

# Aeon Earth

Eine begehbare Welt aus fünf Zahlen und einer echten Oberfläche ableiten  
Das Feld als Funktion der Position; zwei Provenienzen hinter einer Schnittstelle

Marcel Langjahr

Pantareon  
Pantareon Foundations

langjahr@pantareon.io · <https://pantareon.io/>

Juli 2026

## Zusammenfassung

Wir beschreiben den algorithmischen Kern von *Aeon Earth*, einem Weltgenerator, der sowohl eine prozedural erzeugte Insel als auch die echte Erde als einen einzigen begehbaren Ort darstellt. Dieses Paper handelt von den Generierungsalgorithmen — Landform, Klima, Feuchte- und Temperaturverteilung, Biomzuweisung, Artenplatzierung, Wasser — und bewusst nicht von der Rendering-Engine.

Die Architektur ruht auf einer einzigen Entscheidung: *Ein Geländefeld ist eine reine Funktion der Position, keine Datenstruktur*. Es gibt kein Höhenmosaik zusammenzufügen, keinen Resampling-Schritt und keine Nahtlogik; benachbarte Kacheln stimmen an gemeinsamen Kanten konstruktionsbedingt überein, Normale sind finite Differenzen derselben Funktion, und Kollision, Wassertiefe und Vegetation lesen alle dieses Feld statt einer Kopie. Auf diesem Kontrakt sitzen drei abgeleitete Schichten. Schicht 0 liefert Geometrie aus einer von zwei Provenienzen — einer generativen Kette aus Tektonik, Erosion und Küstenlinien-Maskierung, oder ingestierten 30 m-Terrarium-Höhendaten, verfeinert durch Rauschen unterhalb der Auflösung. Schicht 1 leitet Temperatur, Feuchte, Tageslänge, Sonnen- und Mondgeometrie, Biom und Wetter aus *fünf gespeicherten Skalaren* pro Welt plus dem Höhenfeld ab; nichts Klimatisches wird gespeichert. Schicht 2 platziert neun Arten durch multiplikatives Gaten von Klimahüllen gegen morphologische Fenster. Schicht 3 bindet das echte Jetzt: wahre solare Ortszeit, Live-Wetter, Mondphase und 9096 katalogisierte Sterne.

Wir berichten gemessenes Verhalten, nicht Absicht, aus Headless-Sonden gegen die ausgelieferten Module. Eine Welt backt in 0,77 s bei  $N=401$  und in 5,2–6,6 s bei  $N=1025$ ; 32,8% der Seeds stoßen an die Auflösungsobergrenze. Die thermische Erosion ist der dominante formende Operator mit RMS 57,7 m gegen 244 m

Relief, die hydraulische Erosion trägt 3,2 m bei, und der analytische Bathymetrie-Durchgang überschreibt anschließend 79,4% aller Zellen mit RMS 51,7 m. Die Live-Höhendekodierung ist gegen Ground Truth an Mont Blanc, Mount Everest und Challengertief verifiziert.

Wir sind ebenso ausdrücklich darin, was das System nicht ist. Die Plattentektonik ist eine unstetige Einmal-Momentaufnahme; der Erosionsdurchgang existiert weitgehend dazu, ihre Voronoi-Stufen von 57–93 m abzuschleifen. Die thermische Erosion konvergiert nicht: nach den 140 Produktions-Iterationen bleiben 10,2% der Zellen steiler als der nominale Böschungswinkel. Es gibt keine ökologische Konkurrenz, keinen Regenschatten, keine atmosphärische Zirkulation, und Wetter ist ein Zustand an der Kamera statt ein Feld. Die Verifikation besteht aus 356 handgeschriebenen Assertions über 24 Headless-Sonden hinweg, mit null klassischen Tests, null zur Hydrologie und nirgends einem Vergleich gegen gemessene Klimatologie. Das Modell ist gegen sich selbst und gegen eine einzige Referenzinsel kalibriert.

**Umfang dieses Papers:** Dies ist ein technischer Entwurfs- und Statusbericht für Partner, Lizenznehmer und technisch versierte Leser; er ist nicht zur Begutachtung eingereicht und erhebt keinen wissenschaftlichen Anspruch. Er berichtet die Algorithmen so, wie sie heute implementiert sind, mit Zahlen aus Headless-Läufen gegen die ausgelieferten Module, und trennt das sauber von dem, was entworfen, degradiert oder abwesend ist. Wo Code und interne Spezifikation auseinandergehen, berichten wir den Code und sagen es. Abschnitt 10 ist kein Anhang mit Vorbehalten; er ist die Hälfte des Inhalts.

# 1 Einleitung

Prozedurale Weltgeneratoren entscheiden sich normalerweise für eine Seite. Entweder ist die Welt erfunden — Rauschen, Erosion, Biomtabellen, endlose Variation, keine Entsprechung zu irgendeinem Ort — oder sie ist ingestiert, und dann ist sie eine Karte mit einer Kamera darin, und die Teile, die die Daten nicht abdecken, fehlen einfach.

Aeon Earth ist auf der Behauptung gebaut, dass dies eine falsche Wahl ist und dass die Naht zwischen beiden schmaler ist, als sie aussieht. Sein Nordstern steht in der Roadmap als *die begehbare Erde ohne den Menschen, verbunden mit dem echten Jetzt*: genau drei reale Achsen werden ingestiert — Topologie, Bioklima und Gegenwartszustand — und alles andere wird prozedural abgeleitet, sodass es plausibel statt wahr ist. Zivilisation fehlt bewusst und darf nur als Echo auftreten.

Die folgenreiche Architekturentscheidung ergibt sich daraus, beide Provenienzen in einer Engine haben zu wollen: **die Welt wird allem über ihr als ein Satz reiner Abtastfunktionen über die Position dargeboten**, nicht als Arrays, Kacheln oder Meshes. Ein Feld bietet `heightAt`, `flowAt` und einen Klima-Sampler. Ob diese Funktionen von einem gebackenen generativen Höhenfeld oder von gestreamten Höhenkacheln getragen werden, ist für ihre Aufrufer unsichtbar. Jedes System oberhalb von Schicht 0 — Klimaableitung, Biomklassifikation, Artenplatzierung, Wassertiefe, Schrittgeräusch — ist daher genau einmal geschrieben und läuft unverändert auf einer erfundenen Insel und auf dem echten Zentralmassiv.

