

# Kippunkte der Teilkomponenten im Klimasystem

**Fünf zentrale „Kippelemente“ (Grönland, Westantarktis, AMOC, Amazonas, Permafrost)** werden in der Literatur als Systeme mit positiven Rückkopplungen beschrieben. Aus Modell- und Paläodaten kennt man für jedes Feld charakteristische Schwellenwerte („tipping points“), bei deren Überschreiten ein abruptes Umschlagen erwartet wird. In der Folge stellen wir für jedes Teilfeld empirisch belegte Schwellenwerte und Übergangsmuster vor, identifizieren potenzielle Steuergrößen ( $\Theta$ ) und Kopplungsparameter (R) und verweisen auf relevante Modellprojekte (z.B. CMIP, TipMIP) sowie Schlüsselpublikationen zu Schwellen- oder Feldtheorien.

## 1. Grönlandeisschild

- **Dokumentierte Kipppunkte:** Klimamodelle und Paläodaten deuten darauf hin, dass ein **abruptes Abschmelzen** des Grönlandeisschildes oberhalb etwa 1,5–2,3 °C globaler Erwärmung einsetzt <sup>1</sup>. So finden Bochow et al. (2023) einen Grenzwert für das globale Temperatur-Overshoot (1,7–2,3 °C über vorindustriell) für einen „selbsttragenden“ Massenverlust <sup>1</sup>. Andere Studien berichten ähnliche Werte im Bereich ≈1–3 °C. Ein neueres Modell (Petrini et al. 2025) ermittelte einen kritischen Jahresmittel-Schneebilanzrückgang (SMB) von ≈230 Gt/Jahr (60 % Reduktion, entspricht ~+3,4 °C Erwärmung) oberhalb dessen der Eisverlust sprunghaft von ~50 % auf fast 100 % steigt <sup>2</sup>.
- **Übergangsmuster:** Der Grönlandeisschild zeigt ausgeprägte Nichtlinearitäten: Er erlaubt mehrere *stabile Zustände* und deutliche *Hysteresis*. Einmal unterhalb der kritischen Dicke (Schmelzverstärkung durch Höhenrückgang und Albedo-Verlust) gerät das System in einen Abwärtstrend, der sich selbst fortsetzt <sup>2</sup>. Solche Daten deuten auf sigmoidale Umschlagskurven hin (mehrere Gleichgewichtszustände) <sup>2</sup>. In Klimasimulationen sieht man: Mit einem leichten Überschießen der Temperatur tritt rasches Abschmelzen auf, selbst wenn die Erwärmung später zurückgenommen wird <sup>3</sup> <sup>2</sup>. Dies entspricht einem klassischen Kippunktverhalten mit Diskontinuitäten in der Eismasse.
- **Steuergrößen ( $\Theta$ ) und Kopplung (R):** Als Schwellenparameter  $\Theta$  kommt vor allem die lokal anstehende Eistemperatur bzw. Strahlungsbilanz in Frage, also indirekt die lokale Sommer-temperatur oder die globale Mitteltemperatur (erstere vielleicht näher am System). Der SMB (Differenz aus Niederschlag und Oberflächenabfluss) selbst ist ein wichtiges Parameter – ein positiver SMB bedeutet Nettoakkumulation, ein negativer Schwellenwert (hier ~230 Gt/Jahr) kennzeichnet den Umschlag <sup>2</sup>. Als Kopplung R wirkt vor allem die **Melt-Elevation-Rückkopplung**: Tauwasser senkt das Eisniveau ab, was die lokale Lufttemperatur weiter erhöht und weiteres Schmelzen befördert <sup>2</sup> <sup>4</sup>. Ein anderes Kopplungsphänomen ist die Änderung der Albedo (weiße Eisfläche vs. dunkles Wasser). Diese Rückkopplungen verstärken einen einmal gestarteten Abschmelzprozess.
- **Modelle:** Der Grönlandeisschild wird in Eisstrommodellen (z.B. PISM, CISM) und gekoppelten ESM-Eisschild-Simulationen (etwa für ISMIP6) behandelt. Aktuelle Forschungsvorhaben wie TIPMIP (Tipping Points MIP) führen standardisierte Experimente durch. Laut Projektbeschreibung ist das Grönland-Eisschild als typischer Kippunkt definiert: „Einmal eine kritische Erwärmung überschritten, kann die Melt-Elevation-Rückkopplung einen großskaligen Schwund auslösen“ <sup>5</sup> <sup>2</sup>. Auch viele CMIP6-ESMs enthalten schwache Eis-Schemata (z.B. vereinfachte SMB-Modelle), allerdings fehlt ein vollständig dynamisch eingebetteter

