
Die Methode der klebrigen Luft in der Geodynamik Modellierende im Umgang mit den Einschränkungen der Computermodellierung

*L'air collant en géodynamique. Modélisateur·trice·s aux prises avec les
contraintes de la modélisation numérique*

*The "sticky air method" in geodynamics. Modellers dealing with the constraints
of numerical modelling*

*El aire pegajoso en la geodinámica. Los modelizadores se enfrentan a las
limitaciones de la modelización numérica*

Lucie Babel et Dominique Vinck



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rac/27800>

ISSN : 1760-5393

Cet article est une traduction de :

L'air collant en géodynamique - URL : <https://journals.openedition.org/rac/26939> [fr]

Autre(s) traduction(s) de cet article :

The "sticky air method" in geodynamics - URL : <https://journals.openedition.org/rac/27795> [en]

Éditeur

Société d'Anthropologie des Connaissances

Référence électronique

Lucie Babel et Dominique Vinck, « Die Methode der klebrigen Luft in der Geodynamik », *Revue d'anthropologie des connaissances* [En ligne], 16-2 | 2022, mis en ligne le 01 juin 2022, consulté le 01 juin 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rac/27800>

Ce document a été généré automatiquement le 1 juin 2022.



Les contenus de la *Revue d'anthropologie des connaissances* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Die Methode der klebrigen Luft in der Geodynamik

Modellierende im Umgang mit den Einschränkungen der Computermodellierung

L'air collant en géodynamique. Modélisateur·trice·s aux prises avec les contraintes de la modélisation numérique

The "sticky air method" in geodynamics. Modellers dealing with the constraints of numerical modelling

El aire pegajoso en la geodinámica. Los modelizadores se enfrentan a las limitaciones de la modelización numérica

Lucie Babel et Dominique Vinck

Einführung

- 1 Forschende führen manchmal fiktive Entitäten in ihre Berechnungen, Modellierungen oder Theorien ein (Thill, 1973; Winsberg, 2006; Lenhard, 2007). In der Geodynamik, einer Teildisziplin der Geophysik, enthalten viele Computermodelle eine Komponente, die in der uns bekannten Welt nicht vorkommt: die sogenannte „klebrige Luft“ (*sticky air*). In den Artikeln der Geodynamiker*innen, die wir gelesen haben, und in den Aussagen derjenigen, die wir getroffen haben, wird diese „klebrige Luft“ als so zähflüssig wie teilweise geschmolzenes Gestein und so leicht wie Luft konzipiert. In ihren Modellen bedeckt sie die gesamte Erdkruste mit einer Dicke von mehreren Dutzend Kilometern. Dieses fiktive Gebilde - das in Science-Fiction-Erzählungen vielleicht Sinn ergeben würde - mag sehr seltsam erscheinen, da es aus der Praxis von Wissenschaftler*innen stammt, die versuchen, die Prozesse des Inneren unseres Planeten zu beschreiben und darzustellen. Der Artikel beschreibt, was Geodynamiker*innen aus diesem fiktiven Gebilde machen und versucht, einige Aspekte der Modellierungspraxis zu beleuchten.

- 2 Der Trick mit der „klebrigen Luft“ wirft ein scheinbares Paradoxon auf. Obwohl Geodynamiker*innen über numerische Methoden verfügen, mit denen sie das Erdsystem wie gewünscht modellieren können, setzen viele diese Methoden nicht um. Stattdessen scheinen sie es vorzuziehen, dieses erstaunliche, fiktive Hybridwesen in ihr Modell zu integrieren, um ihr Ziel einer Darstellung der Interaktionen zwischen Erdkruste und Erdmantel zu erreichen. Man könnte sich dabei an das Handeln eines Schülers erinnern fühlen, der seine Daten oder sein Modell manipuliert, um das von der Lehrkraft erwartete Ergebnis zu erzielen. Jedoch gehört die Integration von Elementen, die die Berechnungen erleichtern sollen, zu den üblichen Praktiken, die unter Forschenden hinterfragt und hinsichtlich ihrer Relevanz diskutiert werden. Die Einzigartigkeit der „klebrigen Luft“ liegt also nicht in ihrem fiktiven Charakter, sondern vielmehr in den Darstellungen, die die Geodynamiker*innen von ihr erzeugen. Während die meisten dieser Tricks im Computercode verborgen bleiben, wird die „klebrige Luft“ in Artikeln und Fachbüchern benannt und abgebildet. Diese Darstellungen ermöglichen es uns, sie zu verfolgen und damit einen ganz bestimmten Schritt in der Computermodellierung zu zeigen.
- 3 Der Trick und das Paradoxon, um das es hier geht, entstehen beim Übergang von einem konzeptuellen Modell zu einem Computerprogramm. Nachdem die Modellierenden die Prozesse – insbesondere die Konvektionsströmungen des Mantels – konzeptualisiert haben, übersetzen sie sie in eine Reihe von Operationen, die vom Computer ausgeführt werden können, um diese Phänomene zu simulieren und zu untersuchen. Wie wir sehen werden, zeigt sich dieser Übergang zum Computercode reich an Verhandlungen. Darüber hinaus ist er nicht spezifisch für die Geodynamik. Alle Computermodelle in den Geo- und Umweltwissenschaften, einschließlich der Klimamodelle, die von großer gesellschaftlicher Relevanz sind, erfordern das Schreiben eines Computercodes, der von einem Computer gelesen werden kann – und zwar in einer Sprache, die sich stark von derjenigen unterscheidet, die zur konzeptuellen Beschreibung der zu untersuchenden Systeme verwendet wird. Dennoch bleibt dieser Schritt einer der am wenigsten beachteten in den wissenschaftlichen Arbeiten zur Modellierung, wie die Literaturübersicht in diesem Artikel zeigen wird. Der Schritt der Erstellung des Computercodes wirkt sich jedoch auf das Endprodukt aus – das Computermodell, das als Forschungsinstrument verwendet wird – und dessen Bewertung vergleichsweise stark diskutiert wurde (siehe u. a. Oreskes, Shrader-Frechette & Belitz, 2004; Lahsen, 2005; Sundberg, 2011).
- 4 In diesem Artikel wird anhand der Methode der „klebrigen Luft“ in der Geodynamik untersucht, was es mit der wenig erforschten Tatsache auf sich hat, dass ein Modell ausführbar sein muss. Welche Entscheidungen, Verhandlungen und Wege gehen die Modellierenden in diesem Bereich? Bei der Beantwortung dieser Fragen verfolgt der Artikel die Modellierungswege von Forschernetzwerken, die zwischen Pfadabhängigkeiten (David, 1985) und dem Versuch, die Modelle für neue Anwendungen einzusetzen, schwanken. Darüber hinaus wird versucht, die Logik zu ergründen, mit der die „klebrige Luft“ Eigenschaften – einen Namen, eine Dicke, eine Viskosität, eine visuelle Darstellung – erlangt hat und zu einem eigenständigen Forschungsobjekt in der Geodynamik geworden ist. Unsere Forschung stützt sich auf ein gemischtes Material, das hauptsächlich aus der Analyse von wissenschaftlichen Artikeln, die zu diesem Thema innerhalb der Disziplin veröffentlicht wurden, aus Handbüchern und Referenzwerken sowie aus Interviews mit Forschenden in der

Geodynamik besteht. Außerdem wurden 30 teilstrukturierte Interviews mit Modellierenden der Geo- und Umweltwissenschaften in mehreren europäischen Ländern geführt und Konferenzen beobachtet.

- 5 Der Artikel ist in fünf Teile gegliedert. Zunächst beginnen wir mit einer kurzen Darstellung der wichtigsten Herausforderungen der geodynamischen Modellierung, die in diesem Untersuchungsmaterial identifiziert wurden. Wir definieren auch die Terminologie, auf die wir zurückgreifen werden, und ordnen unsere Untersuchung in Bezug auf die bestehende STS-Literatur ein. Die Fallstudie und ihre Methode werden im zweiten Teil eingeführt. Der dritte Teil widmet sich dem scheinbaren Paradoxon der Verwendung numerischer Methoden in diesem Fall. Dabei werden die antagonistischen Dynamiken untersucht, mit denen die Modellierenden konfrontiert sind, wenn sie versuchen, ihr Ziel einer modellhaften Bewegung der Erdkruste zu verfolgen. Die Methode der „klebrigen Luft“, die es ermöglicht, mit diesen Modellierungspfaden umzugehen, wird im vierten Teil vorgestellt. Wir verfolgen die Verbreitung dieses Tricks in der Geodynamik und analysieren genauer, was die Modellierenden mit dem geschaffenen Hybrid machen, durch seine Benennung, seine visuelle Darstellung und die Beherrschung seiner unerwünschten Effekte. Abschließend wird darauf eingegangen, was die Verwendung des Kunstgriffs mit der klebrigen Luft über die Art der wissensbildenden Praxis in der Phase der Erstellung von Computercode aussagt.

Computermodellierung und ihre Verwendung in der Geodynamik

- 6 In den Lehrbüchern der *Geowissenschaften* wird diese Wissenschaft als ein Zusammenschluss zahlreicher Disziplinen (u. a. Geologie, Geochemie, Geomorphologie, Geophysik, Klimatologie, Hydrologie, Ozeanografie) dargestellt, die jeweils einen eigenen Anwendungsbereich und einen eigenen analytischen Blickwinkel haben. Von diesen befasst sich die *Geophysik* hauptsächlich mit der inneren Struktur der Erde, ihren physikalischen Eigenschaften (z. B. Temperatur, Druck, Dichte) und den dabei auftretenden physikalischen Phänomenen (z. B. Schwerkraft, Magnetismus, Erdbebenwellen, Mantelkonvektion). Die Untersuchung der Entwicklung dieser inneren Struktur, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Bewegungen ihrer Bestandteile, wird als *Geodynamik* bezeichnet. Unsere Fallstudie ist innerhalb dieser Unterdisziplin der Geophysik angesiedelt.
- 7 Forschende der Geodynamik beschäftigen sich mit der Dynamik des Erdinneren und der Erdoberfläche. Ziel der Forschung ist es, die Entstehung der bestehenden Strukturen der Erde zu verstehen und die Mechanismen zu erforschen, die bestimmte Naturphänomene (Vulkanismus, Seismizität usw.) hervorrufen. Je nach Zeitskala und Tiefe kann die geodynamische Forschung in der Prävention von Naturgefahren, der Abfalllagerung, der Geothermie und der Lokalisierung mineralischer und fossiler Ressourcen Anwendung finden. Der größte Teil der geodynamischen Forschung, einschließlich der in diesem Artikel behandelten Arbeiten, gehört jedoch zur Grundlagenforschung. Sie wird in einem akademischen Kontext oder innerhalb von Forschungsinstituten durchgeführt und mit öffentlichen Mitteln finanziert. Die gesellschaftlichen Rechtfertigungen für die Suche nach Finanzmitteln liegen zwar manchmal in der Prävention von Naturgefahren. Die hier beschriebenen Forschungsarbeiten haben jedoch keine direkte Anwendung in dieser Hinsicht; es geht

vielmehr um das Verständnis der Mechanismen und ihrer Wechselwirkungen. Die Zahl der Forschenden in der Geodynamik ist im Vergleich zu anderen geowissenschaftlichen Disziplinen wie der Klimatologie oder der Hydrologie sehr gering. In Europa, wo unsere Forschung stattfand, kennen sich die Forschenden in der Regel und haben oft ein gemeinsames biografisches Element: einen Aufenthalt (als Doktorand*in oder Postdoc) am Institut für Geophysik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (Schweiz) oder eine Zusammenarbeit (Forschung, Veröffentlichung) mit den dort tätigen Professoren. Die Wettbewerbsdynamik zwischen Forschungsgruppen scheint in dieser Disziplin wenig verschärft zu sein. Im Gegensatz dazu haben wir im Laufe unserer Forschung das Bild einer kleinen, relativ geschlossenen Gemeinschaft gewonnen, die kaum durch Kontroversen gespalten wird und von einer starken Dynamik geprägt ist, die sich sowohl auf die technische Entwicklung als auch auf die Diversifizierung der Anwendungen ihrer Methoden (z.B. auf andere Planeten des Sonnensystems) konzentriert. Die Zusammenarbeit zwischen Geodynamiker*innen aus verschiedenen Instituten und Ländern scheint zudem sehr häufig und vielfältig zu sein und erfolgt im Zuge neuer Forschungsprojekte immer wieder in anderen Konstellationen.