Drei Konsequenzen folgen aus der Konstruktion, statt nachträglich aufgesetzt zu werden.

**Nähte können nicht existieren, wo es kein Mosaik gibt.** Weil die Höhe eine Funktion der Position ist, werten zwei benachbarte Kacheln, die ihre gemeinsame Kante auswerten, denselben Ausdruck an denselben Koordinaten aus. Normalen stammen aus finiten Differenzen dieser Funktion und nicht aus der Mesh-Topologie, deshalb ist die Schattierung über Kachelgrenzen hinweg stetig; Kollision und Wasser lesen sie direkt, deshalb sind der begehbare Boden und der sichtbare Boden dasselbe Objekt. Nichts wird zusammengenäht, also kann nichts falsch zusammengenäht werden.

**Klima wird abgeleitet, nicht gespeichert.** Eine Welt speichert fünf Skalare und ein Flag. Temperatur, Saisonalität, Feuchte, Tageslänge, Sonnen- und Mondrichtung, Biom, Arteneignung und Wettertendenz werden alle bei Bedarf daraus neu berechnet. Der Vorgängerentwurf speicherte diskrete Klimazonen mit fest verdrahteten Artenlisten und

Gelände-Flags; eine Welt war subtropisch *oder* gemäßigt. Im abgeleiteten Modell liegt ein Punkt bei Breite 12 mit Feuchte 0,7 zwischen dem, was früher zwei Schubladen waren, und allein die Höhe bewegt einen Punkt auf einer einzigen Landmasse durch Biome.

**Die Komposition ist durchgängig multiplikativ.** Eignung, Biom-Zugehörigkeit und Wettertendenz sind allesamt Produkte glatter Fenster über stetigen Feldern. Das ist das charakteristische Muster des Systems, es ist das, was die Schichten ohne Sonderfälle komponierbar macht — und, wie §9 mit Zahlen zeigt, es ist zugleich der Ursprung des folgenreichsten Defekts, den wir berichten.

## 2 Architektur

Vier Schichten, von denen nur die erste zwei Implementierungen hat.

**Schicht 0 — Geometrie.** Ein Höhenfeld und seine abgeleiteten Felder, hinter der Abtast-Schnittstelle. Zwei Provenienzen: *generativ* (§4) und *ingestiert* (§5). Dies ist die einzige Schicht, die weiß, in welcher Welt sie sich befindet.

**Schicht 1 — Klima.** Fünf gespeicherte Skalare plus Höhe und Zeit ergeben Temperatur, Feuchte, Tageslänge, Himmelsgeometrie, Biom und Wetterzustand. Reine Funktionen, keine Speicherung, kein Zustand außer zwei Uhrenphasen.

**Schicht 2 — Ökologie.** Neun Arten mit Klimahüllen und morphologischen Fenstern, platziert durch gegatetes stochastisches Sampling gegen ein gemeinsames Abstandsraster.

**Schicht 3 — das Jetzt.** Echte Sonnenzeit, Live-Wetter, Mondphase und ein echtes Sternfeld, gebunden an die tatsächlichen Koordinaten des Spielers. Optional und stets nachgebend: jede manuelle Übersteuerung setzt die entsprechende Live-Achse außer Dienst, statt gegen sie zu kämpfen.

Die Schichtgrenze, auf die es am meisten ankommt, liegt zwischen 0 und 1, denn dort verschmelzen die beiden Provenienzen. Darüber ein Codepfad. Darunter zwei — und die ehrliche Aussage dieses Papers lautet, dass die beiden weniger symmetrisch sind, als die Schnittstelle nahelegt. Die Insel führt acht ökologische Achsen; die Erde führt drei. Die Insel berechnet ein vollständiges Wasserfeld mit Seen auf ihren Überlaufhöhen; die Erde hat eine Ebene bei null.

Eine zweite Entwurfsregel durchzieht die Ökologieschicht: *Vegetation und Biome sind Geschwister, keine Hierarchie.* Es gibt nirgends eine Biom-zu-Arten-Tabelle. Eine Art ist vollständig durch ihre eigene Klimahülle definiert, und das Biom wird unab-

hängig davon aus derselben Temperatur und Feuchte klassifiziert. Wo die beiden am Boden übereinstimmen, stimmen sie überein, weil sie dieselben Felder lesen — nicht weil der einen von der anderen erzählt wurde.

### 3 Der Positions-Kontrakt

Alles Obenstehende beruht darauf, dass das Feld eine echte Funktion der Position ist: gleiche Koordinaten, gleiche Höhe, unabhängig davon, welche Kachel fragt, auf welcher Detailstufe, nach wie vielen Ursprungsverschiebungen. Das ist das Gegenstück zu einem arithmetischen Determinismus-Kontrakt in einem Konsenssystem, und es verdient dieselbe Prüfung, denn wenn er hält, beseitigt er eine ganze Klasse von Bugs durch Konstruktion, und wenn er still versagt, erzeugt er Artefakte, die wie Rendering-Probleme aussehen und keine sind.

Für den Erd-Pfad ist der Kontrakt direkt in das Modul geschrieben:

```
function heightAt(wx, wz, zoom) {
  const ll = frame.toLatLon(wx, wz);
  const macro =
    dem.sampleAt(ll.lat, ll.lon, zoom)
    ?? bakedElevation(ll);
  const detail = fbmErosive(ll) * amp;
  return macro + detail;
}
```

Position hinein, Höhe heraus, kein verborgener Zustand, keine Abhängigkeit vom gleitenden Ursprung. Vier LOD-Ringe, die Kollision, die Wasseroberfläche und jede Pflanze lesen diese eine Funktion.

