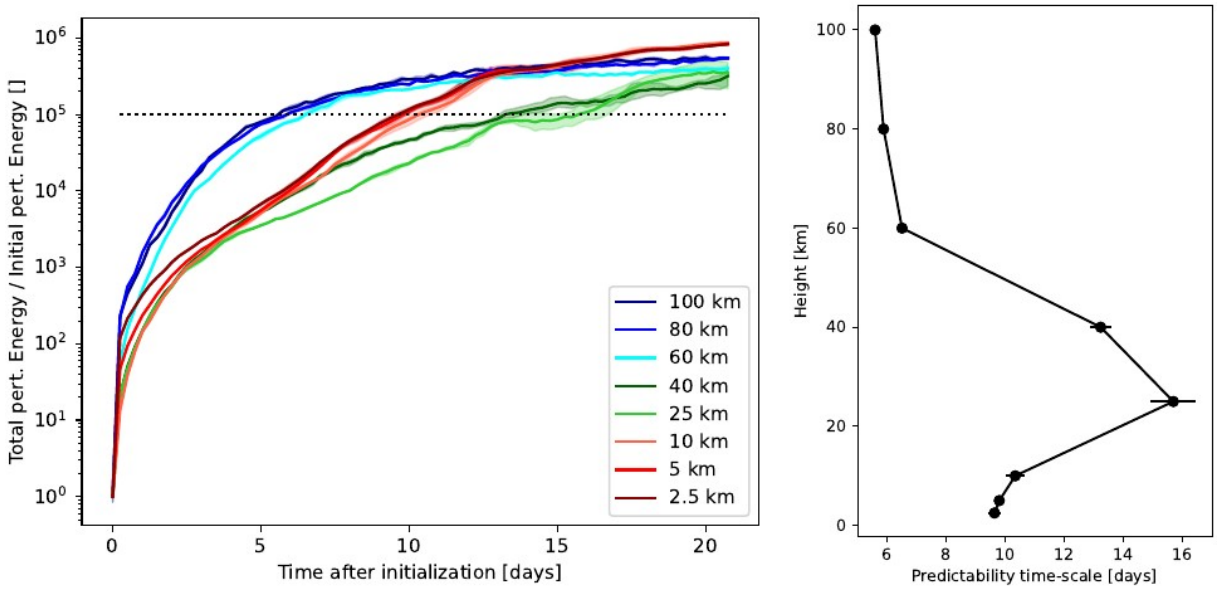

Figure 1: Links: Gesamtenergie der Störung in verschiedenen Höhen (siehe Legende). Die Energie ist mit der anfänglichen Störungsenergie normiert. Die Schattierung zeigt den Bereich, der von den drei Ensemblemitgliedern abgedeckt wird, die Linien sind Ensemblemittelwerte. Rechts: Zeitskala des Fehlerwachstums als Funktion der Höhe, gemessen an der Zeit, in der der Fehler um 5 Größenordnungen gewachsen ist (entspricht 10 % des erwarteten Sättigungswertes). Die Fehlerbalken zeigen die Verteilung über die drei Ensemblemitglieder.