Modellieren, um den Datenmangel zu kompensieren

- 8 Bei der Untersuchung der Prozesse, die im Inneren und auf der Oberfläche der Erde ablaufen, stehen Geodynamiker*innen vor einer zentralen Herausforderung: einem erheblichen Mangel an Daten. Von der vergangenen Dynamik des Erdsystems sind nur einige ihrer Auswirkungen auf die Erdoberfläche erhalten geblieben. Die Phänomene selbst können von Forschenden aufgrund der enormen Zeitskalen (Tausende, Millionen, ja sogar Milliarden von Jahren – im Zeitraum eines Menschenlebens scheint alles stillzustehen) und der Unzugänglichkeit der Tiefen (die Erdkruste reicht bis in eine Tiefe von 50 km, der Erdmantel bis in eine Tiefe von 3000 km) nicht beobachtet werden. Die Prozesse, ihre Ursachen und Auswirkungen müssen daher vorgestellt, hypothetisiert und rekonstruiert werden (*ex post* und *ex situ*). Eines der wichtigsten Werkzeuge, die Geodynamiker*innen zu diesem Zweck einsetzen, ist das Modell. In dieser Disziplin gibt es drei Kategorien von Modellen, die nebeneinander existieren und sich gegenseitig ergänzen: das analytische Modell, das analoge (Labor-)Modell und das numerische Computermodell. Der Artikel befasst sich mit der dritten Kategorie von Modellen: den Computermodellen.
- 9 In den folgenden Abschnitten verwenden wir abwechselnd die Begriffe Modellierenden und Geodynamiker*innen, um die beiden Seiten des Profils der Akteure hervorzuheben, denen wir begegnet sind. In dieser Disziplin, wie auch in vielen anderen der Geowissenschaften, ist die Computermodellierung nicht die Aufgabe eines technischen Personals, das sich von den Forschenden unterscheidet. Die Modellierenden in der Geodynamik, die wir interviewt haben oder deren Arbeiten wir gelesen haben, haben eine Grundausbildung in der Geophysik, der Geologie, den Geowissenschaften oder sogar in der Physik. Die Computermodellierung ist heute Teil der Lehrpläne dieser Studiengänge, jedoch oft nur als Wahlfach. Die Modellierenden berichteten, dass sie den größten Teil ihres Fachwissens im Bereich der Modellierung „on the job“ erworben haben, indem sie die von anderen Forschenden erstellten Modelle kennengelernt und angewendet haben.

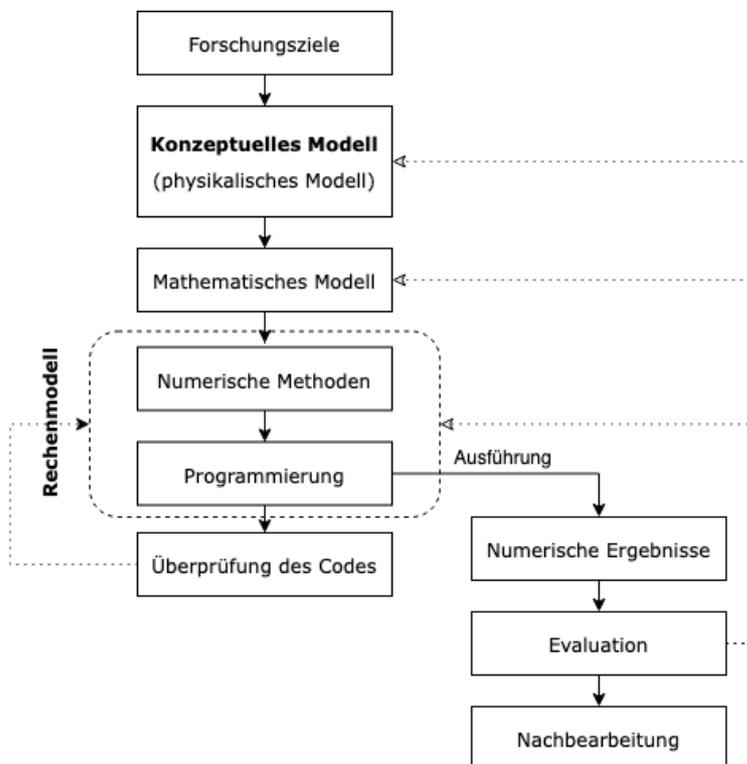
- 10 Geodynamische Computermodelle beschreiben die Bewegungen des Erdmantels und der Erdkruste mithilfe der Strömungsmechanik. Die Erdmaterialien sind auf den ersten Blick nicht flüssig, wenn man sie nach menschlichen Maßstäben betrachtet. In geologischen Maßstäben, die Zehntausende von Jahren überschreiten, wird ihr Verhalten jedoch als viskos angesehen – auch das der Erdkruste. Dann können die Grundgleichungen der Strömungsmechanik (ein Zweig der Physik, der das Verhalten von Flüssigkeiten untersucht) gelten. Es handelt sich um Gleichungen, die die Erhaltungssätze für Masse, Energie und Bewegungsgröße übersetzen. Diese Größen sind konstant; wenn eine Größe irgendwo verschwindet, muss man sie an anderer Stelle wiederfinden. Aus mathematischer Sicht gehören diese Gleichungen zur Kategorie der „partiellen Differentialgleichungen“, die in der Physik und den Ingenieurwissenschaften sehr gebräuchlich sind. Die Unbekannten (z. B. die Temperatur) in diesen Gleichungen sind selbst Funktionen, die gleichzeitig vom Verhalten mehrerer unabhängiger Variablen abhängen. Die große Mehrheit dieser Gleichungen hat eine wichtige Besonderheit: Sie lassen sich nicht analytisch lösen – d. h. durch das Hantieren mit den Termen und Symbolen in diesen Gleichungen. Die Gleichungen sind so komplex, dass für einige von ihnen (z. B. die Navier-Stokes-Gleichungen, die in der Strömungsmechanik von zentraler Bedeutung sind) noch nicht einmal die Existenz von Lösungen bewiesen wurde, was zu den schwierigsten mathematischen Herausforderungen zählt. Diese Herausforderung ist sogar eines der „Millennium-Preis-Probleme“ des Clay Mathematical Institute, das mit einer Million Dollar dotiert ist. Geodynamiker*innen lösen diese Gleichungen also nicht, sondern versuchen, ihre Lösungen mithilfe von Computerberechnungen zu approximieren. Dazu verwenden sie *numerische Lösungsmethoden*. Diese Methoden und die Transformationen, die sie vom modellierten System verlangen, stehen im Mittelpunkt unserer Untersuchung. Im nächsten Abschnitt wird erläutert, auf welche Literatur wir uns bei der Untersuchung dieser Transformationen stützen können.

Der Modellierungsprozess

- 11 Nach unserer Kenntnis gibt es keine Arbeit der Wissenschaftsforschung, die sich mit der geodynamischen Modellierung befasst. Es gibt auch allgemein nur wenige Sozialwissenschaftler*innen, die sich mit der Computermodellierung in den Geowissenschaften befasst haben, ungeachtet der Disziplin. Diese Forschenden haben sich eher auf die Klimamodellierung konzentriert, die für die Gesellschaft von großer Bedeutung ist und im Zusammenhang mit dem Klimawandel kontrovers diskutiert wird. Diese Arbeiten sind *a priori* relevant für die Untersuchung der geodynamischen Modellierung, da die Modelle in der Klimatologie und der Geodynamik viele Gemeinsamkeiten aufweisen. Wie die geodynamischen Modelle stützen sich die globalen Klimamodelle auf die Strömungsmechanik. Sie teilen ebenso die Herausforderung der (annähernden) Lösung der Gleichungen; und die zu diesem Zweck verwendeten mathematisch-informatischen Techniken sind ähnlich. Diese mathematisch-informatischen Techniken und die damit verbundenen Praktiken sind noch wenig erforscht und werden in der STS-Literatur, die sich mit der Modellierung befasst, oft übersehen.
- 12 Unsere Untersuchung bezieht sich auf eine bestimmte Phase der Modellierungsarbeit, die wir anhand des in der geowissenschaftlichen Literatur häufig verwendeten Schemas des Modellierungsprozesses (Abb. 1) einordnen können. Von dieser Art von Schemata

können wir zwar nicht erwarten, dass sie die tatsächlichen Praktiken der Modellierenden abbildet, aber die verwendete Terminologie wird für den weiteren Verlauf dieses Artikels von Nutzen sein. Nach diesem Schema beruht ein Computermodell auf einem *konzeptuellen* Modell, das der qualitativen Darstellung des untersuchten Systems, seiner Komponenten, ihrer Eigenschaften und ihrer Beziehungen entspricht. Ein *mathematisches Modell* übersetzt dieses konzeptuelle Modell in ein System von Gleichungen, die wiederum in ein *Rechenmodell* übersetzt werden, das auf einem Computer ausgeführt werden kann. Diese drei Modelltypen (das konzeptuelle, das mathematische und das Rechenmodell) entsprechen unterschiedlichen Objekten: Das konzeptuelle Modell ist meist eine Skizze des untersuchten Systems¹ und spiegelt die Ideen, das Wissen und die Annahmen der Forschenden über das System wider; das mathematische Modell besteht aus einer Reihe von Gleichungen; das Rechenmodell ist ein Computercode. Wenn dieser Computercode von einem Computer ausgeführt („gelesen“) wird, transformiert er einen Datensatz, der den im Modell berücksichtigten Variablen entspricht, um Ergebnisse zu produzieren – die dann von den Modellierenden in Form von Diagrammen, Karten, Bildern oder Animationen visualisiert werden. Die Ergebnisse werden mit eventuell vorhandenen Daten (aus der Beobachtung der seismischen Aktivität der Erde), mit aktuellen Darstellungen (dem „konzeptuellen Modell“) oder mit den Ergebnissen anderer Simulationen verglichen.

Abbildung 1: Darstellung des Prozesses der Computermodellierung



Von Ismail-Zadeh und Tackley (2010:16) adaptiertes Operationsschema, das den Prozess der Computermodellierung darstellt. Die gepunkteten Pfeile im Schema stellen mögliche Iterationsschleifen dar, die durchgeführt werden, solange die Überprüfung des Codes und die Evaluation des Modells nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen.

Kredit: Schema aus Ismail-Zadeh und Tackley (2010:16), von den Autoren angepasst.

- 13 Die Evaluierung der Ergebnisse des Modells ist genau der Schritt, dem die Autor*innen der Wissenschaftsforschung am meisten Aufmerksamkeit geschenkt haben, darunter die Wissenschaftshistorikerin Naomi Oreskes, die Philosophin Kristin Shrader-Frechette und der Hydrologe Kenneth Belitz (1994), die Anthropologin Myanna Lahsen (2005), die Wissenschaftshistorikerin Hélène Guillemot (2009), die Wissenschaftsphilosophen Johannes Lenhard und Eric Winsberg (2010), Elisabeth Lloyd (2010) und die Soziologin Mikaela Sundberg (2011). Dieses Interesse steht im Zusammenhang mit politischen Kontroversen über die Zuverlässigkeit von Klimamodellprojektionen. Die Bewertung von Computermodellen und ihre Praktiken, ihr Vokabular, ihre Beziehung zu Wahrheit, Realität und Daten war daher ein wichtiges Thema, sowohl in der wissenschaftlichen Gemeinschaft der Modellierenden in den Erd- und Umweltwissenschaften (z.B. Beven, 1993; Odenbaugh, 2005; Rykiel, 2006; Knutti, 2008) als auch in der oben genannten STS-Literatur zu Computermodellen.
- 14 Die Konstruktion des Codes, der im Endeffekt zu den analysierten Ergebnissen führt, wurde allerdings nur oberflächlich behandelt. Zwar gibt es wichtige Bücher und Artikel, die die Entwicklung eines Modells in seiner politischen und institutionellen Ko-Konstruktion nachzeichnen (z.B. Armatte & Dahan Dalmedico, 2004; Dahan Dalmedico, 2007; Edwards, 2013). Dennoch handelt es sich dabei meist um eine Darstellung der wichtigsten mathematischen und informatischen Prinzipien, die bei der Konstruktion des Codes verwendet wurden, und ihrer Entwicklung im Laufe der Zeit. Die Praktiken selbst wurden kaum eingehend untersucht. Aus dieser überwiegend historischen Behandlung des Rechenmodells kann der Eindruck entstehen, dass der Modellierungsprozess linear verläuft, dass kaum Entscheidungen getroffen werden und dass sich numerischen Techniken aufgrund ihrer Effizienz allmählich durchsetzen.
- 15 Abseits der Werke über die Geowissenschaften hat der Anthropologe Matt Spencer (2012b) eine umfassende ethnografische Arbeit über Modellierung verfasst, in der er sich eingehender mit numerischen Methoden und dem Computercode befasst. Obwohl die Analyse des Autors hauptsächlich epistemologischer Natur ist, ist seine Forschung in der Computerphysik für uns von großem Interesse, da sie den numerischen Techniken der Modellierung einen besonderen Status verleiht. Die Wissenschaftsphilosophin Tarja Knuuttila, die Soziologin Martina Merz und die Historikerin und Philosophin Erika Mattila (2006) stellen fest, dass Wissenschaftsphilosophen und STS-Forschende bei der Beschäftigung mit der Computermodellierung ihre frühere Arbeitsteilung zwischen der Analyse der Begriffsproduktion und der Untersuchung der experimentellen Praxis überwinden (Moreno & Vinck, 2021). Die Untersuchung der Modellierung bringt Forschende insofern zusammen, als Modellierung und Simulation sowohl theoretische als auch experimentelle Arbeit sind (Dowling, 1999; Morgan & Morrison, 1999; Sismondo, 1999). Die Art des Gegenstands, auf den sich unsere Untersuchung bezieht, spiegelt diese Interaktion zwischen Wissenschaftsphilosophen und STS gut wider. Winsberg (2010) beispielsweise befasst sich mit dem „fiktionalen“ Charakter der Modellierung, was relevant sein wird, um bestimmte Praktiken rund um die Anwendung der Methode der „klebrigen Luft“, die weiter unten vorgestellt wird, zu hinterfragen.

