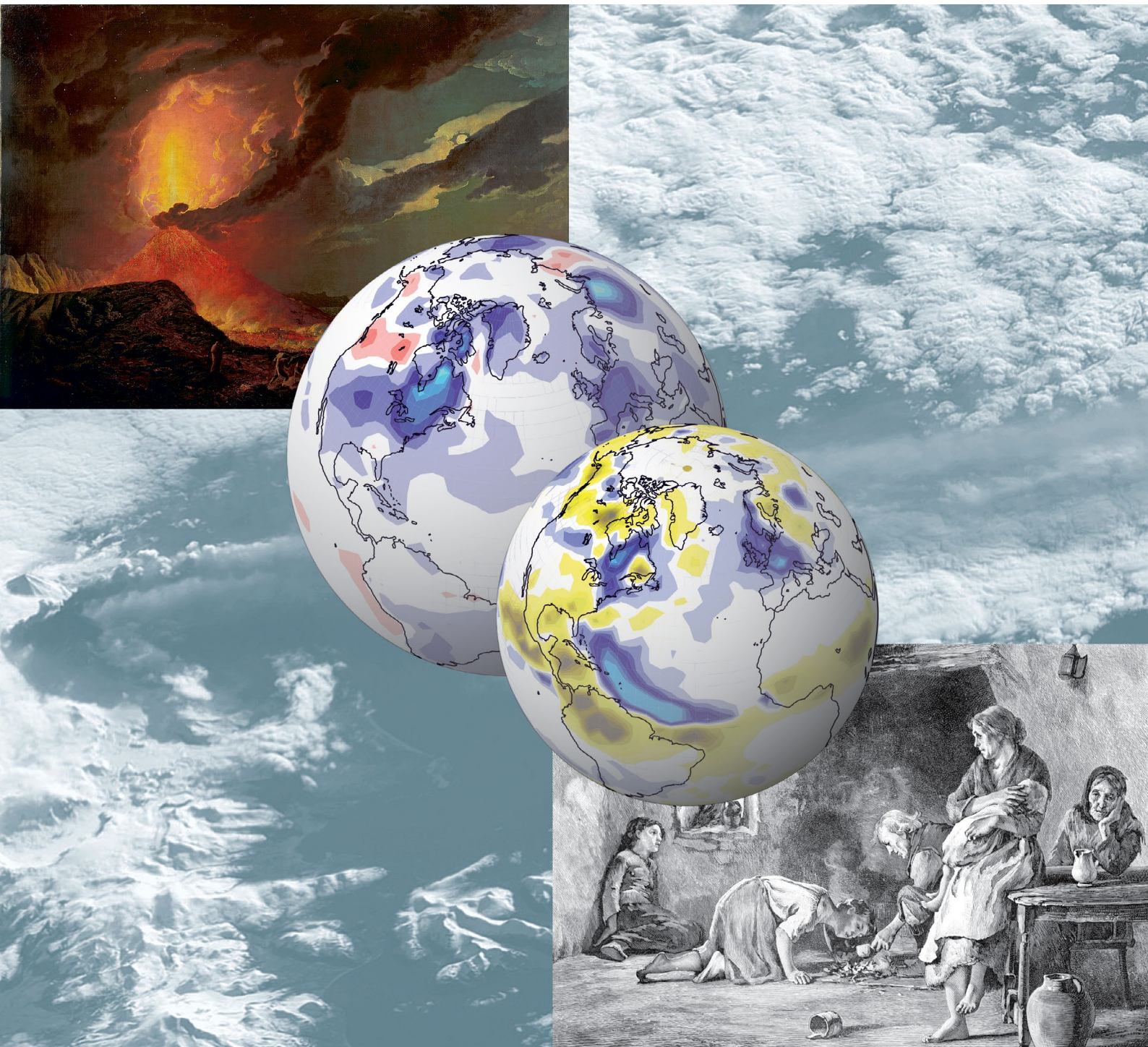


Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816

Klima, Mensch und Gesellschaft



Oeschger Zentrum für Klimaforschung

Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816

Klima, Mensch und Gesellschaft

Autoren:

Stefan Brönnimann, Oeschger Zentrum für Klimaforschung und Geographisches Institut der Universität Bern, Schweiz

Daniel Krämer, Oeschger Zentrum für Klimaforschung und Historisches Institut der Universität Bern, Schweiz

Layout und Gestaltung:

Alexander Hermann, Geographisches Institut der Universität Bern, Schweiz

Bildredaktion:

Leonie Villiger, Oeschger Zentrum für Klimaforschung und Geographisches Institut der Universität Bern, Schweiz

Sprachlektorat:

Andrea Frey

Titelbild:

Oben links: «Vesuv in Eruption, mit einem Blick auf die Inseln in der Bucht von Neapel», Ölmalerei auf Leinwand von Joseph Wright von Derby (1734–1797), Foto: Tate, London 2016. Mitte: Rekonstruierte Anomalien von Temperatur und Niederschlag von Juni bis August 1816 relativ zu einem zeitgenössischen Referenzzeitraum (siehe Seite 16), von Brönnimann (2015). Unten rechts: Irische Hungersnot 1845–1849, Künstler unbekannt, von Woodham-Smith C. 1991. *The Great Hunger*. London: Penguin Books, S. 510. Hintergrund: Ausbruch des Mt. Pavlof, Alaska. Foto: ISS Crew Earth Observations experiment and Image Science & Analysis Laboratory, Johnson Space Center.

Bibliographische Angaben:

Brönnimann S, Krämer D. 2016. Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816. Klima, Mensch und Gesellschaft. *Geographica Bernensia* G90, 48 S., doi:10.4480/GB2016.G90.02.

ISBN: 978-3-905835-45-8

Englische Version:

Brönnimann S, Krämer D. 2016. Tambora and the “Year Without a Summer” of 1816. A Perspective on Earth and Human Systems Science. *Geographica Bernensia* G90, 48 pp., doi:10.4480/GB2016.G90.01.

ISBN: 978-3-905835-46-5

© GEOGRAPHICA BERNENSIA 2016

Geographisches Institut der Universität Bern, Schweiz



Vorwort

Im April 1815 brach in Indonesien der Vulkan Tambora aus. Er brachte Zerstörung über die Insel Sumbawa und die benachbarten Inseln. Auswirkungen dieser Eruption zeigten sich während vieler Monate rund um den Globus. In Europa und Nordamerika wurde 1816 als das «Jahr ohne Sommer» bekannt. Weltweit starben weit über 100 000 Menschen.

Mit einer gewissen zeitlichen Distanz kann aus einem tragischen ein interessantes Ereignis werden. Zweihundert Jahre später, im April 2015, wurde in zahlreichen Veranstaltungen und Medienberichten weltweit an den zweihundertsten Jahrestag des Tamboraausbruchs erinnert. Mindestens ein halbes Dutzend Bücher zum Ausbruch des Tambora erschienen in den Jahren 2013 bis 2015, welche die Ereignisse um den Tamboraausbruch 1815 als einen Meilenstein in der Geschichte der Menschheit verankerten. Die grosse öffentliche Aufmerksamkeit zeigt, wie interessant dieses Ereignis für die heutige Gesellschaft immer noch ist. Gleichzeitig ist es ein Thema mit fortdauernder Relevanz für die Wissenschaft. Viele Studien und Übersichtsartikel sind in den letzten Monaten veröffentlicht worden, und im April 2015 beschäftigte sich eine internationale wissenschaftliche Konferenz, organisiert vom Oeschger Zentrum für Klimaforschung (OCCR) der Universität Bern, mit dem Thema. Die Konferenz beleuchtete die vielfältigen Aspekte des Tamboraausbruchs, dessen klimatische Auswirkungen und die Folgen für Menschen und Gesellschaften.

Der Tamboraausbruch ist faszinierend, weil er zeigt, wie eng Ereignisse in Natur und Gesellschaft miteinander verbunden sind. Dadurch ergeben sich einerseits Schnittstellen, an denen vertieft geforscht wird und an denen neue wissenschaftliche Fragen entstehen. Andererseits bietet sich die Möglichkeit einer Gesamtschau. Der zweihundertste Jahrestag des Ausbruchs war eine Gelegenheit, das aktuelle Verständnis der zahlreichen Einzelaspekte zusammenzufassen. In diesem Prozess entstand eine Synthese, die in dieser Broschüre präsentiert wird.

Ein solches Unterfangen ist zwangsläufig unvollständig und nur unter bestimmten Gesichtspunkten möglich. Hier konzentrieren wir uns auf die Perspektive der Schweiz. Der Ausbruch des Tambora und das «Jahr ohne Sommer» von 1816 sind eng mit der Schweiz verbunden. Die Schweiz gehörte zu den am stärksten betroffenen Regionen: Eine schwere Hungersnot kostete im Osten der Eidgenossenschaft unzählige Menschenleben, brachte Verzweiflung und war möglicherweise ein Auslöser für Migration. Mary Shelley schrieb «Frankenstein» während dieses regnerischen und kalten Sommers in der Schweiz. Der Schweizer Botaniker Heinrich Zollinger bestieg 1847 als erster den Tambora, und sein Bericht über den Ausbruch von 1815 fand nach seiner Publikation grosse Verbreitung. Von Beginn an übernahm die Schweizer Wissenschaft eine führende Rolle bei der Untersuchung des Tamboraausbruchs und des «Jahrs ohne Sommer» von 1816, von den ersten wissenschaftlichen Studien über das kalte Klima in den Alpen bis zu den gegenwärtigen Aktivitäten des OCCR an der Universität Bern.

Diese Publikation wurde durch das OCCR und die Kommission für Atmosphärenchemie und -physik (ACP) der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften SCNAT unterstützt. Sie ist das Ergebnis einer Konferenz, die von diesen beiden Institutionen sowie dem Schweizerischen Nationalfonds, den internationalen Programmen PAGES (Past Global Changes) und SPARC (Stratospheric and Tropospheric Processes and Their Role in Climate) und der Fondation Johanna Dürmüller-Bol unterstützt wurde.¹

Wir möchten allen Personen danken, welche an dieser Broschüre und der zugrundeliegenden Forschung mitgeholfen haben, insbesondere Florian Arfeuille, Renate Auchmann, Mauro Bolzern, Philip Brohan, Yuri Brugnara, Ulf Büntgen, Lucien Chabey, Mike Chenoweth, Gilbert Compo, Céline Dizerens, Hubertus Fischer, Simon Flückiger, David Frank, Jörg Franke, Jürg Fuhrer, Alena Giesche, Martin Grosjean, Gertrude Hirsch Hadorn, Alexander Hermann, Anne-Lie Holzkämper, Gerhard Hotz, Fortunat Joos, Abdul Malik, Stefan Muthers, Christian Pfister, Christian Rohr, Karin Schleifer-Stöckli, Margit Schwikowski, Steve Self, Peter Schulthess, Michael Sigl, Willy Tinner, Leonie Villiger, Martin Wegmann und Helmut Weissert. Wir danken auch allen Teilnehmer/-innen der Konferenz im April 2015.



Endloser Regen, Wolken, trostloses und kaltes Wetter

Das Jahr 1816 ist in Europa und in Nordamerika als «Jahr ohne Sommer» bekannt. Obwohl die Verbindung zwischen den Witterungsverhältnissen und dem Ausbruch des Tambora bereits vor einem Jahrhundert gemacht wurde, beginnt die Wissenschaft erst jetzt, die zahlreichen Verknüpfungen zwischen Vulkanausbruch, atmosphärischen Prozessen, Klima, biophysikalischen Auswirkungen und gesellschaftlichen Reaktionen zu verstehen. Der Tamboraausbruch von 1815 bietet somit die Gelegenheit, ein besseres Verständnis des Mensch-Umwelt-Systems zu erlangen.

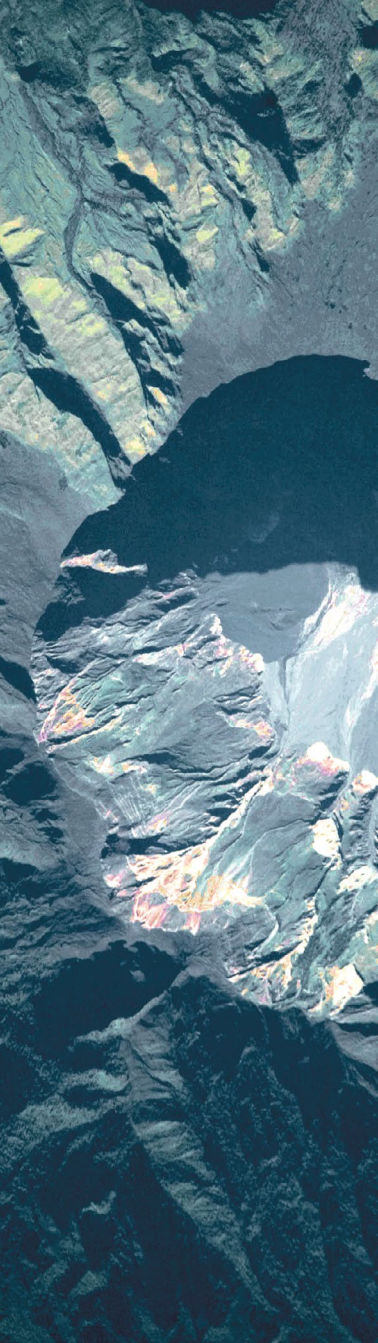


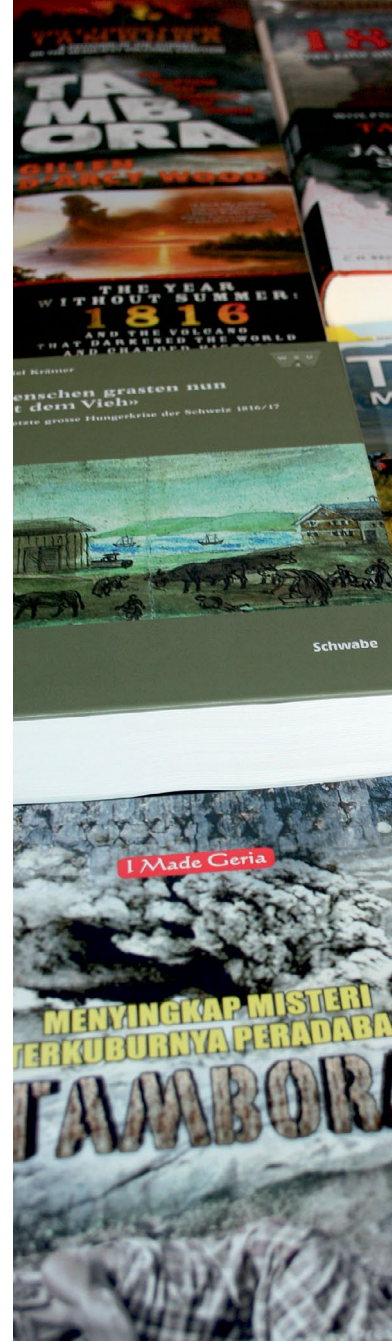
Abb. 1. Luftaufnahme der Caldera des Tambora heute. Sie ist 7 km breit und 1100–1200 m tief und hat zeitweise einen Süßwassersee. An ihrer Basis hat sich ein kleiner aktiver Schlot namens Doro Afi Toi gebildet. Die seismische und tektonische Aktivität des Vulkans wird durch das Indonesische Zentrum für Vulkanologie und Geologische Gefahrenmitigation überwacht (Foto: Manuel Marty).

Die Caldera des Tambora, aufgenommen von der Weltraumstation ISS

Sumbawa ist eine Insel der Kleinen Sunda-Inseln mit einer Fläche von 15 448 km² und einer Bevölkerung von rund 1.39 Millionen. Die Geologie ist gekennzeichnet durch eine Abfolge vulkanischer Sedimente vom späten Oligozän bis ins Quartär. Dazwischen sind Meeresablagerungen und Kalksteine eingebettet. Die Insel hat noch grosse Bereiche des natürlichen trockenen Laubwalds sowie Nadelbäume in höheren Lagen. Die Küstenebenen waren ursprünglich von Savannenvegetation bedeckt. Die Kleinen Sunda-Inseln sind Heimat vieler endemischer Arten, insbesondere Vögel.

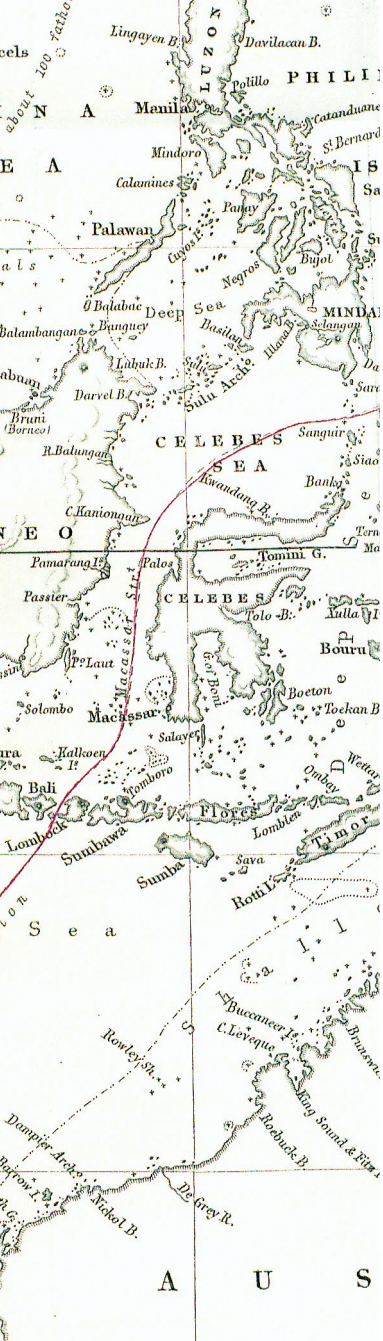
Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
Der Ausbruch	8
Kasten: Eine Geschichte über Indonesien und Europa	10
Die Tambora-Rauchsäule in der Stratosphäre	12
Den Aerosolen auf der Spur	14
Das Klima 1816 aus Klimaarchiven	16
Das Klima 1816 aus Messungen	18
Vulkanwetter: Anatomie des «Jahrs ohne Sommer» in Mitteleuropa	20
Kasten: Wie viel der Sommerkälte 1816 in der Schweiz kann durch den Tambora erklärt werden?	21
Das Tamboraklima in Modellen	22
Indirekte Klimaeffekte	24
Biophysikalische Effekte	26
Krise in Europa	28
Kasten: Ein Modell der Wechselwirkungen zwischen Klima und Gesellschaft	30
Können wir Hunger messen?	32
Teuerungsunruhen	34
Kasten: «Erinnerung an die freundschaftliche Übereinkunft zur Beförderung des allgemeinen Hungers im Jahr 1817»	35
Nachwirkungen	36
Kultur	38
Der Tamboraausbruch und die Wissenschaft	40
Eine veränderte Welt	42
Schlussfolgerungen	43
Anmerkungen und Bibliographie	44
Bildnachweise der Randabbildungen	48



Bücher zum zweihundertsten Jahrestag des Tamboraausbruchs

Der Tamboraausbruch 1815 und das «Jahr ohne Sommer» von 1816 haben in den letzten beiden Jahren grosse Aufmerksamkeit in den Medien erhalten. Im Hinblick auf das Gedenkjahr sind mehrere Bücher veröffentlicht worden. Warum sind Wissenschaft und Öffentlichkeit gleichermaßen fasziniert? Das Ereignis ist erschreckend und fesselnd, unterhaltsam und lehrreich. Und es ist immer noch ein spannendes Forschungsthema.



Karte des Malaiischen Archipels

Die Sunda-Inseln waren für die biogeographischen Analysen von Alfred Russel Wallace, Mitbegründer der Theorie der biologischen Evolution, sehr relevant. Wallace zog eine Linie zwischen den zoogeographischen Regionen Asien und Australien, welche zwischen Lombok und Bali verläuft (Bild: Darstellung der Linie aus Wallaces Publikation von 1863)⁴. Tambora ist einer der wenigen verzeichneten Namen. Wallaces erfolgreiches Buch «Der Malaiische Archipel»⁵ gibt Aufschluss über naturräumliche und humangeographische Aspekte, Vulkane (einschliesslich des Tamboraausbruchs 1815) und die Verteilung und Vielfalt der Pflanzen- und Tierwelt.