Grönlandeisschild in den meisten CMIP-Modellen. In *Stand-alone*-Modellen und im Rahmen von ISMIP6-Initiativen wurden jedoch Multi-Modellstudien zur künftigen Grönland-Eis-Entwicklung durchgeführt (etwa Goelzer et al. 2020).

- **Theorie/Publikationen:** Klassische Arbeiten definieren den Grönlandeisschild als Kipppunkt (Lenton et al. 2008 <sup>6</sup>, Schellnhuber 2009). Neuere Studien zeigen die supra- und subkritischen Zustände (Bochow et al. 2023 <sup>1</sup>). Eine aktuelle Publikation berichtet explizit einen *kritischen SMB*-Schwellenwert und abruptes Verhalten (Petrini et al. 2025 <sup>2</sup>). Diese Literatur verwendet field-ähnliche Terminologie nicht ausdrücklich, aber der Nachweis von Multi-Stabilität und schwellenhaftem Umschlag entspricht anschaulich einem Feldmodell mit Phasenübergang.

## 2. Westantarktischer Eisschild (WAIS)

- **Dokumentierte Kipppunkte:** Die Westantarktis ist stark vom Marine-Ice-Sheet-Instability-Mechanismus (MISI) geprägt. Beobachtungen und Modelle legen nahe, dass **bereits heute** die kritische Schwelle überschritten sein könnte. Lau et al. (2023) simulieren vergangene Warmzeiten und kommen zu dem Schluss, dass die WAIS-Kollaps-Schwelle praktisch bei der *aktuellen* Ozeantemperatur liegt – ein weiterer Anstieg von nur ~0,0–0,25 °C würde den Umschlag erzwingen <sup>3</sup> <sup>7</sup>. Van den Akker et al. (2025) finden in Ensemble-Simulationen, dass unter *jetzigem* ozeanischem Wärmeintrag (Thermocline um +1–2 K) die Gletscher Thwaites und Pine Island in wenigen Jahrhunderten kollabieren und mehr als 1 m globalen Meeresspiegelanstieg bewirken <sup>8</sup>. Klassische Modellprognosen (z.B. Lipscomb et al. 2021) sehen einen Kipppunkt bei etwa +1–2 K Ozeanwärmung gegenüber vorindustriell (wobei unklar ist, ob ein solches Niveau längst erreicht ist) <sup>9</sup>.
- **Übergangsmuster:** Das Umschaltverhalten ist abrupt: In Szenarien mit konstantem Klimastress fällt die Eisfläche lange langsam, dann folgt eine rasche Gletscherschmelze. In Lau et al. zeigen sich starke Sprünge in der Entleerungsrate, sobald ein Schwellenwert überschritten ist (vgl. spikes in Fig. 5b bei bestimmtem Ozeantemperaturniveau <sup>7</sup>). Die paläoglaziologische Evidenz – etwa plötzlicher SLR-Anstiege im letzten Interglazial – untermauert die Selbstverstärkung (Meeresspiegelanstieg schwächt Halt). Daher ist auch für die Westantarktis von einem mehrstufigen Gleichgewicht mit klaren Hysterese-Effekten auszugehen. Das System läuft in ein neues Zustandsmuster, wenn die Sub-Schelftemperatur einen kritischen Wert erreicht.
- **Steuergrößen ( $\Theta$ ) und Kopplung ( $R$ ):** Als entscheidender Schwellenparameter  $\Theta$  gilt die **Ozeantemperatur unter den Schelfeisen** (Thermocline-Wärme), die direkt das Basaleissthingern schmilzt. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Zufluss von Süßwasser (z.B. durch Grönlandeisverlust), der die Meeressalinität im Südpolarmeer beeinflusst. Die Feldkopplung  $R$  wird bestimmt durch den Rückkopplungsmechanismus MISI: Wenn das Schelfeis stark erodiert, rückt die Gletscherzunge auf abfallendem Grund vor – dies erhöht lokal den Eisfluss und verstärkt den Rückzug. Auch die Schwerkraftentlastung (Gletscherkräfte) kann dynamisch zum Eisverlust beitragen. In den Modellen wirken diese Rückkopplungen wie ein **positive R-Kopplungsterm**, der nach Kipppunkt überschlagen wird.
- **Modelle:** Der WAIS wird in gekoppelten Eis-/Ozeanmodellen (z.B. PISM mit Ozeanmodell) sowie in ESM-Konfigurationen mit dynamischem Schelfeis untersucht. Einige CMIP6-Modelle besitzen Eis-Simulationsmodule (z.B. AWI-FESOM), doch meist wird WAIS in speziellen Analysen betrachtet. Die *Antarctic Instability MIP* (Teil von ISMIP6) und neuere Übersichtsarbeiten (z.B. van den Akker et al. 2025 <sup>8</sup>) liefern Multi-Modell-Analysen. TipMIP (Eis- und Ozean-Domänen) plant spezifische Quellen- und Hosing-Experimente für die WAIS (Sektion 3.1 in Winkelmann et al. 2025 <sup>5</sup> <sup>10</sup>).
- **Theorie/Publikationen:** Wissenschaftler diskutieren den WAIS-Kipppunkt als „Rate-dependent tipping point“. Die hier genannten Studien (Lau et al. 2023 <sup>3</sup>, van den Akker et al. 2025 <sup>8</sup>) zeigen das plötzliche Verhalten. Speziell wird auf MISI hingewiesen (Schoof 2007). Explizit auf Schwellenfeldtheorien eingeht meist die Fachliteratur kaum; allerdings vergleichen Autoren ihre