Untersuchung von Modellierungspraktiken: eine zeitlich und räumlich verteilte Fallstudie

- 16 Die hier vorgestellte Fallstudie ist Teil einer umfassenderen Forschungsarbeit, die sich mit den Praktiken der Konstruktion von Computermodellen in den Geowissenschaften befasst. In diesem Rahmen nahmen wir an zwei Jahreskonferenzen der European Geosciences Union (EGU) teil, wobei die Koautorin dieses Artikels als Forscherin in diesem Bereich tätig war und eine teilnehmende Beobachtung vornahm. Diese Konferenzen, an denen mehr als 15.000 Forschende sechs Tage lang in Wien (Österreich) teilnehmen, bestehen aus mehreren hundert ein- oder interdisziplinären Sitzungen. Bei einer der Geodynamik-Sitzungen der Ausgabe 2019 wurden wir zum ersten Mal mit der Methode der „klebrigen Luft“ (sticky air method) konfrontiert. Bei dieser Sitzung handelte es sich um einen 90-minütigen „Short Course“ über numerische Methoden für angehende Geowissenschaftler*innen, die mit der Computermodellierung in der Geodynamik nicht vertraut waren. Die Tatsache, dass die Methode der „klebrigen Luft“ in einer so kurzen und allgemeinen Sitzung behandelt wurde, zeigt, dass sie relativ verbreitet ist. Ihre Darlegung löste übrigens keine Reaktion in der Versammlung aus, obwohl es um die Einführung einer fiktiven Entität in das Modell geht.

Vorgehensweise bei der Untersuchung

- 17 Unser Bestreben, die Praktiken zu verfolgen, um die Entstehung dieser fiktiven Entität und ihre Verwendung zu dokumentieren, stellt uns vor eine übliche methodologische Herausforderung der Wissenschaftsforschung, die sich mit der Modellierung beschäftigt. Wie Guillemot (2009) und Sundberg (2010) betonen, eignet sich die Computermodellierung nur bedingt für die ethnografische Beobachtung. Die Tätigkeit der Modellierenden, die vor Computerbildschirmen auf ihren Tastaturen tippen und mit der Maus klicken, kann für den Beobachtenden besonders undurchsichtig bleiben. Der häufig inkrementelle Aufbau von Modellen über mehrere Jahrzehnte und an mehreren Produktionsstandorten (Lahsen, 2005) erschwert die Erhebung empirischer Daten zusätzlich. Guillemot (2009, S. 276) ist der Ansicht, dass bei der Modellierung „die Beschreibung der Praktiken der Forschenden unweigerlich über ihre eigene Rede in Interviews erfolgt“. Spencer (2012b, S. 12), der mit numerischen Methoden in der Computerphysik konfrontiert ist, lehnt es jedoch ab, sich auf Interviews zu beschränken. Er ist der Ansicht, dass deren Aussagen nur verstanden werden können, wenn sie von einem umfassenderen ethnografischen Ansatz begleitet werden. Wir schließen uns ihm hier an. Ein erstes Gespräch mit einem der Spezialisten der „klebrigen Luft“ machte uns schnell klar, dass wir allein auf der Grundlage dieser Gespräche nicht die Detailgenauigkeit erreichen würden, die für die Rekonstruktion der Praktiken erforderlich ist. Wie Spencer (2012b) mussten wir uns persönlich mit dem technisch anspruchsvollen Charakter und den Besonderheiten dieses Forschungsfeldes auseinandersetzen. Diese Investition ging über das reine Überlegen hinaus: wir mussten lernen, grafische Darstellungen und Gleichungen zu lesen und zu manipulieren, um sie in Übereinstimmung zu bringen und zu rekonstruieren. Dafür haben wir reichlich von den Ressourcen Gebrauch gemacht, die Geodynamiker*innen verwenden: wissenschaftliche Artikel, Handbücher über die geodynamische

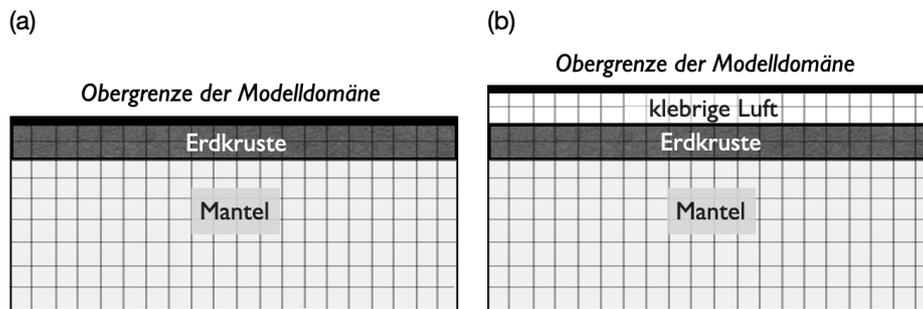
Modellierung und über die numerischen Methoden, Auszüge aus Vorlesungen, aber auch informelle Anfragen an Geodynamiker*innen und an einen Mathematiker zu mathematisch-informatischen Details, denen wir unterwegs begegneten. So konnten wir nach und nach nah genug an die betrachteten Objekte gelangen, um Entscheidungen und Verzweigungen zu erkennen und sie in Gesprächen ansprechen zu können. Der Prozess war iterativ: Die von den Geodynamiker*innen in den Interviews skizzierten Praktiken führten uns zu anderen geodynamischen Artikeln und Arbeiten, zu anderen graphischen Darstellungen und Gleichungen, die uns in manchen Fällen dazu veranlassten, die Autor*innen zu kontaktieren. Da es uns nicht möglich war, situierte Praktiken zu untersuchen (innerhalb eines Labors oder im Verlauf eines Projekts) – da das, was sich abspielt, an verschiedenen Orten und zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfindet – haben wir durch aufeinanderfolgende Iterationen im Untersuchungsmaterial und bei unseren Gesprächspartnern nach und nach ihr Universum, ihre Praktiken, ihre Entwicklungen, die ihnen begegneten Herausforderungen und ihre Reibungspunkte rekonstruiert.

- 18 Die anonymisierten Geodynamiker*innen, die in den Zitaten aus den Interviews zu Wort kommen, arbeiten alle an verschiedenen Instituten und in verschiedenen Ländern. Ihnen ist jedoch allen gemeinsam, dass sie in früheren Forschungsprojekten mit der „klebrigen Luft“ gearbeitet haben. Wir haben uns dafür entschieden, keine Auszüge aus der Korrespondenz mit einigen Autorinnen und Autoren wiederzugeben. Diese bezog sich nämlich hauptsächlich auf Objekte am Rande der „klebrigen Luft“, deren Handhabung und Untersuchung für uns notwendig war, um uns dieser Technik besser anzunähern, aber auf die wir in diesem Artikel nicht näher eingehen. Die allgemeinen Herausforderungen der numerischen Modellierung, denen wir uns stellen, werden durch eine Feldarbeit unterstützt, die aus 30 teilstrukturierten Interviews mit Modellierenden in den Geo- und Umweltwissenschaften in Frankreich, der Schweiz, den Niederlanden und Deutschland besteht, und die sich mit der Wahl bestimmter Modellkomponenten und dem Austausch von Modellierungspraktiken befassen. Hinzu kommen teilnehmende Beobachtungen bei Konferenzen der European Geosciences Union (EGU) in Wien (Österreich) in den Jahren 2018 und 2019 sowie schließlich zahlreiche formelle und informelle Gespräche mit Modellierenden, da eine der Autor*innen einer Forschungsgruppe für rechnergestützte Geographie angegliedert ist.

Die Methode der „klebrigen Luft“

- 19 Wenn es darum geht, ein System numerisch zu modellieren, sind sich Modellierende in den Lehrbüchern und in der Praxis einig, dass sie die Modelldomäne abgrenzen müssen. Dabei handelt es sich um den Teil des Raums, der modelliert werden soll und auf den die betrachteten Gleichungen angewendet werden. Bei einer zweidimensionalen Modellierung, wie sie in der Geodynamik üblich ist, hat die Modelldomäne meist die Form eines Rechtecks. Es enthält in diesem Fall einen Teil der Erdkruste und des Erdmantels (Abb. 2a).

Abbildung 2: Darstellung der Modelldomäne vor und nach dem Einfügen der „klebrigen Luft“.



Schematischer Vergleich der geodynamischen Modelldomäne vor (a) und nach (b) der Einfügung der „klebrigen Luft“. Das Raster stellt das „Modellgitter“ dar, das aus Zellen besteht, auf denen jeweils die betrachteten Gleichungen ausgeführt werden.

Credits: Von Lucie Babel ausgearbeitet.

- 20 Bei der Methode der „klebrigen Luft“ wird der Modelldomäne eine Schicht über der Erdkruste hinzugefügt (Abb. 2b). Diese Schicht, die als „klebrige Luft“ bezeichnet wird, hat sowohl die Dichte von Luft (Null) als auch eine Viskosität, die hunderttausend Trillionen Mal höher ist als die von Luft. Kein anderes bekanntes Element weist eine solche Kombination von so widersprüchlichen Eigenschaften auf. Die Schicht „klebriger Luft“ soll also keine physikalische „Realität“ darstellen; sie ist auch nicht Teil des konzeptuellen Modells, sondern taucht nur bei der Erstellung des Rechenmodells auf. Dieser Ansatz ermöglicht es uns, unsere Aufmerksamkeit speziell auf diese Phase der Computermodellierung zu richten.

Computermodellierung zwischen Verriegelung und Entfaltung: Darstellung einer sich bewegenden Erdkruste

- 21 Die sogenannte Methode der „klebrigen Luft“ wird nicht in allen geodynamischen Modellen verwendet. Sie taucht nur in Modellen auf, die die Interaktion zwischen der Erdkruste und dem darunter liegenden Mantel beinhalten. Das Interesse an dieser Interaktion wurde seit Mitte der 1980er Jahre (siehe z. B. Hager *et al.*, 1985; Koons, 1989) durch Forschungen motiviert, die zeigten, dass die Konvektion des Erdmantels in der Lage ist, die Erdkruste stellenweise anzuheben und abzusenken². Die kollektive Erforschung der Interaktion zwischen Erdkruste und Erdmantel beschleunigte sich in den 1990er Jahren, parallel zu besonders detaillierten Messungen der Deformationen und Bewegungen der Erdoberfläche (Burbank & Pinter, 1999). Seit Ende der 1990er Jahre wurden zahlreiche numerische und Labormethoden entwickelt, um diese Bewegungen dynamisch zu simulieren (siehe Schmeling *et al.*, 2008).
- 22 In geodynamischen Modellen stellt die Erdkruste in der Regel die obere Grenze der Modelldomäne dar (siehe Abb. 2a). Das heißt, wenn die Erdkruste in Bewegung versetzt wird – was das Ziel der meisten Modellierenden ist³, die die Wechselwirkung zwischen Kruste und Mantel berücksichtigen – wäre die Modelldomäne nicht mehr rechteckig wie in unserer Abbildung. Sie würde sich im oberen Bereich verformen.

Die Rechenkosten der Modellierung

- 23 Die Verformung der Modelldomäne ist jedoch mit Kosten verbunden. Für ihre Modellierungen unterteilen Geodynamiker*innen die Domäne in kleine geometrische Bausteine und bilden so das *Modellgitter*. Mit den Verformungen der Erdkruste werden alle Elemente dieses Gitters dazu gebracht, sich ebenfalls zu verformen. Im Vergleich zu einem festen Gitter müssen während des gesamten Modellierungsprozesses wesentlich mehr Berechnungen durchgeführt und vom Computer gespeichert werden. Für die Modellierenden sind die Rechengeschwindigkeit und die verfügbare Speicherkapazität keine abstrakten Einheiten, sondern materielle Ressourcen, die in den Forschungsinstituten und ihren soziotechnischen Netzwerken installiert sind. Die Arbeit hängt dann von der Art der Computer ab, über die sie verfügen und auf die sie zugreifen können, von ihrer Zusammenarbeit mit den Personen, die diese Computerressourcen verwalten, und von der Wartung der Computer. Wie lange können Modellierenden ihr Modell „laufen“ lassen, bevor sie die Aktivitäten anderer Institutsmitglieder oder ihre eigene Agenda, die ebenfalls institutionell verhandelt wird (Fujimura, 1987), beeinträchtigen? Hat das Institut Zugang zu den Supercomputern eines nationalen Rechenzentrums? Diese Bedingungen bezüglich der Infrastruktur der Modellierung sind in den Überlegungen zur Wahl der numerischen Techniken allgegenwärtig. Der Historiker Paul Edwards aggregiert sie unter dem Begriff der „computational friction“ (Edwards, 2013, S. 84). Dieses Konzept umfasst „nicht nur die physikalischen und wirtschaftlichen Grenzen der Prozessorgeschwindigkeit und der Speicherkapazität“, die in wissenschaftlichen Artikeln unter den Begriffen „Effizienz“ oder „Rechenkosten“ numerischer Techniken berücksichtigt und verglichen werden, „sondern auch die menschliche Arbeit, die für die Programmierung, den Betrieb, die Fehlersuche und die Reparatur von Computern erforderlich ist“. Das Konzept der „computational friction“ ist in der Geodynamik wenig bekannt. Die Verwendung des Begriffs „Rechenkosten“ (*computational cost*) durch die geodynamischen Akteure während unserer Interviews nähert sich jedoch dieser erweiterten Definition an und geht über die mobilisierten materiellen Ressourcen hinaus. Er ist auch eines der ersten Argumente, die von den Modellierenden in unseren Interviews spontan vorgebracht wurden, um die Wahl einer Methode zu rechtfertigen. So verweist der Geodynamiker A. auf die „Rechenkosten“ einschließlich der Programmierarbeit, als er in einem Interview den Nutzen eines verformbaren Rasters ablehnt:

Für Modelle der Mantelkonvektion ... gibt es so viele Verformungen, dass du dein Gitter (des Modells) während der Evolution neu definieren müsstest, also macht es nicht wirklich Sinn. (A., Geodynamiker, 12. März 2020).