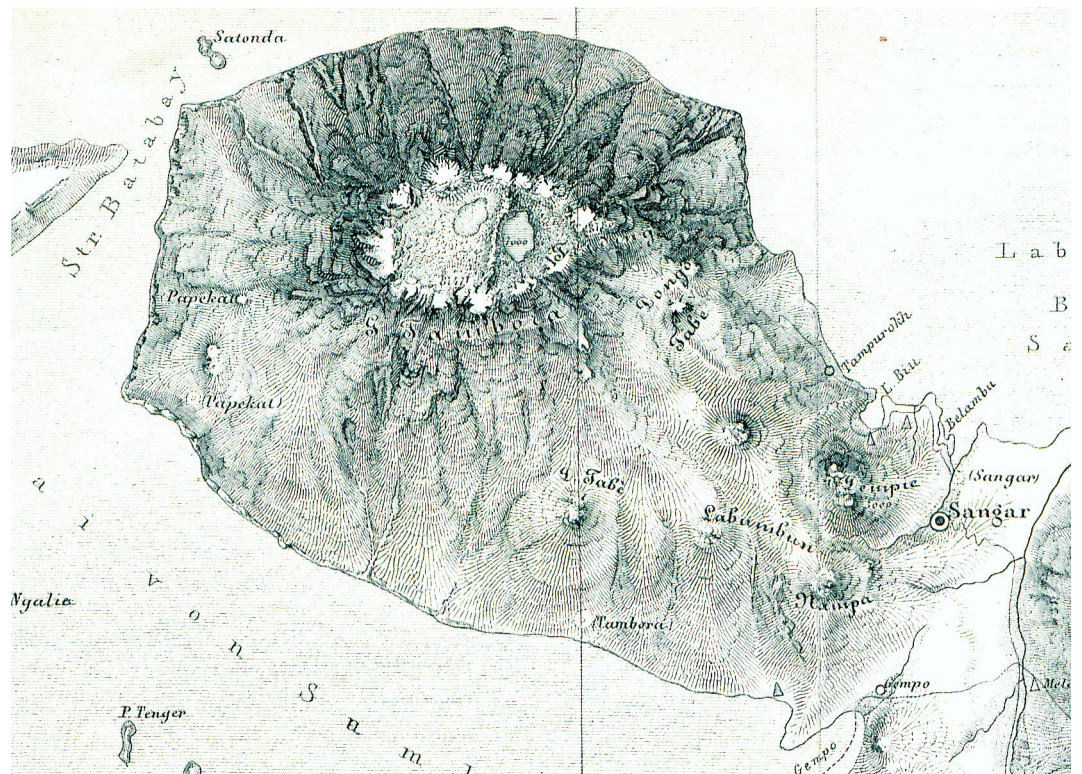


Abb. 2. Der Schweizer Botaniker Heinrich Zollinger bereiste 1847 Sumbawa und bestieg den Tambora. Er fand eine grosse Caldera mit zwei Seen vor (abgebildet ist eine Karte aus seiner Publikation).² Zollinger berichtete ausführlich über den Ausbruch von 1815. Viele weitere Berichte gehen auf seine Beschreibungen der Eruption zurück. Die Karte zeigt verlassene Siedlungen oder Ruinen (in Klammern), von denen einige später an einem anderen Standort neu gegründet wurden (Sangar, Papekat, Tambora). Auch ausserhalb der unmittelbaren Zone der Verwüstung wurden die meisten Siedlungen nach 1815 neu gegründet, da nach der Eruption die gesamte Insel weitgehend entvölkert war. Interessanterweise beschrieb Zollinger bereits die zoogeographische Trennlinie, die später als Wallace-Linie bekannt wurde (vgl. Abb. Randspalte).³

Einleitung

Nur wenige natürliche Ereignisse haben die Menschheit in einem globalen Massstab beeinflusst. Ein solches Ereignis in der jüngeren (Erd-)Geschichte war der Ausbruch des Tambora (indones. Gunung Tambora oder Tomboro) vor zweihundert Jahren.^{6,7,8} Der Ausbruch dieses grossen Vulkans auf der indonesischen Insel Sumbawa im April 1815 war in der Tat verheerend. Zehntausende Menschen starben in Indonesien, drei lokale Fürstentümer verschwanden.⁹ Die Konsequenzen des Ausbruchs waren aber noch viel weitreichender. Die globalen Temperaturen sanken deutlich; die Eruption des Tambora machte das Jahr 1816 zum wohl kältesten der letzten 250 Jahre.¹⁰ Gleichzeitig verringerte sich der Monsunniederschlag und Teile Asiens würden von Dürre heimgesucht. Auch in weiter entfernten Regionen kam es zu einer Veränderung des Klimas. Besonders stark betroffen waren Mitteleuropa und Nordamerika. In beiden Regionen war der Sommer 1816 viel kühler als normal. In den Neuengland-Staaten tobte im Juni ein Schneesturm.¹¹ Mittel- und Westeuropa litten unter endlosem Regen, während die Iberische Halbinsel von Trockenheit geplagt wurde.¹² Missernten waren vielerorts die Folge, und in Europa kam es zur «letzten grossen Subsistenzkrise in der westlichen Welt»¹³ mit weitreichenden Auswirkungen. Einige Autoren gehen sogar noch weiter und führen Aufstände, eine Choleraepidemie, die Voraussetzung für den Drogenanbau im «Goldenen Dreieck», Wirtschaftskrisen in den USA und die Entstehung des Wohlfahrtsstaates auf den Tamboraausbruch von 1815 zurück.^{14,15} Allerdings trugen mit der Aufklärung, der Protoindustrialisierung und den politischen Veränderungen im neugeordneten Europa nach den Napoleonischen Kriegen auch sozio-ökonomische Prozesse wesentlich zu einer tiefgreifenden Veränderung der europäischen Gesellschaften bei, die bereits vor der Krise in vollem Gange waren. Als die Folgen der Eruption endgültig abgeklungen waren, war die Welt nicht mehr dieselbe. Sumbawa erholte sich nie ganz davon. Auch in Europa, Nordamerika und China hatte sich vieles verändert.

Auch heute zieht der Tamboraausbruch das Interesse der Wissenschaft auf sich. Exemplarisch lassen sich hier die Wechselwirkungen im Mensch–Umwelt-System untersuchen. Auch nach zweihundert Jahren ist die Erforschung des Tamboraausbruchs deshalb eine Herausforderung, die ständig neue und überraschende Ergebnisse liefert. Sie zwingt die Wissenschaft zu einer Erdsystem-Perspektive, welche unterschiedlichste Zweige der Naturwissenschaften umfasst; von der Vulkanologie bis zur Stratosphärenchemie, von Aerosolmikrophysik bis zu Atmosphärendynamik. Dazu müssen verschiedenartige Methoden kombiniert werden, von Baumringrekonstruktionen bis zur numerischen Modellierung. Das Studium der biophysikalischen Auswirkungen erfordert Fachkenntnisse von Biologinnen und Agronominnen. Umgekehrt verlangt das Studium der Auswirkungen auf Mensch und Gesellschaft historische Methoden und ökonomische Ansätze sowie das Wissen von Anthropologinnen und Kulturwissenschaftlerinnen. Die wirkliche Herausforderung ist dann, diese Ansätze zu verknüpfen. Im Hinblick auf viele aktuelle Probleme ist dieses Vorgehen, inspiriert durch den Tamboraausbruch, ein hochaktueller Ansatz.

Eine Übersicht über den Stand der Forschung zum Tamboraausbruch 1815 und das «Jahr ohne Sommer» 1816 wurde 1992 von Harington¹⁶ vorgelegt. Seit dieser Zeit wurden zahlreiche Studien durchgeführt, und neue Aspekte wurden beleuchtet. Mit der Zweihundertjahrfeier 2015 kam eine neue Gelegenheit, das Wissen zu kompilieren.¹⁷ Die vorliegende Broschüre liefert einen umfassenden Überblick auf der Basis dieser Arbeiten. Mit dem Fokus auf die Schweiz kann die Interaktion zwischen dem Erdsystem und den Gesellschaftssystemen skizziert werden. Gleichzeitig kann beispielhaft gezeigt werden, wie wissenschaftlicher Fortschritt erzielt wird.



Der Ausbruch des Pinatubo (Philippinen) im Juni 1991 von der Clark Air Base aus fotografiert

Ein grosser Teil unseres Wissens über die Klimafolgen von Vulkanausbrüchen stammt aus der Beobachtung und der Analyse des Pinatuboausbruchs im Juni 1991. Der Ausbruch ereignete sich zu einer Zeit, in der mehrere Satelliten Gase und Aerosole massen und bereits brauchbare Klimamodelle verfügbar waren.

Studien des Tamboraausbruchs 1815 sind eine weitere wichtige Quelle der Wissenschaft für Information und Inspiration. Der Tamboraausbruch war 3–4 Mal stärker als jener des Pinatubo, die Klimaauswirkungen grösser und die Gesellschaften verletzlichere als heute.

Der Ausbruch

Entlang des Sundagrabens südlich von Indonesien sinkt die schwere Indo-Australische Platte unter die leichtere Sundaplate, wodurch sich der Sunda-Vulkanbogen gebildet hat. Indonesien hat 147 Vulkane, von denen 76 als historisch aktiv bekannt sind (d.h., Vulkanausbrüche sind dokumentiert). Der Tambora ist einer dieser Vulkane. Er ist ein typischer Stratovulkan mit einem symmetrischen Vulkankegel und einem einzigen zentralen Schlot. Obwohl er historisch aktiv gewesen war, brach der Vulkan in den 400 Jahren vor der Eruption im Jahre 1815 nie aus.

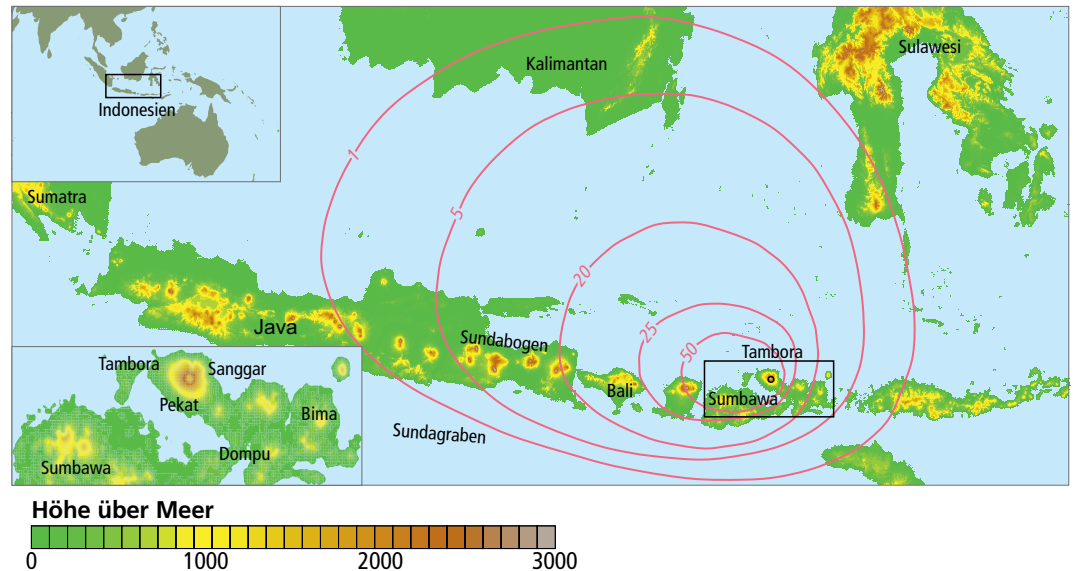


Abb. 3. Karte von Indonesien mit der Lage des Tambora und der Dicke der Ascheablagerungen des Ausbruchs von 1815 (in cm, aus Self et al. 1984)¹⁸. Der Einschub zeigt die sechs Fürstentümer, welche auf Sumbawa vor dem Ausbruch existierten.

Im Jahr 1812 bemerkte die lokale Bevölkerung erste Anzeichen vulkanischer Aktivität. Über dem Vulkan zeigten sich Aschewolken. Am 5. April 1815 begann der Ausbruch. Die erste, bereits heftige Eruptionsphase dauerte fünf Tage und emittierte grosse Mengen von Asche. Diese Phase war begleitet von Laharen (SchlammLawinen aus vulkanischer Asche, Geröll, Erde und Wasser). Die Hauptausbruchsphase stand aber noch bevor. Am 10. und 11. April explodierte der Tambora buchstäblich. Der Ausbruch führte zu verheerenden pyroklastischen Strömen («Glutwolken» aus heissem Gas und aus Asche, die lawinenartig die Vulkanhänge niedergeringen).¹⁹ Die Explosionen waren im gesamten Archipel zu hören, über Entfernungen von 1700 km, angeblich sogar 2600 km. Innerhalb dieser ein bis zwei Tage wurden etwa 50 km³ Gesteinsmaterial ausgeworfen. Asche und Tephraablagerungen bedeckten grosse Regionen (Abb. 3), einschliesslich Kalimantan, Java und Sulawesi, was aus historischen Berichten und Sedimentanalysen bekannt ist.^{20,21,22}

Nach dem 11. April verringerte sich die Intensität des Ausbruchs. Er endete schliesslich am 17. April. Der vormals vermutlich höchste Berg des Archipels war nur noch ein geköpfter Kegel. Das oberste Drittel des Tambora war weggesprengt. Der Ausbruch des Tambora von 1815 hinterliess eine Caldera mit einem Durchmesser von 7 km und 1100–1200 m Tiefe²³ (Abb. 1 und 2).

Der Tamboraausbruch von 1815 in Zahlen

Geogr. Breite	8.25°S
Geogr. Länge	117.95°E
Höhe vor dem Ausbruch	ca. 4300 m
Heutige Höhe	2850 m
Dauer	5.–11. Apr.
Auswurfvolumen	50 km ³
Emittierte SO ₂ -Menge	60–80 Mt
Vulkanische Explosivität	7 (von 8)
Max. Höhe der Rauchsäule	43 km
Neutrale Auftriebshöhe	23–27 km
Schallreichweite	2600 km
Todesopfer in Indonesien	~100 000
Todesopfer weltweit	100–200 000

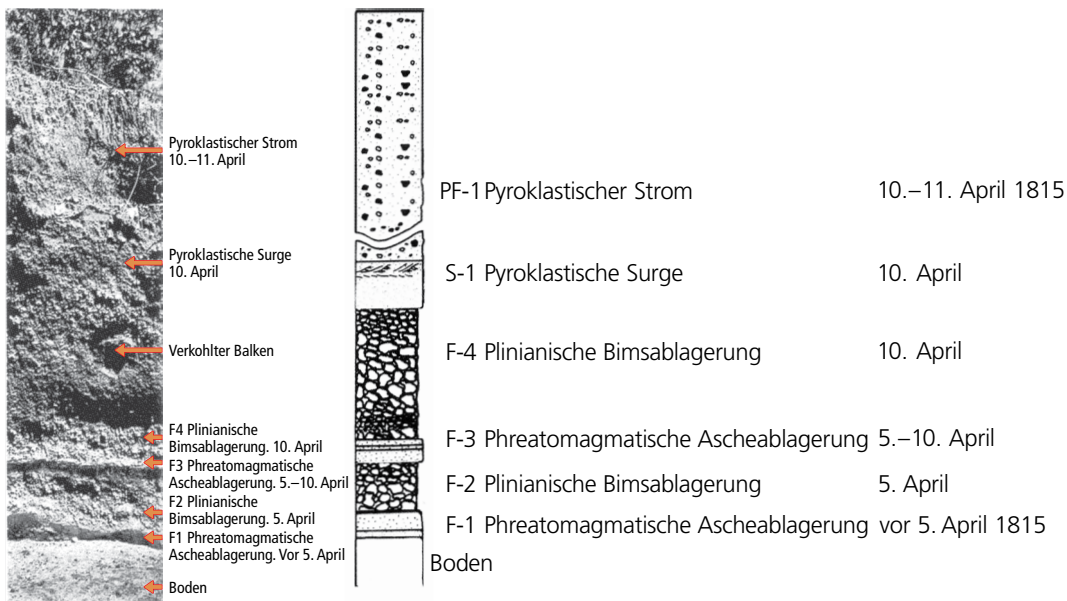


Abb. 4. Eine stratigraphische Abfolge von Ablagerungen des Tamboraausbruchs von 1815 in der Nähe des Dorfs Tambora auf der Halbinsel Sanggar (von Sudrajat und Rachmat, 2015)²⁴.

Heute bedecken vulkanische Ablagerungen aus dem Jahre 1815 fast die gesamte Sanggar-Halbinsel. Die Ablagerungen des Ausbruchs bestehen aus abwechselnden Schichten von Lava und pyroklastischem Material, oft mehrere Meter dick. Ein Ablagerungsprofil in der Nähe des Dorfs Tambora²⁵ ist in Abbildung 4 dargestellt (siehe auch Foto auf der rechten Randspalte). Die unteren Schichten entsprechen der ersten Ausbruchphase und bestehen aus Asche und Bimsstein. Diese Schicht ist 40–150 cm dick und ist bedeckt mit 1–4 m dicken pyroklastischen Ablagerungen der Hauptideptionsphase. Am Calderarand sind die Ablagerungen sogar bis zu 40–140 m dick. Zusätzlich zu Lavaströmen, Ascheregen, Auswurf von Gesteinsbrocken, pyroklastischen Strömen und Laharen zerstörten auch Tsunamis (ausgelöst durch die pyroklastischen Ströme ins Meer) die Küsten. Nach der Entleerung der Magmakammer sanken Teile der Halbinsel Sanggar ab. Die Kombination all dieser Prozesse veränderte die Landschaft der Halbinsel Sanggar.

Für die lokale Bevölkerung, die offenbar nicht mit den Gefahren einer grossen Eruption vertraut war und die während des Ausbruchs keine Fluchtmöglichkeiten hatte, endete die Eruption in einer humanitären Katastrophe.²⁶ Für die meisten Menschen auf der Sanggar-Halbinsel gab es kein Entkommen. Die drei Fürstentümer Tambora, Pekat und Sanggar verschwanden (siehe Abb. 3). Tausende von Menschen starben während der Eruption, Zehntausende in den folgenden Wochen und Monaten, weil der Ascheregen die landwirtschaftliche Produktion zerstörte und das Trinkwasser durch den hohen Fluorid- und Säuregehalt vergiftete. Ein Jahr später war die Hälfte der Bevölkerung auf Sumbawa tot, ein grosser Teil der Überlebenden war zudem auf die benachbarten Inseln geflüchtet. Aber auch auf den Inseln Lombok und Bali starben Tausende, und in ihrer Not endeten viele in der Versklavung.²⁷ Insgesamt starben durch den Tamboraausbruch auf den wichtigsten Inseln von Indonesien schätzungsweise 90 000 bis 117 000 Menschen.²⁸ Noch einmal so viele Menschen starben weltweit an Hunger und Krankheiten. Allerdings ist Vorsicht geboten, weil nicht alle Todesfälle ausschliesslich dem Tamboraausbruch zugeschrieben werden können.



Ablagerungen des Tamboraausbruchs von 1815 bedecken grosse Flächen der Sanggar-Halbinsel

Die Lavaströme und pyroklastischen Ströme verschonten nur einige Streifen am Südhang des Bergs, wo alte Lavaströme den Weg blockierten. Dies ist wahrscheinlich der Grund, weshalb der Raja von Sanggar und einige Mitglieder seiner Familie und seiner Entourage überlebten, als sie südwärts flüchteten.

Foto: Ablagerungen des Ausbruchs von 1815 an der Nordwestflanke des Tambora: Abwechselnde Schichten von Bimsstein und Asche, überlagert von Ablagerungen eines pyroklastischen Stroms.²⁹

Eine Geschichte über Indonesien und Europa



Der Tamboraausbruch veränderte den Himmel über Indonesien und Europa. Zwei Gemälde von William Turner zeigen (links) einen Ausbruch des Vesuv (graviert von T. Jeavons, 1830, Foto: Tate, London 2016) sowie (rechts) einen Sonnenuntergang im Bild «Fighting Temeraire» von 1838 (Foto: National Gallery, London). Turners Sonnenuntergangsbilder entstanden zwar nach 1815, waren aber von den farbenprächtigen Sonnenuntergängen nach dem Tamboraausbruch inspiriert.

Der Tamboraausbruch von 1815 zerstörte die Insel Sumbawa in **Indonesien** und veränderte die globale Atmosphäre. Über Sumbawa stiegen Aschewolken zum Himmel und verdunkelten ihn tagelang vollständig. Während sich die Asche nach ein paar Tagen setzte, beeinflussten die gasförmigen Emissionen des Tamboraausbruchs den Himmel weltweit. Sulfataerosole, die sich aus diesen Gasen bildeten, verweilten über mehrere Jahre in der Stratosphäre. Sie führten zu leuchtenden Sonnenuntergängen rund um die Welt, welche die Maler der Romantik in **Europa** wie William Turner (1775–1851, siehe auch Abschnitt «Den Aerosolen auf der Spur») inspirierten. Obwohl Turner von Vulkanausbrüchen fasziniert war (links), war er sich wohl nicht bewusst, dass er jahrelang vulkanische Sonnenuntergänge malte, nachdem ihn die Sonnenuntergänge 1817–1818 inspiriert hatten (rechts).

“ The fire and columns of flame continued to rage with unabated fury until the darkness, caused by the quantity of falling matter, obscured it at about 8 p. m. Stones at this time fell very thick at Saugur—some of them as large as two fists, but generally not larger than walnuts; between 9 and 10 p. m. ashes began to fall, and soon after a violent whirlwind ensued, which blew down nearly every house in the village of Saugur, carrying the tops and light parts away with it. In the part of Saugur adjoining Tom-

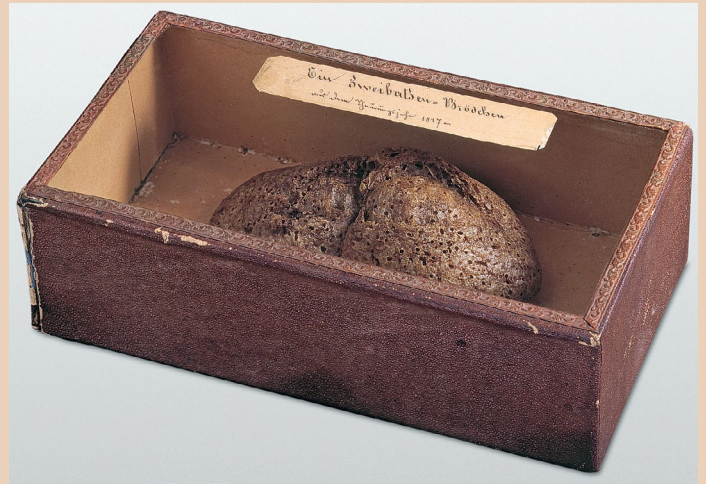
Die Folgen des Tamboraausbruchs von 1815 beunruhigten die Menschen in Indonesien und Europa. Augenzeugenberichte zum Ausbruch (zusammengetragen in Raffles' Bericht³⁰, links) sprechen von rasenden Flammen und Wirbelwinden, die fast alle Häuser zerstörten. In der Schweiz notierte Martin Obersteg am 1. August 1816 in seinem Tagebuch (rechts), dass es so kalt sei, dass man heizen müsse (Staatsarchiv Nidwalden).

Die Folgen des Tamboraausbruchs von 1815 beunruhigten die Menschen in Indonesien und Europa. Augenzeugenberichte zum Ausbruch (zusammengetragen in Raffles' Bericht³⁰, links) sprechen von rasenden Flammen und Wirbelwinden, die fast alle Häuser zerstörten. In der Schweiz notierte Martin Obersteg am 1. August 1816 in seinem Tagebuch (rechts), dass es so kalt sei, dass man heizen müsse (Staatsarchiv Nidwalden).