Ergebnisse mit Phasenübergängen (z.B. „bistable states“ in Lau et al.). Ein Übersichtsartikel (Robel et al. 2019) etwa weist auf die instabile Rückkoppelung hin.

### 3. Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation (AMOC)

- **Dokumentierte Kippunkte:** Die AMOC gilt als klassisches bistables System (nach Stommel 1961). In vielen Klimamodellen tritt ein sprunghafter Umschlag auf, wenn ein kritischer Süßwasserzufluss in den Nordatlantik erreicht wird (oft auf  $O(0,1)$ - $O(1)$  Sv Niveau). Neueste Beobachtungsstudien (Ditlevsen & Ditlevsen 2023) deuten darauf hin, dass der Süßwassereintrag (hauptsächlich durch Grönland-Schmelze) bereits alarmierend nahe am Prognosebereich für einen Kollaps liegt. Sie schätzen, dass unter aktuellen Emissionspfaden ein kompletter AMOC-Kollaps möglicherweise **Mitte des Jahrhunderts** erfolgen könnte <sup>11</sup> <sup>12</sup>. Dies stützt sich auf statistische Frühwarnsignale (zunehmende Varianz und Autokorrelation) in Meeressalinitätsdaten. IPCC AR6 schätzte noch eine sehr geringe 21.-Jh.-Wahrscheinlichkeit, doch die Unsicherheit ist groß.
- **Übergangsmuster:** In Modellen zeigt der AMOC eine scharfe Bifurkation zwischen starkem Strömungszustand und gedämpftem/ausgefallenem Zustand. Die Umschlagskurve (Bifurkationsdiagramm) ist sigmoidartig: Bis nahe an den Kippunkt wirkt die AMOC halbwegs stabil, kurz davor steigen Schwankungsamplituden stark (kritisches Verlangsamten) <sup>11</sup>. In paleoklimatischen Daten tritt AMOC-Kollaps häufig während rapides Abschmelzphasen auf. Der Übergang ist oft abrupt (wenige Jahrzehnte), verläuft also nicht graduell.
- **Steuergrößen ( $\Theta$ ) und Kopplung ( $R$ ):** Das klassische Kontrollparameter  $\Theta$  ist der Süßwassergehalt/Nordatlantik-Süßwasserzufluss (z.B. durch Flüsse, Eisschmelze) oder equivalently die lokalen Temperatur- und Salzgradienten. Alternativ kann man auch die nördliche Grenztopografie oder den Meeresspiegelhöhenunterschied betrachten. Die Feldkopplung  $R$  ergibt sich aus dem Ferntransport von Wärme und Süßwasser: Wenn die AMOC schwächer wird, erwärmt sich der hohe Norden weniger, was den stratifikationsbedingten Süßwassereintrag verändert. Praktisch wirkt ein Rückkopplungsterm durch Verringerung des wärmegetriebenen Konvektionsantriebs. Manche Theorien (siehe Stommel-Boxmodelle) fassen AMOC als Gleichungssystem mit einem Rückkopplungsparameter auf.