- 24 A. erwähnt speziell die Mantelkonvektionsmodelle, da nicht alle geodynamischen Modelle, die sich mit der Deformation der Kruste befassen, dies auf derselben Zeit- und Raumskala tun. Die Modelle der Mantelkonvektion untersuchen die Dynamik des Mantels bis in große Tiefen und über Zeiträume von Zehntausenden bis Millionen von Jahren. In diesen Größenordnungen sind die Verformungen des Mantels so groß, dass die Programmierschwierigkeiten, die mit der Implementierung eines verformbaren Gitters verbunden sind, für unsere Gesprächspartner unüberwindbar erscheinen. Die „Rechenkosten“ sind jedoch viel erschwinglicher, wenn die Modelle auf kleineren Skalen operieren. Die Geodynamikerin S., die ebenfalls an Modellen der Mantelkonvektion arbeitet, hatte mit sogenannten „*Earth quake people*“

zusammengearbeitet, die ihrer Meinung nach eine eigene Gemeinschaft bilden. Ihre Modelle simulieren Prozesse, die nur wenige Minuten dauern.

Sie hatten nie das Bedürfnis, Methoden zu erforschen, mit denen sich viele Verformungen unterbringen lassen... Diese ganze Gemeinschaft hatte noch nie etwas von „klebriger Luft“ gehört, weil sie das nicht nötig haben. Sie untersuchen keine langfristigen Prozesse. (S., Geodynamikerin, 25. Mai 2021).

- 25 Die Problematik der nicht zu überwindenden Rechenkosten des verformbaren Gitters ist in der Tat spezifisch für Geodynamiker*innen, die die Konvektion des Mantels modellieren. Auf diese Gruppe beziehen wir uns im weiteren Verlauf des Artikels, wenn wir aus Platzgründen von „Geodynamiker*innen“ sprechen.

Das Problem der Kompatibilität

- 26 Die Verwendung eines vollständig verformbaren Gitters wird von Geodynamiker*innen nicht als erschwingliche Option angesehen. Um die Bewegungen der Erdkruste dennoch darstellen zu können, wurden andere Modellierungstechniken entwickelt. Eine davon, die *Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method* (ALE), stammt aus dem Ingenieurwesen und erlaubt nur die vertikale Verformung jedes Gitterelements, was wesentlich weniger Computerressourcen erfordert, als wenn auch die horizontalen Verformungen berechnet werden müssten. Nicht alle Computercodes sind jedoch mit dieser Technik kompatibel. Daher wird die ALE, die eine teilweise Verformung des Gitters ermöglicht, nur in Verbindung mit der Finite-Elemente-Methode⁴ verwendet, da ihre Hauptalternative, die Finite-Differenzen-Methode, auf der Verwendung eines vollständig festen Gitters beruht.
- 27 Es sind also nicht nur die Rechenkosten, sondern auch die Wahl der numerischen Methode, die den Handlungsspielraum der Geodynamiker*innen einschränken. Die numerischen Methoden beeinflussen das Schreiben des Computercodes, da sie auf unterschiedliche Weise diskretisieren (d. h. die Modelldomäne aufteilen). Die Methode der „finiten Differenzen“ nähert die Ergebnisse der Gleichungen an jeder Kreuzung (Knoten) des Modellgitters an. Die Methode der „finiten Elemente“ hingegen tut dies auf der gesamten Fläche jedes Gitterelements. Dieser Unterschied ist von der mathematischen Schreibweise her so grundlegend, dass Modellierende nicht innerhalb desselben Modells zwischen den beiden Methoden wechseln können. Ein Modellierender, der ein auf finiten Differenzen basierendes Modell verwendet, ist daher durch die mathematische Schreibweise zu einer festen Geometrie gezwungen, die es unmöglich macht, das Modellgitter (auch nur teilweise) zu verformen. Man könnte nun also erwarten, dass alle Geodynamiker*innen, die die Bewegungen der Erdkruste darstellen wollen, die andere numerische Methode (der finiten Elemente) anwenden, die eine Verformung zulässt. Dies ist jedoch nicht der Fall. Unsere Forschung bietet mehrere mögliche Erklärungen für dieses scheinbare Paradoxon, die im Folgenden näher erläutert werden.

Computermodelle und numerische Methoden, die vererbt werden

- 28 Die Modellierenden wählen nicht unbedingt die numerischen Methoden aus, die sie verwenden. Die meisten der befragten Geodynamiker*innen verwendeten Modelle, die von anderen Modellierenden entworfen worden waren, und ergänzten und modifizierten diese. Der Fall der Geodynamikerin S., einer Postdoc-Studentin, ist ein

Beispiel dafür. Während ihrer Doktorarbeit hatte S., wie alle anderen Doktoranden der Forschungsgruppe, der sie angehörte, an einem Modell gearbeitet, das von ihren Doktorvätern erstellt worden war. Jeder Doktorand wurde mit der Entwicklung eines anderen Teils des ursprünglichen Codes beauftragt. Für ihre erste Postdoc-Stelle hatte S. das Modell gewechselt und ein Modell verwendet, das von einem ihrer ehemaligen Professoren entwickelt worden war. Zum Zeitpunkt unseres Interviews bereitete sie sich darauf vor, einige Monate später eine neue Stelle anzutreten. Diese neue Stelle würde von S. verlangen, erneut auf ein anderes geodynamisches Modell umzusteigen. Die meisten dieser Wechsel waren durch ihre Ankunft in einer neuen Forschungsgruppe bedingt, in der ein geodynamisches Modell als gemeinsames Arbeitswerkzeug für alle Forschenden diente. Die Modellierenden passen sich dem örtlich verwendeten Modell und einigen der ursprünglichen Entscheidungen ihrer Vorgänger*innen an. S. verwendete während des Interviews häufig den Begriff „Vermächtnis“ (*legacy*). Sie war der Meinung, dass die Anwendung der Finite-Elemente-Methode oder der Methode der finiten Differenzen „nur eine Frage der Vorliebe der Person, die das Modell zuerst codiert hat“⁵ sei. Aufgrund der Auswirkungen dieser ersten Wahl auf die mathematische Schreibweise des Codes (siehe oben) nimmt das, was die Geodynamikerin S. als „Vermächtnis“ bezeichnet, die Form einer Pfadabhängigkeit (David, 1985) an, die durch ihre Irreversibilität gekennzeichnet ist (Edwards *et al.*, 2007). Die Wahl der numerischen Methode zu ändern, würde erfordern, das Originalmodell umzukehren und komplett neu zu schreiben. Dies wäre nicht nur zeitlich und personell sehr aufwendig, sondern würde auch die Stellung der Modelliererin in einem Netzwerk von Akteuren in Frage stellen, das um ein bereits bestehendes Modell und dessen inkrementelle Entwicklung herum aufgebaut ist.

- 29 Die Geodynamikerin S. zeigte eine Mobilität – zwischen Modellen, numerischen Methoden und Forschungsgruppen –, die wir in den anderen Interviews nur selten antrafen. Sie war sich dessen bewusst und gab an, dafür bekannt zu sein, dass sie wiederholt das verwendete Modell wechselte. In den verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen verwendeten die meisten der von uns befragten Modellierenden jedoch noch bis zu zwei Jahrzehnte später weiterentwickelte Versionen eines Modells, mit dem sie sich während ihrer Dissertation oder Postdoc-Forschung vertraut gemacht hatten oder das sie zu diesem Zeitpunkt mitentwickelt hatten. Die Modellierenden haben oftmals eine so hohe berufliche Investition (Pickering, 1985) getätigt, um das Know-how zu erwerben, das ihnen die Arbeit mit einem bestimmten Modell ermöglicht, dass diese Investition die spätere Wiederverwendung des Modells unterstützt. Diese Beobachtungen gelten auch für die numerischen Methoden. Auf der Grundlage unserer Interviews haben wir in einem früheren Artikel (Babel, Vinck & Karssenber, 2019) gezeigt, dass die wiederholte Wahl einer numerischen Methode aufgrund der erworbenen Expertise und der Verankerung in einem Netzwerk von Forschenden, die die gleiche Methode verwenden, auch eine besonders dauerhafte Pfadabhängigkeit initiieren kann. Für diejenigen, die in einer dieser Methoden ausgebildet wurden, ihre Einschränkungen erfahren haben und mit ihr umgehen können, kann der Wechsel zu einem Modell, das auf einer anderen Methode basiert, daher eine so große Investition darstellen, dass sie abschreckend wirken kann.

Modelle als Objekte, die sich entfalten

- 30 Eine Institution scheint eine besonders wichtige Rolle auf diesen Modellierungskurse gespielt zu haben: das Institut für Geophysik der ETH Zürich. Dieses Institut beherbergt zwei besonders dynamische Forschungsgruppen (große Anzahl an Forschenden, zahlreiche internationale Kooperationen, beachtliche Anzahl an Publikationen). Fast alle Geodynamiker*innen, die wir getroffen oder deren Artikel wir studiert haben, haben irgendwann einmal an diesem Institut geforscht. Einer seiner Professoren hat ein weit verbreitetes Fachbuch über Computermodellierung in der Geodynamik geschrieben; wir haben dieses Buch in den Büros von Forschenden gefunden, die wir getroffen haben, und seine Neuauflage wurde sogar bei der Generalversammlung der European Union of Geosciences 2019 vorgestellt und als „Highlight“ gekennzeichnet.
- 31 Die beiden Forschungsgruppen dieses Instituts sind die Urheber von zwei der bekanntesten Modelle der Geodynamik. Beide Modelle basieren auf der Methode der finiten Differenzen. Dies bedeutet, dass ein großes Forschungskollektiv – bestehend aus den Mitgliedern des Instituts und aus Forschenden, die das Institut verlassen haben, aber weiterhin die Modelle verwenden, sowie aus externen Forschenden, die an gemeinsamen Forschungsprojekten teilnehmen – auf einem bestimmten Modellierungspfad eingeschlossen ist, d. h. in der Verwendung einer festen Geometrie. Wir benutzen hier den Begriff des Pfades um darauf hinzuweisen, dass diese Modelle alles andere als zeitlich fixiert sind. Genau wie die von Martina Merz (1999) untersuchten Modellen der Teilchenphysik handelt es sich bei den Modellen, denen wir in den Geowissenschaften begegnet sind, um „sich entfaltende“ (*unfolding*) Objekte. Ihre ständige Veränderung zielt einerseits darauf ab, ihre Effizienz zu verbessern, Instabilitäten zu beseitigen und die Computercodes an die Entwicklungen der verfügbaren Infrastruktur anzupassen. Andererseits handelt es sich bei den Änderungen um Ergänzungen, die es den Nutzern des Modells ermöglichen sollen, zusätzliche Forschungsfragen zu beantworten. Wie die Geodynamikerin S. während ihrer Doktorarbeit arbeiten viele Forschenden an Erweiterungen der beiden Modelle der ETH Zürich. Aufgrund der hohen Anzahl parallel entwickelter Versionen sagte die Geodynamikerin S. in einem Interview sogar, sie habe nie „das echte Ding“ (*the real thing*) gesehen, womit sie das konsolidierte, feststehende Modell meinte, ohne die Zusatzweige, die jeweils neue Untersuchungsansätze und Anwendungen ermöglichen. Diese charakteristische Entfaltung der Modelle scheint häufig einem strategischen Interesse zu folgen. Die Möglichkeit, zusätzliche Forschungsfragen anzugehen, trägt dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit des Modells zu stärken und ein stabiles oder sogar wachsendes Netzwerk von Nutzern aufrechtzuerhalten, und ist in der Regel auch eine Voraussetzung für die Gewinnung neuer Finanzmittel. Manchmal schienen die Modelle jedoch auch außerhalb der Forschungsgruppe, die sie erstellt hatte, weiterentwickelt zu werden. Die Änderungen wurden dann von Einzelpersonen oder Kollektiven vorgenommen, die Erfahrung im Umgang mit bestimmten Modellen gesammelt hatten und diese weiterhin nutzen, aber an ihre aktuelle Forschung anpassen wollten.
- 32 Diese Dynamiken der Verriegelung (durch Pfadabhängigkeiten) und der Entfaltung ermöglichen es, das auf den ersten Blick paradoxe Auftreten von Techniken wie der der „klebrigen Luft“ innerhalb von Computermodelle besser zu verstehen. Die Zirkulation von Forschenden und ihre Beziehungen führen zur Bildung von Modellierungstraditionen, deren Begrenzungen Innovationen hervorrufen, ohne das

ursprüngliche Modell umzuwerfen. Die „Methode der klebrigen Luft“ ermöglicht es, die Modelle auf neue Anwendungen (eine dynamische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Kruste und Mantel) auszurichten, ohne von dem festgefahrenen Modellierungspfad abzuweichen, auf dem sie sich befinden (d.h. die Verwendung eines festen Modellgitters). Auf diese Weise wurde uns bewusst, wie wichtig die Modellierungskurse und Beziehungen zwischen den Forschenden sind, um die „Wahl“ der Methoden und die Prozesse der Konsolidierung von Modellen, zu verstehen.