Der Vulkanausbruch in **Indonesien** muss gewaltig gewesen sein. Weil von den etwa 10000 Menschen, die auf der Sanggar-Halbinsel gelebt hatten, nur wenige überlebten, sind nur vereinzelte Augenzeugenberichte vorhanden. Die «Benares», ein Schiff der British East India Company, das in Sulawesi vor Anker lag, verliess die Insel südwärts, nachdem am 10. April Explosionen zu hören waren. Das Schiff geriet in einen gewaltigen Ascheregen und sank beinahe. Unterwegs traf die «Benares» auf ein lokales Segelschiff, dessen Besatzung die Eruption vom Meer aus gesehen hatte und davon berichtete. Die Besatzung der «Benares» beschloss, in Sumbawa an Land zu gehen. Als das Schiff am 18. April ankam, fand die Besatzung totale Verwüstung vor. Auch in Java wurden die Explosionen gehört und Angst verbreitete sich. Sir Thomas Stamford Raffles, der Britische Gouverneur der Insel (die Briten hatten den Archipel kurz zuvor von den Niederländern übernommen), war tief beunruhigt. Da er einen grossen Vulkanausbruch befürchtete, liess er ein Schiff mit Wasser und Reis beladen und ostwärts segeln. Einige sehen darin die erste geplante Katastrophenhilfsaktion der Geschichte. Auf Sumbawa traf Leutnant Owen Phillips den Raja von Sanggar, der glücklicherweise überlebt hatte. Sein Bericht, d.h. der einzige Augenzeugenbericht aus der unmittelbaren Nähe des Ausbruchs, wurde von Owen Phillips auf-

geschrieben. Raffles liess alle Berichte zur Eruption und ihren Konsequenzen sammeln und zusammenstellen. Dieser Bericht wurde im September 1815 der Batavischen Gesellschaft der Wissenschaften und Künste vorgelegt und später veröffentlicht.³¹ Raffles' Bericht erreichte Europa ein paar Monate später und wurde in Auszügen von zahlreichen europäischen Zeitungen gedruckt.

Ein Jahr nach dem Ausbruch und 15 000 km von Indonesien entfernt litten Teile **Europas** unter einem besonders kalten und regnerischen Sommer. Verzweifelte Bauern kämpften um ihr Überleben. Die Koalitionskriege in den Jahren zuvor hatten tiefe Spuren hinterlassen. Jetzt bedrohten die ständigen Regenfälle, Schnee im Frühsommer, geringer Nährwert des Heus und die Aussicht auf eine sehr schlechte Ernte die Existenz vieler. Zahlreiche Tagebücher und andere Quellen geben diesen Menschen eine Stimme und gewähren Einblicke in ihre Sorgen und Ängste. Heute wissen wir, dass das regnerische Wetter in Europa teilweise eine Folge des Tamboraausbruchs war. Allerdings wurden die beiden Ereignisse damals nicht miteinander in Verbindung gebracht und die Ursache für die klimatischen Anomalien in Europa blieb noch ein Jahrhundert lang unentdeckt.³²



Der Tamboraausbruch verursachte Tod in Indonesien und Europa. Links: Skelett eines Opfers des Tamboraausbruchs auf Sumbawa (Foto: Rik Stoetman), rechts: «Hungerbrot» in Europa (Foto: P. Portner, Historisches Museum Basel).

Zehntausende Menschen starben in **Indonesien** während der Eruption und in den folgenden Monaten, als die Asche die Ernte zerstörte und das Trinkwasser vergiftete. Aber bis vor ungefähr zehn Jahren wurden keine Leichen gefunden. Im Jahr 2004 entdeckten Igan Sutawidjaja vom Zentrum der Vulkanologie in Bandung, Indonesien, und Haraldur Sigurdsson von der Universität von Rhode Island, USA, zwei Skelette (links) und gruben mehrere Häuser aus. Ähnlich wie beim Ausbruch des Vesuv im Jahr 79 schienen die Opfer von der Eruption überrascht worden zu sein. Eine der beiden Personen wurde vermutlich getötet, während sie das Abendessen zubereitete. Aufgrund der Parallelen zum Ausbruch des Vesuv nannten die beiden Vulkanologen den Ort «Pompeji des Ostens».

In **Europa** führte der kalte und regnerische Sommer zu schlechten Ernten. Dies war einer der Faktoren, die zu Hungersnot und zur «letzten grossen Subsistenzkrise der westlichen Welt» (John D. Post) führten. Die Brote wurden bei gleichbleibenden Preisen kleiner, und dem Mehl wurden kaum geniessbare Zutaten beigemischt. Diese «Hungerbrote» wurden zu einem Symbol der Krise (rechts). Unterernährung und Krankheiten verursachten zahlreiche Todesfälle und trugen zu Migration, Unruhen und politischen und sozialen Veränderungen bei. Die Skelette in Indonesien und Hungerbrote in Europa bleiben die stummen Zeugen einer Katastrophe, die durch den Tamboraausbruch 1815 herbeigeführt wurde.



Zweihundert Jahre später fanden zum Gedenken an den Tamboraausbruch 1815 und seine Folgen in **Indonesien** und in **Europa** zahlreiche Anlässe statt. Auf einer internationalen Konferenz vom 7.–10. April 2015 in Bern, Schweiz, trafen sich Wissenschaftler aus der ganzen Welt, um das Wissen zusammenzutragen und den Vulkanausbruch und seine Folgen besser zu verstehen.

Anlässlich der Tagung in Bern zum zweihundertjährigen Gedenken an den grossen Tamboraausbruch überreicht Adjat Sudrajat von der Universität Padjadjaran, Bandung, Indonesien, ein T-Shirt an Stefan Brönnimann vom Oeschger Zentrum und Geographischen Institut der Universität Bern, Schweiz (Foto: Céline Dizerens).



Die Rauchsäule des Vulkans Calbuco in der Nähe von Puerto Montt (Chile) am 22. April 2015

Vulkanische Rauchsäulen steigen hauptsächlich durch Auftrieb. Wenn die heisse Mischung aus Lava, Asche, Luft, Wasserdampf und anderen Gasen ihren Feststoffanteil verloren hat, kann das mehrere Hundert Grad heisse Gas- und Rauchgemisch bis in die Stratosphäre steigen. Auf dem Weg nach oben wird Umgebungsluft eingemischt und dadurch der Wasserdampfanteil verändert. Die Dynamik vulkanischer Rauchsäulen ist komplex und die Prozesse sind nicht vollständig verstanden. Gerade letzteres wäre wichtig, um die darauf folgende globale Ausbreitung von Sulfataerosolen und deren Effekt auf das Klima besser zu verstehen.

Die Tambora-Rauchsäule in der Stratosphäre

Die Auswirkungen des Ausbruchs reichten weit über den indonesischen Archipel hinaus. Um die globalen klimatischen Auswirkungen des Tamboraausbruchs zu verstehen, müssen wir die ablaufenden Prozesse in einer vulkanischen Rauchsäule betrachten. Es ist nicht die beeindruckende Eruptionssäule, die wir von Bildern aktueller Eruptionen kennen, die klimatisch relevant ist, sondern ihr unsichtbarer Teil: die Schwefelgase. Der wichtigste Faktor für die globale Klimawirkung ist die Schwefelmenge, welche die Stratosphäre (atmosphärische Schicht in ca. 10–50 km über der Erdoberfläche, darunter liegt die Troposphäre) erreicht. Hier können die Gase mehrere Jahre verweilen und sich weltweit ausbreiten (aus diesem Grund haben troposphärische Eruptionen wie diejenige des Eyjafjallajökull 2010 einen viel geringeren, nur regionalen Klimaeffekt).

Der Tamboraausbruch 1815 emittierte ca. 60–80 Megatonnen Schwefeldioxid (SO_2) in die Stratosphäre.³³ Dies ist drei- bis viermal so viel wie während des Pinatuboausbruchs 1991 auf den Philippinen, der grössten Eruption des 20. Jahrhunderts. In der Stratosphäre umkreiste die SO_2 -Wolke die Erde um die Tropen und wurde innerhalb weniger Wochen zu Schwefelsäure (H_2SO_4) oxidiert, welches zu winzigen Tröpfchen kondensiert: Sulfataerosole (Abb. 5). Diese Aerosole vermindern das Sonnenlicht und waren die primäre Ursache der auf den Tamboraausbruch folgenden globalen klimatischen Auswirkungen.

Ein aktuelles Forschungsthema betrifft die Höhe und die Ausbreitung der Aerosolwolke nach dem Tamboraausbruch 1815. Beides ist für die Klimaauswirkungen wichtig. Asche und andere vulkanische Ablagerungen (vgl. Abb. 3), die in der Vergangenheit zur Schätzung der Höhe der Eruptionssäule verwendet wurden, ergeben für den Tamboraausbruch 1815 eine maximale Höhe von 43 km.^{34,35} Diese Zahl wird in der Literatur häufig genannt. Allerdings dürfte es sich hier eher um eine Überschiesshöhe handeln als um diejenige Höhe, in welcher die Wolke (und damit die Schwefelgase) letztlich verweilte. Der entscheidende Faktor für die Höhe, die eine Eruptionssäule erreicht, ist der Auftrieb und nicht die kinetische Energie der Explosion.³⁶ Die sogenannte neutrale Auftriebshöhe ist daher ein besseres Mass für die Höhe der SO_2 -Schicht. Ausserdem muss berücksichtigt werden, dass ein Vulkanausbruch mehrere Rauchsäulen erzeugt. Oft ist es nicht die erste, die «Plinianische» Eruptionssäule, die entscheidend ist. Diese ist häufig zu dicht und kollabiert zu pyroklastischen Strömen. Aus diesen steigen dann aber oft sekundäre Eruptionssäulen empor («Phoenix plumes»), die weniger dicht sind und auch in die Stratosphäre aufsteigen können. Diese Vorgänge für den Tamboraausbruch 1815 zu rekonstruieren ist sehr schwierig.

Ebenso ist die Rekonstruktion des Transports der Tamboraaerosole in der Stratosphäre alles andere als einfach. Mit den Winden der äquatorialen unteren Stratosphäre (die immer entweder östlich oder westlich sind), umkreist die vulkanische Wolke die Erde innerhalb von zwei bis vier Wochen (Abb. 5). Dies wurde zuerst nach dem Krakatauausbruch 1883 beobachtet. Gemäss Lehrbuchwissen müsste die meridionale Zirkulation in der Stratosphäre die Aerosole anschliessend in Richtung der beiden Polarregionen transportieren. Allerdings ist diese Zirkulation viel langsamer, so dass es zwei bis fünf Jahre dauert, bis ein Luftpaket von der tropischen Tropopause in die Polarregion gelangt (Abb. 5).

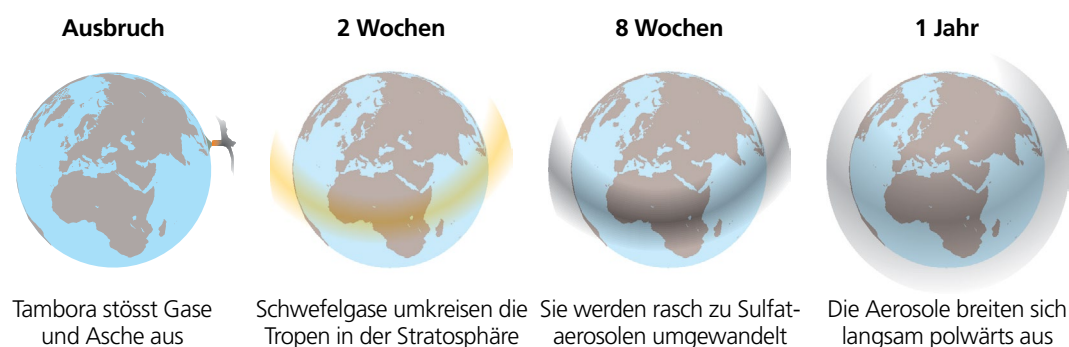


Abb. 5. Schematische Abbildung der Ausbreitung von SO_2 und Aerosolen über die Erde nach dem Ausbruch des Tambora.

Es ist nicht klar, wie effizient andere Zirkulationen sind. Darüber hinaus ist die hemisphärische Aufteilung der Aerosole, die für das Verständnis der klimatischen Auswirkungen wichtig ist, sehr unsicher.

Da der meridionale Transport vor allem zur jeweiligen Winterhemisphäre hin verläuft, müssten Aerosole aus tropischen Eruptionen im April oder Mai zunächst in den Süden transportiert werden, weil dann der Südwinter anfängt. Im Oktober kommt diese Zirkulation zum Erliegen und im November beginnt die nördliche Zirkulation. Aerosole, die bis zu diesem Zeitpunkt in der tropischen Stratosphäre verblieben sind, wandern dann nach Norden. Numerische Simulationen des Transports der Tambora-aerosole (unter Annahme durchschnittlicher stratosphärischer Winde) durch Arfeuille und Koautoren³⁷ zeigen daher mehr Aerosole in der Südhemisphäre (Abb. 6, links unten). Dies steht jedoch im Kontrast zur verbreiteten Vorstellung, dass die klimatischen Auswirkungen vor allem auf der Nordhemisphäre spürbar gewesen seien. Zwar sind die Unsicherheiten im Modell hoch (so überschätzt es tropische Aerosolmengen), aber vielleicht fehlen lediglich Informationen über die realen Klimaauswirkungen in der Südhemisphäre. Der folgende Abschnitt trägt Ergebnisse zur Verteilung der Aerosole zusammen – und zum Einfluss auf das Klima in beiden Hemisphären.

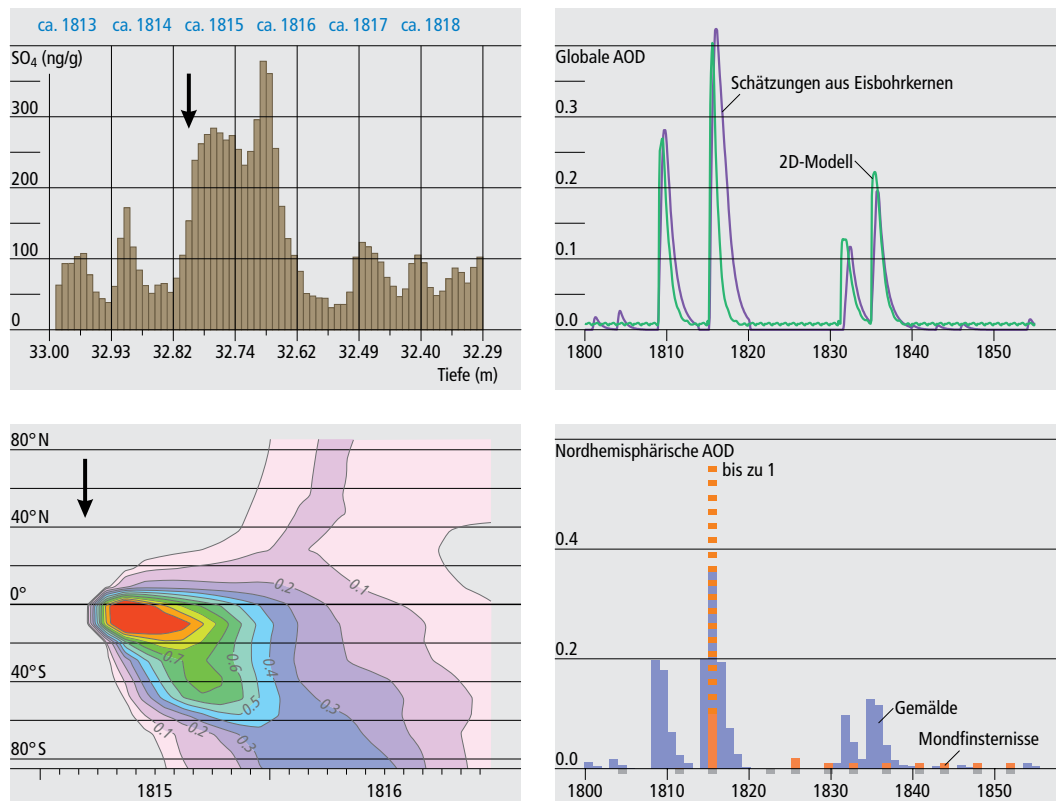


Abb. 6. (Oben links) Schwefelkonzentration in Segmenten eines grönländischen Eisbohrkerns.³⁸ (Oben rechts) Rekonstruktion der globalen optischen Aerosoldicke (AOD) mittels statistischer Techniken aus Eisbohrkernen geschätzt³⁹ oder in einem 2D-Modell simuliert.⁴⁰ (Unten links) Ausbreitung der zonal gemittelten Aerosole (AOD) nach dem Tamboraausbruch in einem 2D-Modell.⁴¹ (Unten rechts) Optische Aerosoldicke geschätzt aus Gemälden⁴² und Mondfinsternissen⁴³ (grau: beobachtete Mondfinsternisse). Der Pfeil markiert jeweils den Tamboraausbruch.

Zwei Aerosolschichten in der Stratosphäre, zwei Monate nach dem Ausbruch des Pinatubo 1991, fotografiert aus dem Space Shuttle

Erreicht das gasförmige SO_2 einer Eruption die Stratosphäre, breitet es sich (nach anfänglichem Überschießen) auf der neutralen Auftriebshöhe aus und umkreist den Erdball innerhalb von zwei oder drei Wochen. Die Aerosole des Pinatuboausbruchs erscheinen als zwei dünne Schichten in einer Höhe von 20–25 km. Die Aerosole bewegten sich im Laufe der nächsten zwei Jahre langsam polwärts und trübten die Atmosphäre für ca. vier Jahre.



Eisbohrkerne sind ein Archiv für vulkanische Aerosole historischer Ausbrüche

Vulkanische Aerosole treten in den mittleren und hohen Breiten wieder in die Troposphäre ein. Oft führen hier aktive Wettersysteme zu einem Austausch mit der Stratosphäre. In der Troposphäre werden die Aerosole in Wolkenteilchen eingebaut und erreichen den Boden in Form von Niederschlag oder sie setzen sich am Erdboden ab. Der Schnee auf dem grönländischen Eisschild hat daher Spuren vulkanischer Aerosole, die in Eisbohrkernen erhalten geblieben sind und chemisch analysiert werden können.

Bild: Eisbohrkern des North Greenland Eemian Ice Drilling project (NEEM).

Den Aerosolen auf der Spur

Können die Ergebnisse von Arfeuille und Koautoren mit unabhängigen Beobachtungsdaten bestätigt oder widerlegt werden? Möglicherweise können Eisbohrkerne dabei helfen. Vulkanische Sulfataerosole erreichen letztlich immer die Troposphäre. Sie lagern sich am Boden ab oder werden in Wolkenteilchen eingebaut und erreichen die Erdoberfläche als Niederschlag. In hohen Gebirgen oder polaren Regionen werden die Aerosole im Schnee gespeichert. In Eisbohrkernen konserviert, können die Aerosole des Tamboraausbruchs deshalb noch heute beprobt werden. Sulfatmessungen an Eisbohrkernen sind (neben vulkanischen Ablagerungen) die Hauptinformationsquelle für vergangene Vulkanausbrüche (Abb. 6, oben links). Für den Tamboraausbruch 1815 sind grosse Sulfatmengen dokumentiert, sowohl in Eisbohrkernen polarer Regionen als auch in alpinen Kernen (spätere Ausbrüche sind hier überdeckt durch industrielle Schwefelemissionen). Wegen der langen Umwälzzeit der Stratosphäre und der langen Lebensdauer der Aerosole in der Stratosphäre erreichen sie die polaren Regionen erst ein bis zwei Jahre nach dem Ausbruch. Das Signal ist somit über zwei oder mehr jährliche Schichten verteilt (Abb. 6, oben links).

Was lässt sich also mit Eisbohrkernen über die hemisphärische Aufteilung der Aerosolmengen aussagen? Eine kürzlich durchgeführte Studie ergab, dass die Schwefelmengen des Tamboraausbruchs in Eisbohrkernen der Antarktis höher waren als in solchen von Grönland,⁴⁴ während frühere Studien⁴⁵ etwa gleich grosse Mengen fanden. Allerdings sind die Unsicherheiten in diesen Schätzungen hoch, weil Schwefelmengen unterschiedlicher Standorte nicht direkt verglichen werden können. Die räumliche Variabilität und auch die Gradienten sind sehr gross und hängen vor allem von der Auswaschung der Aerosole während des Transports ab. Es braucht deshalb Annahmen über den Transport oder eine statistische Kalibration. Die Frage bleibt also offen, ob die Tamboraaerosole tatsächlich ungleich verteilt waren.

Auch direkte Beobachtungen liefern Informationen über die atmosphärische Aerosoltrübung, allerdings nur sehr spärlich. Während der Mondfinsternis am 10. Juni 1816 war der Mond praktisch unsichtbar, was auf eine optische Aerosoltiefe (ein Mass für die Reduktion der Sonnenstrahlung durch Aerosole) grösser als 0.1 hindeutet. Das ist ein typischer Wert für einen starken tropischen Vulkanausbruch. Andere Phänomene (farbige, leuchtende Dämmerung, Sichtbarkeit von Sonnenflecken mit blossen Auge, Reduktion von Sternenlicht) weisen sogar auf noch höhere Werte bis gegen eins hin.⁴⁶ Darüber hinaus führte der Tamboraausbruch 1815, wie andere starke Eruptionen, zu farbenprächtigen Sonnenuntergängen. Zerefos und Koautoren⁴⁷ analysierten das Rot-Grün-Verhältnis in Hunderten von Sonnenuntergangsgemälden des 18. und 19. Jahrhunderts (siehe Kasten «Eine Geschichte über Indonesien und Europa»). Daraus berechneten sie die zeitliche Entwicklung der Aerosoltrübung (Abb. 6, unten rechts). Die Übereinstimmung zwischen den Schätzungen aus Eisbohrkernen (oben rechts) und denjenigen aus Gemälden ist sehr gut. Alle Datenquellen sind in Übereinstimmung mit einer globalen oder nordhemisphärischen optischen Aerosoltiefe von ungefähr 0.2–0.4. Gemälde bestätigen also die Erkenntnisse aus Eisbohrkernen! Allerdings ist ihre räumliche Abdeckung nicht ausreichend, um das Problem der hemisphärischen Aufteilung zu lösen. Klar ist, dass die Aerosoltrübung über den nördlichen Aussertropen gross genug war, um das Klima grossräumig zu beeinflussen.

Die wichtigsten Auswirkungen der vulkanischen Aerosole auf die Strahlung und auf die Stratosphäre sind heute gut untersucht. Vulkanische Aerosole streuen kurzwellige Strahlung und absorbieren Nahinfrarotlicht der Sonne und thermische Infrarotstrahlung der Erde. Die Absorption erwärmt die Stratosphäre erheblich. Die Streuung der kurzwelligen Strahlung mindert umgekehrt die Sonneneinstrahlung auf dem Erdboden und führt zu einer Abkühlung. Der Tambora war in dieser Hinsicht nicht anders als andere Eruptionen, nur grösser.