- **Modelle:** Im Rahmen von CMIP5/6 wurden gezielt AMOC-Hosing-Experimente (z.B. AR4-Experiment „Cessation“: teilweise Abschalten) gefahren; aktuell läuft TIPMIP-Ocean, das idealisierte Frischwasserexperimente mit ESMs durchführt <sup>13</sup>. Auch auf Modellbibliotheken wie NAHosMIP oder CESM Nudging-Studien kann man verweisen. Dabei zeigen viele ESM (z.B. GFDL, HadCM3) eine Abrissbifurkation bei starkem Süßwasser. TIPMIP schlägt „Secondary Forcing“ Versuche vor (s.o.) <sup>13</sup>, d.h. synthetische Schmelzwasserhinzugaben. Außerdem gibt es interdisziplinäre Studien zur Verkoppelung der AMOC mit anderen Kippelementen (z.B. Grönlandeisschild).
- **Theorie/Publikationen:** Die AMOC wurde früh als elementarer Kippunkt behandelt (Lenton et al. 2008). Die Naturkommunikationsstudie von Ditlevsen & Ditlevsen (2023) liefert datenbasierte Abschätzungen und nennt explizit frühe Warnsignale (Kollaps mid-century) <sup>12</sup> <sup>11</sup>. Auch Boers et al. (2022, Environ. Res. Lett.) zeigten theoretisch Fallbeispiele. Zwei Frühwarnindikatoren (Autokorrelation und Varianz) sind verbreitet diskutiert (siehe z.B. Boers 2021, welches per Beobachtungen Frühwarnsignale dokumentierte). Feldtheorie-Ansätze werden eher konzeptionell erwähnt, etwa “bifurcation” oder „Doppelstable“-Analogie (Stern 2007, notiert in IPCC-Glossar).

### 4. Amazonas-Regenwald

- **Dokumentierte Kippunkte:** Der Amazonas ist durch starke Rückkopplungen in Wasserkreislauf und Vegetationsdichte gekennzeichnet. Studien nennen Schwellenwerte in

Vegetationsdeckung oder Trockenheit: Zum Beispiel zeigte ein Vegetationsmodell einen **kritischen Entwaldungsanteil von ~20 %** (akkumuliert) der Amazonas-Region: Bei Überschreitung beschleunigt sich die Waldsterblichkeit und etwa 50–60 % des Waldes könnten in offener Savanne übergehen <sup>14</sup>. Eine neuere Analyse schlägt konservativ vor, die Entwaldung unter 10 % zu halten, um großskalige Umschläge zu vermeiden <sup>15</sup>. Neben der Landnutzungsgrenze spielt die Trockenzeitlänge eine Rolle: Fernerkundungen deuten auf ~7–8 Trockenmonate als Grenzwert (außerhalb dessen Mehrdeutigkeiten entstehen) <sup>16</sup>.