**Und der Bruch ist in der Signatur sichtbar.** `zoom` ist ein drittes Argument. Die vier LOD-Ringe wählen für denselben Boden unterschiedliche Höhen-Zoomstufen — `z14`, `z13`, `z11` und `z10` am Äquator — sodass `heightAt(x, z, z14) ≠ heightAt(x, z, z11)`. Die Reinheit hält innerhalb eines Rings und versagt zwischen Ringen. Diese eine Tatsache erklärt die Artefakte, gegen die das Projekt tatsächlich gekämpft hat: die LOD-Ring-Konfiguration trägt eine vertikale Trennkonstante von 160 m, deren erklärter Zweck es ist, grobe Ringe daran zu hindern, durch feine hindurchzustößen, und das ist ein 160-Meter-Zugeständnis an einen Kontrakt, der nicht hält. Es bedeutet außerdem, dass der begehbare Boden abseits des innersten Rings nicht der sichtbare Boden ist, denn das Kollisionsfeld ruft `heightAt` ohne Zoom-Argument auf und erhält daher immer die feinste Stufe.

Drei weitere Grenzen des Kontrakts, alle gemessen:

**Das Detailrauschen ist außerhalb des innersten Rings unterabgetastet.** Das Verfeinerungs-`fbm` hat eine feinste Oktave nahe 18 m gegenüber Vertexabständen von 27, 82 und 288 m auf den Ringen 1–3. Dieselbe Funktion, auf verschiedenen Rastern abgetastet, liefert verschiedene Oberflächen — eine zweite, unabhängige Quelle derselben Divergenz.

**Die Verfeinerung ist anisotrop.** Das Detailrauschen ist auf Grad indiziert, skaliert mit Metern pro Grad *am Äquator*, sodass seine Strukturen bei 60° Breite in Ost–West-Richtung halb so breit sind wie in Nord–Süd-Richtung. Die prozedurale Lithologieschicht dagegen ist auf absolute Weltmeter indiziert und ist isotrop; die beiden prozeduralen Schichten verwenden unterschiedliche Koordinatenkonventionen.

**Der generative Determinismus ist über Engines hinweg ungetestet.** Die Rauschgrundlage der Insel ist ein `fract(sin(·))`-Hash. Wiederholte Bakes eines Seeds in einem Prozess sind bit-identisch, aber `Math.sin` ist vom Sprachstandard nur implementierungsnah genähert, und die nachgelagerte Tropfenerosion ist chaotisch und auf Schwellwerte gegatet. Reproduzierbarkeit über Engines hinweg wurde nie geprüft, und das ist die natürliche Stelle, an der sie bricht.

Der generative Pfad schwächt außerdem seine eigene Seed-Ableitung. Sechs gesalzene Ströme werden als unabhängig beschrieben, aber alle sind affine Bilder einer einzigen Multiplikation: erhöht man den Seed um eins, verschiebt sich *jeder* Strom um genau 0,38197. Form, Tektonik-Regime, Vulkanwurf, Seenumwurf und Breite bewegen sich daher im Gleichschritt, sodass ein Seed-Sweep eine eindimensionale Kurve statt eines sechsdimensionalen Raums durchläuft. Zwei Salt-Konstanten kollidieren zusätzlich, und innerhalb des Vulkans setzt ein Wurf sowohl Größe als auch Azimut, was sie perfekt korreliert macht.

### 4 Schicht 0a — Die generative Insel

Ein Seed liefert den Weltmaßstab (0,5–3,0× einer Basis von 1600 m, Mittel 2453 m), einen Archetyp, ein tektonisches Regime und eine Rasterauflösung mit Zielwert 3 m-Zellen, gedeckelt bei  $N=1025$ . Sechzehn sequentielle Durchgänge laufen dann über ein einziges `Float32Array`.

Die Basishöhe ist ein planares Voronoi-Tektonikfeld: 4–13 Platten je nach Regime, jede mit einem Driftvektor und einer kontinentalen oder ozeanischen Basishöhe. Grenzeffekte werden nicht in konvergente, divergente und

Transform-Typen klassifiziert; stattdessen wird für die nächstgelegene Platte die Konvergenz der Drift jeder anderen Platte auf die Verbindungsrichtung projiziert und mit einem gaußschen Nähegewicht akkumuliert, sodass Hebung und Rift als positiver und negativer Teil einer einzigen Größe entstehen und Transformgrenzen als der Fall herausfallen, in dem nichts passiert.

Ein Küstenlinien-Regimefeld  $\Phi$  — ein einzelnes niederfrequentes 3-Oktaven-Rauschen — leistet dann ungewöhnlich viel Arbeit für seine Kosten: es setzt die Weichheit der Landmaskenkante, die Strandbreite sowie das Profil von vorgelagertem Schelf und Riff. Ein Feld, drei gekoppelte Konsequenzen, weshalb Küstenlinien sich lesen, als gehörten sie zu ihrer Insel, statt unabhängig randomisiert zu sein. Das ist die ökonomischste Idee in der generativen Kette.

Es folgt die Erosion, und ihre gemessenen Beiträge sind nicht das, was das Vokabular des Codes selbst nahelegt. Gegen 244 m Relief auf der Referenzwelt:

| Operator                       | RMS-Wirkung   | Kosten      |
|--------------------------------|---------------|-------------|
| thermische Böschung, 140 Iter. | 57,7 m        | 126 ms      |
| Laplace-Glättung, 3 Iter.      | 0,10 m        | $\approx 0$ |
| hydraulische Tropfen           | 3,2 m         | 286 ms      |
| Beckenaushub                   | lokal         | 16 ms       |
| <b>analytische Bathymetrie</b> | <b>51,7 m</b> | 151 ms      |

Tabelle 1: Formgebende Operatoren auf der Referenzinsel,  $N=401$ , 244 m Relief. Der Bathymetrie-Durchgang überschreibt die beiden Erosionsdurchgänge auf 79,4% der Zellen.