Einführung einer fiktiven Entität: die Methode der „klebrigen Luft“ als Mittel der Entkopplung

- 33 Wie wir gesehen haben greifen Modelle, die die Methode der „finiten Differenzen“ verwenden, greifen, auf ein völlig festes Gitter zurück. In der Regel stellt die obere Grenze der Modelldomäne (die obere Seite des Rechtecks; siehe Abb. 2a) die Erdkruste dar. Nach Ansicht der Modellierenden liegt hier der größte Haken dieses Modells im Hinblick auf die Darstellung der Bewegungen der Kruste, da diese Obergrenze mathematisch nicht in Bewegung gesetzt werden kann. Laut unserer Untersuchung besteht eine der am weitesten verbreiteten Lösungen für das, was wie eine Sackgasse aussehen könnte, aus einem Kunstgriff. Wenn der obere Rand des Rechenmodells nicht mehr der obere Rand des konzeptualisierten Erdsystems ist, sieht die Situation in der Tat ganz anders aus. Um die beiden Ränder voneinander zu trennen, führen die Modellierenden eine fiktive Schicht klebriger Luft ein. Die beiden Ränder können nun getrennt behandelt werden: Der obere Rand des Modellgebiets, die von der Erdkruste abgetrennt wurde (siehe Abb. 2b), ist nur noch eine abstrakte Abgrenzung, die für die numerische Verarbeitung erforderlich ist, aber keine physikalische Bedeutung hat. Sie muss nicht mehr in Bewegung gesetzt werden. Die Erdkruste und ihre Grenze zum Erdmantel befinden sich innerhalb der Modelldomäne und Geodynamiker*innen können ihre Interaktionen mit weit verbreiteten Methoden⁶ darstellen, die mit der Verwendung eines festen Modellgitters kompatibel sind.

Ein fiktiver Hybrid, halb Luft, halb Gestein

- 34 Die klebrige Luftschicht ist also ein Trick, um die beiden Ränder zu trennen (Abb. 2b) und so ein festes Modellgitter weiter zu verwenden. Dieses fiktive Gebilde ist im konzeptuellen Modell nicht vorhanden, wird aber von den Geodynamiker*innen wie alle anderen Komponenten des Modells mit physikalischen Eigenschaften versehen: Dichte, Dicke und Viskosität. Die Geodynamiker*innen weisen diese Werte jedoch nicht zufällig zu. Auch wenn diese Entität fiktiv ist, hat sie, sobald sie in das Computermodell eingeführt wird, Auswirkungen auf den Rest des Computermodells und auf die erforderliche Recheninfrastruktur. Der Computer ist nämlich so programmiert, dass er die Differentialgleichungen für jede Zelle des Gitters löst, einschließlich der Zellen, die die „klebrige Luft“ darstellen. Weitere Zellen hinzuzufügen bedeutet, die Anzahl der Berechnungen zu erhöhen und damit auch die Zeit, die benötigt wird, um das Modell „laufen“ zu lassen und Ergebnisse zu erhalten. Um die Recheneffizienz ihres Modells zu optimieren, versuchen Geodynamiker*innen, die Dicke dieser fiktiven Schicht zu verringern, um die Anzahl der zu berechnenden Maschen zu reduzieren. Je dünner diese Schicht jedoch ist – und je näher sich die Grenze der Erdkruste und der Rand des

Modellgebiets kommen –, desto mehr Widerstand leistet sie gegen die Verformungen der Erdoberfläche und schert sie. Genau das wollen die Geodynamiker*innen aber verhindern, denn sie sind der Ansicht, dass diese fiktive Schicht nicht auf die Oberfläche einwirken sollte. Um es mit den Worten einer der meistzitierten Forschungsarbeiten zu dieser Technik zu sagen, darf sie nicht „spürbar“ sein (Crameri *et al.*, 2012, S. 39).

- 35 An der Grenzfläche zur Erdkruste gibt es jedoch ein Fluid, das im natürlichen Erdsystem nicht „spürbar“ ist: die Luft⁷. Die Geodynamiker*innen, über deren Arbeit wir hier berichten, versuchen, die fiktive Schicht an die Eigenschaften von Luft anzupassen, indem sie ihr eine Dichte von nahezu null zuschreiben. Eine andere Eigenschaft der Luft ist jedoch für ihre Modellierungsziele ungeeignet; die Viskosität der Luft ist im Vergleich zur angrenzenden Erdkruste sehr gering. Numerische Methoden tolerieren nur schwer einen so großen Unterschied, einen abrupten Sprung der Werte von einer Gitterzelle zur anderen. Aufgrund dieses Verhaltens der numerischen Methoden überschätzen die Geodynamiker*innen bewusst die Viskosität der Luft stark. Crameri *et al.* (2012) verwenden in ihrer Studie eine Viskosität zwischen 10^{18} und 10^{20} Pascal*Sekunden (Pa*s) und somit hunderttausend Trillionen Mal höher als die von Luft. Diese Luft mit dem Adjektiv „klebrig“ zu beschreiben, mag daher wie eine Untertreibung klingen. Tatsächlich hat diese Schicht nur noch die Dichte von Luft, während die Viskosität den teilweise geschmolzenen Gesteinen des oberen Mantels ähnelt.
- 36 Die Einbeziehung einer Komponente, die kein Element des beobachteten Systems darstellt und sogar unserem physikalischen Verständnis der Welt widerspricht, ist an sich kaum eine Ausnahme in der Computermodellierung. Winsberg stellte fest, dass es solche Elemente gibt, die „von anderer Natur sind als die gewöhnlichen Idealisierungen, Annäherungen und Vereinfachungen“⁸ (2010, S. 87) und die er als Fiktionen bezeichnet. Die Silogenatome, die er in der Nanomechanik analysiert, die künstliche Viskosität, die bei der Modellierung von Stoßwellen in der Strömungsdynamik angewendet wird (Winsberg, 2006), der „Arakawa-Operator“, der von Lenhard (2007) untersucht wird, und die Kontaminationsrate des Teilchenstrahls in der Untersuchung des Experiments „K+ - Deuterium Interactions at 3 GeV/c“ in der Hochenergiephysik (Thill, 1973) teilen somit mit der „klebrigen Luft“ die Eigenschaft, dass sie in Computermodelle eingeführt werden, um deren allgemeine Abbildungsfähigkeit zu verbessern. Wie Winsberg es formuliert: „Wir machen die Dinge absichtlich lokal falsch, um sie global richtig zu machen“⁹ (2010, S. 92). Die in den vorherigen Abschnitten eingebrachten Elemente ermöglichen es, das im vorherigen Zitat von Winsberg skizzierte „lokal“ einzugrenzen und zu kartographieren. An der oberen Grenze der Modelldomäne – an diesem Ort der Reibung zwischen einerseits der Entfaltung der Modelle im Hinblick auf neue Forschungsfragen und andererseits von Modellierungspfaden, die auf einer völligen Unbeweglichkeit des Modellrasters beruhen – entsteht die „klebrige Luft“, um mit diesen Antagonismen zurechtzukommen.
- 37 Wie wir in mehreren Gesprächen und in unseren informellen Interaktionen im Rahmen unserer Praxis beobachtet haben, haben Modellierende in den Geo- und Umweltwissenschaften oft ein ambivalentes Verhältnis zu diesen Modellierungstricks. Auf der einen Seite erscheinen ihnen diese in ihren Verhandlungen mit der Computer-Infrastruktur als notwendig und werden daher weitgehend verwendet und verbreitet. Andererseits scheinen sie sie bei der Präsentation ihrer Arbeit in Verlegenheit zu

bringen, als ob die Erwähnung solcher Praktiken die Ergebnisse der Modelle, in den Augen der Gesprächspartner oder Leser diskreditieren könnte. Die nächsten Abschnitte beschäftigen sich daher mit der Frage, wie Geodynamiker*innen die Fiktion der „klebrigen Luft“ nutzen, um sie zu verbreiten, zu kommunizieren und ihre Auswirkungen auf den Rest ihres Modells zu zähmen.

Die klebrige Luft als eigenständiger Forschungsgegenstand

- 38 Während der Trick, eine zusätzliche Schicht über die Erdkruste zu legen, in der Geodynamik mindestens seit Matsumoto und Tomoda (1983) bekannt ist, scheint der Begriff „sticky air“ (klebrige Luft) erstmals in der wissenschaftlichen Literatur in einem Artikel von Schmeling *et al.* aus dem Jahr 2008 aufgetaucht zu sein. Die Autor*innen verwenden ihn dort neben anderen Beschreibungen wie „soft surface layer“ (weiche Oberflächenschicht) oder „artificial layer“ (künstliche Schicht). Wenn man sie als Schicht aus weichem Material betrachtet, bezieht man sich auf ihre Viskosität. Wenn man sie als Luftschicht betrachtet, bezieht man sich auf ihre Dichte. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Autor*innen zwischen diesen beiden Bezeichnungen schwanken, die jeweils eine Analogie für eine der Eigenschaften der betreffenden Schicht bieten. Der Begriff „künstliche Schicht“ erinnert uns daran, dass dieses Element im konzeptuellen Modell der Geowissenschaften nicht existiert.
- 39 Einige Jahre nach Schmeling *et al.* greifen Quinquis, Buitter und Ellis (2011) den Begriff „klebrige Luft“ ausgiebig auf und sprechen sogar einfach von einer „Luft“schicht („air“ layer). Hier erinnern nur die Anführungszeichen an die Einzigartigkeit dieser Luft, die hunderttausend Trillionen Mal zähflüssiger ist als das Gasgemisch, das wir einatmen. Es war jedoch der Artikel von Crameri *et al.* (2012), der einen endgültigen Wendepunkt in der Verwendung des Begriffs – und auch in der Verwendung der Technik selbst – zu markieren scheint. Zum ersten Mal wurde die Methode der „klebrigen Luft“ in den Titel eines wissenschaftlichen Artikels aufgenommen. Die Autor*innen, von denen die meisten dem Institut für Geophysik der ETH Zürich (siehe oben) angehören, versuchen, die Methode der „klebrigen Luft“ zu bewerten und die Bedingungen für die Gültigkeit ihrer Anwendung zu bestimmen. Sie tun dies nicht nur theoretisch, indem sie die physikalischen Gleichungen analysieren, sondern auch, indem sie die Modellierungen, die sie mit einer „klebrigen Luft“ erhalten, mit denen vergleichen, die andere Methoden verwenden (z. B. eine vertikale Verformung des Modellgitters). Das Ergebnis der Studie ist eine Gleichung, mit der laut den Autoren „geeignete“ Werte für die Viskosität, Dicke und Fließgeschwindigkeit der „klebrigen Luft“ ermittelt werden können.
- 40 Von einem diskret angewandten Trick, der in den meisten vorherigen Artikeln praktisch verborgen war und keine stabilisierte Bezeichnung hatte, wurde die „klebrige Luft“ plötzlich zu einem Forschungsobjekt. Seine Wirkungsfähigkeit wird zur Schau gestellt und bewertet. Die Fragestellung des Artikels bezieht sich nicht mehr auf die Naturphänomene, die mithilfe der „klebrigen Luft“ untersucht werden können, sondern auf die Handlungen des Objekts selbst und auf seine Interaktion mit dem Rest des Verfahrensmodells. Die „klebrige Luft“ wird von einem Objekt, das der Forschung *dient*, zu einem Objekt, das modellinterne Forschungsfragen zu seiner eigenen Funktionsweise und seinem Verhalten *generiert*. Damit besitzt er die Eigenschaften, die der Anthropologe Matt Spencer, der die Arbeiten des Wissenschaftshistorikers Hans-

Jörg Rheinberger aufgreift, den „methodologischen epistemischen Objekten“ in den Computerwissenschaften zuschreibt (Spencer, 2019). Die Entwicklung der „klebrigen Luft“ ist bei weitem kein Einzelfall in den numerischen Methoden. Sobald man davon ausgeht, dass diese Methoden wirken können – und nicht nur auf die von den Modellierenden vorgesehene Art und Weise –, werden sie zum Gegenstand von Analysen ihres Verhaltens in verschiedenen Situationen. In einem Interview im Januar 2022 amüsierte sich einer der Mitautoren des Artikels von Crameri *et al.* (2012) rückblickend über die Tatsache, dass die Studie erst nach der „empirischen Anwendung“ der „klebrigen Luft“ durchgeführt wurde. Dennoch sind vermutlich gerade die schnelle Verbreitung der „klebrigen Luft“ in der geodynamischen Gemeinschaft und ihre Bedeutung – die Öffnung bestehender Modelle für die Untersuchung der Bewegungen der Erdoberfläche – der Grund dafür, dass das Verhalten und die Eigenschaften der „klebrigen Luft“ als so interessant erachtet wurden, dass eine so große Studie durchgeführt und veröffentlicht wurde. An der Studie waren zehn Forschenden beteiligt, darunter einige der bekanntesten Namen der europäischen Geodynamik. Für diese Studie arbeiteten sie mit sechs verschiedenen Modellen. Da jedes Modell über ein eigenes Netzwerk von Anwender*innen mit unterschiedlichen Ansätzen und Modellierungspfaden verfügt, kann die von den Autoren vorgenommene Bewertung der „klebrigen Luft“ global erscheinen; dieser modellübergreifende Vergleich trägt dazu bei, die Glaubwürdigkeit der Methode für ein breites Publikum zu erhöhen. Der Artikel, der in einer anerkannten geophysikalischen Fachzeitschrift erschien, scheint inzwischen zu einem unverzichtbaren Zitat für jede Forschung geworden zu sein, die „klebrige Luft“ einbezieht. Mehr noch, er ersetzt die Beschreibung der Technik und ihrer Funktionsweise in vielen nachfolgenden Artikeln¹⁰, als ob es die Zurschaustellung des Tricks im Artikel von Crameri *et al.* (2012) nun erlauben würde, die Black Box zu schließen.