Trotzdem spielt die Grösse von Eruptionen eine Rolle, wie neue Forschungsarbeiten zeigen. Die Beziehung zwischen der stratosphärischen Sulfatmenge und der Reduktion der kurzwelligen Strahlung ist nicht linear. Grosse Eruptionen haben also nicht eine proportional grössere Wirkung als kleinere Eruptionen. Der Grund liegt im Wachstum der Aerosolpartikel (siehe Abb. 7, oben). Grössere Eruptionen emittieren eine grössere Menge von SO_2 in die Stratosphäre in ein ungefähr gleich grosses Volumen. Entsprechend ist die Konzentration von SO_2 erhöht. Die Anzahl Aerosolpartikel ist bei einer grossen Eruption deshalb zunächst viel höher als bei einer kleinen, aber diese Partikel stossen häufiger zusammen, verbinden sich und wachsen wesent-

lich schneller.⁴⁸ Die Grössenverteilung der Aerosole wirkt sich auf die optischen Eigenschaften aus. Grössere Partikel sind weniger effizient im Streuen kurzweiliger Strahlung. Darüber hinaus sind grosse Partikel schwerer, sinken und verbleiben weniger lang in der Stratosphäre. In einer Modellstudie, welche die Eruptionen des Tambora 1815 und des Pinatubo 1991 verglich, zeigte sich zwei Jahre nach dem Ausbruch am Äquator eine ungefähr gleich grosse Aerosolwirkung, obwohl für den Tambora eine viermal grössere SO₂-Menge angenommen wurde als für den Pinatubo⁴⁹ (siehe Abb. 7, unten). Drei Jahre nach dem Ausbruch war die Aerosolwirkung beim Tambora sogar geringer als beim Pinatubo. Grosse Eruptionen haben daher möglicherweise einen kleineren Klimaeffekt als angenommen.

Ausserdem könnten Vulkanaerosole auch indirekte Auswirkungen haben, wenn sie aus der Stratosphäre in die obere Troposphäre gesunken sind und dort die Bildung von Zirruswolken beeinflussen. Allerdings ist über diesen Mechanismus nur wenig bekannt.

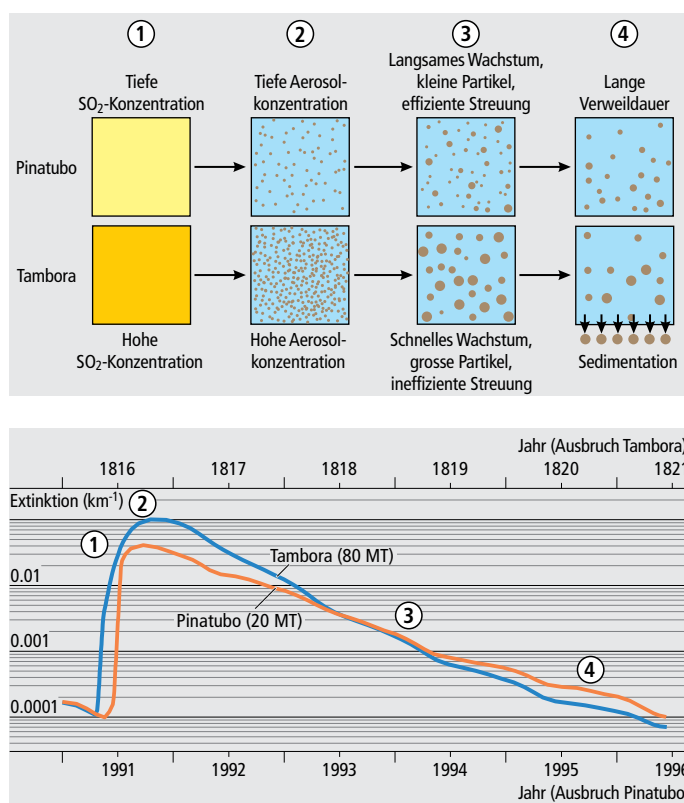


Abb. 7. (Oben) Schematische Darstellung von Anzahl und Wachstum von Aerosolpartikeln nach dem Ausbruch des Pinatubo resp. des Tambora.⁵⁰ (Unten) Vergleich der Aerosolextinktion (d.h. die Wirkung auf die kurzweilige Strahlung) am Äquator in 20 km Höhe in Modellsimulationen nach den Ausbrüchen von Tambora und Pinatubo.⁵¹

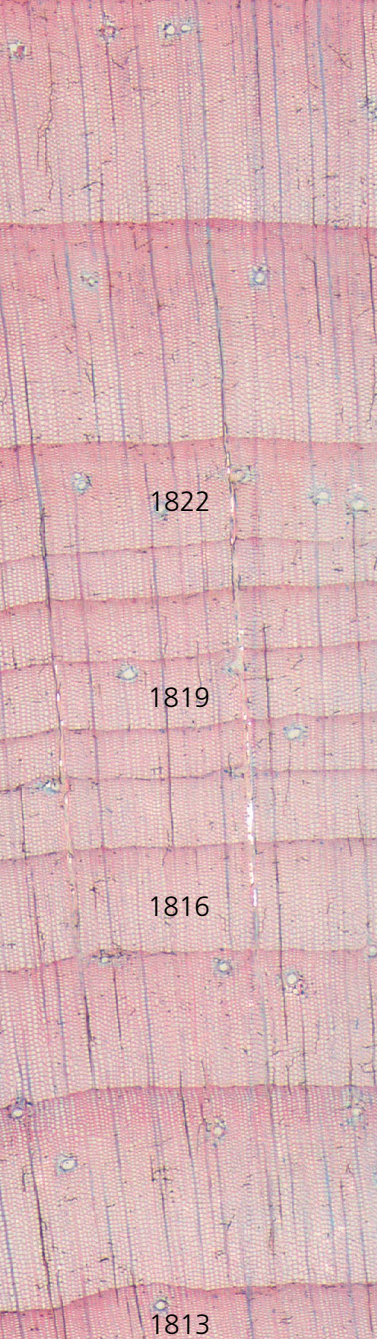
Die Tamboraerosole verursachten einen negativen Strahlungsantrieb des globalen Klimasystems von ca. 5–6 W/m² über ein bis zwei Jahre.^{52,53} Diese Zahl ist allerdings sehr unsicher; lokal könnten deutlich höhere Strahlungseinflüsse aufgetreten sein. Zum Vergleich: Der Strahlungsantrieb seit der vorindustriellen Ära allein durch CO₂ liegt bei 1.82 W/m² und wächst pro Jahrzehnt um 0.27 W/m².⁵⁴ Die unmittelbare Strahlungswirkung des Tamboraausbruchs 1815 war also etwa dreimal so stark wie der Strahlungsantrieb durch CO₂ seither, dauerte jedoch nur ein bis zwei Jahre. Über einen längeren Zeitraum betrachtet, haben Vulkanausbrüche daher eher geringe Auswirkungen auf die Klimaentwicklung. Um eine Vorstellung der Grössenordnung zu haben, kann die gegenwärtige Klimaerwärmung mit dem Ausbruch des Tambora verglichen werden: Um dem aktuellen Anstieg von CO₂ entgegenzuwirken (ohne überhaupt andere Treibhausgase zu berücksichtigen), müsste die Häufigkeit Tambora-ähnlicher Ausbrüche von einmal in vierhundert Jahren auf einmal in 25 Jahren ansteigen.



Mondfinsternisse als Informationsquelle für Vulkanausbrüche

Die Farbe der völlig verdunkelten Scheibe gibt einen Hinweis auf die optische Trübung der Atmosphäre, die wiederum auf vulkanische Aerosole schliessen lässt. Während der Mondfinsternis am 10. Juni 1816 schien der Mond in einem klaren Himmel zu verschwinden, vermutlich aufgrund der Tamboraerosole. Basierend auf solchen Berichten schätzte Richard Stothers⁵⁵ die Aerosoltrübung grosser vulkanischer Eruptionen.

Bild: Mondfinsternis am 10. Dezember 2011 in Batticaloa, Sri Lanka.



Dünne Baumringe nach 1816

Jahrringe – die jährlichen Wachstumsringe der Bäume – sind ein häufig verwendeter Klimaproxy. Dicke Ringe zeigen ein ungestörtes Wachstum, dünne weisen auf ungünstige Wachstumsbedingungen hin. Abhängig von Baumart und Standort ist das Wachstum durch zu niedrige Temperaturen oder durch Trockenheit limitiert. Dazu spielen die Einstrahlung sowie das Wachstum des Vorjahrs eine Rolle. Die Kombination dieser Faktoren führte zu dünnen Ringen 1816 und in den Folgejahren. Die einzelnen Faktoren auseinanderzuhalten, ist eine grosse Herausforderung.

Bild: Dünnschnitt einer Kiefer aus dem Tatra-Gebirge.⁷⁰

Das Klima 1816 aus Klimaarchiven

Die Strahlungsverminderung um $5\text{--}6\text{W/m}^2$ am Erdboden in den zwei Jahren nach dem Tamborausbruch führte zu einer globalen Abkühlung; wie gross die Abkühlung war, ist allerdings nicht klar. Instrumentelle Messungen sind unzureichend, um eine globale oder auch nur eine hemisphärische Abweichung zu schätzen. Nur der «Berkeley Earth»-Temperaturdatensatz⁵⁶ reicht so weit zurück. Demnach war die Temperatur der Landoberfläche der Nordhemisphäre 1816 um 1.4°C kühler als im Durchschnitt der Jahre 1821–1830. Eine derart grosse Abweichung wurde in diesem Datensatz seither nicht wieder erreicht.

Allerdings beruht diese Zahl auf den Messungen weniger Stationen, die zudem meistens in denjenigen Regionen liegen, die besonders stark betroffen waren: Mitteleuropa und Nordamerika. Rekonstruktionen basierend auf Klimaarchiven (Proxies) stellen daher eine Alternative dar, um kontinentale bis globale Temperaturabweichungen zu schätzen. Eine der ersten Studien zum Klima von 1816 aus Proxies wurde durch Briffa und Koautoren⁵⁷ verfasst. Ihre Karten der maximalen Spätholzdicke in Baumringen (ein Proxy für Temperatur) zeigt eine deutliche Abnahme über dem nördlichen Eurasien im Sommer 1816. Spätere Studien bestätigten dies. Eine starke Abkühlung ist auch für die Tropen aus Studien mit Baumringen⁵⁸ und Korallen⁵⁹ belegt. Spärliche Messungen auf Schiffen, von Mike Chenoweth⁶⁰ sorgfältig zusammengestellt, zeigen ebenfalls niedrige tropische Meeresoberflächentemperaturen im Jahr 1816.

Die verfügbaren Rekonstruktionen^{61,62,63,64} stimmen dahingehend überein, dass das Jahr 1816 global oder nordhemisphärisch betrachtet unter den kältesten der letzten vierhundert Jahre einzureihen ist. Allerdings unterscheiden sich die Rekonstruktionen erheblich in der Grösse der Abweichung. Die Temperatur der Nordhemisphäre lag 1816 um 0.66°C bis 1.9°C unterhalb der Mitteltemperatur der Jahre 1961–1990.⁶⁵ Allerdings hat in dieser Zeit zusätzlich die globale Erwärmung stattgefunden. Im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren führte Tambora zu einer Abkühlung von rund 0.5°C .⁶⁶ Interessanterweise fiel der Sommer 1816 in einen Zeitraum, in dem die Temperaturen bereits rückläufig waren.

Als Beispiel sind in Abbildung 8 Temperaturrekonstruktionen von Tom Crowley und Koautoren⁶⁷ gezeigt, als Abweichungen im Vergleich zur Periode 1799–1821*. Die Rekonstruktion betont Jahr-zu-Jahr-Schwankungen weniger stark als dekadische. In diesen Rekonstruktionen ist 1816 das kälteste Jahr weltweit, in den nördlichen Aussertropen sowie in den Tropen, nicht

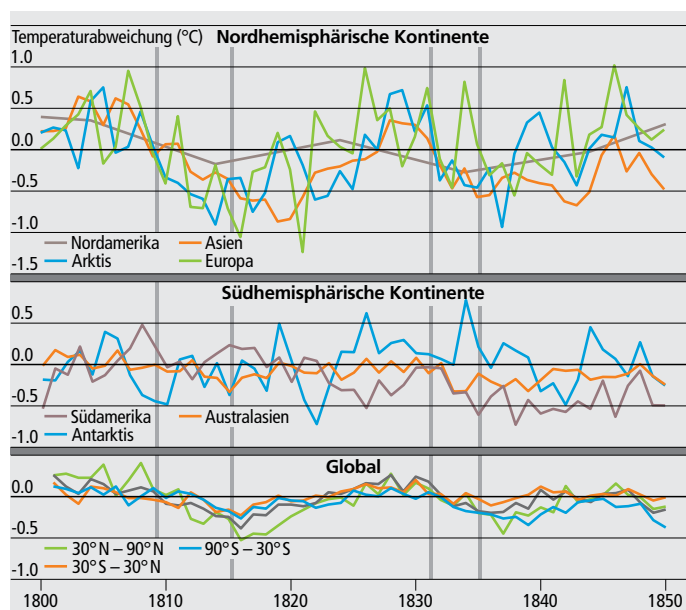


Abb. 8. Jährliche Temperaturabweichungen* für Kontinente der Nord- (oben) und Südhemisphäre (Mitte).⁶⁸ (Unten) jährliche Temperaturabweichungen für die Erde, nördliche Aussertropen, Tropen und südliche Aussertropen.⁶⁹ Graue Balken kennzeichnen wichtige tropische Vulkanausbrüche.

* Nach Auchmann und Koautoren [vgl. Anmerkung 101] verwenden wir als Referenz den Zeitraum 1799–1821, ohne die vulkanischen Jahre 1809–1811 und 1815–1817 (eigene Datensätze starten erst 1800) für diese Abbildung und die ganze Broschüre.

aber in den südlichen Aussertropen. Eine ausgeprägte Kaltphase trat auch nach 1830 auf, mit besonders kalten Jahren nach den Eruptionen des Babuyan Claro 1831 auf den Philippinen und des Cosiguina 1835 in Nicaragua.

Kontinentale Rekonstruktionen des PAGES-2k-Projekts⁷¹ (Abb. 8, oben und Mitte) zeigen ein differenzierteres Bild. Die Temperaturen der nordhemisphärischen Kontinente stimmen sowohl untereinander als auch mit den Rekonstruktionen von Crowley und Koautoren⁷² überein. Jedoch zeigt sich in den PAGES-2k-Rekonstruktionen keine klare Auswirkung des Tamborausbruchs 1815 auf die Südkontinente (Antarktis, Australien, Südamerika). Da viele der Proxystandorte der Südhemisphäre an Küsten liegen, sind diese möglicherweise nicht repräsentativ. Trotzdem ist das gänzliche Fehlen eines Signals auffällig, umso mehr, als ein grösserer Teil der Aerosole Richtung Südhemisphäre gezogen sein könnte. Ausserdem stimmt das Fehlen eines Tamborasignals nicht mit Modellsimulationen überein.⁷³ Besteht hier ein Widerspruch? Dies ist eine offene Frage, aber sie betrifft nicht nur das Jahr 1816. Die fehlende Korrelation zwischen Temperaturrekonstruktionen der Nord- und Südhemisphäre ist ein wissenschaftliches Rätsel.⁷⁴

Aus Proxies kann nicht nur Information über die Temperatur gewonnen werden. Einige Proxies reagieren auch auf Änderungen in tropischen Niederschlägen. In Mittelamerika scheint sich die Innertropische Konvergenzzone (ITCZ) nach dem Tamborausbruch nach Norden verschoben zu haben.⁷⁵ Basierend auf Baumringen, weiteren Proxies und historischen Messungen wurden für verschiedene Regionen Rekonstruktionen von Niederschlag oder Trockenheit durchgeführt. Abbildung 9 stellt diese Rekonstruktionen für den Nordsommer 1816 zusammen. Die Dürrekonstruktionen zeigen eine starke Trockenheit in den indischen und südostasiatischen Monsunregionen, während in Nordamerika ein ausgeprägtes West-Ost-Gefälle sichtbar wird. Niederschlagsrekonstruktionen für die asiatische Monsunregion bestätigen trockene Bedingungen in Indien und Südostasien, aber nicht in China. Es braucht daher weitere Forschung zur Klärung der meteorologischen und hydrologischen Dürre in China im Jahre 1816. Kein klares Signal zeigt sich im Winterniederschlag in Südafrika und der jährlichen Niederschlagsmenge für Australien, während die Niederschlagsrekonstruktion für das südliche Südamerika im Südwinter 1816 einen Niederschlagsüberschuss zeigt. Eine neue Rekonstruktion, basierend auf der Kombination von Klimaproxies und instrumentellen Aufzeichnungen mit Modellsimulationen (auf der Titelseite), zeigt Trockenheit in den inneren Tropen sowie in China.

Rekonstruktionen von Dürre und Niederschlag stimmen für Europa sehr gut überein. Hier zeigt sich eine deutliche Zunahme der Niederschläge im Sommer 1816 als eine der wichtigsten Ursachen für das Elend im «Jahr ohne Sommer». Im Folgenden konzentrieren wir uns daher auf Europa.

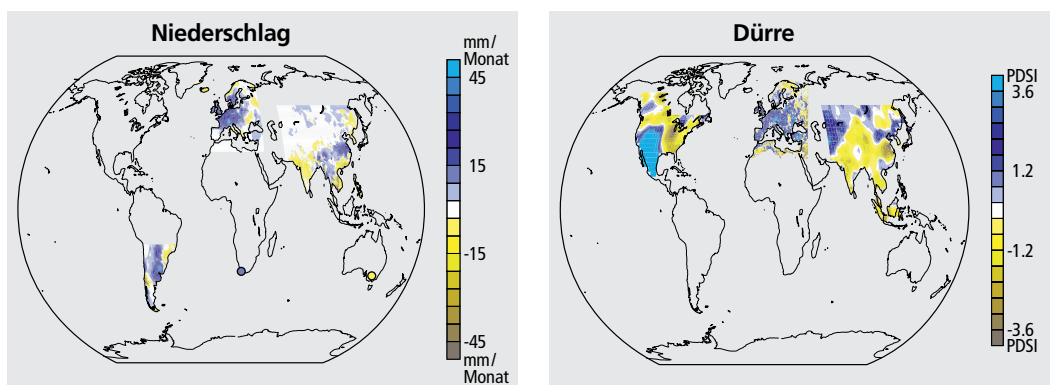


Abb. 9. (Links) Rekonstruktionen von Niederschlagsanomalien im Nordsommer 1816 basierend auf instrumentellen Daten und Proxies für Südsüdamerika,⁷⁶ Europa⁷⁷ (beide Juni bis August), Asien⁷⁸ (Mai bis September), sowie für Südafrika⁷⁹ (April bis September) und Australien⁸⁰ (Mai bis April). (Rechts) Baumringbasierte Rekonstruktionen des «Palmer Drought Severity Index» für die warme Jahreszeit für Nordamerika,⁸¹ Europa,⁸² und Asien⁸³ für den Nordsommer 1816, ausgedrückt als Anomalien bezüglich 1799–1821.



Trockenheit in den Monsunregionen

Im Sommer 1816 litten grosse Teile Asiens unter schwerer Dürre aufgrund eines schwachen asiatischen Monsuns – zumindest in Klimamodellsimulationen und gemäss einigen, aber nicht allen, Rekonstruktionen. Obwohl für viele Regionen in den letzten Jahren Dürrekonstruktionen durchgeführt wurden, haben wir noch kein vollständiges, globales Bild des Hydroklimas des Jahres 1816. Die Hungersnot im Südwesten Chinas (Provinz Yunnan) war wohl nicht nur auf Trockenheit zurückzuführen, sondern auch auf niedrige Temperaturen, auf die der dort angebaute Reis sehr empfindlich reagierte.



Hochwasser in Mitteleuropa

Mitteleuropa litt unter einem nassen Frühjahr und Sommer 1816. Der Niederschlag betrug mancherorts fast das Doppelte der normalen Menge und es kam zu zahlreichen Überflutungen. Noch grössere Überschwemmungen traten auf der Alpennordseite ein Jahr später auf, als der angesammelte Schnee von zwei Wintern (ein Teil des Schnees des Winters 1816 blieb über den Sommer liegen) sowie dem in hohen Lagen als Schnee gefallenem Niederschlag vom Sommer 1816 abschmolzen.

Bild: Überschwemmtes Feld in der Nähe von Linz (Österreich) nach starken Niederschlägen im Juni 2013.

Das Klima 1816 aus Messungen

Für Nordamerika und Europa liegen genügend meteorologische Messreihen vor, um einen Überblick über das Klima des Jahres 1816 zu gewinnen. Hubert Lamb, Christian Pfister, Rudolf Brazdil und andere Klimahistoriker untersuchten diese Messungen und Beobachtungen.^{84,85,86} Ein 1992 veröffentlichtes Buch⁸⁷ trug diese Arbeiten zusammen. In West- und Mitteleuropa lagen die Temperaturen im Sommer 1816 weit unterhalb des normalen Bereichs. Am stärksten war die Abkühlung in Frankreich und in der Schweiz. Während die Klimaabweichungen in Westeuropa gut dokumentiert sind, ergeben Rekonstruktionen für Osteuropa kein einheitliches Bild. Zeitgenössische Quellen berichten über Trockenheit und Wärme in Russland, was durch sehr spärliche Messdaten (Kiew, St. Petersburg) gestützt wird. In Polen scheint der Sommer 1816 normal gewesen zu sein, während Baumringe aus dem Tatra-Gebirge stark reduziertes Wachstum zeigen.⁸⁸ Die Abkühlung war vor allem in West- und Mitteleuropa stark und wohl kein kontinentweites Phänomen.