Drei Lesarten folgen, und wir benennen sie lieber schlicht, als die Durchgangsnamen etwas anderes nahelegen zu lassen. Die thermische Böschung ist der dominante formgebende Operator, und ihre dominante Aufgabe ist die Reparatur eines Artefakts: die Voronoi-Basishöhe ist über Plattengrenzen hinweg eine harte Stufenfunktion, die vertikale Wände von 57–93 m innerhalb einer einzigen 3 m-Zelle erzeugt, und der Böschungsdurchgang mahlt sie zu Rampen. Sie konvergiert außerdem nicht — nach den 140 Produktionsiterationen sind 10,2% der Zellen immer noch steiler als der  $45^\circ$  Böschungswinkel, *mehr* als vor Beginn des Durchgangs, und die Zahl fällt bei 1000 Iterationen immer noch. Masse wird exakt erhalten, der Prozess ist also eher eine stationäre Mühle als eine Relaxation; das Ergebnis wird durch die Iterationszahl gesetzt, nicht durch den Böschungswinkel. Die hydraulische Tropfenerosion ist eine Oberflächentextur bei 3 m, im Quelltext ehrlich als solche bezeichnet. Und unterhalb von 10 m Wassertiefe blendet die analytische Bathymetrie auf 100% über, sodass beide Erosionsdurchgänge auf vier

Fünfteln der Karte verworfen werden.

Abgeleitete Felder sind D8-Abflussakkumulation ohne Senkenfüllung, ein perzentil-normalisiertes Sedimentablagerungsfeld, das nachgelagert als Proxy für Bodenfruchtbarkeit dient, und eine Zweidurchgangs-Chamfer-Distanz zur Küste. Zwei in der Klimaspezifikation benannte Felder — Konkavität und Exposition — existieren als Parameter, die kein Aufrufer je liefert, wodurch zwei der vier Feuchteterme und ihre Konstanten tot sind.

## 5 Schicht 0b — Die ingestierte Erde

Zwei echte Höhenquellen auf sehr verschiedenen Skalen, dazu eine Verfeinerung.

**Gebackenes Bioklima.** Eine planare Binärdatei von 3,1 MB bei  $1024 \times 512$  (39 km-Zellen) trägt Höhe, Mitteltemperatur, Feuchte und Eisanteil, offline gebacken aus CHELSA-TraCE21k-Monatsniederschlag und -temperatur zu einer vorindustriellen Zeitscheibe und aus ETOPO-2022-Relief. Feuchte ist ein log-komprimierter Ariditätsindex des Jahresniederschlags, keine relative Luftfeuchte — ein Punkt, auf den wir in §10 zurückkommen. Dieses Feld ist der immer verfügbare Boden: grob, glatt und nie abwesend.

**Gestreante Höhe.** Terrarium-Terrain-RGB-Kacheln von AWS Open Data, Zoom 6–14, dekodiert als  $R \cdot 256 + G + B/256 - 32768$  Meter. Die Bodenabtastung bei z14 beträgt 9,55 m am Äquator und 6,14 m bei  $50^\circ$ . Der Zoom wird so gewählt, dass der Abtastabstand gerade feiner ist als der Vertexabstand — die Daten sollen die Wahrheit sein und das Rauschen soll nur darunter auffüllen.

Zwei technische Entscheidungen sind hier festhaltenswert, weil beide aus Fehlschlägen stammen.

Das Modul trägt seinen eigenen PNG-Dekoder — Chunk-Parser, `DecompressionStream`-Inflate, Paeth-Entfilterung — weil der naheliegende Weg über `createImageBitmap` plus `OffscreenCanvas` unter WebGPU *stillschweigend* wirft. Jede Kachel landete in einem Fehlerzustand, und der gesamte Planet fiel still auf 39 km-Auflösung zurück, ohne dass irgendwo ein Fehler sichtbar wurde. Der Ersatz hat eine nützliche zweite Eigenschaft: ein Codepfad bedient den Browser und die Headless-Sonden, also ist das Getestete das Ausgelieferte.

Der Sampler ist synchron und gibt `null` zurück, statt zu warten. Die Höhe wird einige tausend Mal pro Kachel ausgewertet und kann nicht asynchron sein, deshalb liefert ein Cache-Miss sofort das grobe Makro und plant den Abruf ein; wenn die Kachel eintrifft, werden ansässige Meshes an Ort und Stelle

nachgefüllt und schärfen sich sichtbar. Beide defensiven Details in diesem Pfad — ein NaN-Guard, weil NaN durch einen Null-Coalescing-Fallback hindurchgeht und die Kollision vergiftet, und begrenzte Wiederholversuche, weil ein einzelner Netzwerkaussetzer sonst eine Kachel dauerhaft grob machte — wurden gegen beobachtete Bugs geschrieben.

Die Verfeinerung darüber ist ein erosives fBm fester Frequenz mit 30 m Amplitude, mit oktavenweiser Dämpfung durch den akkumulierten Gradienten, was glatte Ebenen und ausgeprägte Grate ergibt, ohne irgendetwas zu simulieren. Es ist eine statische Aufteilung, keine adaptive: das Rauschen kennt die lokale Datenauflösung nicht, also fügt es in den Tropen, wo die Zoom-Deckelung bindet, Relief unterhalb der Abtastgrenze hinzu.

Die Geometrie ist eine Vier-Ring-Clipmap mit gleitendem Ursprung,  $7 \times 7$  Kacheln je Ring, von 256 m-Kacheln bei 8 m Vertexabstand hinaus bis zu 6912 m-Kacheln bei 288 m und einem 24 km-Horizont. Die  $3 \times$ -Leiter ist erzwungen und nicht gewählt: ein früherer  $9 \times$ -Sprung machte das innere Loch kleiner als eine grobe Kachel, sodass der grobe Ring nie ausgeschnitten wurde und ein Band davon im Nahfeld dauerhaft freilag.