- **Übergangsmuster:** Ökosystemuntersuchungen und regionalklimatische Modelle legen nahe, dass bei schrittweisem Waldverlust bifurzierendes Verhalten auftreten kann: Intakte Wälder erzeugen über Evapotranspiration Niederschlag, was sie stabilisiert, während gestörte Flächen deutlich weniger Wasserdampf abgeben (Wald→Savanne Feedback). Wenn ein Schwellenwert in Trockenheit oder Entwaldung erreicht ist, kann die Umstellung abrupt erscheinen (savannenartige Gebiete breiten sich rasch aus). Beobachtungen betroffener Regionen (z.B. Südamazonas) zeigen bereits lokal savannenähnliche Tendenzen. Die Muster sind weniger „klassisch sigmoid“ als bei Eisschilden, aber die beschriebenen „Alternativen Stabilen Zustände“ (Regenwald vs. Trockensavanne) sprechen für ein Schwellenverhalten in der Dynamik <sup>14</sup>.

- **Steuergrößen ( $\Theta$ ) und Kopplung (R):** Als Schwellenparameter  $\Theta$  kommen in Frage: die **Akkumulierte Entwaldung** (Flächenanteil) oder die **Veränderung der Trockenzeitlänge** bzw. Wasserbilanz. Beide definieren direkt die Waldgesundheit. Auch atmosphärische CO<sub>2</sub>- und Temperaturänderungen beeinflussen das System (z.B. CO<sub>2</sub>-Fertilisation kann das Schwellenverhalten teilweise verzögern). Als Feldkopplung R wirkt vor allem die *Regenkreis-Rückkopplung*: Eine Abnahme der Baumdichte reduziert die lokale Feuchtigkeit, was zu weniger Niederschlag führt und damit zu weiterem Waldverlust. In Modellen taucht diese Rückkopplung explizit auf und kann zu selbstverstärkenden Kaskaden führen <sup>14</sup>. Der Kopplungsterm ist also proportional zur Differenz von Feuchteintrag/Abgabe zwischen Wald und Savanne.
- **Modelle:** In CMIP6-Modellen gibt es dynamische Vegetationsmodelle (DGVMs) oder Landoberflächenmodelle (z.B. CLM, JULES, JSBACH), die Wald-Feedbacks zumindest teilweise berücksichtigen. Allerdings ist die Reaktion oft zu konservativ modelliert; viele Studien fanden erst in Pionierstudien (e.g. Malhi et al. 2009, also außerhalb CMIP) klare Kipppunkte. TIPMIP plant einen Biosphären-Domänenkomplex, in dem genau diese Interaktionen erforscht werden. In der Praxis wurden großräumige Amazonassimulationen mit ESMs und Biome-Modellen durchgeführt (etwa so genannte *Dynamical Global Vegetation Models* unter unterschiedlichen Trockenheits- und Landnutzungsszenarien). Die zitierte Studie von Flores et al. 2024 <sup>14</sup> ist selbst ein Beispiel für ein gekoppeltes Simulationsexperiment mit vielen Modellen.
- **Theorie/Publikationen:** In der Literatur wird der Amazonas oft im Sinne eines „Flip“-Übergangs diskutiert (Nobre et al. 2016 in der *Pariser Erklärung*; Lenton 2008 PNAS[46:L232-L242]). Flores et al. 2024 <sup>14</sup> ist eine zentrale neue Studie, die explizit Schwelleneffekte (z.B. 20 % Entwaldung) und alternative Zustände beschreibt. Sie führen ein Schwellen-Modell mit Trockenzeitlänge und Entwaldung als Größe ein. Ähnlich argumentiert die *Global Tipping Points*-Bericht 2023 (Exeter Univ.), der auf 20–40 % Waldverlust als kritischen Bereich hinweist. Theoretische Feldmodelle speziell für Wälder (z.B. boschesche Modelle) existieren seltener, doch man kann hier stark vereinfachende Landflächen- bzw. Biomassen-Modelle (mit Doppelschiebergräf etc.) heranziehen, die Mehrfachgleichgewichte besitzen (Rietkerk u. H. 2014 et al.). Zusammengefasst: Der Amazonas wird vielfach als klassisches Ökosystem-Kippelement mit dominanten Rückkopplungen beschrieben und ist ein Schwerpunktthema in Schwellentheorien der Erde <sup>14</sup>.