Für die Bevölkerung Mitteleuropas war der endlose Regen problematischer als die tieferen Temperaturen. Johann Peter Hoffmann, Landwirt und Friedensrichter aus dem Elsass, schrieb in sein Tagebuch⁸⁹ im Juli 1816: «Der Regen hält noch immer an, es ist kein Tag an welchem es nicht regnet. Der Jammer ist nicht zu beschreiben. Seit dem mirs gedenckt ist kein so bedenkliche Zeit gewesen.» Die Niederschläge in Mitteleuropa waren im Sommer 1816 um bis zu 80 % höher als normal. Zur gleichen Zeit war es auf der Iberischen Halbinsel und im westlichen Russland eher trocken.⁹⁰

Eine neue Klimarekonstruktion aus der Kombination von Modellsimulationen mit instrumentellen Daten und Proxies (Abb. 10, siehe auch Titelseite)⁹¹ bestätigt die niedrigen Temperaturen in Mitteleuropa und Nordamerika sowie etwas höhere Temperaturen in Osteuropa. Sie zeigt auch eine starke Zunahme des Niederschlags über West- und Mitteleuropa (Abnahme über Westrussland) und eine Abnahme des Drucks über den Britischen Inseln.

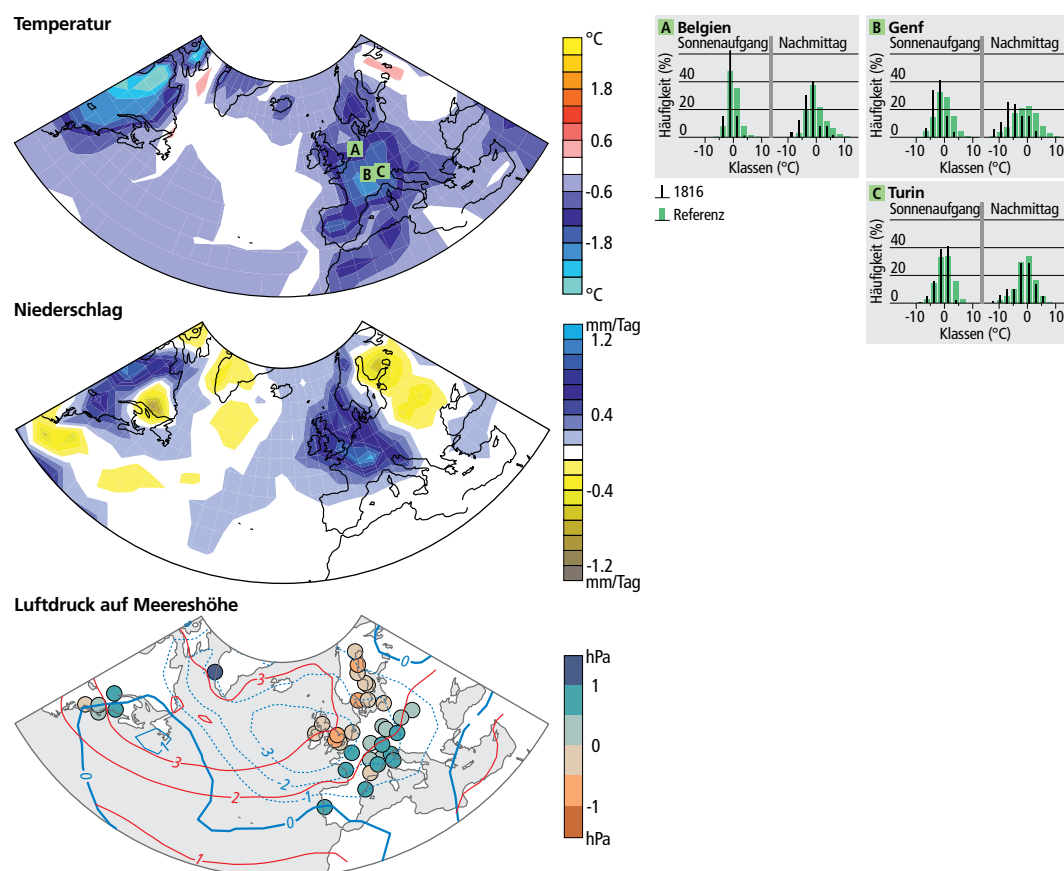


Abb. 10. Klimaabweichungen im Sommer (Juni–August) 1816 relativ zum Referenzzeitraum 1799–1821. Dargestellt sind Rekonstruktionen⁹² der (oben) Temperatur (kleine Diagramme: Häufigkeitsverteilungen der täglichen Temperaturanomalien dreier Stationen), (Mitte) des Niederschlags und (unten) des Luftdrucks auf Meereshöhe (schwarze Konturen, in hPa). Die Punkte zeigen die Standardabweichung des täglichen Luftdrucks (3–6 Tage Bandpassfilterung)⁹³, ausgedrückt als Anomalien im Vergleich zu einer neueren Referenzperiode (1981–2010, rote Konturen).

1816 war in Europa nicht das erste kühle Jahr im 19. Jahrhundert. Nach einer Warmphase um 1800 sank die Temperatur deutlich (Abb. 11) und erreichte im Sommer 1816 einen Tiefpunkt. Ein Teil der Abkühlung könnte durch einen vorangegangenen, unbekannten Vulkanausbruch 1808 oder 1809 verursacht worden sein⁹⁴ (Vulkanaerosole sind in Eisbohrkernen dokumentiert, konnten aber keiner bekannten Eruption zugeordnet werden). Auch eine geringere Sonnenaktivität oder interne dekadische Schwankungen im Ozean-Atmosphärensystem könnten dazu beigetragen haben.⁹⁵

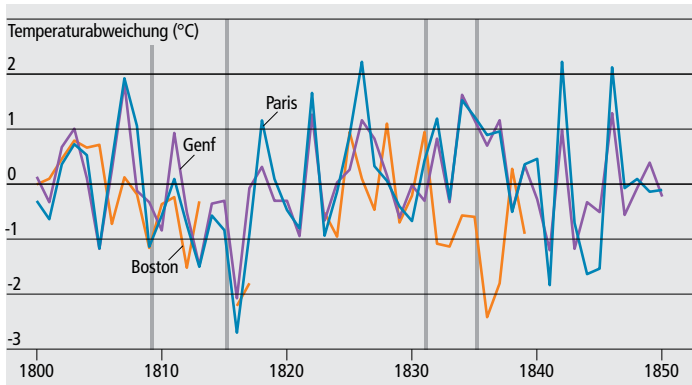


Abb. 11. Sommertemperatur (Juni–August) in Genf, Paris und Boston, ausgedrückt als Abweichungen bezüglich der Referenzperiode 1799–1821. Graue Balken markieren wichtige tropische Vulkanausbrüche.

Während in Europa bereits früher «Jahre ohne Sommer» beobachtet wurden (Beispiele: 1529, 1588, 1601, 1618, 1628, 1675 und 1813)⁹⁶, war 1816 das einzige so bezeichnete Ereignis in Nordamerika (kühle Sommer wurden in Boston allerdings auch in den 1830er-Jahren beobachtet, auch diese folgten Vulkanausbrüchen). Die Temperaturanomalien in den Neuengland-Staaten im Sommer 1816 (Abb. 10, 11) waren fast so prägnant wie in Westeuropa. In dieser Region ist 1816 auch bekannt als «Eighteen-hundred-and-froze-to-death». Nach mehreren Kältewellen im Mai wurde im Juni ein Schneesturm verzeichnet, der Teilen der Staaten New York, Pennsylvania, Vermont und New Hampshire eine 2–30 cm dicke Schneedecke bescherte. Wetterkarten für diesen Sturm (gezeichnet von Mike Chenoweth)⁹⁷ sind in Abbildung 12 gezeigt. Hinter der Kaltfront über dem Atlantik sanken die Temperaturen unter den Gefrierpunkt. Interessanterweise traf zugleich ein Hurrikan auf Florida (rotes Symbol in Abb. 12). Die südöstlichen Staaten der USA erlebten ein trockenes Frühjahr und einen trockenen Sommer.

Weiter nördlich wurde über ungewöhnliche Meereisverhältnisse berichtet. Die Schiffe der Hudson Bay Company verzeichneten viel Meereis im Sommer 1816. Umgekehrt rapportierte der Walfänger William Scoresby Jr. sehr wenig Eis in der Grönlandsee (östlich von Grönland) und ungewöhnlich hohe Temperaturen im Jahr 1816 (im Vergleich zu den Jahren 1810 bis 1818).⁹⁸

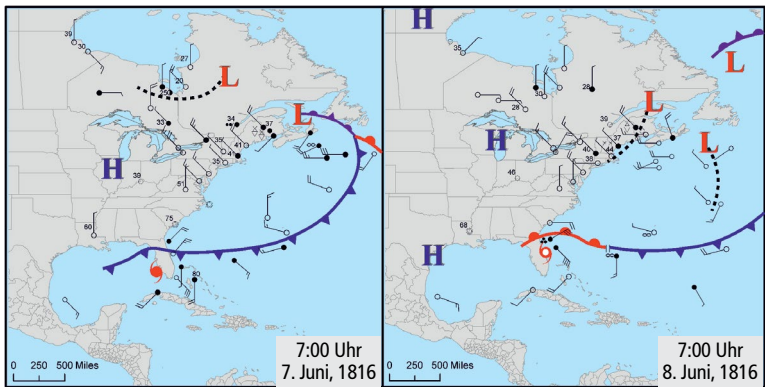


Abb. 12. Wetterkarten für den 7. und 8. Juni 1816 sowie Beobachtungen von Wind, Temperatur (°F), Bewölkung (offene/gefüllte Kreise) und Niederschlag (Symbole neben den Windpfeilen), basierend auf einer Zusammenstellung von Beobachtungen von Mike Chenoweth (2009).⁹⁹

Den Schatz bergen

Lange Zeit galten historische Wetterbeobachtungen als verstaubt; die Klimawissenschaft war darauf nicht mehr angewiesen. In den letzten Jahren haben einerseits veränderte wissenschaftliche Fragestellungen – von Mittelwerten hin zu Extremereignissen und Klimafolgen – sowie neue numerische Möglichkeiten (Datenassimilation) dazu geführt, dass historische Manuskriptdaten wieder wertvoll sind. In «Citizen Science»-Projekten wie oldweather.org können Internetnutzer helfen, den Schatz zu bergen.

Schnee oder Regen.		
Nachts.	Vormittags.	Nachmittags.
—	—	Reg. 3
Regen	Regen	Regen
Regen	—	Regen
Regen	Regen	Regen
—	Regen	Regen
Regen	—	—
—	—	Reg. 3
Regen	Regen	—
—	—	Etbr. 7
—	Reg. 12	Regen
Regen	Reg. 11	Regen
Regen	Regen	Regen
Regen	Regen	Regen
Regen	Regen	—
—	—	Reg. 4
—	—	Regen
Regen	Regen	Regen
Regen	Regen	—
Regen	—	—
—	—	—
—	—	—
Regen	—	Regen
—	—	—
Regen	Reg. 12	Regen
Regen	—	Reg. 6
—	—	Reg. 1
Regen	—	—
—	—	Etbr. 7
Regen	Regen	Regen
Regen	Regen	Reg. 51
Regen	Regen	Regen

Wetterbeobachtungen aus Aarau, Schweiz, Juli 1816

Der Deutsche (später Schweizer) Wissenschaftler, Autor und Volksaufklärer Heinrich Zschokke führte während der Jahre 1807 bis 1816 in Aarau dreimal pro Tag instrumentelle Messungen und Wetterbeobachtungen durch.¹⁰⁵ Das Datenblatt vom Juli 1816 zeigt Regen an 28 von 31 Tagen, meist den ganzen Tag lang.

Während der aktuellen klimatologischen Normperiode (1981–2010) wies die Station Buchs/Aarau für den Monat Juli durchschnittlich 11.5 Tage mit >0.1 mm Niederschlag auf.

Vulkanwetter: Anatomie des «Jahrs ohne Sommer» in Mitteleuropa

«Vulkanwetter» ist der Titel des bekannten Buchs von Henry und Elisabeth Stommel¹⁰⁰ zum «Jahr ohne Sommer» von 1816. Tatsächlich erlauben die frühinstrumentellen Aufzeichnungen aus Mitteleuropa mittlerweile sowohl eine detaillierte Sicht auf das Klima als auch – basierend auf mehreren Messungen pro Tag – auf das tägliche Wetter des Jahrs 1816. Diese Analyse zeigt, dass 1816 nicht das Wetter, sondern das Klima extrem war: Es war die Häufigkeit von Schlechtwettersituationen und nicht deren Intensität, die den Sommer 1816 charakterisierte.¹⁰¹

Die Niederschlagshäufigkeit war in der Schweiz stark erhöht, während die Intensität der einzelnen Regenereignisse normal war. Es gab also mehr Regentage, jeder Tag für sich genommen war aber nicht ungewöhnlich. Allerdings ist Niederschlag schwer zu messen und lokal variabel. Andere Orte in Mitteleuropa zeigten im Sommer 1816 nur gering erhöhte Niederschlagsmengen, obwohl von vielen Überschwemmungen berichtet wird. In der Schweiz fiel 1816 bis in den frühen Sommer wiederholt Schnee bis in die Talböden (vgl. Abschnitt «Nachwirkungen»).

Detaillierte Temperaturmessungen geben auch Hinweise für die zugrundeliegenden Prozesse. So war an mehreren mitteleuropäischen Standorten die Abkühlung bei den Nachmittagstemperaturen viel stärker ausgeprägt (in Genf 3.8°C im Vergleich zur Referenzperiode 1799–1821) als bei Sonnenaufgang (1.8°C; Abb. 10, oben). Dies ist auf eine Zunahme der Bewölkung zurückzuführen, was durch Bewölkungsbeobachtungen bestätigt wird.¹⁰² Wolken führen tagsüber zu einer Abkühlung (durch Reduzierung der Sonneneinstrahlung), während der Nacht aber zu einer Erwärmung (durch Verminderung der langwelligen Abstrahlung). Im Sommer 1816 kamen zwar warme Sonnenaufgänge kaum vor, kalte waren hingegen aufgrund der erhöhten Wolkenbedeckung nicht häufiger als in anderen Jahren (Abb. 10, oben). Für das Pflanzenwachstum hatte die erhöhte Wolkenbedeckung zusammen mit der Temperatur starke negative Auswirkungen (vgl. Abschnitt «Biophysikalische Auswirkungen»). Südlich der Alpen (z. B. in Turin, Abb. 10, oben) nahm die Bewölkung nicht zu.

Aus der Kombination von Temperatur- und Bewölkungsdaten kann für den Sommer 1816 die durchschnittliche tägliche Temperaturspanne für wolkenlose Tage berechnet und als Mass für die direkte Strahlungswirkung der vulkanischen Aerosole beigezogen werden. Als Folge der verminderten Sonneneinstrahlung wird erwartet, dass die Temperaturen tagsüber stärker sinken als in der Nacht, wodurch die Temperaturspanne kleiner wird. Tatsächlich zeigt sich im Vergleich zu benachbarten Jahren ein Rückgang um etwa 0.6°C bei mehreren Stationen in Mitteleuropa. Dieser Wert stimmt gut mit Klimasimulationen überein.¹⁰³ Zwar zeigen diese Ergebnisse, dass sich die Tamboraaerosole direkt auswirkten, doch sie erklären nur einen kleinen Teil der 1.5–3°C starken Abkühlung in Mitteleuropa (siehe Kasten «Wie viel der Sommerkälte 1816 in der Schweiz kann durch den Tambora erklärt werden?»). Der grösste Teil der Abkühlung muss durch Änderungen im Wetter erklärt werden. Eine Wetterlagenklassifizierung für Genf, basierend auf Druck, Druckveränderung und Wind, zeigt eine Zunahme von Tiefdrucklagen um einen Faktor 2.5 und ein fast vollständiges Fehlen von Hochdrucklagen.¹⁰⁴ Für einen europäischen Überblick kann die synoptische Aktivität, also die Häufigkeit des Durchzugs von Fronten und Störungen, aus der Druckvariabilität geschätzt werden (Standardabweichung von bandpassgefilterten Druckmessungen). Diese Daten zeigen für den Sommer 1816 ein Band erhöhter Variabilität, das sich über Mitteleuropa zieht (Abb. 10, unten, grünliche Farben). Das stimmt mit Wetteraufzeichnungen überein und lässt vermuten, dass eine Störung nach der anderen über Frankreich und die Schweiz hinwegzog. Die Störungen brachten häufig Regen, niedrige Temperaturen, Bewölkung, fast keine sonnigen Tage und keine langen Schönwetterphasen bis August 1816. Die Hauptursache des kalten Wetters war somit nicht der direkte Strahlungseinfluss, sondern eine Häufigkeitsänderung der Wetterlagen. Allerdings war auch diese teilweise durch die vulkanischen Aerosole bedingt (vgl. Abschnitt «Indirekte Auswirkungen»).

Gleichzeitig war in Skandinavien die Druckvariabilität geringer als normal, obwohl der durchschnittliche Druck unternormal war. Auch Temperatur- und Niederschlagseffekte waren hier weniger stark ausgeprägt als in Mitteleuropa.

Wie viel der Sommerkälte 1816 in der Schweiz kann durch den Tambora erklärt werden?

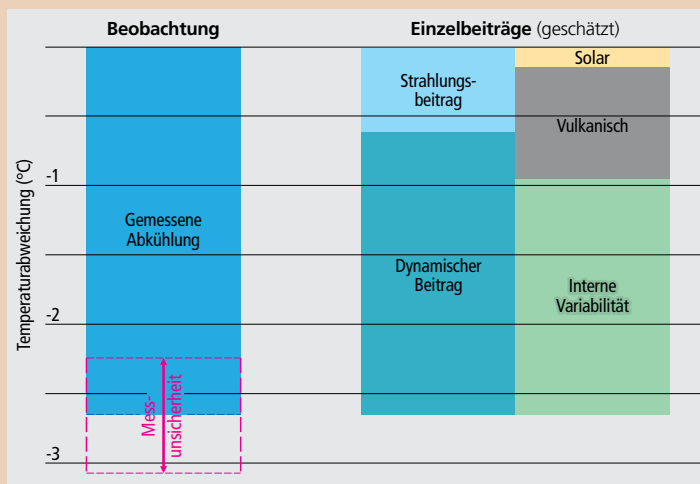
Lord Byron verbrachte den Sommer 1816 in der Villa Diodati in der Nähe von Genf, begleitet von Percy Bysshe Shelley und Mary Godwin (die spätere Mary Shelley). Das schlechte Wetter zwang die jungen Autorinnen, zuhause zu bleiben, wo sie die Zeit mit Reden, Trinken und dem Schreiben von Geistergeschichten verbrachten. Mary Shelleys Roman «Frankenstein» und Lord Byrons Gedicht «Darkness» waren die Ergebnisse. Dies ist eine der oft beschriebenen Tambora-Anekdoten.

Tatsächlich war die Temperatur in Genf und in den benachbarten Gebieten im Sommer 1816 ca. 2.5–3°C niedriger als in der Zeit 1799–1821. Aber wie viel dieser Abkühlung wurde wirklich durch den Tamboraausbruch verursacht? Eine Abschätzung der strahlungsgetriebenen Abkühlung lässt sich aus der Reduktion der täglichen Temperaturspanne bei klaren Tagen gewinnen, die für mehrere mitteleuropäische Stationen ca. 0.6°C betrug.¹⁰⁶ Diese auf Beobachtungen basierende Schätzung entspricht der grossflächigen Abkühlung in Modellsimulationen. Ein kleiner Bruchteil dieser strahlungsgetriebenen Abkühlung wurde möglicherweise nicht durch Tambora-aerosole, sondern reduzierte Sonnenaktivität während des sogenannten Dalton Minimums 1790–1830 verursacht (der Betrag ist sehr gering, wenn ein zeitgenössischer Bezugszeitraum gewählt wird). Allerdings umfasst der Tamboraeinfluss mehr als nur Strahlungseffekte. Klimamodellsimulationen mit vulkanischen Aerosolen deuten darauf hin, dass die ungleiche Abkühlung über Land und Meer (das Land kühlt schneller ab als der Ozean) die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik verschieben kann (siehe Abschnitte «Vulkanwetter: Anatomie des «Jahrs ohne Sommer» in Mitteleuropa» und «Indirekte Klimaeffekte»). Deshalb erlebte Mitteleuropa eine zusätzliche Kühlung durch eine Verschiebung der Wetterlagen. In Modellsimulationen wird diese zusätzliche Abkühlung bestätigt; sie ist aber zumindest im Durchschnitt eher gering. Insgesamt können so rund 0.7–1°C der Abkühlung direkt oder indirekt auf den Tamboraausbruch zurückgeführt werden.



Villa Diodati in der Nähe von Genf (Foto: Robert Grassi).

Das ist weit weniger als die beobachteten 2.5–3°C Abkühlung. Das bedeutet, dass höchstwahrscheinlich zufällige, interne Variabilität im Klimasystem ebenfalls stark zur Abkühlung beigetragen hat. Tatsächlich bleibt der grösste Beitrag zur Abkühlung in der Schweiz in den Modellen unerklärt. Inwieweit dies wirklich nur Zufall war oder ob es sich um eine Verstärkung der indirekten vulkanischen Effekte durch unbekannte Prozesse handelt, bleibt offen. Tatsache ist, dass nicht alle starken Vulkaneruptionen zu einem «Jahr ohne Sommer» führen, und zwar weder im Modell noch in der realen Welt. Umgekehrt sind nicht alle «Jahre ohne Sommer» durch Vulkanausbrüche verursacht. Also waren «Frankenstein» und «Darkness» nicht nur das Ergebnis des Tamboraausbruchs, sondern auch von zufälliger Wettervariabilität – und natürlich der Phantasie der «jungen Romantiker».¹⁰⁷



Beiträge von direkten und indirekten Vulkanwirkungen und der internen Variabilität zur Temperaturabweichung im Sommer 1816 in Genf. Die Quantifizierung beruht auf der beobachteten täglichen Temperaturspanne bei klarem Himmel sowie auf Modellsimulationen.¹⁰⁸



Supercomputer sind für die Paläoklimatologie unverzichtbare Werkzeuge geworden

Vulkanausbrüche sind ein Test für unser Verständnis des Klimasystems. Wenn dieses in Klimamodellen richtig erfasst ist, können Wissenschaftler anhand von Modellsimulationen die Auswirkungen vergangener Ausbrüche untersuchen. Dabei spielt auch die zufällige Klimavariabilität eine Rolle, so dass sehr viele Simulationen durchgeführt werden müssen, bevor ein Signal hervortritt. Dazu müssen riesige Datenmengen verarbeitet werden – Paläoklimatologie wird zu einer «Big Data»-Wissenschaft.