## 6 Schicht 1 — Klima

Fünf Skalare werden einmal ausgewürfelt und festgesetzt: vorzeichenbehaftete Breite, Feuchte auf Meeressniveau, Starttag, Startzeit und initiale Mondphase. Alles Folgende wird daraus neu berechnet.

$$\begin{aligned} T_{\text{mean}} &= 28 + (-43) (|\phi|/90)^{1,8} \\ \Delta T_{\text{seas}} &= \cos\left(2\pi\left(d - \frac{1}{2}\right)\right) \cdot 18 \cdot s(\phi) \cdot \text{sign } \phi \\ \Delta T_{\text{diur}} &= \cos\left(2\pi\left(t - \frac{1}{2} - \ell\right)\right) \cdot 8 \cdot (1 - h_0) \\ T &= T_{\text{mean}} + \Delta T_{\text{seas}} + \Delta T_{\text{diur}} - 6,5 \frac{z}{1000} \end{aligned}$$

mit  $s(\phi) = |\phi|/90$  als Saisonalitätsstärke und  $\ell$  als breitenabhängiger thermischer Verzögerung, die das Tagesmaximum nahe 14:30 statt auf den Mittag legt. Die Feuchtekopplung im Tagesgangterm ist gut eingesetzte echte Physik: trockene Luft schwingt zwischen Tag und Nacht weiter aus, also fühlen sich eine Wüste und eine Küste bei gleicher Mitteltemperatur verschieden an, und ein einziger gespeicherter Skalar erledigt zwei Aufgaben.

Die tatsächlich ausgewertete Feuchte reduziert sich auf  $h_0 + 0,25 f - 0,30 \max(0, -T)/30$  über der Abflussakkumulation  $f$ , wobei die Tal- und Grat-Terme unerreichbar sind.

Die Himmelsgeometrie ist der sauberste Teil des Modells. Statt die Abbildung von Zeit auf Sonnenwinkel zu verbiegen, damit sie zu einer berechneten

Tageslänge passt — was die interne Spezifikation vorschlug und als invasiv markierte — wertet die Implementierung die sphärische Standardbeziehung  $\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H$  direkt aus, und korrekte Tageslänge, Polartag und Polarnacht fallen einfach heraus. Der Mond läuft auf seiner eigenen synodischen Periode mit geneigter Bahn, und seine Phase treibt einen echten Terminator auf dem Mond-Quad. Auf der Erde ist die Uhr wahre solare Ortszeit einschließlich der Zeitgleichung — für die Beleuchtung korrekter als eine politische Zeitzone, angesichts der Konvention der Engine, dass  $t=0,5$  die Kulmination ist.

Biome sind neun Klassen im Whittaker-Stil, jede ein gaußsches Fenster im normalisierten Temperatur-Feuchte-Raum, mit hartem Argmax: kontinuierliche Zugehörigkeit, diskretes Ergebnis, ein Biom pro Zelle.

Ein Detail hier ist ein wirklich lehrreicher Design-Befund, und es ist die Art von Sache, für deren Festhalten dieses Paper existiert. Der Biom-Index reist in einem Vertexfarbkanal zum Shader und wird daher *linear über Dreiecke hinweg interpoliert*. An einem steilen Hang unterscheiden sich benachbarte Vertices um mehrere Indizes, und der Shader läuft durch jede Klasse dazwischen. Als die hellen Wüsten- und Savannengelbs numerisch zwischen Waldgrün und Alpinweiß lagen, strich jede Bergflanke sichtbar durch Gelb und erzeugte Zickzack-Banding. Der Fix lag nicht im Shader: die Taxonomie wurde umgeordnet, sodass die Kalt-zu-Grün-Rampe zusammenhängend ist und die hellen Klassen ans Ende geheftet sind, wo sie nie im Inneren eines Durchlaufs liegen können. **Die Datenkodierung schränkt die Reihenfolge der Klassifikation ein.** Eine Sonde bewacht diese Reihenfolge jetzt.

Das Wetter ist eine Semi-Markov-Kette über neun Zustände mit eingeschränktem Übergangsgraphen — Stürme können nicht direkt in klaren Himmel übergehen — in der die Tendenzen Produkte glatter Rampen über dem geglätteten kameralokalen Klima sind. Zwei Eigenschaften sind präzise festzuhalten. Die Übergangswahrscheinlichkeit ist die rohe Tendenzsumme, gedeckelt bei 0,9, und keine normalisierte Zeile, schwache Tendenz bedeutet also Persistenz. Die Verweildauer wird gleichverteilt aus zustandsweisen Bereichen gezogen statt geometrisch, was sie zu einer Semi-Markov-Kette macht und was einen Sturm seine natürlichen 8–20 Minuten dauern lässt. Die Kälteleiter umgeht die Regendentendenz vollständig, weil der konvektive Faktor sie unterhalb von  $-2^\circ\text{C}$  deckelt und Blizzards sonst unerreichbar wären. Eine Zerfallskarte flickt echte absorbierende Zustände: von einem Regensturm in ein arides Klima zu laufen

tötet jede Austrittstendenz, und ohne sie regnet es in der Wüste ewig.

Die Wetteruhr ist von der Weltuhr getrennt, und das ist eine echte Design-Idee und kein Workaround. Den Zeitfluss auf null zu setzen friert die Himmel-suhr ein — Sonne, Mond, Jahreszeit, Tageszeit — während Wetter, Windrichtung und Wolkendrift auf einer umgebenden Echtzeituhr weiterlaufen. Ein Sturm dauert auch in eingefrorenem Licht seine acht echten Minuten.

## 7 Schicht 2 — Ökologie

Neun Arten, jede mit einer Klimahülle, morphologischen Fenstern, einer Zieldichte pro Hektar sowie Skalierungs- und Platzierungsparametern. Die Zugehörigkeit zur Hülle ist ein Produkt zweier Raised-Cosine-Fenster,

$$w(v) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(\pi \tau(v)), \quad \text{fit} = w_T \cdot w_H$$

wobei  $\tau$  vom Toleranzrand zum Optimum hochläuft. Die Annahme multipliziert dies mit einer morphologischen Passung — Fenster über Hangneigung, Höhe über Wasser, Flussnähe und Sedimentfruchtbarkeit — und mit einem Cluster-Gate pro Art, das aus deren eigenem Rauschfeld mit einem artspezifischen Offset abgeleitet wird, sodass verschiedene Arten in dekorrelierten Flecken zusammenklumpen.