## 5. Permafrostregionen

- **Dokumentierte Kipppunkte:** Anders als die vorherigen Felder zeigt der Permafrost im globalen Maßstab keine eindeutige Sharptipping-Schwelle. Klimamodelle und Beobachtungen deuten auf

einen nahezu stetigen (lineareren) Temperatur-Effekt hin: Mit zunehmender arktischer Erwärmung taut immer mehr Festfrostboden auf. Großflächige Hochmoortäler („Thermokarstseen“) entstehen nur lokal abrupt bei Extremereignissen (Hitzewellen). Der jüngste Bewertungsbericht von Lenton et al. (2022) fasst zusammen, dass ein typischer Schwellenbereich für *spontanes massives Auftauen* (so genannte „abrupt thaw“) bei etwa 1,5 °C globaler Erwärmung liegen könnte (Unsicherheit 1,0–2,3 °C) <sup>17</sup>. Allerdings betonen Experten, dass Permafrost vor allem langsam und irreversibel carbon-ätzend reagiert, nicht als plötzlicher Kippunkt <sup>18</sup>.

• **Übergangsmuster:** Statt einer globalen Sigmoiden sieht man am Boden eher ein Mosaik aus lokalen Kippunkten: Wo der Boden besonders eisreich ist, kann durch Bodenabrutsch und Thermokarstmoränen sehr schnelle lokale Entfrostung erfolgen (z.B. Batagaika-Krater, Suomi 2021). Diese lokalen Sprünge führen aber nicht zu einer Kettenreaktion über Kontinente hinweg. In der Summe bleibt die Permafrost-Statistik über Jahrzehnte relativ stetig ansteigend, solange die Erwärmung langsam wächst. Es gibt also keine Beobachtung eines einzigen globalen Schwelleneffekts. Vielmehr wäre die *Summe vieler lokaler Tipping-Events* bei >1,5 °C zu erwarten (etwa im Sinne regionaler Überschreitung von Permafrostdicken-Schwellen).

• **Steuergrößen ( $\Theta$ ) und Kopplung ( $R$ ):** Das Steuerparameter  $\Theta$  ist prinzipiell die **Arktis-Erwärmung (Boden- oder Lufttemperatur)** oder die Energiebilanz am Boden (z.B. Eistemperaturschwelle). Einmal ins Tauen gebracht, koppelt sich das System über Treibhausgase: Das Feldkopplungsglied  $R$  stellt den CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>-Feedback dar. Wird der Permafrost degradiert, setzt er Treibhausgase frei (oft über Jahrhunderte), was die globale Erwärmung weiter antreibt – ein langsamer, aber *selbstverstärkender* Feedback. In vereinfachten Modellen könnte man dies als Feldkopplung  $R \approx$  (Menge freigesetzten Kohlenstoffs) pro Grad Erderwärmung abbilden. Weil Mikroprozesse vorherrschen (Bodenfeuchte, Schneeschichtdicke, Vegetationsdeckung), ist das effective Kopplungsverhalten heterogen. Man spricht oft von einer „Permafrostkarbon-Kaskade“ als Rückkopplung.

• **Modelle:** Moderne ESMs (CMIP6) enthalten oft einfache Permafrost-Kohlenstoffschemata in ihren Landmodulen (z.B. CLM, JULES, ORCHIDEE, JSBACH). Sie projizieren einen deutlichen aber schrittweisen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Erwärmung. TIPMIP hat einen eigenen „Permafrost“-Bereich: Winckemann et al. 2025 formulieren ausdrücklich das Ziel, abrupten vs. langsamem Permafrost-Verlust zu quantifizieren <sup>19</sup>. Dort wird eingeschränkt, dass Modelle oft keine abrupten thermokarst-Mechanismen abbilden. Past Model Intercomparison Projects (z.B. C4MIP) haben CO<sub>2</sub>-Freisetzung berechnet, aber meist noch ohne explizite Schwellen. Stand-alone-Modelle (Snow- und Eis-Packuntersuchungen) können jedoch einzelne lokale Kippunkte zeigen (z.B. Plots von Eistemperatur vs. Permafrosttiefe mit Multiple Stable Equilibria).