Foto: Datenspeicher des Oeschger Zentrums für Klimaforschung (OCCR) der Universität Bern.

Das Tamboraklima in Modellen

Während Beobachtungen und Rekonstruktionen darüber Auskunft geben, was geschah, helfen Modellsimulationen, herauszufinden, warum etwas geschah. Modelle simulieren die grundlegenden Prozesse in der Atmosphäre wie die Zirkulation oder die Strahlung auf der Grundlage von Gleichungen. Vulkanische Aerosole können in diesen Simulationen vorgegeben und die Antwort des Modells anschliessend analysiert werden (Abb. 13). In gekoppelten Modellen werden auch die Ozeane simuliert, alternativ können in Atmosphärenmodellen die Meeresoberflächentemperaturen beispielsweise aus Rekonstruktionen vorgegeben werden (vgl. Abb. 15).¹⁰⁹ In den meisten gekoppelten Modellsimulationen sinkt die globale Mitteltemperatur nach dem Tamboraausbruch um ca. 0.5–1 °C, was mit den Rekonstruktionen ungefähr übereinstimmt. Als ein Beispiel zeigt Abbildung 14 ein Set von gekoppelten Simulationen für den Zeitraum 1800–1850, der vier grosse Ausbrüche umfasst. In diesen Modellsimulationen verringert sich die globale Temperatur (Land und Ozean) in Übereinstimmung mit Rekonstruktionen um 0.5 °C nach dem Tamboraausbruch. Diese Simulationen verwendeten die in Abbildung 6 dargestellten modellierten Aerosolmengen,¹¹⁰ in welchen wie erwähnt die meisten Aerosole in den Süden transportiert werden. Es erstaunt daher nicht, dass für die Südhemisphäre eine stärkere Abkühlung simuliert wird als für die Nordhemisphäre.

Die Übereinstimmung zwischen Modellsimulationen und Rekonstruktionen für die globale Mitteltemperatur ist bemerkenswert. Frühere Studien hatten eine Diskrepanz zwischen Modellen und Rekonstruktionen gefunden, wobei die Ursache für die Abweichungen auf beiden Seiten vermutet wurde.^{111,112} Neue Studien zeigen jedoch eine höhere Übereinstimmung.^{113,114}

In der Stratosphäre führen Vulkanausbrüche zu einer ausgeprägten Erwärmung, die für stratosphärische Prozesse relevant ist, obwohl sie sich nicht direkt auf das Klima am Erdboden auswirkt. Die untere Stratosphäre erwärmte sich nach dem Pinatuboausbruch 1991 um 1.5 °C – im globalen Mittel! Der Tamboraausbruch 1815 war drei- bis viermal stärker. Gemäss Modellsimulationen verursachte er eine Zunahme der global gemittelten Temperatur der unteren Stratosphäre von 6 °C. Auch in der Stratosphäre überschätzten frühere Modellsimulationen zumindest für den Pinatuboausbruch die Auswirkungen.¹¹⁵ Trotzdem ist eine 6 °C-Erwärmung nach der Eruption des Tambora nicht unrealistisch.

Die unmittelbare Strahlungswirkung von Vulkanausbrüchen wirkt sich auch auf andere Grössen aus. Die Ozeane nehmen weniger Energie auf und ihr Wärmeinhalt verringert sich. In den Simulationen ist der Einfluss des Tambora über lange Zeit feststellbar. Der Wärmeinhalt der Ozeane war immer noch durch den Tamboraausbruch beeinflusst, als 1831 bereits der nächste

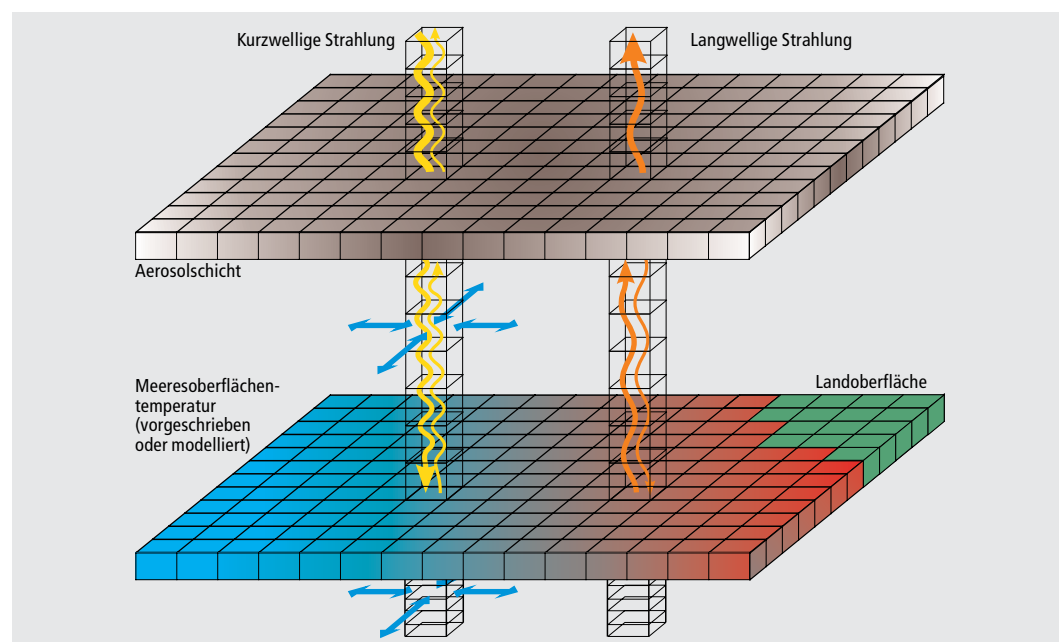


Abb. 13. Schematische Darstellung eines Klimamodells.

grosse Ausbruch folgte. Umgekehrt war der Wärmeinhalt zum Zeitpunkt des Tamboraausbruchs als Folge des «unbekannten» Ausbruchs¹¹⁶ 1808/09 bereits stark reduziert. Werte wie jene um 1800 wurden im Modell über die nächsten sechzig Jahre nicht mehr erreicht. Die Langzeitwirkung von zwei Eruptionen in kurzer Zeit könnte grösser sein als die von zwei einzelnen Eruptionen über einen längeren Zeitraum, da eine Doppeleruption möglicherweise Änderungen in der Ozeanzirkulation auslösen kann. Im frühen 19. Jahrhundert war ausserdem die Sonnenaktivität reduziert («Dalton Minimum» zwischen 1790 und 1830).¹¹⁷

Die Simulationen zeigen als Folge der Abkühlung einen leichten Anstieg der globalen Meereseismenge nach dem Ausbruch des Tambora und anderen Ausbrüchen. Im Gegensatz zu den Auswirkungen auf den Ozeanwärmeinhalt oder die stratosphärische Temperatur bewegen sich diese Veränderungen allerdings in der Grössenordnung der typischen Jahr-zu-Jahr-Variabilität.

Aufgrund der reduzierten Sonneneinstrahlung ist nach Vulkanausbrüchen auch die Verdunstung reduziert. Der gesamte Wasserkreislauf wird verlangsamt. Die globale mittlere Niederschlagsmenge sank nach dem Tamboraausbruch in den Modellsimulationen um 3–4 %; deutlich stärker als die Variabilität von Jahr zu Jahr. Der globale Rückgang ging vor allem auf einen Niederschlagsrückgang in den Tropen zurück, was gut zu den in Abbildung 9 dargestellten Rekonstruktionen passt.

In einer ersten Annäherung führen Vulkane also zu kühlem, trockenem Klima. Warum aber war es 1816 kalt und nass über Europa? Es kann sich demnach nicht um eine direkte Strahlungswirkung handeln, sondern um eine indirekte Wirkung. Im nächsten Abschnitt analysieren wir deshalb die indirekten Effekte von Vulkanausbrüchen im Allgemeinen und des Tamboraausbruchs im Besonderen.

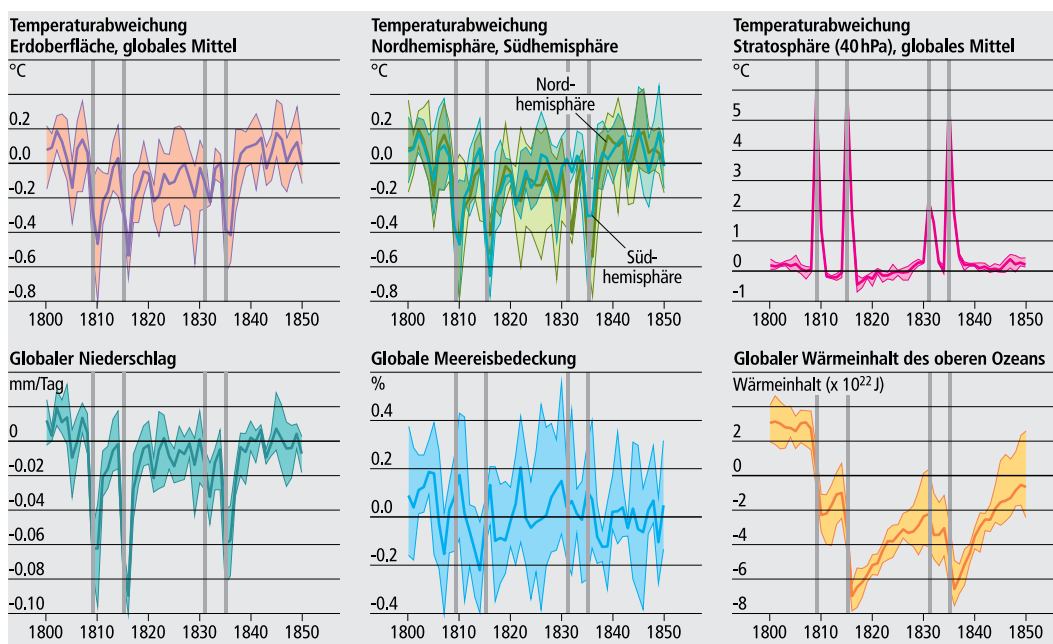


Abb. 14. Jährliche Zeitreihen von globalen Mittelwerten der Temperatur an der Erdoberfläche (ebenfalls Nord- und Südhemisphäre), in der Stratosphäre, des Niederschlags, des Meereises und des Wärmeinhalts des oberen Ozeans (0–700m) von vier Klimasimulationen mit einem Ozean–Atmosphären–Chemie-Klimamodell,¹¹⁸ ausgedrückt als Abweichungen von der Referenzperiode 1799–1821. Dicke Linien zeigen den Mittelwert der vier Simulationen, die Schattierung zeigt die Spannweite. Jeweils zwei Simulationen unterscheiden sich von den anderen durch einen leicht anderen Strahlungsantrieb (Sonnenaktivität), untereinander durch unterschiedliche Ausgangsbedingungen.¹¹⁹ Graue Balken markieren wichtige tropische Vulkanausbrüche.

```
#vvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvv rep
OBS = $(OBJDIR)/mcmain.o $(
$(OBJDIR)/mcparse.o $(
$(OBJDIR)/sunpos.o $(
$(OBJDIR)/mcttt.o $(O
$(OBJDIR)/mcsyntax.o
$(OBJDIR)/mccdfn.o $(
$(OBJDIR)/mcadvect.o
$(OBJDIR)/mchemin.o
$(OBJDIR)/matrix.o $(
$(OBJDIR)/mcspecial.o
$(OBJDIR)/mcppm.o \
$(OBJDIR)/mc_module.o
$(OBJDIR)/mc_commands

LIBS = mctwostream/libmctwos

SRC = mcmain.c mcglobal.c mc
sunpos.c mcground.c mc
mcsyntax.c mcinp.c mcc
mcadvect.c mpdata.c mc
matrix.c mcclouds.c mc
mcppm.c \
mc_module.cc mc_variab
puffemit.cc

#vvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvvv keep

depend :
    madeepend $(INCLUDE)
    (cd mctwostream; make

$(OBJDIR)/%.o : %.c
    $(CC) -c $(CFLAGS) $(

$(OBJDIR)/%.o : %.cc
    $(CC) -c $(CFLAGS) $(

$(OBJDIR)/%.o : %.f
    f77 -c $(FFLAGS) $*.f

parallel : $(OBS) $(OBJDIR)
    $(CC) $(OBS) $(OBJD
    -lm -lnetcdf -lpv
    $(STRIP) meteochem

meteochem : $(OBS) $(LIBS)
    $(CC) $(OBS) -L/usr/
    $(STRIP) meteochem

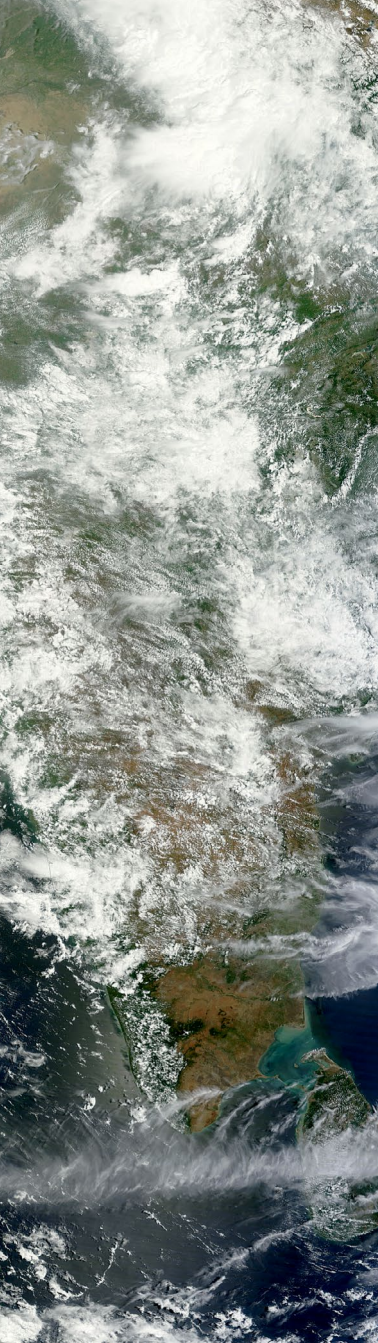
mcinp.c : mcinp.l
    flex -P mci -- -o $@ $

mcsyntax.c mcsyntax.h : mcsy
    bison -y -d mcsyntax.
    sed 's/yy/mci/g' y.ta
    rm y.tab.c
    sed 's/yy/mci/g' y.ta
    rm y.tab.h
```

Klimamodelle basieren auf unserem Wissen über das Klimasystem, übersetzt in Computercode, der numerische Werte erzeugt

Die vielleicht erste Modellstu- die zum Tamboraausbruch wurde durch Krishna Rao Vupputuri¹²⁰ vorgelegt. Er benutzte ein eindimensiona- les gekoppeltes Chemie– Klima-Modell. Heute nutzen die Wissenschaftler dreidi- mensionale Modelle der Atmosphäre und des Ozeans (gekoppelte Modelle), der Atmosphärenphysik und -chemie (Chemie–Klima-Mo- delle) oder der Atmosphäre, des Ozeans, der Vegetation und der Eisschilde (Erdsystem- modelle).

Foto: Makefile des Mo- dells METPHOMOD.



Monsunsysteme reagieren empfindlich auf Störungen der Einstrahlung wie nach einem Vulkanausbruch

Sommermonsune werden im Wesentlichen durch die stärkere Erhitzung der subtropischen Landmassen im Vergleich zu den umliegenden Meeren angetrieben. Landmassen reagieren schneller auf vulkanische Abkühlung, was zu einer Abschwächung der Monsune führt. Das Verständnis der Monsunsysteme ist auch relevant in Bezug auf das zukünftige Klima, beispielsweise als Reaktion auf eine Zunahme von Treibhausgasen, oder Veränderungen der troposphärischen Aerosole, der Schneedecke oder der Landnutzung.

Foto: Satellitenbild von Indien während des Monsuns.

Indirekte Klimaeffekte

Direkte Strahlungswirkungen wie Abkühlung, weniger Verdunstung oder weniger Niederschlag stellen nur einen Teil der Auswirkungen von Vulkanausbrüchen auf das Klima dar. Viele weitere Effekte sind indirekt, d.h., sie entstehen durch räumlich ungleiche Abkühlung und dadurch verursachte Änderungen der atmosphärischen Zirkulation. So kühlt die Landoberfläche schneller ab als die Ozeane, weshalb sich der grossräumige Land–Meer-Temperaturkontrast ändert. Dieser ist aber ein wichtiger Antriebsfaktor der Sommermonsune. Folglich zeigen viele – aber nicht alle – Modellsimulationen eine Abschwächung der Sommermonsune als Reaktion auf Vulkanausbrüche.¹²¹ Einige Hinweise darauf finden sich in den Rekonstruktionen in Abbildung 9 (ebenfalls nicht in allen).

Simulationen mit einem Atmosphärenmodell mit vorgegebenen Meeresoberflächentemperaturen für den Sommer von 1816 sind in Abbildung 15 dargestellt, und zwar als Mittelwert über 30 Simulationen mit geringfügig unterschiedlichen Anfangsbedingungen.¹²² Dadurch wird ein grosser Teil der zufälligen Wettervariabilität herausgemittelt. Was bleibt, ist das Signal, das aufgrund der vulkanischen Aerosole und der niedrigen Meeresoberflächentemperaturen zustande kommt. Die Simulationen bestätigen die starke Abkühlung der Kontinente (oben links). Die südwestlichen Monsunwinde in Westafrika und Indien sind reduziert (unten links; die Windanomalien sind östlich). Dies könnte auch in der realen Welt der Fall gewesen sein.

Wegen der geringeren Feuchte und der schwächeren Monsunzirkulation nimmt der Niederschlag (oben rechts) in den Monsunregionen Afrikas, Asiens und Amerikas ab. Während die Niederschlagsabnahme und die Dürre in Asien auch in einigen Rekonstruktionen widergegeben wird (Abb. 9), ist dies für Nordamerika nicht der Fall – für Afrika sind keine Rekonstruktionen verfügbar. In den Monsunregionen ist auch die Bewölkung geringer. Daher entstehen, eingebettet in die kontinentale Abkühlung, in einigen Modellsimulationen Regionen mit einer Erwärmung aufgrund geringerer Bewölkung. Dies ist auch in Abb. 15 (oben links) sichtbar.^{123,124}

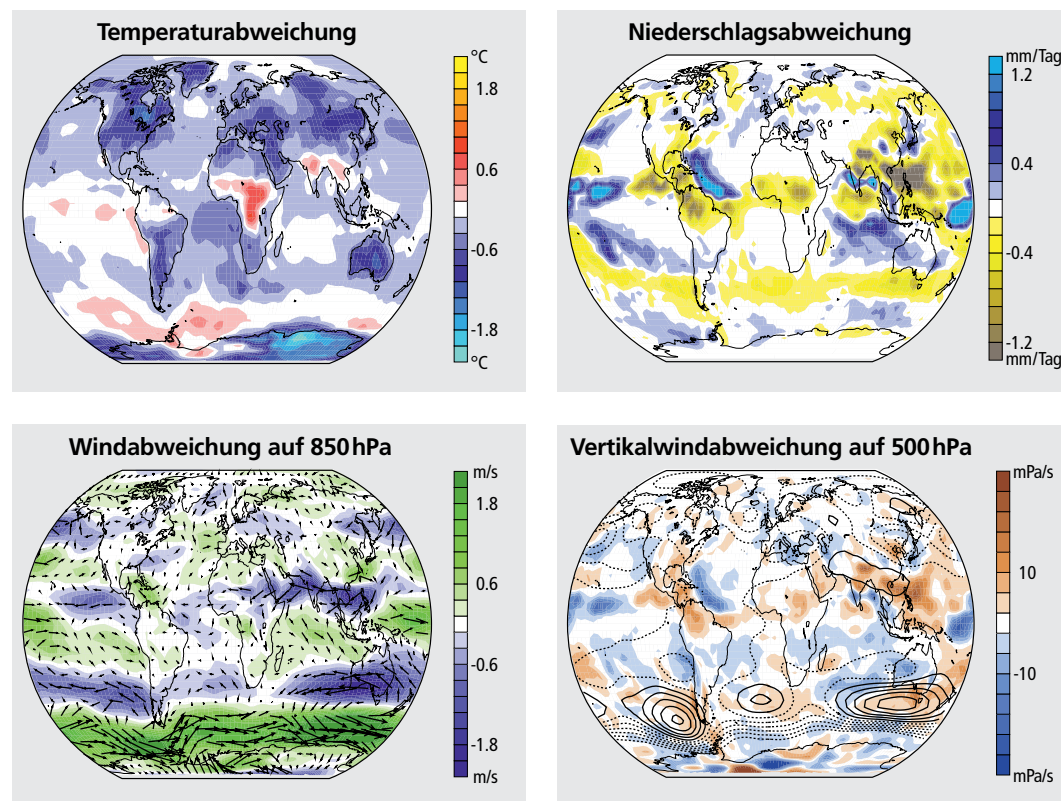


Abb. 15. Simulierte Abweichungen¹²⁵ der Temperatur an der Erdoberfläche (oben links), des Niederschlags (oben rechts), des Winds auf 850 hPa (ca. 1.5 km Höhe, links unten; Farben zeigen den zonalen Wind) und der vertikalen Geschwindigkeit (Farben) und der geopotenziellen Höhe (ca. 5.5 km Höhe; Konturen, 6 gpm Abstand symmetrisch um Null, negative Werte sind gestrichelt) auf 500 hPa (unten rechts) im Juni–August 1816, ausgedrückt als Anomalien im Vergleich zur Referenzperiode 1799–1821. Gezeigt ist der Mittelwert von 30 Simulationen.