Auf der Insel wird ein Kandidat aus Landzellen gezogen, gejittert, hart gegatet und mit einer Wahrscheinlichkeit gleich seiner Eignung angenommen, dann gegen ein gemeinsames Abstandsraster mit variablem Radius geprüft, wobei Arten mit der größten Grundfläche zuerst platziert werden. Auf der Erde ist die Stichprobennahme ein gejittertes Ganzzahlraster, bei dem jede Ziehung ein Hash des Zellindex ist, gesalzen mit dem Artnamen, was die Platzierung geo-deterministisch und stabil über Ursprungsverschiebungen hinweg macht — per Sonde verifiziert.

Zwei Asymmetrien zwischen den Pfaden sind absichtlich und dokumentiert. Die Erde wertet drei der acht Eignungsachsen aus, weil das Kachelfeld weder Fluss noch Sediment liefert und die Höhenfenster der Insel auf 200 m Inselrelief kalibriert sind und jeden echten Berg kahl räumen würden. Und die Erde wendet einen Feuchte-Skalierungsfaktor von 0,82 an, um den Wertebereich des gebackenen Feldes in Hüllen einzupassen, die von Hand für die Insel gesetzt wurden — mit der Folge, dass Vegetation und Bodenfärbung am selben Punkt aus unterschiedlichen Feuchtwerten rechnen.

**Es gibt keine Konkurrenz, und das ist die ehrliche Schlagzeile dieser Schicht.** Keine Funktion bewertet zwei Arten für einen Ort gegeneinan-

der. Ein Dominanz-Argmax existiert, wird aber nur von einem Diagnosewerkzeug aufgerufen, nie in der Produktion. Über 1024 Standorte pro Region gemessen, hat jede Art, die irgendwo auftritt, an 100% der Standorte eine Eignung ungleich null; es gibt überhaupt keine Nischentrennung aus dem Klimamodell. Was auf dem Bildschirm als Artentrennung gelesen wird, ist das dekorrelierte Cluster-Rauschen plus unterschiedliche Zieldichten. Es gibt keine Sukzession, keinen Nachbarschaftseffekt, keine Kronenbeschattung, kein Deckungsbudget und keinen Zeitbegriff. Der einzige echte Ausschluss ist räumlich: Auf der Erde gibt das gemeinsame Raster eine Pflanze pro Zelle, sodass der Gewinner über die Stammgrundfläche entschieden wird — eine Eiche bei Eignung 0,02 verdrängt Gras bei 0,9.

## 8 Wasser

Auf der Insel ist Wasser ein Höhenfeld statt eines Niveaus. Eine Priority-Flood-Füllung mit meeresbewusstem Seeding — Ozeanzellen auf Meeresspiegellhöhe geseedet, Randzellen auf ihrer eigenen Höhe — gibt jedem geschlossenen Becken seine Überlaufhöhe als Fläche, sodass Seen auf hydrologisch korrekten Höhen liegen und ein einziges Mesh beliebig viele Niveaus trägt. Ein Zusammenhangskomponenten-Durchgang trocknet dann jeden Nicht-Ozean-Körper unter 40 Zellen aus, weil die Füllung sonst zahllose Ein-Zell-Pfützen erzeugt, und ein Ariditäts-Term kann diese Schwelle auf unendlich setzen, sodass trockene Welten überhaupt keine Seen haben.

Flüsse werden nicht aus der Abflussakkumulation abgeleitet. Sie stammen aus einem Quellsee-Archetyp: Ein Becken wird gestanzt, sein Überlauf rand wird abgetastet, eine Quelle wird außerhalb davon platziert, und eine Gradientenabstiegs-Kerbung läuft bergab mit einer monotonen Höhenklemmung. Der Erosionsdurchgang berechnet zwar ein Tropfen-Flussfeld, aber nichts im Wassersystem liest es; es speist nur Vegetation, Feuchte und Umgebungsklang.

Die Kopplung zwischen Erosion und Wasser ist daher einseitig gerichtet und rein geometrisch: Die Erosion formt Höhen, die Flutung liest Höhen. Es gibt keine Massenbilanz, kein Niederschlags- oder Verdunstungsbudget und keine Zeitentwicklung. Das Feld wird einmal beim Backen berechnet und nie aktualisiert. Das ist deutlich mehr als eine Ebene auf fester Höhe — und deutlich weniger als Hydrologie.

Auf der Erde *ist* es eine Ebene auf Höhe null. Seen und Flüsse verlangen das endliche Priority-Flood-Feld, das die Insel hat und der Streaming-Pfad nicht. Unter Wasser ist ein kanalweises Beer-Lambert-Medium mit tiefenabhängiger Verdunkelung und

Entsättigung die eine wassernahe Komponente mit echter numerischer Abdeckung.

## 9 Gemessene Ergebnisse

Alle Zahlen aus Headless-Läufen gegen die ausgelieferten Module.

**Generierungskosten.** 0,77s bei  $N=401$ ; 5,2–6,6s bei  $N=1025$ , was 32,8% der Seeds erreichen. Die Insel baut ein einziges Mesh von bis zu 2,1 M Dreiecken ohne Chunking oder LOD; der Erd-Pfad streamt Kacheln mit einem Resampling-Budget pro Frame.

**Höhentreue.** Der Dekodierpfad ist gegen Ground Truth verifiziert: Mont Blanc innerhalb 3000–5200 m bei z14, Mount Everest innerhalb 7500–9000 m bei z13 und das Challengertief gegen bekannte –10 900 m. Die Übereinstimmung des Höhendatums zwischen gestreamten Kacheln und dem gebackenen Makro wird an vier flachen Landstandorten innerhalb von 300 m mittlerem absolutem Fehler geprüft. Das gebackene Makro selbst erreicht als Spitze 6138 m gegen die 8849 des Mount Everest — die Downsampling-Kette flacht Extreme um rund 30% ab, und genau das wiederherzustellen ist der Daseinszweck der gestreamten Schicht.