• **Theorie/Publikationen:** In der Fachliteratur gilt Permafrost oft als *keine* globale Kippunktkomponente (IPCC AR6: „kein klarer Kippunkt“). Dennoch finden sich Spekulationen über Punkt-Umschläge (z.B. NASEM 2019). Die aktuelle TIPMIP-Analyse weist darauf hin, dass lokalisierte thermokarste Prozesse bei >1,5 °C wahrscheinlicher werden <sup>19</sup>, liefert aber keine einzelne globale Schwelle. Eine review-ähnliche Publikation (Brovkin et al. 2025) kommt zu dem Ergebnis, dass der großskalige Permafrosttod allmählich erfolgt <sup>18</sup>. Armstrong-McKay et al. (2022) liste einen „PFAT“-Kippunkt bei ~1.5 °C, jedoch sind viele Modelle zu simpel, um dieser Theorie gerecht zu werden. Insgesamt gibt es wenige Arbeiten, die Permafrost mit einem Feldtheorie-Ansatz behandeln – am ehesten werden klimabedingte Feedbacks mit Auftau-Projektionen kombiniert (z.B. Turetsky et al. 2020), was einem unteren Grenzwert (Wärme) und einem Niedrig-wärme-Gefälle als Kopplung entspricht.

## Integration in ein Schwellenfeldmodell

Insgesamt lassen sich alle fünf Teifelder prinzipiell als Elemente eines erweiterten **Schwellenfeldmodells** fassen. Jeder Bereich ist durch ein (oder mehrere) Schwellenparameter  $\Theta$  charakterisiert (z.B. Temperatur, Landnutzungsanteil, SMB), die ab einem kritischen Wert zu einer

Selbstverstärkung führen. Die Rückkopplungen R koppeln die Felder gegenseitig: Erwärmtes Grönlandeis führt zu Meeresspiegelanstieg und Süßwasser, was AMOC und WAIS beeinflusst; veränderte AMOC beeinflusst etwa Niederschlag über Europa und Grönland; Permafrost-CO<sub>2</sub> verstärkt globale Erwärmung, und eine wärmere Arktis beeinträchtigt Biodiversität etc. Viele dieser Zusammenhänge sind explizit Teil des TIPMIP-Rahmens, der den systemischen Risikozusammenhang untersucht <sup>20</sup> <sup>10</sup>.

In einem theoretischen Feldmodell könnte man jedes Kippelement als räumlich ausgedehnte Variable (z.B. Eisvolumen, Wald-Biomasse, Salinität) mit einem lokalen Schwellensprung beschreiben, gekoppelt durch Reaktions-Diffusions- oder Netzwerkterme (z.B. Transport von Wärme/Süßwasser, atmosphärische Zirkulation). Die ermittelten Größen ( $\Theta$ ) bieten Ansatzpunkte: etwa globale Temperatur als äußeres Feld, das lokale Übergänge auslöst; und Kopplungsterm R wäre etwa Funktionen der Verteilung (z.B. zurückfließende Wassermenge aus dem Regenwald in andere Regionen).

**Fazit:** Jedes Teilstück zeigt experimentell begründete Schwellenverhalten und Rückkopplungen, die sich – zumindest konzeptionell – in ein übergreifendes Feldmodell integrieren lassen. Empirisch und modellseitig bekannte Parameter (z.B. kritische Erwärmungswerte, Prozentanteile von Entwaldung, Ozeantemperaturen) eignen sich als  $\Theta$ , während intern wirkende Rückkopplungen (Melt-Elevation, MISI, Wasserbilanz-Feedback, CO<sub>2</sub>-Freisetzung) als Kopplungsterm R fungieren. Die wissenschaftliche Diskussion um klimatische Kippunkte hat breit auf die Notwendigkeit hingewiesen, solche Elemente in Modellen zu verknüpfen (s. z.B. die TIPMIP-Übersicht <sup>20</sup>). Für eine mögliche Formalisierung sind die angegebenen Schwellenwerte und System-Variablen wichtige Anknüpfungspunkte: Sie ermöglichen, in einem physikalisch motivierten Feld- oder Netzwerkmodell die Bedingungen für Übergänge quantitativ einzubauen und damit die Kippelemente kohärent zu verknüpfen.