Das Modell sagt nicht nur eine Abschwächung der Monsune voraus, sondern auch der damit verbundenen nördlichen Hadley-Zelle (die Zirkulationswalze der Tropen, bestehend aus Aufsteigen in der ITCZ, polwärts Ausströmen, Absinken in den Subtropenhochs und Rückströmen zum Äquator als Passatwinde). Über Afrika wird die Konvektion über der Sahelzone (der aufsteigende Ast der Hadley-Zelle in dieser Region; rötliche Farben in der Figur unten rechts) geschwächt, und damit auch der absteigende Ast über dem Mittelmeer (bläulich). Das Azorenhoch wird schwächer (gestrichelte Linien). Als Folge können die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete im Modell weiter gegen Süden vordringen – genau wie in den Beobachtungen (Abb. 10). Nicht jede der durchgeführten Simulationen zeigt dieses Verhalten. Erst als Mittelwert über 30 Simulationen wird der Effekt sichtbar und ist dabei viel schwächer als in den Beobachtungen. Trotzdem bestätigt das Modell, dass ein Teil der Veränderung der Wetterlagen tatsächlich vulkanisch angetrieben ist – über eine Schwächung des afrikanischen Monsuns.¹²⁶

Die Existenz solcher Fernwirkungen ist eine der Erkenntnisse aus dem Studium des Tambora und andere Ausbrüche. Die Verbindung zwischen dem europäischen Niederschlag und Vulkanausbrüchen (vgl. Abb. 16) ist nicht das einzige Beispiel. Modellsimulationen deuten darauf hin, dass Vulkanausbrüche auch die interne Variabilität im Ozean–Atmosphären-System verändern. Oft treten zeitgleich mit Vulkanausbrüchen auch El-Niño-Ereignisse auf (was kontrovers diskutiert wird)¹²⁷ und in Modellen verstärkt sich die Umwälzzirkulation des Atlantiks, die sogenannte AMOC.^{128,129} Allerdings sind weitere Beweise nötig, auch für den Tamboraausbruch. Die indirekten Auswirkungen von Vulkanausbrüchen via Ozeane sind ein aktiver Forschungsbereich.

Eine weitere indirekte und nicht-intuitive Auswirkung von Vulkanausbrüchen ist die Erwärmung der Winter im Nordosten Europas, die für viele Ausbrüche dokumentiert ist.¹³⁰ Sie zeigt sich auch in Modellsimulationen,¹³¹ allerdings ist sie in atmosphärischen Modellen besser erkennbar als in gekoppelten Ozean–Atmosphären-Modellen.¹³² Der Effekt kann zumindest teilweise erklärt werden,^{133,134} wobei die Stratosphäre als Ausgangspunkt dient (Abb. 16). Hier stellen sich starke Temperaturgradienten zwischen den Tropen, wo die Infrarotstrahlung der Erde und somit die Absorption in der stratosphärischen Aerosolschicht höher ist, und den Polargebieten ein. Der Temperaturunterschied beschleunigt die starken Westwinde der polaren Stratosphäre. Diese pflanzen sich wiederum nach unten fort¹³⁵ und können in der Troposphäre zu einer stärkeren Westströmung über dem Raum Atlantik–Europa führen. Diese Strömung bringt milde Atlantikluft nach Nordosteuropa. Ein ähnlicher Mechanismus könnte in der Südpolarregion zu einer Verstärkung der Westwinde führen. Zumindest zeigen dies Modellsimulationen für den Tamboraausbruch (Abb. 15).

Abbildung 16 zeigt schematisch die indirekten Auswirkungen von Vulkanausbrüchen auf die atmosphärische Zirkulation und das Klima. Ob all diese Effekte nach dem Tamboraausbruch eintraten, ist nicht bekannt. Einige der Effekte sind gut dokumentiert, einige werden diskutiert, und einige bleiben vermutlich noch zu entdecken.

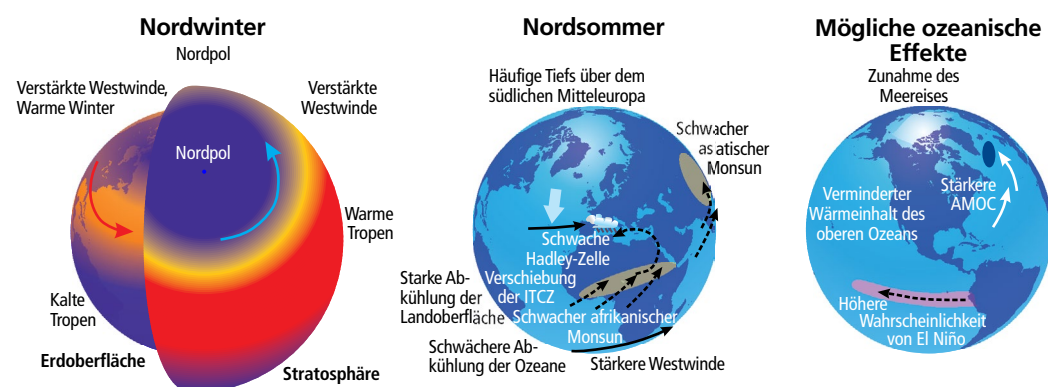


Abb. 16. Schematische Darstellung der Mechanismen, durch welche Vulkanausbrüche das Klima über Veränderungen in der Atmosphäre oder den Ozeanen indirekt beeinflussen.¹³⁶



Meereis nimmt nach Vulkanausbrüchen zu und könnte weitere Feedback-Mechanismen auslösen

Es wird vermutet, dass Vulkanausbrüche der Auslöser der «Kleinen Eiszeit» waren, wobei Feedback-Mechanismen mit dem Meereis eine Rolle spielten.¹³⁷ Im Sommer 1816 wurde in der Baffin Bay besonders viel, in der Grönlandsee dagegen besonders wenig Meereis beobachtet. Ob ein Zusammenhang mit dem Tamboraausbruch besteht, ist nicht bekannt.



Hat der Tamboraausbruch den globalen Kohlenstoffkreislauf beeinflusst?

Nach dem Ausbruch des Pinatubo 1991 wurde die Reaktion der Waldökosysteme auf den Ausbruch untersucht. Die Abkühlung verlangsamte das Wachstum und führte global zu einer Braunfärbung der Vegetation. Umgekehrt reagierten einige Wälder positiv auf die Zunahme von diffusem Licht.

Gleichzeitig veränderten sich auch andere Bereiche des Systems wie die Böden oder die Ozeane. Zwar beeinflusste der Tamboraausbruch die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre kaum, aber er ist ein interessanter Test unseres Wissens über den Kohlenstoffkreislauf.

Biophysikalische Effekte

Der Tamboraausbruch 1815 hatte auch Auswirkungen auf die Biosphäre und biogeochemische Kreisläufe. Auf Sumbawa und den benachbarten Inseln zerstörten Ascheablagerungen die Ernten und veränderten den pH-Wert und die Zusammensetzung des Wassers, was sich auf Pflanzen- und Tierwelt auswirkte. Weiter entfernt beeinflussten die Strahlungseffekte und Klimawirkungen die Landbiosphäre. In den Monsunregionen führten die fehlenden Niederschläge zu Dürre und verminderten das Wachstum. In anderen Regionen beeinträchtigte das trübe, regnerische Wetter das Pflanzenwachstum. Neben den gravierenden regionalen Auswirkungen, von denen einige auf den folgenden Seiten besprochen werden, stellt sich die Frage, ob der Tamboraausbruch 1815 den globalen Kohlenstoffkreislauf verändert hat.^{138,139} Dabei kommen viele Mechanismen in Frage: Die niedrige Temperatur verlangsamt das Wachstum, die erhöhte diffuse Strahlung kann dagegen die Photosynthese anregen. Auch Veränderungen der Niederschlagsmenge können sich im globalen Massstab auf die Landbiosphäre auswirken. Tiefe Temperaturen und veränderte Bodenfeuchte beeinflussen die Respiration. Auch die CO₂-Aufnahme der Ozeane könnte durch die veränderten Winde, Temperatur, und Meeresströmungen beeinträchtigt gewesen sein. Die Relevanz der einzelnen Faktoren bleibt unklar, insgesamt wird allerdings davon ausgegangen, dass der Nettoeffekt von Vulkanausbrüchen eine Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre ist.¹⁴⁰

Auf der regionalen Ebene sind vor allem die Auswirkungen auf Nahrungspflanzen relevant. So führten ab 1816 der schwache Monsun und die Abkühlung in der Region Yunnan in China drei Jahre in Folge zu geringen Ernten und zu einer Hungersnot.¹⁴¹ Angeblich assen verzweifelte Menschen den Lehm Boden, weil die Reisernte vollständig ausfiel. Indien litt ebenfalls unter Dürren und Hitzewellen,¹⁴² dieses auf den ersten Blick widersprüchliche Phänomen – Hitzewellen trotz vulkanischer Abkühlung – erklärt sich durch die Abnahme der Bewölkung (vgl. Abb. 15). Dürren könnten auch in Afrika aufgetreten sein, sind aber nicht dokumentiert.

Klimafaktoren wie Temperatur, Strahlung und Niederschlag wirken sich sowohl auf die Menge und die Qualität wie auch auf den Zeitpunkt der Ernte aus. Verzögertes Wachstum bedeutet, dass die Kulturen länger Schädlingen, Hagel und anderen Gefahren ausgesetzt sind. Wie beim Klima gehen die Auswirkungen auch bei den biophysikalischen Effekten über die direkten Wirkungen hinaus.

Puma und Koautoren¹⁴³ untersuchten, wie sich Vulkanausbrüche wie derjenige des Tambora auf einen weltweit vernetzten Agrarmarkt auswirken könnten, um die Stabilität der globalen Lebensmittelversorgung zu beurteilen. Sie kamen zum Schluss, dass ein solches Ereignis das globale System empfindlich stören könnte.

Gemäss Modellsimulationen für die Schweiz¹⁴⁴ verlangsamten die tiefen Temperaturen und die geringe Strahlung (mehr Wolken) das Wachstum und führten zu geringen und späten Ernten. Je nach Kultur und Region beträgt der modellierte Verlust ca. 10–40 % (z.B. bei Kartoffeln), in Grenzertragslagen kann es zu einem Totalausfall kommen. Historische Quellen zeigen, dass Pflanzen wegen übermässiger Nässe auf den Feldern verrotteten; ein Faktor, der im Modell nicht berücksichtigt ist. Die Erträge waren 1816 ca. 20–30 % tiefer und die Qualität der Ernte war sehr schlecht. Die Weintrauben wurden im November unreif geerntet, bevor der Winter kam.

Das ungünstige Wetter hatte auch indirekte Auswirkungen auf die Nahrungsmittelverfügbarkeit. Im frühen 19. Jahrhundert waren die Verluste in der Verbrauchskette gross; 1816 waren sie noch grösser. Wegen der feuchten Witterung verrotteten die Pflanzen nicht nur auf den Feldern, sondern auch in den Scheunen, wenn das Getreide nass eingebracht werden musste. Auch der Transport wurde beeinflusst (vgl. nächster Abschnitt). Schliesslich veränderte das Wetter auch die Nachfrage nach Gütern des täglichen Bedarfs (z.B. Feuerholz, weil im Sommer geheizt werden musste).

Die Wirkung des Wetters von 1816 in Mitteleuropa auf Nutztiere ist nicht gut untersucht. Von tiefen Ernteerträgen waren auch Futterpflanzen betroffen, sowohl bezüglich Verfügbarkeit und Preis als auch Qualität. Pferde und Rinder, die nicht gefüttert werden konnten, wurden mit Verlusten verkauft oder geschlachtet. Ausserdem landeten Hafer oder Kartoffeln nicht mehr in den Futtertrögen, sondern als Ersatznahrung auf den Tellern der Menschen (Substitutionseffekte).

Eine weitere mögliche biophysikalische Auswirkung des Tamboraausbruchs betrifft Krankheitserreger. Einzelne Autoren argumentieren, dass der Ausbruch von 1815 die Ursache für die erste globale Cholerapandemie war: 1817 brach in Bengalen eine Choleraepidemie aus, die sich in den folgenden Jahren ausbreitete und zu einer Pandemie auswuchs.¹⁴⁵ Vielleicht war das Tambora-



Abb. 17. Choleraopfer in Sunderland, 1832. Kolorierte Lithographie (Foto: Wellcome Library, London CC BY 4.0).

klima in einigen Regionen für den Krankheitserreger günstig. Sicher veränderte das Klima aber den Gesundheitszustand und das Verhalten von Menschen und Tieren. Geschwächte Personen waren anfälliger für Krankheiten. In ihrer Verzweiflung verließen viele Menschen ihre Dörfer und zogen auf der Suche nach Nahrung und Arbeit in die Städte, wo sich Krankheiten durch die Menschenansammlungen leichter ausbreiteten. Auch die militärischen Aktivitäten in diesen Jahren (beispielsweise der Krieg der British East India Company in Indien) spielten bei der Verbreitung von Krankheiten eine Rolle. Möglicherweise haben diese Prozesse auch Viehkrankheiten begünstigt.

Sind diese biophysikalischen Auswirkungen wirklich eine Folge des Tamboraausbruchs oder stehen sie eher im Zusammenhang mit menschlichem Verhalten? Die Preise von Lebensmitteln, Futter und Brennholz sowie Hungersnöte, gesundheitliche Probleme oder Migration sind ökonomische, politische oder gesellschaftliche Phänomene und zählen nicht zu den biophysikalischen Auswirkungen.¹⁴⁶ Im verbleibenden Teil dieser Broschüre konzentrieren wir uns deshalb auf Mensch und Gesellschaft. Zuvor seien hier nochmals die Auswirkungen des Tamboraausbruchs (oder von Vulkanausbrüchen im Allgemeinen) auf das Erdsystem zusammengefasst (Abb. 18). Sie umfassen vulkanologische Phänomene, die Dynamik der Rauchsäule, chemische, mikrophysikalische und Strahlungsprozesse, Atmosphärendynamik und biophysikalische Auswirkungen. Der Tamboraausbruch verlangt eine Systemsichtweise: Um die Auswirkungen des Ausbruchs zu verstehen, brauchen wir die Expertise von Geologen, Physikerinnen, Chemikern, Biologinnen und Klimatologen. Wir brauchen Feldstudien, Proxies, numerische Modellierung und dynamische Analysen. Selbst dann können wir noch nicht die Wirkung auf die Gesellschaft einschätzen. Wir brauchen daher nicht nur eine Erdsystemperspektive, sondern eine Mensch–Umwelt-Systemperspektive.

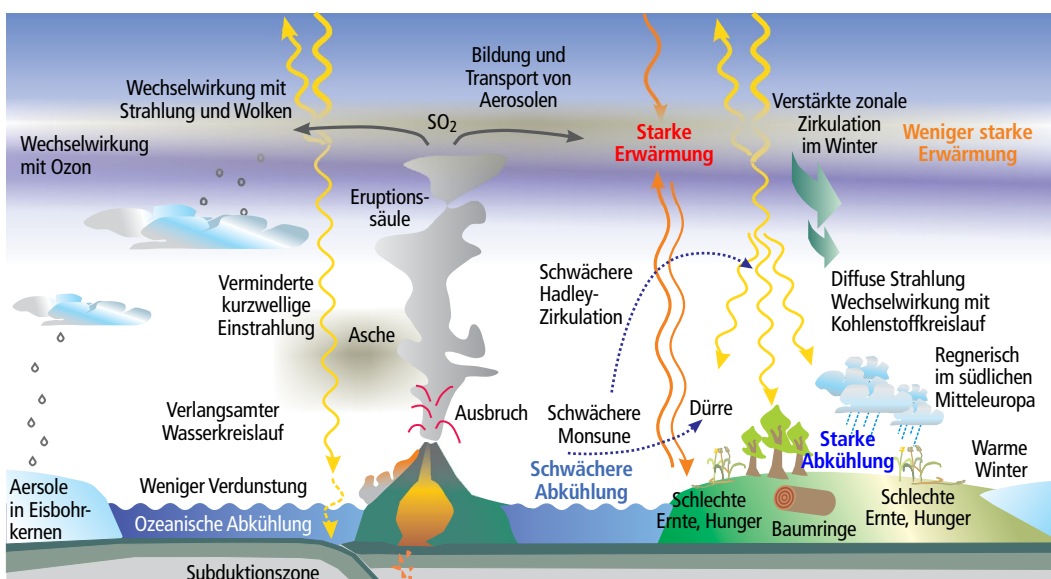
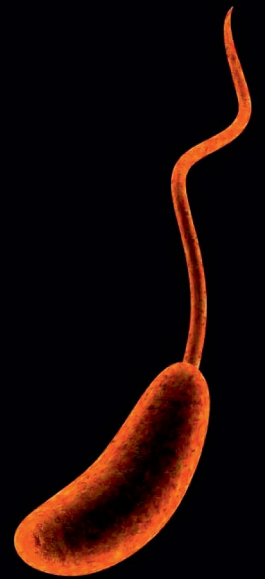


Abb. 18. Prozesse im Erdsystem im Zusammenhang mit Vulkanausbrüchen.



Cholera-Bakterium *Vibrium Cholerae*

Bevor Bakterien als Krankheitsursachen bekannt waren, vermuteten Ärzte oft klimatische Verhältnisse als Ursachen von Erkrankungen. Obwohl sich unser Wissen über Infektionskrankheiten seither dramatisch verbessert hat, ist der Einfluss des Klimas auf die Ausbreitung von Krankheitserregern, insbesondere im Zuge der Klimaänderung, immer noch ein aktuelles Forschungsthema. Hatte der Tamboraausbruch einen Einfluss auf die Ausbreitung der Cholera?



1816 stand Europa immer noch unter dem Eindruck der Koalitionskriege

Die Menschen schöpften Zuversicht aus dem Sieg gegen Napoleon. Nach all den Widrigkeiten des Krieges, den zusätzlichen Frondiensten und den ausserordentlichen Abgaben sehnten sich nach einer Friedensdividende. Sie wurden enttäuscht: «Das erste Friedensjahr in der politischen Welt wurde ein Kriegsjahr in der physischen», hielt eine Schrift zu den Merkwürdigkeiten der Jahre 1816 und 1817 fest.

Bild: Ausschnitt aus dem Gemälde «Sortie de la garnison de Huningue le 20 août 1815» von Edouard Detaille.

Krise in Europa

In den vorangegangenen Abschnitten haben wir die Kette von Prozessen diskutiert, die von der Eruption an einer Subduktionszone zu geringeren Ernten in Europa geführt hat. Der Ausbruch des Tambora war aber nicht der einzige Grund für die globalen Klimaabweichungen oder die endlosen Regen in der Schweiz. Und die klimatischen Bedingungen waren nicht der einzige Grund für die geringen Ernten. Schliesslich war die geringe Ernte nicht der einzige Grund für die Krise.

Das «Jahr ohne Sommer» traf die Gesellschaften in Europa zur Unzeit. Nach dem Ende der Napoleonischen Kriege (1792–1815) traten in Frankreich, den Niederlanden, den italienischen Staaten und in Spanien grössere Wirtschaftskrisen auf.¹⁴⁷ Die Kriege hatten die Wirtschaftsstrukturen verändert: Einerseits schnitten die Seeblockaden die Kolonialmächte von ihren überseeischen Territorien ab, andererseits zog die Kriegswirtschaft in vielen Staaten einen Strukturwandel in der Landwirtschaft nach sich. Die Blockaden garantierten den Bauern vielfach hohe Getreidepreise und die fehlende ausländische Konkurrenz führte zu einer Ausdehnung der Anbauflächen. Als die Preise nach den Kriegen sanken, verloren die Bauern ihre Kriegsrente. England reagierte 1815 auf die stark sinkenden Getreidepreise mit der Einführung neuer Korngesetze (Corn Laws).¹⁴⁸

Verstärkt wurde die Nachkriegsdepression durch die gesättigten Arbeitsmärkte, die nicht alle demobilisierten Soldaten aufnehmen konnten, die eingeschränkte Handlungsfähigkeit der Staaten durch die gestiegene Schuldenlast und die politische Nachkriegsordnung mit Staaten, deren Territorien teilweise erheblich erweitert worden waren. Dazu kam ein tiefgreifender Strukturwandel in der Textilindustrie, der insbesondere die kontinentalen Zentren traf.¹⁴⁹ Allein in der Schweiz gingen zwischen 1787 und 1820 rund 60 000 Arbeitsplätze in der Handspinnerei durch die Mechanisierung der Webstühle verloren. Ihr Schicksal wurde durch den fehlenden Schutz nach der Aufhebung der Kontinentalsperre und die Hungerjahre 1816/17 endgültig besiegelt. Im Kanton Zürich wurden 1817 nicht weniger als 30 000 verdienstlose Baumwollspinner gezählt.^{150,151}

Gerade deshalb hofften die Menschen in grossen Teilen Europas nach den Napoleonischen Kriegen auf gute Ernten. Ihre Vorräte waren nach den ständigen Einquartierungen von Truppen, Requisitionen und Plünderungen erschöpft. Als die Ernten im «Jahr ohne Sommer» vielerorts sowohl quantitativ als auch qualitativ schlecht ausfielen, setzten sich die altbekannten Mechanismen einer Teuerungskrise in Bewegung. Die jährlichen Durchschnittspreise verdoppelten oder verdreifachten sich auf vielen europäischen Märkten zwischen 1815 und 1817.¹⁵² In der Schweiz bewegte sich die Teuerung in den Hungerjahren zwischen 220 Prozent in Genf und knapp 600 Prozent in Rorschach.¹⁵³ In einer Zeit, in der die Mehrheit der Bevölkerung 60–70 Prozent ihres Einkommens für Nahrungsmittel ausgeben musste, konnten sich viele Haushalte ihr tägliches Brot nicht mehr leisten.¹⁵⁴

Die Kaufkraft der Konsumenten sank während die Teuerungskrise weiter. Die Unter- und Mittelschichten konnten sich selbst Lebensmittel kaum noch leisten; in der Landwirtschaft schwanden durch die Missernten die Verdienstmöglichkeiten für Tagelöhner, Knechte und Mägde; in der Textilbranche brachen die Absätze ein; und in Handel und Gewerbe blieben die Auftragsbücher leer und die Teuerung frass die Erträge auf.¹⁵⁵ Nicht zuletzt deshalb sprach John D. Post von der «letzten grossen Subsistenzkrise des Westens».¹⁵⁶