Bezugnahme auf Luft zur Erhöhung der Glaubwürdigkeit

- 41 Die von Fabio Crameri und seinen Kollegen durchgeführte Studie hat zwar dazu beigetragen, die Glaubwürdigkeit der „klebrigen Luft“ zu festigen – durch den Status, den sie der Technik verleihen, durch die Einbeziehung verschiedener Modelle, die von unterschiedlichen Kollektiven angewendet wurden und durch die Beteiligung von Forschenden mit Autorität in der Disziplin. Wir argumentieren jedoch, dass die stabilisierte Bezeichnung („klebrige Luft“ statt „weiche Oberflächenschicht“ oder „künstlichen Schicht“ wie am Anfang) ebenfalls dazu beiträgt. Dass sie sich gegen diese konkurrierenden Beschreibungen durchgesetzt hat, scheint auch auf die Versuche zurückzuführen zu sein, dieser Komponente innerhalb des konzeptuellen Modells eine Bedeutung zu geben. Die klebrige Luftschicht ist ein Trick des Rechenmodells, der digitalen Verarbeitung des Systems. Sie hat eine Rolle und eine Begründung innerhalb des Rechenmodells, aber keine im konzeptuellen Modell. Da sie als Luft bezeichnet wird, ist sie jedoch auch im konzeptuellen Modell mit Bedeutung aufgeladen. Die Erdkruste ist tatsächlich von Luft überlagert! Einen Teil der Atmosphäre in die „Box“ des Modells zu integrieren, erscheint nicht abwegig. Eine mehrere Dutzend Kilometer dicke Schicht aus einem festen, extrem viskosen Material über der Erdkruste hinzuzufügen, dürften Leserinnen und Leser der Geodynamik eher in Frage stellen: Im natürlichen System, das wir kennen, gibt es so etwas nicht. Wenn Geodynamiker*innen die Pufferschicht mit dem Substantiv „Luft“ bezeichnen, unterstreichen sie damit die

partielle Ähnlichkeit mit dem konzeptuellen Modell. Der Unterschied wird dagegen durch die Adjektivierung in den Hintergrund gedrängt und zu einem Attribut: Diese Luft ist klebrig. Das Adjektiv wird manchmal nur noch angedeutet (z. B. durch Anführungszeichen – siehe das Zitat aus Quinquis, Buiter & Ellis, 2011, oben) oder aus Gründen der Kürze sogar aus den Namen der Variablen gestrichen:

Die obere Hälfte des Modells wird mit einer dicken Schicht „klebriger Luft“ gefüllt, mit Dichte ρ_{Luft} und Viskosität η_{Luft} um eine freie Oberfläche zu simulieren¹¹ (Fuchs, Koyi & Schmeling, 2015, S. 82).

- 42 Die Verwechslung zwischen der klebrigen Luft und der Luft in unserem natürlichen System erinnert an die von der Anthropologin Myanna Lahsen (2005) beobachtete Verwechslung zwischen dem modellierten und dem beobachteten Element in der mündlichen Kommunikation von Klimamodellierenden. Die Verschwommenheit zwischen den beiden Bedeutungen (sei sie beabsichtigt oder nicht) und das Zurückdrängen dieser besonderen Viskosität in ein kaum beschriebenes Attribut („klebrig“) scheinen dazu beizutragen, die Glaubwürdigkeit der Methode zu festigen, ebenso wie die Verwendung des Substantivs „Luft“, das sich auf ein Element bezieht, das tatsächlich die Erdkruste umgibt. Wir sehen in dieser Verwechslung keine nachweisliche Täuschung, die darauf abzielt, Leser*innen der Geodynamik über die Natur dieser Schicht in die Irre zu führen. Vielmehr handelt es sich um einen Versuch, den fiktiven Charakter dieses Elements abzuschwächen, aus der – in den Erd- und Umweltwissenschaften offenbar weit verbreiteten – Befürchtung heraus, dass die Erwähnung einer solchen Fiktion die Darstellungskraft von Modellierungen mindern könnte. Die methodologischen Abschnitte von Artikeln über geodynamische Modellierung wirken wie „grey boxes“: Manche ihrer Bestandteile zeigen sie, damit die Leser*innen die Zusammenhänge verstehen, die Methode bewerten und sie wiederverwenden können, während sie einige ihrer Eigenschaften unsichtbar machen, um keine Bresche in eine Konstruktion zu schlagen, die der Kritik der Leser*innen und der Fachkollegen standhalten soll. Wir möchten anmerken, dass die Singularität der „klebrigen Luft“ – ihre fehlende physikalische Bedeutung und ihre extreme Viskosität im Vergleich zu Luft – in der geodynamischen Literatur kaum diskutiert wird. Lediglich in einem Artikel von Duretz, May und Yamato (2016), in dem eine alternative Technik vorgestellt wird, wird explizit auf ihre fiktive Natur hingewiesen. Diese wird jedoch erst am Ende des Artikels als Einschränkung hinzugefügt. Sie findet sich in einer abschließenden Aufzählung der Vorteile ihrer Methode, die im Gegensatz zur „klebrigen Luft“ *„keine willkürlichen Entscheidungen über die Materialeigenschaften eines fiktiven Fluids erfordert“*¹². Der Hintergrund zweier Autoren – Co-Autoren der Studie von Cramer *et al.* (2012) über die „klebrige Luft“ – und einige Aussagen aus Interviews lassen uns diese Formulierung dennoch eher der Rhetorik zuschreiben, als sie als Zeichen einer bestehenden Kontroverse zu werten.

Repräsentation des fiktiven Wesens

- 43 Computermodellierungen in den Geowissenschaften sind Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Veröffentlichungen in Form von Artikeln. In der Methodik beschreiben die Autoren in der Regel das verwendete Modell und seine Hauptgleichungen, die gewählten Parameterwerte, die vorgenommenen Annäherungen sowie die verwendete räumliche und zeitliche Auflösung. Im Vergleich zu anderen geowissenschaftlichen Disziplinen (wie Hydrologie, Geomorphologie, Klimatologie oder

Ozeanographie) fügen Geodynamiker*innen ihren Artikeln eine visuelle Darstellung der Modelldomäne hinzu, die sich aus den verschiedenen modellierten Schichten zusammensetzt. Da Geodynamiker*innen gerade an der dynamischen Entwicklung dieser Schichten interessiert sind, sind diese anfänglichen Abbildungen besonders wichtig.

- 44 Der Rückgriff auf die Schicht „klebriger Luft“ ist eine Konvention unter Geodynamiker*innen, die sie jedoch in eine ungewöhnliche Situation bringt. Da die „klebrige Luft“ Teil der Modelldomäne ist, verleihen die Geodynamiker*innen ihr eine visuelle Präsenz: eine abgegrenzte Fläche, einen Farbcode, eine Legende. Während die numerische Existenz dieser Entität in Tausenden von Zeilen Computercode untergeht und nur für diejenigen sichtbar ist, die sie lesen können, ist ihre visuelle Existenz offensichtlich: Die „klebrige Luft“ ist offen neben den Materialschichten (z. B. kontinentale Kruste, Sedimente, Mantel) zu sehen, deren Verhalten den zentralen Gegenstand der veröffentlichten Artikel bildet. Dennoch bleibt sie unauffällig. Die Autorinnen und Autoren schreiben ihr meist die Farbe Weiß zu, während die anderen Schichten reichlich farbig sind. Da sie weiß auf dem weißen Blatt Papier ist, oder weiß auf dem elektronischen Dokument mit weißem Hintergrund, bleibt die Schicht der „klebrigen Luft“ fast unsichtbar: Sie offenbart sich dem Leser nur durch den Spalt, den sie durch ihre Anwesenheit zwischen der Obergrenze des Modells und der Erdoberfläche hinterlässt.

Abbildung 3: Visuelle Darstellung der klebrigen Luftschicht

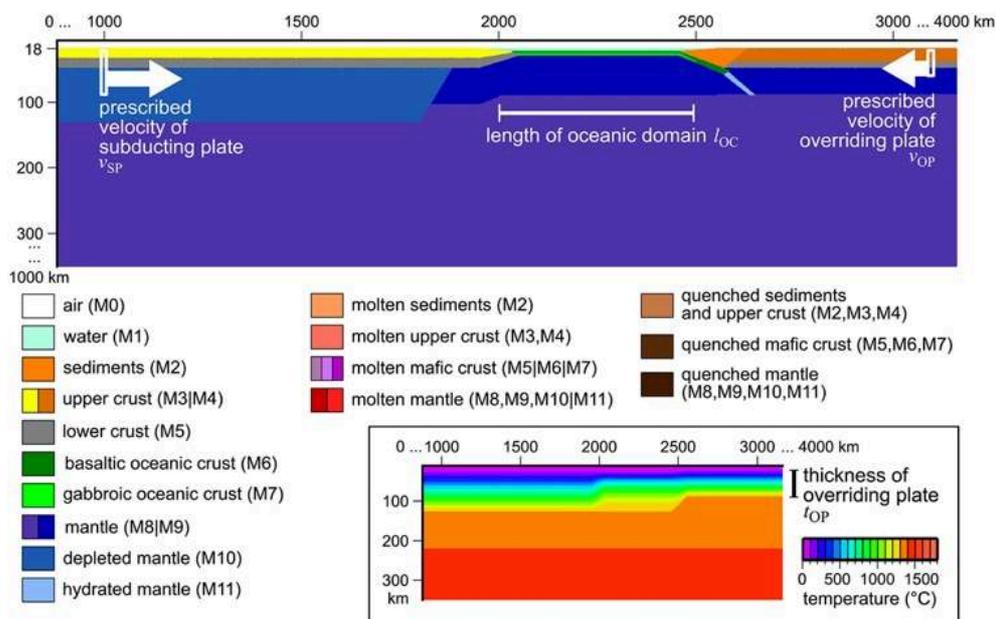


Illustration aus dem Artikel von Maierová, Schulmann und Gerya (2018), die die anfängliche Verteilung der „Materialien“ in der Modelldomäne und das Temperaturfeld darstellt. Mithilfe des verwendeten Modells wollen die Forschenden die Transformationen der kontinentalen Kruste bei einer Kollision zwischen zwei tektonischen Platten simulieren.

Credits: © American Geophysical Union, alle Rechte vorbehalten. Reproduziert mit Genehmigung des Herausgebers.

- 45 Die Abbildung 3 zeigt eine dieser Darstellungen. Ein schmaler weißer Streifen überlagert den restlichen Bereich des Modells. Die Legende, die diesen Streifen bezeichnet, ist hier von besonderem Interesse. Das isoliert verwendete Substantiv

(Luft) lässt nochmals vermuten, dass die Autor*innen tatsächlich die ersten achtzehn Kilometer der Atmosphäre in ihr konzeptuelles Modell einbeziehen wollten. Wir wissen, dass dies nicht der Fall ist, da die Atmosphäre dort keine Rolle spielt. In ihrer Nummerierung kürzen die Autor*innen sie mit dem Code M0 ab; die Luft ist das Material (M) null. Diese Nummerierung verdeutlicht die zweideutige Position der klebrigen Luftschicht, die zwar in die Modelldomäne einbezogen und somit abgebildet wird, aber eine andere Art von Material ist, das keinen Einfluss haben sollte, das nicht zählt – wie es auch im konzeptuellen Modell nicht zählt.

Die „Instabilität des betrunkenen Seemanns“: ein unerwünschter Effekt, der nach weiteren Modellierungstricks ruft

- 46 Die Schicht aus „klebriger Luft“ hat jedoch einen weitaus größeren Einfluss, als die Analogien zur Luft vermuten lassen. Erstens durch die Tatsache, dass sie zusätzliche Maschen des Modellgitters belegt und damit den Rechenaufwand für die Modellierung erhöht (siehe oben). Zweitens in noch direkterer Weise auf den Rest des Modells, wie wir weiter unten sehen werden.
- 47 Die „klebrige Luft“ ermöglicht es den Geodynamiker*innen, die Erdkruste als freie Oberfläche zu modellieren, die sich verformen, aber auch instabil sein kann. Freie Oberflächen neigen dazu, eine Anomalie in Computermodellen hervorzurufen, die als „*drunken sailor instability*“ bekannt ist (Kaus *et al.*, 2010; Gerya, 2019). Die Fließgeschwindigkeit des Gesteins beginnt dann, in jedem Zeitintervall die Richtung zu wechseln (Kaus *et al.*, 2010), wodurch die Erdkruste wiederholt angehoben und wieder abgesenkt wird. Dieses Problem ist die Kehrseite des Erfolgs der Methode. Weil es den Geodynamiker*innen gelingt, eine freie Oberfläche zu approximieren, sehen sie sich mit dieser erstaunlich oszillierenden Erdkruste konfrontiert, die ihre Ergebnisse verfälscht.
- 48 Der Weg, auf dem die Modellierenden den Trick mit der „klebrigen Luft“ entwickelt haben, war bereits sehr kurvenreich, aber es sind noch einige zusätzliche Kurven nötig, um diese Anomalie zu überwinden. Verschiedene Behelfslösungen wurden entwickelt und in die Modelle integriert, darunter Stabilisierungsalgorithmen (Duretz *et al.*, 2011; Kaus *et al.*, 2010) und Zeitintegrationsschemata (Furuichi & May, 2015). Auch diese neuen numerischen Tricks fehlen im konzeptuellen Modell des untersuchten natürlichen Systems völlig. Sie korrigieren sozusagen „nur“ die unerwünschten Effekte der „klebrigen Luft“. Dennoch führen sie in der geowissenschaftlichen Literatur ein Eigenleben. Ihre Auswirkungen auf die Modellgleichungen, die Ergebnisse der Modellierung und den Ressourcenverbrauch werden analysiert, bewertet und diskutiert.
- 49 Die große Anzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die numerische Methoden hervorbringen, sowie ihre wiederholte Präsentation und Diskussion auf Konferenzen zeugen von den Herausforderungen, die sie für die geodynamische Gemeinschaft darstellen. Dabei handelt es sich nicht um bloße technische Details eines eingespielten Prozesses. Vielmehr stimmen wir mit dem Anthropologen Matt Spencer (2019) darin überein, dass numerische Methoden Forschungsobjekte sind, die die Forschenden in den Disziplinen mobilisieren, in denen diese Methoden entwickelt und angewendet werden. Diese Methoden, Tricks und fiktiven Entitäten beleben

Forschungsgemeinschaften, für die sie epistemische Objekte darstellen, ebenso wie die Phänomene, die sie letztendlich erforschen.