**Ökologisches Ergebnis.** Hier zeigt das multiplikative Kompositionsmuster seine Kosten, und die Zahlen sind unschmeichelhaft genug, um sie abzu drucken.

| Region       | Pflanzen | Zusammensetzung              |
|--------------|----------|------------------------------|
| Amazonas     | 3808     | 88% Gras/Farn, 19 Bäume      |
| Mitteleuropa | 3446     | 79% Gras, 0 Eiche            |
| Taiga        | 620      | 100% Fichte, kein Unterwuchs |

Tabelle 2: Gemessene Artenzusammensetzung an drei echten Koordinaten, 1024 Standorte pro Region gesampelt.

Der Mechanismus ist exakt und folgt aus der Fensterform. Ein Raised-Cosine-Fenster hat an seinen Rändern die Ableitung null, verhält sich dort also quadratisch: Ein Punkt 10% innerhalb der Toleranzflanke erreicht 0,025, nicht 0,1. Über zwei Achsen multipliziert ist die Ecke quartisch. Die Laubbaum-Hülle reicht bis höchstens 26 °C, und der Amazonas liegt bei 24,8, was 1,2 Grad innerhalb der Flanke landet — und der Regenwald bekommt im Wesentlichen keine Bäume. Die Hüllen selbst haben keine Datenprovenienz; alle 54 Klimazahlen sind von Hand gesetzt, und die eine Art, die nach einem echten Taxon benannt ist, ein Mojave-Endemit, gewinnt das Dominanz-Argmax quer über das semiaride Anatolien.

Der Insel-Pfad degradiert anders: Weil das Platzierungsziel pro Hektar *gesamter* Landfläche gesetzt ist, die Annahme aber gegen die Eignung gezogen wird, ist das Ziel unerreichbar, sobald die mittlere Eignung sinkt, und der Sampler hat keinen frühen Ausstieg. Eine gemessene Welt verwarf rund 40 Millionen Kandidatenstichproben und platzierte überhaupt nichts.

**Verifikation.** Es gibt kein Test-Framework, kein CI und nirgends im Repository einen klassischen Test: Suchen nach `assert()`, `expect()`, `describe()` und `selftest` liefern null. Was stattdessen existiert, sind 24 Headless-Sondenwerkzeuge mit 356 handgeschriebenen numerischen Assertions samt Pass/Fail-Meldung und Exit-Codes.

| Bereich                               | Assertions |
|---------------------------------------|------------|
| Live-Schicht, Sonnenzeit              | 35         |
| Klanginvarianten                      | 31         |
| Wetterkopplung                        | 31         |
| Atmosphäre/Klima-Matrix               | 27         |
| Höhendekodierung und Wiederholversuch | 24         |
| Unterwassermedium                     | 19         |
| Bewuchsplatzierung, Nischen           | 32         |
| Klima, Kacheln, Sterne, Sonstiges     | 157        |
| <b>Hydrologie</b>                     | <b>0</b>   |

Tabelle 3: Numerische Abdeckung. Der 1349-zeilige Wasser-Cluster hat genau eine verifizierte Komponente: das 56-zeilige Unterwassermedium.

Das sind echte Prüfungen — hemisphärische Symmetrie bis  $10^{-9}$ , Beer–Lambert-Identität bis  $10^{-12}$ , Kachelabdeckungs-Invarianten unter einem vollständigen Sub-Kachel-Offset-Sweep, byte-identisches wiederholtes Dekodieren. Aber ihre Reichweite ist ungleich, und zwei Grenzen sind von Belang. Die Wasser-Vorschauwerkzeuge rendern aus einem handgepflegten JavaScript-Spiegel des Shaders statt aus dem Shader selbst, und die projekteigene Dokumentation warnt, dass der Spiegel driften kann. Und die Zusammensetzungs-Fehlschläge in der Tabelle oben haben jede existierende Sonde grün passiert, weil die Sonden Anwesenheit und Abwesenheit an Referenzkoordinaten assertieren und nichts ein Verhältnis assertiert.

## 10 Was nicht wahr ist

Wir benennen die Grenze lieber, als das Vokabular etwas anderes nahelegen zu lassen, denn die meisten dieser Systeme sind nach Prozessen benannt, die sie nicht ausführen.

- **Die Tektonik ist eine Momentaufnahme, keine Genese.** Eine Voronoi-Partition mit

Driftvektoren, einmal ausgewertet. Keine Zeitschritte, keine Plattenbewegung, keine orogene Geschichte. Ihre Grenzen sind unstetig — bis zu 92,7 m über eine 3 m-Zelle hinweg — aus zwei unabhängigen Quellen: der harten Basishöhenstufe und der Renormierung, die umschaltet, wenn die nächstgelegene Platte wechselt.

- **Die thermische Erosion erreicht ihr angegebenes Kriterium nicht.** 10,2% der Zellen liegen nach der Produktions-Iterationszahl weiterhin über dem Böschungswinkel, und der Prozess ist auch bei 1000 nicht konvergiert.
- **Die Lithologie ist Farbe.** Sechs Gesteinstypen tragen ein Härtefeld, das nichts liest, und der Lithologie-Durchgang läuft nach beiden Erosionsdurchgängen, sodass die Härte selbst dann nicht koppeln könnte, wenn sie gelesen würde.
- **Es gibt keine Orographie.** Keinen Regenschatten, keine Luv/Lee-Asymmetrie, keine Advektion. Die Windrichtung steuert die Partikelneigung und die Wellenrichtung und berührt die Feuchte nirgends. Die Höhe wirkt nur auf die Temperatur, über den Temperaturgradienten.
- **Es gibt keine Zirkulation.** Die mittlere Temperatur ist eine reine Funktion von  $|\phi|$ . Keine ITCZ, keine subtropischen Wüstengürtel, keine Kontinentalität, keine Meeresströmungen. Die Feuchte wird unabhängig von der geographischen Breite gewürfelt, *weil* kein Mechanismus beide koppelt — was die Spezifikation als Freiheit darstellt, ist die Abwesenheit von Physik.
- **Das Wetter ist ein Punkt, kein Feld.** Der Wetterzustand ist ein einziger globaler Wert, gewürfelt aus dem Klima an der Kamera. Eine Front ist eine zeitliche Überblendung an einem Ort, kein bewegtes Objekt. Für geteilte oder Mehrspieler-Welten ist das die härteste Grenze im System.
- **Zwei Temperaturen treffen einander nie.** Vegetation und Biome lesen eine jahreszeitfreie, zeitfreie Temperatur; Wetter, Klang und Schritte lesen die volle. Bei Breite 60 beträgt der halbe jahreszeitliche Ausschlag 12 K, sodass die Schneeleiter läuft, während das Gelände sommergrün bleibt. In der Vegetation gibt es keinen Winter.
- **Feuchte bedeutet zwei verschiedene Dinge.** Auf der Insel ist sie eine gewürfelte relative Luftfeuchte; auf der Erde ist sie ein log-komprimierter Index des Jahresniederschlags.