Diese Resultate wurden weiter ausgewertet, und eine Publikation dazu ist in Vorbereitung (Garny et al, in preparation).
Der Fokus der Arbeiten in diesem Jahr lag aber auf der Fragestellung nach der Vorhersagbarkeit der Atmosphäre in verschiedenen Höhenschichten. Dafür wurden Störungexperimente durchgeführt, in welchen die Anfangsbedingungen leicht gestört werden, und der Wachstum der Störung in der Simulation verfolgt werden kann. Wenn die Störung gesättigt ist, bzw. die kinetischen Energie der Störung diejenige der Hintergrundzirkulation erreicht, ist das Limit der Vorhersagbarkeit erreicht. Es wurden insgesamt 8 Störungs-Simulationen durchgeführt mit UA-ICON in der höheren R2B7 Auflösung mit einem Initialisierungsdatum im August, und für etwas 40 Tage gerechnet. Diese 8 Simulationen setzen sich aus Sensitivitäten bezüglich der Stärke der Störung und Ensemblen mit der gleichen Störungsstärke zusammen. Ebenso wurden Simulationen mit der niedrigeren Auflösung (R2B4) durchgeführt (3 Ensemble member). Das Wachstum der globalen Störungsenergie in verschiedenen Höhen ist in Abb. 1 dargestellt (basierend auf der Differenz von einer Kontrol-Simulation den Störungssimulationen). Die erste Beobachtung ist, dass sich das Fehlerwachstum in den einzelnen Atmosphärenschichten eindeutig ähnlich verhält, sich aber zwischen verschiedenen Schichten unterscheidet. In allen Schichten wächst die Störungsenergie innerhalb der ersten 1-2 Tage schnell um 2-3 Größenordnungen. Danach nehmen die Wachstumsraten in der Troposphäre und Stratosphäre stark ab, und in der Troposphäre wird eine nahezu konstante exponentielle Wachstumsrate bis etwa Tag 12 festgestellt, wonach das Wachstum der Störenergie weiter auf eine geringere Rate abnimmt. Das unterschiedliche Verhalten des Wachstums der Störungsenergie in den vertikalen Schichten der Atmosphäre ist in Abb. 1 (rechts) durch eine Zeitskala für das Fehlerwachstum charakterisiert. Die Zeitskala ist die Zeit, die benötigt wird, bis die anfängliche Störung um 5 Größenordnungen angewachsen ist (d. h. die Zeit des Überschreitens der gestrichelten Linie im linken Bild). Dies entspricht etwa 10% der erwarteten Sättigung der Störungsenergie. In der Troposphäre beträgt die Fehlerwachstumszeit in der Troposphäre etwa 10 Tage, in der Stratosphäre etwa 2 Wochen, während in der Mesosphäre/unteren Thermosphäre (MLT) die Störungsenergie bereits nach 4-6 Tagen um 5 Größenordnungen angewachsen ist. Weitere Analysen der Simulationen ergaben, dass 1.) das Anwachsen der Störungen in der gröber aufgelösten Simulationen deutlich langsamer ist, so dass mit der groben Auflösung die Vorhersagbarkeit in der Mesosphäre etwa um einen Faktor von 2 überschätzt würde; 2.) die vertikale Propagation von Störungen einen deutlichen Einfluss auf die Vorhersagbarkeit in der MLT Region hat, aber die vertikale Kopplung auch zu verlängerten Vorhersagezeiten insbesondere für größer-skalige Wellen (>2000 km Wellenlänge) führt. Diese Arbeiten sind in einer Publikation zusammengefasst, die kurz vor der Einreichung in „*Journal of Geophysical Research: Atmosphere*“ steht (Garny, in preparation).

Neben den beschriebenen Arbeiten mit neu durchgeführten Simulationen wurde im Jahr 2024 Publikationen veröffentlicht, die entstanden sind unter Verwendung von Simulationen die in diesem Projekt in früheren Jahren durchgeführt wurden. Dies beinhaltet eine Publikation zu der Berechnung von stratosphärischen Transportzeiten aus dem Spurengas SF6 (Garny et al, 2024), eine Publikation zum Einfluss von plötzlichen Stratosphärenerwärmungen auf Ozon und Wasserdampf in der unteren Stratosphäre und Troposphäre (Williams et al, 2024), und eine Publikation zum Vergleich von Schwerewellenimpulsflüssen zwischen Lidar Beobachtungen, ERA5, einer 1km-Simulation mit IFS und von uns bereitgestellten EMAC Simulationen (Gupta et al, 2024).

In 2024 erschienene Publikationen:

Garny, H., Eichinger, R., Laube, J. C., Ray, E. A., Stiller, G. P., Bönisch, H., Saunders, L., and Linz, M.: Correction of stratospheric age of air (AoA) derived from sulfur hexafluoride (SF_6) for the effect of chemical sinks, Atmos. Chem. Phys., 24, 4193–4215, https://doi.org/10.5194/acp-24-4193-2024, 2024.

Williams, R. S., Hegglin, M. I., Jöckel, P., Garny, H., and Shine, K. P.: Air quality and radiative impacts of downward-propagating sudden stratospheric warmings (SSWs), Atmos. Chem. Phys., 24, 1389–1413, https://doi.org/10.5194/acp-24-1389-2024, 2024.

Gupta, A., R. Reichert, A. Dörnbrack, H. Garny, R. Eichinger, I. Polichtchouk, B. Kaifler, and T. Birner, 2024: Estimates of Southern Hemispheric Gravity Wave Momentum Fluxes across Observations, Reanalyses, and Kilometer-Scale Numerical Weather Prediction Model. *J. Atmos. Sci.*, **81**, 583–604, https://doi.org/10.1175/JAS-D-23-0095.1.

Sonstige Referenzen:

Garny, H., Walz, R., Nützel, M., and Birner, T.: Extending the Modular Earth Submodel System (MESSy v2.54) model hierarchy: the ECHAM/MESSy IdeaLized (EMIL) model setup, Geosci. Model Dev., 13, 5229–5257, https://doi.org/10.5194/gmd-13-5229-2020, 2020.

Borchert, S., Zhou, G., Baldauf, M., Schmidt, H., Zängl, G., and Reinert, D.: The upper-atmosphere extension of the ICON general circulation model (version: ua-icon-1.0), Geosci. Model Dev., 12, 3541–3569, https://doi.org/10.5194/gmd-12-3541-2019, 2019.