Schlussfolgerung

- 50 Die Geodynamiker*innen und die Entitäten, die sie produzieren und mobilisieren, folgen den festgefahrenen und gleichzeitig sich entfaltenden Modellierungspfaden auf kurvenreichen Wegen und überwinden aufeinanderfolgende Hindernisse durch mathematische, numerische und konzeptuelle Tricks, die Gegenstand von Diskussionen und konsensualer Ausarbeitung sind. Die erste Lehre aus dieser Fallstudie besteht gerade in der Nichtlinearität dieses Weges, im Gegensatz zu dem, was die unidirektionalen Pfeile der Operationsschemata (siehe Abb. 1) über die Aktivität der Modellierung suggerieren. Der Übergang von einer quantitativen Beschreibung der Prozesse (dem konzeptuellen Modell) zu einem mathematischen Modell und dann zu einem computerausführbaren Code (dem Rechenmodell) verpflichtet die Modellierenden zu kollektiven Erkundungen, Verhandlungen und Kompromissbildungen – zwischen den manchmal verriegelten Modellierungspfaden, auf denen sie sich gemeinsam bewegen; dem Willen, sich strategisch auf neue Ziele auszurichten; ihrem Verständnis der Prozesse; den materiellen und wirtschaftlichen Grenzen ihrer Infrastruktur; und der Eignung der Ergebnisse für das konzeptuelle Modell, auf das sie sich zurückbesinnen. Diese Dynamiken sind je nach Modellierungssituation unterschiedlich. Es handelt sich nicht um eine Reihe von übertragbaren oder automatisierbaren Vorgängen. Die Soziologin Mikaela Sundberg fasst den Übergang zum ausführbaren Code mit dem Begriff „Übersetzung“ (2010, S. 273) zusammen. Diese „Übersetzung“ ist im Sinne der Akteur-Netzwerk-Theorie zu verstehen als Verschiebung, Transformation und Verrat der beteiligten Entitäten – in diesem Fall des konzeptuellen Modells und des Rechenmodells –, die ihre Gleichsetzung (Callon, 1986) und ihre Neuschöpfung (Eco, 2007) begründen. Im Laufe der Transformationen vom mathematischen Modell zum Rechenmodell wird das modellierte Erdsystem in der Tat erheblich verändert. Es wurde nicht nur in eine endliche Anzahl von Zellen zerlegt, um die Lösungen der verwendeten Differentialgleichungen annähern zu können. Die Prozesse, die auf einer kleineren Skala als der der Gitterzellen ablaufen, mussten außerdem vereinfacht werden. Insbesondere wurde auch das Erdsystem um eine neue Komponente bereichert, ähnlich wie in dem von Bruno Latour (1993) beschriebenen Prozess der „(Re)ⁿ-Präsentation“. Die Oberfläche unseres Planeten wurde mit einer mehrere Dutzend Kilometer dicken Schicht aus einem Material bedeckt, das in unserer sinnlich wahrnehmbaren Welt unbekannt ist und das die Dichte von Luft und die Viskosität des Erdmantels aufweist.
- 51 Dieser numerische Trick bleibt nicht im Rechenmodell stecken. Wir haben gesehen, wie einige Autoren der Geodynamik ihn durch eine semantische Verschiebung stromaufwärts führen, bis hin zu dem konzeptuellen Modell, aus dem dieser Hybrid hätte hervorgehen können. Tatsächlich müssen numerische Methoden in Worte gefasst werden, um präsentiert, analysiert und mit Peers geteilt werden zu können. Die Analyse wissenschaftlicher Artikel hat es ermöglicht, eine der Herausforderungen im Zusammenhang mit der Versprachlichung dieser Bruchstücke von Computercodes herauszustellen: die einer zusätzlichen Glaubwürdigkeit, die durch Bezeichnung und Abbildung angestrebt wird und die es wert wäre, durch ethnografische Studien erfasst

zu werden. Innerhalb der analysierten wissenschaftlichen Artikel lässt die Verwirrung, die zwischen den beiden Bedeutungen von (klebriger oder nicht klebriger) Luft aufrechterhalten wird, die Grenzen zwischen konzeptuellen, mathematischen und Rechen-Modellen verschwinden. Ist diese weiße (also auf dem Blatt Papier unsichtbare) „Luft“, dieses nicht-zählende Nullmaterial, nicht die Luft-ohne-Anführungszeichen? Der numerische Trick, in all seiner Fiktionalität (Winsberg, 2010), tritt in den Hintergrund; aufgrund der Wortwahl und der visuellen Darstellung scheint nur noch das Gasgemisch übrig zu bleiben, dessen Vorhandensein wir nicht in Frage zu stellen wagen würden. Wir müssen uns an die Entstehungsgeschichte erinnern, an den Weg, der durch Verhandlungen und Erkundungen im Kontakt mit den Pfaden und Grenzen des Modells gekennzeichnet ist, um nicht in die Irre geführt zu werden und die klebrige Luft als ein Element zu sehen, das nur für die Zwecke des Verfahrensmodells geschaffen wurde.

- 52 Diese Beobachtung bleibt nicht ohne Folgen für unseren Ansatz der Computermodellierung. Zunächst einmal zeigt sie – wir paraphrasieren hier Lenhard (2007, S. 87) mit unserer eigenen Terminologie – dass das Rechenmodell teilweise von den konzeptuellen und mathematischen Modellen losgelöst ist. Dort taucht nämlich ein Element auf, das in den konzeptuellen und mathematischen Modellen nicht vorhanden ist und weder von ihnen abgeleitet noch an sie angenähert wird. Der Übergang vom mathematischen Modell zum Rechenmodell, das auf dem Computer ausgeführt werden kann, ist somit das Ergebnis einer Neuschöpfung, einer vollwertigen Neumodellierung, die mit den besonderen Einschränkungen der digitalen Verarbeitung ausgehandelt wird. Die Tatsache, dass wir in diesem Schritt des „Ausführbarmachens“ einen kreativen Prozess sehen, wie Winsberg (2010) und Spencer (2012b), steht im Gegensatz zu dem technologischen Determinismus, der mangels Untersuchungen oftmals von den Arbeiten der Wissenschaftsforschung, die sich mit der Modellierung befassen, suggeriert wird. Unsere Untersuchung der Methode der „klebrigen Luft“ hat die Koexistenz von Wahlmöglichkeiten und alternativen Wegen zur Implementierung desselben Prozesses hervorgehoben. Für die Geodynamiker*innen, mit denen wir gesprochen haben, ist die Methode der „klebrigen Luft“ nur eine von mehreren möglichen Routen. Dass viele von ihnen diesen Weg wählen, lässt sich nicht allein durch einen Vergleich der Rechenkosten der verschiedenen Methoden erklären. Die Bedeutung von Pfadabhängigkeiten, gesammelter individueller und disziplinärer Erfahrung und Zusammenarbeit sollte durch Feldstudien weiter untersucht werden. Diese würden es ermöglichen, die Entstehung und Stabilisierung von Praktiken der Computermodellierung besser zu erfassen, die einen immer größeren Teil der wissenschaftlichen Forschung in den Geowissenschaften darstellen.
- 53 Wenn es kreative und ausgehandelte Praktiken gibt, wenn die Entwicklung und Auswahl einer numerischen Methode innerhalb der Disziplinen, die sie anwenden, von so großer Bedeutung ist, ist es in der Tat erstaunlich, dass die Untersuchung von Rechenmodellen bislang vor allem eine Domäne der Wissenschaftsphilosophen¹³ war. Spencer (2012b und 2019) und seine ethnographischen Arbeiten zu Modellen in den Computational Sciences bilden hier eine bemerkenswerte Ausnahme, obwohl sie bisher von den verschiedenen Ansätzen der Wissenschaftsforschung zur geowissenschaftlichen Modellierung ignoriert wurden. Die Methode der „klebrigen Luft“, die die Grenzen der Modelldomäne von denen der Kruste und des Mantels trennt, fordert uns schließlich auf, andere Grenzen zu überschreiten: die Grenzen, die die Gebiete der STS-Studien der Modellierung der Geowissenschaften einerseits und der

STS-Studien der Computerwissenschaften andererseits voneinander abgrenzen – obwohl sie durch die Natur des numerischen Instruments selbst unleugbar miteinander verflochten sind.

*Wir bedanken uns herzlich bei Thibault Duretz für den Austausch in verschiedenen Phasen der Entstehung dieses Artikels und bei den anderen Geodynamiker*innen, die wir kontaktiert haben, für ihre Verfügbarkeit und den Enthusiasmus, mit der sie uns von ihrer Forschung berichtet haben. Eine frühere Version dieses Artikels war Gegenstand eines Doktoranden-Workshops des STS Lab der Universität Lausanne und erhielt Rückmeldungen vom Redaktionskomitee der Zeitschrift Terrains & Travaux. Schließlich danken wir den vier anonymen Reviewern der RAC für ihre wertvollen Kommentare, die es uns ermöglicht haben, diese neue Version des Artikels zu verbessern, und bei Niels Kuchenbuch für das deutsche Lektorat.*

BIBLIOGRAPHIE

- Armatte, M. & Dahan Dalmedico, A. (2004). Modèles et modélisations, 1950-2000 : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux. *Revue d'histoire des sciences*, 57(2), 243-303.
- Babel, L., Vinck, D. & Karssenber, D. (2019). Decision-making in model construction: unveiling habits. *Environmental Modelling & Software*, 120, 104490.
- Balazs, A., Faccenna, C., Ueda, K., Funicello, F., Boutoux, A., Blanc, E. J.-P. & Gerya, T. (2021). Oblique subduction and mantle flow control on upper plate deformation: 3D geodynamic modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, (569), 117056.
- Beven, K. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16(1), 41-51.
- Braun, J. (2010). The many surface expressions of mantle dynamics. *Nature Geoscience*, 3(12), 825-833.
- Burbank, D. W. & Pinter, N. (1999). Landscape evolution: the interactions of tectonics and surface processes. *Basin Research*, 11, 1-6.
- Callon, M. (1986). Éléments pour une sociologie de la traduction. La domestication des coquilles Saint-Jacques dans la Baie de Saint-Brieuc. *L'Année sociologique*, (36), 169-208.
- Crameri, F., Schmeling, H., Golabek, G.J., Duretz, T., Orendt, R., Buiter, S.J.H., May, D.A., Kaus, B.J.P., Gerya, T.V. & Tackley, P.J. (2012). A comparison of numerical surface topography calculations in geodynamic modelling: An evaluation of the 'sticky air' method: Modelling topography in geodynamics. *Geophysical Journal International*, 189(1), 38-54.
- Dahan Dalmedico, A. (2007). Models and simulations in climate change. Historical, epistemological, anthropological and political aspects. In A.N.H Creager, E. Lunbeck & M. Norton Wise (dir.). *Science Without Laws: Model Systems, Cases, Exemplary Narratives*. Durham: Duke University Press.
- David, P. A. (1985). Clio and the Economics of QWERTY. *The American Economic Review*, 75(2), 332-337.

- Dowling, D. (1999). Experimenting on Theories. *Science in Context*, 12 (2), 261-273.
- Duretz, T., May, D. A., Gerya, T. V. & Tackley, P. J. (2011). Discretization errors and free surface stabilization in the finite difference and marker-in-cell method for applied geodynamics: A numerical stud., *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(7).
- Duretz, T., May, D., Yamato, P. (2016). A free surface capturing discretization for the staggered grid finite difference scheme. *Geophysical Journal International*, 204, 1518-1530.
- Eco, U. (2007). *Dire presque la même chose*. Paris : Grasset.
- Edwards, P., Jackson, S., Bowker, G., Knobel, C. (2007). Understanding Infrastructure: Dynamics, Tensions, and Design. Report of a Workshop on “History & Theory of Infrastructure: Lessons for New Scientific Cyberinfrastructure”.
- Edwards, P. (2013). *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, And The Politics Of Global Warming*. Cambridge: The MIT Press.
- Fuchs, L., Koyi, H. & Schmeling, H. (2015). Numerical modeling of the effect of composite rheology on internal deformation in down-built diapirs. *Tectonophysics*, (646), 79-95.
- Fujimura, J. H. (1987). Constructing ‘Do-able’ Problems in Cancer Research: Articulating Alignment. *Social Studies of Science*, 17(2).
- Furuichi, M. & May, D. A. (2015). Implicit solution of the material transport in Stokes flow simulation: Toward thermal convection simulation surrounded by free surface. *Computer Physics Communications*, (192), 1-11.
- Gerya, T. (2019). *Introduction to Numerical Geodynamic Modelling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gramelsberger, G. (2011). What do numerical (climate) models really represent? *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 42(2), 296-302.
- Guillemot, H. (2009). Comment évaluer un modèle numérique de climat ? *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3(2), 273-293. <https://journals.openedition.org/rac/17941>
- Ismail-Zadeh, A., Tackley, P. (2010). *Computational Methods for Geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hager, B., Clayton, C., Richards, M., Comer, R. & Dziewonski, A. (1985). Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and the geoid. *Nature*, 313, 541-545.
- Kaus, B. J. P., Mühlhaus, H. & May, D. A. (2010). A stabilization algorithm for geodynamic numerical simulations with a free surface. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 181(1-2), 12-20.
- Koons, P.O. (1989). The topographic evolution of collisional mountain belts: a numeric look at the Southern Alps, New Zealand. *American Journal of Science*, 289(9), 1041-1069.
- Knutti, R. (2008). Should we believe model predictions of future climate change? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1885), 4647-4664.
- Lahsen, M. (2005). Seductive Simulations? Uncertainty Distribution Around Climate Models. *Social Studies of Science*, 35(6), 895-922.
- Latour, B. (1993). Le topofil de Boa Vista ou la référence scientifique – montage photo-philosophique. *Raison Pratique*, (4), 187-216.