**Quellen:** Die genannten Schwellenwerte und Dynamiken stammen aus neuester Fachliteratur (z.B. Bochow et al. 2023, Lau et al. 2023, Flores et al. 2024, Petrini et al. 2025, van den Akker et al. 2025, Ditlevsen & Ditlevsen 2023) sowie aus Synthesen wie IPCC und Projektbeschreibungen von TIPMIP <sup>1</sup> <sup>3</sup> <sup>14</sup> <sup>2</sup> <sup>8</sup> <sup>11</sup>. Diese Arbeiten untermauern die hier skizzierten Kippunkt-Verhalten und bieten Daten für eine Integration in ein Schwellenfeldmodell.

---

<sup>1</sup> <sup>4</sup> Overshooting the critical threshold for the Greenland ice sheet | Nature  
[https://www.nature.com/articles/s41586-023-06503-9?error=cookies\\_not\\_supported&code=d89aa3f3-d0e8-4328-b0e4-05211f55797e](https://www.nature.com/articles/s41586-023-06503-9?error=cookies_not_supported&code=d89aa3f3-d0e8-4328-b0e4-05211f55797e)

<sup>2</sup> TC - A topographically controlled tipping point for complete Greenland ice sheet melt  
<https://tc.copernicus.org/articles/19/63/2025/>

<sup>3</sup> <sup>7</sup> Antarctic Ice Sheet tipping in the last 800,000 years warns of future ice loss | Communications Earth & Environment  
[https://www.nature.com/articles/s43247-025-02366-2?error=cookies\\_not\\_supported&code=0eab24f8-019a-42b7-b31c-cd1f51e9f42f](https://www.nature.com/articles/s43247-025-02366-2?error=cookies_not_supported&code=0eab24f8-019a-42b7-b31c-cd1f51e9f42f)

<sup>5</sup> <sup>10</sup> <sup>19</sup> ntrs.nasa.gov  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20250006500/downloads/ARomanouESDTippingPreprint.pdf>

<sup>6</sup> Kippelemente im Erdklimasystem – Wikipedia  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Kippelemente\\_im\\_Erdklimasystem](https://de.wikipedia.org/wiki/Kippelemente_im_Erdklimasystem)

<sup>8</sup> <sup>9</sup> TC - Present-day mass loss rates are a precursor for West Antarctic Ice Sheet collapse  
<https://tc.copernicus.org/articles/19/283/2025/>

**11 12** Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation | Nature Communications

[https://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w?error=cookies\\_not\\_supported&code=5878cafc-48a2-42fd-8597-4e405dceb4d9](https://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w?error=cookies_not_supported&code=5878cafc-48a2-42fd-8597-4e405dceb4d9)

**13** Ocean Domain – TIPMIP

<http://tipmip.org/ocean-domain/>

**14 15 16** Critical transitions in the Amazon forest system | Nature

[https://www.nature.com/articles/s41586-023-06970-0?error=cookies\\_not\\_supported&code=03be8b4f-7719-4505-acfc-0422413899c7](https://www.nature.com/articles/s41586-023-06970-0?error=cookies_not_supported&code=03be8b4f-7719-4505-acfc-0422413899c7)

**17** [PDF] Title: Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate ...

[https://davidarmstrongmckay.com/wp-content/uploads/2022/09/armstrong-mckay-et-al-2022\\_climate-tipping-points-reassessment\\_accepted-version-with-figures.pdf](https://davidarmstrongmckay.com/wp-content/uploads/2022/09/armstrong-mckay-et-al-2022_climate-tipping-points-reassessment_accepted-version-with-figures.pdf)

**18** Max-Planck-Institute for Meteorology: Permafrost Thaw: Gradual Change or Climate Tipping Point?

<https://mpimet.mpg.de/en/communication/news/permafrost-thaw-gradual-change-or-climate-tipping-point>

**20** The Tipping Points Modelling Intercomparison Project (TIPMIP): Assessing tipping point risks in the Earth system - Stockholm Resilience Centre

<https://www.stockholmresilience.org/publications/publications/2025-06-30-the-tipping-points-modelling-intercomparison-project-tipmip-assessing-tipping-point-risks-in-the-earth-system.html>