Beide speisen dieselben Hüllen und dieselben Biom-Zentren, die gegen keine von beiden kalibriert sind.

- **Finsternisse sind spezifiziert, implementiert und unerreichbar.** Die Geometriefunktionen existieren und werden exportiert; nichts importiert sie. Die interne Spezifikation markiert den Abschnitt als bestätigt.
- **Das Modell ist nie mit gemessenem Klima verglichen worden.** Kein Köppen-Geiger-Vergleich, kein ERA5, kein WorldClim, keine Stationsdaten, keine Prüfung der Regenhäufigkeit. Die Sonden verifizieren interne Konsistenz und Reihenfolge gegen handgeschriebene Referenzklimata. Rund sechzig atmosphärische Konstanten sind, wie der Quelltext offen sagt, so gewählt, dass die Referenzinsel aussieht wie zuvor. Das ist legitime Ingenieursarbeit; es ist Kalibrierung gegen einen Screenshot, nicht gegen Daten.
- **Das ingestierte Bioklima ist share-alike.** Das gebackene Klimafeld leitet sich aus CC-BY-SA-Quellen ab und ist daher selbst share-alike. Für ein Produkt, das lizenziert werden soll, ist das eine echte Beschränkung, und sie beschränkt sich auf die Klimafelder; die Höhenquellen sind nicht betroffen.

Nichts davon macht das System unehrlich, denn nichts davon ist tragend für das, was das Produkt tatsächlich behauptet: eine kohärente, begehbare, plausible Welt, verbunden mit einem echten Ort und einem echten Jetzt. Unehrllich wird es in dem Moment, in dem irgendetwas davon als Simulation beschrieben wird.

## 11 Wohin das führt

Die Reihenfolge der nächsten Arbeit folgt aus den Abschnitten oben, nicht aus einer Wunschliste.

**Den Positions-Kontrakt schließen.** Die Zoomwahl zu einer Funktion der Bodenposition machen statt des fragenden Rings, sodass alle vier Ringe übereinstimmen, die 160 m-Trennkonstante entfallen kann und der begehbare Boden überall zum sichtbaren Boden wird. Das ist die einzelne Änderung mit der weitesten Artefakt-Reichweite.

**Die Zusammensetzungs-Ecke beheben.** Die ökologischen Ergebnisse in §9 sind kein Problem der Parameterabstimmung; sie folgen aus der Form des Fensters und der quartischen Ecke, die es beim Multiplizieren erzeugt. Entweder werden die Flanken linear, oder die Eignung geht als Rang ein statt



als Wahrscheinlichkeit. Eine Verhältnis-Assertion — Regenwald muss baumdominiert sein — gehört daneben in den Sondensatz, denn das jetzige Versagen hat jede existierende Prüfung bestanden.

**Der Erde ihr Wasserfeld geben.** Seen und Flüsse erfordern den endlichen Priority-Flood, den die Insel bereits implementiert, pro Kachel ausgeführt und mit kachelübergreifender Überlaufauflösung. Das ist die größte fehlende Fähigkeit auf dem Weg, den das Projekt jetzt als primär behandelt.

**Die numerische Abdeckung auf die Hydrologie ausweiten.** Die Invarianten sind leicht zu formulieren und derzeit nicht assertiert: jede Seeoberfläche auf oder über ihrer Überlaufhöhe, nichtnegative Tiefen, Chamfer-Distanz nahe der euklidischen, monotoner Abstieg entlang jedes Flusses.

Darüber hinaus ist die Roadmap Produkt statt Algorithmus: eine Fotoschicht, eine Sprachschicht, die einen echten Ort im Konjunktiv beschreibt, ohne Tatsachen über ihn zu behaupten, und Ambient-Panoramen. Diese sitzen über allem hier Beschriebenen und setzen keine Änderung an alledem voraus.

## 12 Fazit

Aeon Earth schlägt vor, dass eine erfundene Welt und die echte dieselbe Software sein können, und

dass der Weg dorthin darin besteht, die Welt zu einer *Funktion* statt zu einer Struktur zu machen. Diese Entscheidung zahlt sich genau wie versprochen aus, wo sie trägt: kein Zusammennähen, kein Resampling, keine Nähte, eine Klima- und Ökologieschicht, die unverändert über beiden Provenienzen läuft, und Geometrie, die unbegrenztes Reisen übersteht, weil sie nie von einem Ursprung abhing. Sie ist zugleich die schärfste verfügbare Diagnostik, denn jedes ernsthafte Artefakt, das das Projekt bekämpft hat, führt zurück auf die eine Stelle, an der der Kontrakt gebrochen ist — ein Zoom-Argument, das es nicht geben dürfte.

Was wirklich gebaut ist, ist eine Ableitungs-Engine: fünf Skalare und ein Höhenfeld, entfaltet zu Temperatur, Feuchte, Tageslänge, korrekter Himmelsgeometrie, Biomen, Arten und Wetter, mit einer echten 30m-Oberfläche und der echten Gegenwart darunter gebunden. Was nicht gebaut ist, ist Simulation. Die Tektonik entwickelt sich nicht, die Erosion konvergiert nicht, die Ökologie konkurriert nicht, und die Atmosphäre zirkuliert nicht. Das sind One-Shot-Operatoren, kalibriert bis das Ergebnis überzeugte, was eine legitime Art ist, eine Welt zu bauen, und eine illegitime Art, eine zu beschreiben.

Der nächste Meilenstein ist keine größere Behauptung. Es ist eine Höhe für jeden Punkt.