- Lenhard, J. (2007). Computer Simulation: The Cooperation between Experimenting and Modeling. *Philosophy of Science*, 74(2), 176-194.
- Lloyd, E.A. (2010). Confirmation and Robustness of Climate Models. *Philosophy of Science*, 77(5), 971-984.
- Maierová, P. & Schulmann, K. & Gerya, T. (2018). Relamination Styles in Collisional Orogens. *Tectonics*, 37(1), 224-250.
- Matsumoto, T. & Tomodo, Y. (1983). Numerical simulation of the initiation of subduction at the fracture zone. *Journal of Physics of the Earth*, 31, 183-194.
- Moreno, J.C. & Vinck, D. (2021). Encounters between philosophy of science, philosophy of technology and STS. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 15(2), [En ligne] <https://doi.org/10.4000/rac.23127>.
- Morgan, M.S. & Morrison, M. (eds.) (1999) *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Pickering, A. (1985). Rôle des intérêts sociaux en physique des hautes énergies. Le choix entre charme et couleur. In M. Callon & B. Latour (éd.). *Les scientifiques et leurs alliés*. Paris : Pandore.
- Quinquis, M. E. T., Buitter, S. J. H., Ellis, S., 2010. The role of boundary conditions in numerical models of subduction zone dynamics, *Tectonophysics*, 497, 57-70.
- Rykiel, E. J., 1996. Testing ecological models: The meaning of validation, *Ecological Modelling*, 90(3), 229-244.
- Odenbaugh, J. (2005). Idealized, Inaccurate but Successful: A Pragmatic Approach to Evaluating Models in Theoretical Ecology, *Biology & Philosophy*, 20(2-3), 231-255.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. & Belitz, K. (1994). Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, 263(5147), 641-646.
- Schmeling, H., Babeyko, A.Y., Enns, A., Faccenna, C., Funiciello, F., Gerya, T., Golabek, G.J., Grigulla, S., Kaus, B.J.P., Morra, G., Schmalholz, S.M. & van Hunen, J. (2008). A benchmark comparison of spontaneous subduction models. Towards a free surface. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4), 198-223.
- Sismondo, S. (1999). Models, Simulations, and Their Objects. *Science in Context*, 12 (2), 247-260.
- Spencer, M. (2012a). Image and Practice: Visualization in Computational Fluid Dynamics Research. *Interdisciplinary Science Reviews*, 37(1), 86-100.
- Spencer, M. (2012b). *Reason and Representation in Scientific Simulation*. Thèse de Doctorat pour l'Université de Londres, Londres.
- Spencer, M. (2019). The difference a method makes: Methods as epistemic objects in computational science. *Distinktion: Journal of Social Theory*, 20(3), 313-327.
- Sundberg, M. (2010). Cultures of simulations vs. cultures of calculations? The development of simulation practices in meteorology and astrophysics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41(3), 273-281.
- Sundberg, M. (2011). The dynamics of coordinated comparisons: How simulationists in astrophysics, oceanography and meteorology create standards for results. *Social Studies of Science*, 41(1), 107-125.
- Thill, G. (1973). *La fête scientifique. D'une praxéologie scientifique à une analyse de la décision chrétienne*. Paris, Bruxelles : Aubier-Cerf-Delachaux-Desclée De Brouwer.

Winsberg, E. (2006). Models of Success Versus the Success of Models: Reliability without Truth. *Synthese*, 152(1), 1-19.

Winsberg, E. (2010). *Science In The Age Of Computer Simulation*. Chicago: The University of Chicago Press.

Zhong, S., Gurnis, M. & Moresi, L. (1996). Free-surface formulation of mantle convection-I. Basic theory and application to plumes. *Geophysical Journal International*, 127(3), 708-718.

NOTES

1. In ihrer Praxis hat die Koautorin dieses Artikels beobachtet, dass diese Skizzen zum Beispiel die Form von sehr einfachen (aus wenigen Strichen bestehenden) Skizzen des zu modellierenden Systems haben können. Sie konnten mit einem Gitternetz überzogen sein, das das Modellgitter darstellte, wobei Teile von Gleichungen (oder Computeranweisungen) mit bestimmten Elementen des Gitters verbunden waren.
2. Das Ergebnis der Einwirkung des Erdmantels auf die Erdkruste wird als „dynamische Topografie“ bezeichnet. Das Adjektiv „dynamisch“ soll diese Topografie von dem Relief unterscheiden, das durch die Interaktion zwischen tektonischen Platten (durch Gleiten, Spreizen oder Subduktion) erzeugt wird. Die dynamische Topografie hat eine relativ geringe Amplitude: in der Größenordnung von 1000 m Höhenunterschied (positiv oder negativ) über eine Distanz von mehreren hundert oder sogar tausend Kilometern (Braun, 2010).
3. Historisch gesehen haben einige Modellierende die Bewegungen der Erdkruste lediglich berechnet, ohne sie explizit zu simulieren. Geodynamiker*innen modellierten die Kräfte, die der Mantel auf die Kruste ausübte, und versuchten, die daraus resultierende Hebung oder Senkung rechnerisch zu bestimmen. In diesen Modellen wurde die Erdkruste also nicht in Bewegung gesetzt. Dennoch scheint diese Technik, die viele Näherungen voraussetzt (Zhong *et al.*, 1996), in der aktuellen geodynamischen Literatur als überholt zu gelten.
4. Geodynamiker*innen verwenden „numerische Lösungsmethoden“, um die Ergebnisse der von ihnen verwendeten partiellen Differentialgleichungen zu approximieren. Es gibt drei verschiedene Methoden: die Finite-Differenzen-Methode, die Finite-Elemente-Methode und die Finite-Volumen-Methode, die in der Geodynamik noch sehr selten verwendet wird.
5. „It's just the preference, to some extent, of the person who is coding it up in the first place“. Wir stellen fest, dass die Wahl einer der beiden Lösungsmethoden in der geodynamischen Literatur *a posteriori* häufig mit Vorteilen in Bezug auf die einfache Implementierung, die Computereffizienz oder die Vereinbarkeit mit den Forschungszielen begründet wird.
6. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Techniken, bei denen Marker eingefügt werden, d.h. Partikel, die die Position der Erdoberfläche darstellen und innerhalb eines festen Rasters in Bewegung gesetzt werden können (siehe Gerya, 2019).
7. Das gilt auch für Wasser. Einige Geodynamiker*innen wenden daher, je nach Modellsituation, die Dichte von Wasser auf ihre Schicht «klebriger Luft» an.
8. “that are different in kind from ordinary idealizations, approximations, and simplifications”.
9. “We are deliberately getting things wrong locally so that we get things right globally”.
10. Balazs *et al.* (2021) schreiben z.B. als einzige Beschreibung, dass „eine 20-km-Schicht aus „klebrigen Luft“ oberhalb des Modells definiert ist (Crameri *et al.*, 2012)“. Dieses Beispiel steht stellvertretend für eine Vielzahl von Veröffentlichungen.
11. “The upper half of the model is filled with a thick layer of “sticky air” with a density ρ_{air} and a viscosity of η_{air} to simulate a free surface”.
12. “The method does not require arbitrary choices to be made for material properties associated with a fictitious fluid.”

13. Neben den oben genannten Autor*innen ist Gramelsberger (2011) zu erwähnen, die sich mit den Auswirkungen der durch die Computercodierung verursachten Veränderungen auf die Darstellungskraft von Modellen befasst.

RÉSUMÉS

Numerische Modelle sind ein wesentlicher Bestandteil der Forschung in den Geowissenschaften. Um auf einem Computer ausgeführt werden zu können, werden die mathematischen Darstellungen der Prozesse, die sie beschreiben, in ein Computerprogramm umgewandelt. Der Artikel verfolgt diesen Prozess und untersucht, was es bedeutet, etwas ausführbar zu machen. Dafür untersucht er eine numerische Methode der Geodynamik, die sogenannte Methode der „klebrigen Luft“ (sticky air method). Bei dieser Methode wird die Erdkruste mit einem Hybridmaterial überzogen, dessen Viskosität hundert Trillionen (10^{23}) Mal höher ist als die von Luft; sie veranschaulicht die Transformationen, die notwendig sind, um mit den Einschränkungen der numerischen Verarbeitung zurechtzukommen. Die Entwicklung eines ausführbaren Codes ist also keineswegs nur eine marginale und automatische Phase des Modellierungsprozesses, sondern ein zutiefst kreatives und ausgehandeltes Verfahren.

Les modèles numériques nourrissent une part substantielle de la recherche en sciences de la Terre. Afin de pouvoir être exécutées sur ordinateur, les représentations mathématiques des processus qu'ils décrivent sont transformées en programme informatique. L'article se propose de suivre ce passage et d'interroger ce qu'implique le fait de rendre exécutable, au moyen de l'étude d'une méthode numérique employée en géodynamique et dite de « l'air collant ». Cette dernière consiste à surmonter la croûte terrestre d'un matériau hybride d'une viscosité cent mille milliards de milliards (10^{23}) de fois supérieure à l'air et atteste des transformations requises afin de composer avec les contraintes du traitement numérique. Loin de n'être qu'une étape marginale et automatique du processus de modélisation, l'élaboration d'un code exécutable relève ainsi de pratiques profondément créatives et négociées.

Numerical models contribute to a substantial part of research conducted in Earth sciences. To be executed on a computer, the mathematical representations they depict are transformed into a computer program. The present article aims at following this transformation and at questioning the implications of rendering a representation computationally executable. It uses to this end a case study of the so-called “sticky air” numerical method employed in geodynamics, which consists of putting a layer of a hybrid material — a hundred thousand quintillion (10^{23}) times more viscous than air — on top of the Earth crust. Far from being only a marginal and automatic step in the modelling process, the constitution of an executable computer code is the result of a profoundly creative and negotiated practice.

Los modelos numéricos constituyen una parte sustancial de la investigación en ciencias de la tierra. Para ser ejecutadas en una computadora, las representaciones matemáticas de los procesos que describen son transformados en programas informáticos. Este artículo pretende seguir este proceso y examinar lo que supone el hacer ejecutable un método numérico utilizado en geodinámica, conocido como «aire pegajoso». Este método consiste en superar la corteza terrestre con un material híbrido cuya viscosidad es cien mil trillones (10^{23}) veces mayor que la del aire, y da fe de las transformaciones necesarias para hacer frente a las limitaciones del

procesamiento digital. Lejos de ser un paso marginal y automático en el proceso de modelización, el desarrollo de código ejecutable es, por tanto, una práctica profundamente creativa y negociada.

INDEX

Mots-clés : modélisation, méthode numérique, géodynamique, sciences de la Terre

Palabras claves : modelización, método numérico, geodinámica, ciencias de la tierra

Keywords : modelling, numerical method, geodynamics, Earth sciences

Schlüsselwörter : Modellierung, Numerische Methode, Geodynamik, Geowissenschaften

AUTEURS

LUCIE BABEL

Ausgebildet in Hydrologie, Doktorandin am Department for Physical Geography der Universität Utrecht (Niederlande) und ebenfalls angegliedert an das Laboratoire d'étude des sciences et techniques der Universität Lausanne. Ihre Doktorarbeit befasst sich mit Modellierungspraktiken in den Geo- und Umweltwissenschaften.

Anschrift: Department of Physical Geography, Faculty of Geosciences, Utrecht University, 3584CS Utrecht(Niederlande).

E-Mail: l.v.babel[at]uu.nl

DOMINIQUE VINCK

Ordentlicher Professor für Sozialstudien der Wissenschaft und Technik an der Universität Lausanne und am Collège des Humanités der École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Mitglied des STS Lab der UNIL. Seine Forschung konzentriert sich auf die Soziologie der Wissenschaft und der Innovation. Er beschäftigt sich insbesondere mit dem Bereich des Ingenieurwesens der Digital Cultures and Humanities. Er hat unter anderem veröffentlicht: *Everyday engineering. Ethnography of design and innovation* (MIT presse, 2003); *The Sociology of Scientific Work. The Fundamental Relationship between Science and Society* (Edward Elgar, 2107); *Critical studies of innovation: Alternatives to the Pro-Innovation Bias* (Edward Elgar, 2017); *Staging Collaborative Design and Innovation: An Action-Oriented Participatory Approach* (Edward Elgar, 2020); *Handbook on Alternative Theories of Innovation* (Edward Elgar, 2021).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7835-7008>

Anschrift: STS Lab, Institut des sciences sociales, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne (Schweiz).

E-Mail: Dominique.Vinck[at]unil.ch