In Mitteleuropa existierte seit dem ausgehenden Mittelalter ein erstaunlich einheitlicher Kanon mit Bewältigungsstrategien, die mit Eingriffen in den Markt das Angebot, die Produktion und die Nachfrage lenken und die Not «steuern» sollten, wie es in den Quellen immer wieder hiess.¹⁵⁷ Zu Beginn des 19. Jahrhunderts standen vor allem Massnahmen im Vordergrund, welche die Preise stabilisieren, die Verwendung der Lebensmittel regulieren und die Produktion steigern sollten. Dazu kamen die Förderung von Getreideimporten und die Einschränkung oder gar das Verbot von Getreideexporten.¹⁵⁸ Rationierungen waren noch selten, in der Stadt Nürnberg erhielten bedürftige Personen auf dem Höhepunkt der Krise aber zum Beispiel Brotkarten.¹⁵⁹ Während die Aufnahme der privaten Vorräte die härteste Massnahme war, erwiesen sich der frühzeitige Kauf von Getreide im Ausland, die Errichtung von Suppenküchen und

die Anordnung von Notstandsarbeiten als die wirkungsvollsten Bewältigungsstrategien.¹⁶⁰ Schliesslich zählten im Königreich Württemberg und im Grossherzogtum Baden die Migration entlang des Rheins und der Donau zu den am häufigsten angewandten Strategien auf individueller Ebene.^{161,162}

Die Not überstieg das Vorstellungsvermögen vieler Menschen. Die Missernten schürten die Ängste vor Revolutionen, das Heer der Bettler wuchs an, die Polarisierung zwischen Arm und Reich nahm zu, die Gefängnisse füllten sich, Krankheiten wie Typhus oder Pellagra breiteten sich aus, Weltuntergangsszenarien fanden zahlreiche Anhänger und das Gespenst des Wuchers führte nicht nur zu sozialen Spannungen, sondern liess auch das Stereotyp des jüdischen Kornwucherers aufleben.¹⁶³ Das Andenken an das Unfassbare wurde in zahllosen Beschreibungen, Bilderbogen, Darstellungen, Spottbildern, Teuerungsmedaillen und Preistabellen wachgehalten.^{164,165,166}

In der Schweiz zeigten sich in der Krise mehrere Muster. Erstens war die Krise auf der Alpensüdseite nicht so gravierend wie auf der Alpennordseite. Im Sommer 1816 staute sich die feucht-kalte Luft in den Alpen und regnete sich aus. Die Alpensüdseite und die inneren Alpen waren deshalb weit weniger stark von der Klima-anomalie des «Jahrs ohne Sommer» betroffen als die Gebiete auf der Alpennordseite. Zusammen mit der tiefen Bevölkerungsdichte durch die naturräumlichen Voraussetzungen und der auf Risikoausgleich und Subsistenz bedachten agropastoralen Produktionsweise trug die klimatische Gunstlage zu einer höheren Widerstandsfähigkeit dieser Regionen bei, obwohl sie schlecht erschlossen und vielfach nicht an überregionale Märkte angebunden waren. Die peripheren und «rückständigen» Regionen waren in der Übergangsphase von der Agrar- zur Industriegesellschaft deshalb nicht so verletzlich wie die integrierten und «fortschrittlichen» Wirtschaftsräume im schweizerischen Mittelland.^{167,168,169}

Zweitens traten grosse Unterschiede zwischen der Ostschweiz und der Westschweiz auf. Zu den Merkmalen dieses Ost-West-Musters gehörten die grössere Übersterblichkeit, das Preisgefälle zwischen den beiden Regionen und die unterschiedliche Grösse der industriellen Zentren. Das Textilgewerbe hatte sich in der Ostschweiz früher ausgebreitet und beschäftigte mehr Personen als in der Westschweiz. Nicht zuletzt deshalb war die Bevölkerungsdichte in der Ostschweiz höher als im westlichen Mittelland, in den Voralpen und in den Tälern des Juras. Gleichzeitig hatte sich das Gewerbe auf Kosten der Landwirtschaft ausgedehnt, weshalb der Selbstversorgungsgrad tiefer war als im westlichen Mittelland. Schliesslich war um den Bodensee ein integrierter Getreidemarkt entstanden, in dem der süddeutsche Raum zur Kornkammer der Kantone in der Ostschweiz geworden war. Die Spinner, die Weber und die Spuler waren in einem doppelten Sinne vom Markt abhängig geworden: Einerseits waren sie auf eine gute Konjunktur in der Textilindustrie angewiesen, andererseits mussten sie auf gute Ernten hoffen, weil sie sich auf dem Markt mit Getreide versorgen mussten. Als sich in den Jahren 1816 und 1817 die agrarische und industrielle Krise überlagerten, standen sie vor dem Nichts.¹⁷⁰

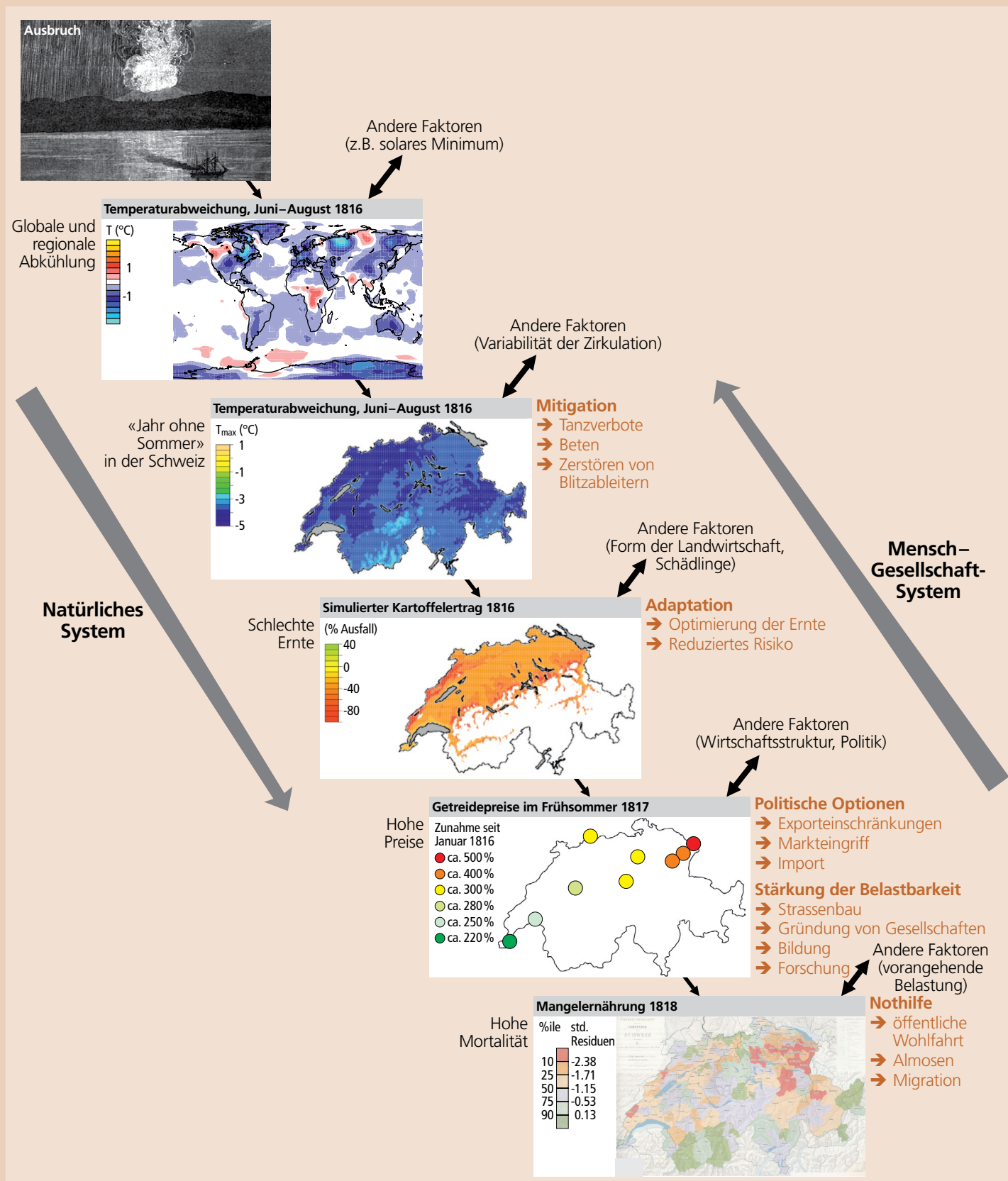
Drittens hatte die Hungerkrise nicht nur strukturelle Ursachen. Hunger war und ist immer politisch.¹⁷¹ Während die Kantone in der Westschweiz früher in den Markt eingriffen und bereits im Herbst 1816 Getreide im Ausland kauften, um die Preise senken und die Teuerung dämpfen zu können, warteten die Kantone in der Ostschweiz länger zu. Als junge Kantone besaßen sie nicht nur weniger Erfahrungen im Umgang mit Subsistenzkrisen, sie verfügten auch nicht über die gleichen finanziellen Ressourcen. Teilweise fehlte es jedoch auch am politischen Willen, alle vorhandenen Mittel einzusetzen. Die Staatsrechnung des Kantons Thurgau schloss 1817 mit einem Überschuss. In einem Bericht der kantonalen Armenkommission wurde der «planlose Kampf» gegen die rasch zunehmende Not kritisiert – die Krise wurde verwaltet statt bekämpft.^{172,173}



Erinnerungen an die Krise

Die Krise 1817 war ein denkwürdiges Ereignis, an das die Menschen mit Flugblättern und Medaillen erinnerten. Ein Bestandteil dieser Erinnerungskultur ist auch dieser bemalte Schrank in Appenzell. Die Foto zeigt Szenen des Hungers und Listen mit Preisen während der Krise im Jahr 1817.

Ein Modell der Wechselwirkungen zwischen Klima und Gesellschaft



Der Tamborausbruch, die Klimawirkungen, die Folgen für die Gesellschaft und deren Reaktionen können als gekoppeltes Mensch–Umwelt-System verstanden werden. Einige der Wechselwirkungen können darin quantitativ dargestellt werden. Von oben nach unten: Der Tamborausbruch 1815, globale Temperaturabweichungen im Juni bis August 1816 in Rekonstruktionen,¹⁷⁴ Temperaturabweichung in der Schweiz (bezüglich 1800–1820) in einer täglichen Wetterrekonstruktion aus Analogfällen,¹⁷⁵ simulierter Verlust am potenziellen Kartoffelertrag in der Schweiz im Jahr 1816 (bezüglich 1800–1820),¹⁷⁶ basierend auf täglichen Wetterrekonstruktionen (die tatsächliche Landnutzung ist nicht berücksichtigt, ebenso weitere wichtige Faktoren wie Bodennässe, Schädlinge oder Krankheiten), Preise für die jeweils wichtigsten Getreide in der Schweiz im Frühsommer 1817 im Vergleich zu Januar 1816¹⁷⁷ und Karte der Mangelernährung in der Schweiz im Jahr 1818 (Kohortenanalyse der ersten Schweizer Volkszählung 1860, gezeigt ist die Häufigkeit des Jahrgangs 1818 relativ zum erwarteten Wert, dargestellt als standardisierte Residuen und Perzentile).¹⁷⁸

Der Einfluss des Tamboraausbruchs auf das Klima, die Folgen für die Gesellschaft und sowie die Reaktionen darauf können in einem Wechselwirkungsmodell dargestellt werden, wie es durch Ingram¹⁷⁹ eingeführt und durch Pfister und Brazdil¹⁸⁰ und andere^{181,182} weiterentwickelt wurde. In diesem Modell haben klimatische Abweichungen biophysikalische Wirkungen (z.B. niedrige Ernteerträge), die sich dann auf die Gesellschaft auswirken und dort zu einer Krise führen können. Beim Versuch, die Krise zu bewältigen, setzt die Gesellschaft nicht nur an den sozioökonomischen und politischen Seiten an, sondern sie beeinflusst auch die biophysikalische Welt.

Am Beispiel der Hungerkrise in der Schweiz nach dem Ausbruch des Tambora 1815 können viele Aspekte der Klima–Gesellschaftswechselwirkungen relativ genau spezifiziert und – zumindest teilweise – auch quantifiziert werden. Darüber hinaus können die Reaktionen der Gesellschaft mit diesem Modell verortet und angesprochen werden (vgl. die Abbildung oben). Hier umfasst das natürliche System den oberen linken Teil der Abbildung, das Mensch–Gesellschaft-System den unteren rechten Teil. Die beiden Bereiche interagieren in der Mitte der Abbildung, wo das biophysikalische System dargestellt ist. Dabei ist zu beachten, dass die Abbildung nicht eine deterministische, monokausale Sicht darstellt, sondern auf jeder Stufe jeweils nur eine von vielen Ursache-Wirkungsbeziehungen zeigt. Die Abbildung muss daher im Kontext vieler weiterer Einflüsse betrachtet werden.

Der Tamboraausbruch 1815 verursachte eine globale Abkühlung, hier dargestellt in Klimarekonstruktionen (vgl. Titelseite)¹⁸³. Gleichzeitig spielten auch andere Faktoren (z.B. der vorangegangene Ausbruch 1808/09, geringere Sonnenaktivität oder ozeanische Variabilität) eine Rolle und trugen zu einer globalen Abkühlung bei, die ja bereits in den Jahren vor dem Tamboraausbruch begonnen hatte. Auch das «Jahr ohne Sommer» in der Schweiz (hier dargestellt mit einer täglichen Wetterrekonstruktion für die Schweiz aus Analogfällen)¹⁸⁴ war nur teilweise ein Effekt des Tamboraausbruchs. Die zufällige Variabilität der atmosphärischen Zirkulation trug wohl den grössten Teil zum «Jahr ohne Sommer» bei (siehe Kasten «Wie viel der Sommerkälte 1816 in der Schweiz kann durch den Tambora erklärt werden?»). Diese klimatischen Anomalien beeinflussten Wachstum und potenzielle Erträge der Nutzpflanzen. Dies ist in der Abbildung anhand von Modellsimulationen dargestellt,¹⁸⁵ die mit den oben gezeigten täglichen Wetterrekonstruktionen angetrieben wurden. Auch hier war das ungünstige Wetter sicher nicht der einzige Faktor, der die Ernteerträge beeinflusste. Landwirtschaftliche Praktiken, verfügbare Ressourcen, politische und andere Faktoren trugen gleichermassen dazu bei. Die geringeren Ernteerträge führten zu einem Preisanstieg der wichtigsten Getreidearten, insbesondere im Jahr 1817 vor der Ernte im Sommer. Die Abbildung zeigt historische Daten aus der Schweiz. Die Preissteigerung war in der Ostschweiz besonders markant. Wiederum trugen viele andere Faktoren dazu bei: leere Speicher nach den Koalitionskriegen, der gesättigte Arbeitsmarkt und andere mehr. Die hohen Preise führten in einigen Regionen der Schweiz zu Mangelernährung, hier dargestellt mit einer Kohortenanalyse (d.h. einer statistischen Analyse des Geburtsjahrs aller Menschen in der ersten Schweizer Volkszählung 1860; Menschen mit Jahrgang 1818 waren stark untervertreten). Auch hier spielten verschiedene andere Faktoren, beispielsweise vorangehende Stressfaktoren und erhöhte gesellschaftliche und individuelle Verletzlichkeit, eine Rolle.

Zwar gibt es eine direkte Verbindung zwischen Tamboraausbruch und Mangelernährung, die Bedeutung der Eruption nimmt aber auf jeder Ebene ab. Umgekehrt sind auf jeder Ebene andere Faktoren wichtig bzw. dominant. Es ist daher nicht sinnvoll, die Krise direkt als Folge des Tamboraausbruchs darzustellen. Dennoch hilft uns das Beispiel des Tamboraausbruchs, alle Faktoren, die zu einer Hungersnot führen, zu verstehen und gegeneinander abzuwägen und am Ende richtig einzuordnen.

Die Menschen begegnen ihrem Schicksal nicht passiv, sondern interagieren mit ihrer Umwelt. Sie fällen Entscheidungen zur Linderung der Not, passen sich an die widrigen Bedingungen an, versuchen die Ursachen zu bekämpfen und ihr individuelles Wohlbefinden zu verbessern. Diese Reaktionen können in diese Abbildung eingetragen werden. Zur Mitigation der Mangelernährung – im Wechselwirkungsmodell auf der Ebene der Kultur angesiedelt – können Gesellschaften mehrere Strategien anwenden, von der öffentlichen Wohlfahrt über Spendensammlungen bis zu Entscheidungen auf der individuellen Ebene wie auszuwandern oder ledig zu bleiben und sich nicht fortzupflanzen. Um die Entwicklung der Preise der wichtigsten Nahrungsmittel zu beeinflussen, müssen politische Massnahmen ergriffen werden wie Marktinterventionen, Ausfuhrverbote oder Importe. Weitere Massnahmen waren eher zukunftsgerichtet und können als «Stärkung der Resilienz» zusammengefasst werden. Sie umfassten den Bau von Strassen, die Gründung von gemeinnützigen Gesellschaften und Sparkassen¹⁸⁶ oder die Förderung von Bildung und Forschung. In der Landwirtschaft wurden Strategien entwickelt, um die Erträge zu steigern oder das Risiko der maximalen Verluste zu reduzieren, allerdings innerhalb der Grenzen der damals verfügbaren Technologie und des verfügbaren Wissens. Wichtig waren in dieser Hinsicht insbesondere die Prozesse, die durch die Agrarmodernisierung bereits angestossen worden waren. Schliesslich wurden auch symbolische Massnahmen zur Minderung der widrigen Wetterbedingungen ergriffen: So gab es besonders während der Fasnacht Tanzverbote in einigen Schweizer Kantonen und die Bevölkerung wurde zum Beten aufgefordert, weil hinter der schlechten Witterung eine Strafe Gottes vermutet wurde. In einigen Gegenden Deutschlands und der Schweiz begann die aufgebrachte Bevölkerung sogar, Blitzableiter von den Häusern zu reissen. Den damals noch relativ neuen Blitzableitern wurde von Teilen der Bevölkerung die Schuld am regnerischen Wetter gegeben¹⁸⁷ (gewissermassen eine anthropogene Klimabeeinflussung).

Mitigation, Adaptation, politische Optionen, Stärkung der Resilienz, Katastrophenhilfe – die Reaktionen der damaligen Gesellschaft entsprechen den Kategorien, mit welchen wir heute die Reaktion der Gesellschaft auf den Klimawandel charakterisieren. So kann das Studium des Tamboraausbruchs helfen, auch die Beziehung zwischen dem zukünftigen Klimawandel und der Gesellschaft besser zu verstehen. Wie damals werden auch in Zukunft Krisen vielleicht nicht primär klimatisch verursacht sein, aber sie können dann entstehen, wenn klimatische Veränderungen mit vielen anderen ungünstigen Faktoren zusammentreffen, also in Situationen mit einer erhöhten Verletzlichkeit. Entsprechend vielschichtig wird die Gesellschaft darauf reagieren.

Können wir Hunger messen?

Die Intensität und das Ausmass des Hungers in den Jahren 1816 und 1817 lassen sich kaum «messen». Anders als den Naturwissenschaften gelang es der Hungerforschung bislang nicht, eine Skala zu entwickeln, um seine sinnliche Erfahrung oder seine physiologischen Auswirkungen abzubilden.¹⁸⁸ Neben Preisreihen werden deshalb meistens demographische Studien herangezogen, weil sich in der steigenden Zahl der Todesfälle und dem Rückgang der Geburten die Versorgungslage indirekt abzubilden scheint. Zusätzlich können auch der Anstieg der (Klein-)Kriminalität während Teuerungskrisen und die Entwicklung der mittleren Körperhöhe herangezogen werden, um die Auswirkungen der Subsistenzkrise zu erfassen. Alle indirekten Indikatoren können jedoch keine mathematische Genauigkeit beanspruchen, sie vermitteln lediglich einen Eindruck von der Grösse der Not.¹⁸⁹ Alle vier Indikatoren wurden zwar auch von den indirekten und biophysikalischen Effekten des Tamboraausbruchs beeinflusst, die politischen, sozialen und kulturellen Faktoren müssen aber stärker gewichtet werden, wie das Interaktionsmodell zwischen Klima und Gesellschaft zeigt (siehe Kasten).

In der Schweiz stieg mit den Getreidepreisen in den Hungerjahren auch die Zahl der Diebstähle – dies bildete in ganz Europa während des Übergangs von der agrarisch zur bürgerlich-industriellen Gesellschaft die Regel, auch wenn es im Jahr ohne Sommer vereinzelt Ausnahmen gegeben haben mag. Mehr als die Hälfte der Personen, die in den Jahren 1816–1818 in den eidgenössischen Signalement-Büchern zur Fahndung ausgeschrieben waren, wurden eines Diebstahls verdächtigt. Bestätigt wurden diese Ergebnisse durch Zahlen aus dem Kanton Aargau: In den Jahren 1816 und 1817 sanktionierten die Richter beinahe nur Diebe; sie machten mehr als 90 Prozent der verurteilten Personen aus.¹⁹⁰

Die Subsistenzkrise wirkte sich auch auf die Entwicklung der mittleren Körperhöhe aus. In ihr spiegeln sich soziale und gesellschaftliche Ungleichheiten wie die Verteilung der Lebensmittel innerhalb eines Haushalts genauso wie regionale Unterschiede. Der Körper reagierte während seiner Wachstumsphase sensitiv auf agrarische und industrielle Krisen, weil die Aufnahme von Nährstoffen zu Beginn des 19. Jahrhunderts stark von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig war. Im Passregister des Amtes Entlebuch im Kanton Luzern ging die mittlere Körperhöhe derjenigen Personen signifikant zurück, die zwischen 1800 und 1809 geboren worden waren. Sie hatten sowohl unter den Kriegsjahren als auch unter der Subsistenzkrise zu leiden. Erstaunlicherweise ging die mittlere Körperhöhe der Mittelschicht stärker zurück als die Körpergrösse der Unterschicht.¹⁹¹ Möglicherweise hatten sie aus Furcht vor einer sozialen Stigmatisierung im Gegensatz zu den Angehörigen der Unterschichten keine Hilfe in Anspruch genommen, um die Krise zu bewältigen. Ein ähnliches Bild zeigte sich in Schweizer Städten gut einhundert Jahre später während des Ersten Weltkriegs.¹⁹²

Schliesslich liess auch die rückläufige Zahl der Taufen in Krisenjahren Rückschlüsse auf die Verletzlichkeit der Gesellschaft in der Schweiz zu. In Subsistenzkrisen zeigte sich jeweils eine demographische Scherenbewegung, die durch eine steigende Zahl von Todesfällen und eine sinkende Zahl von Taufen charakterisiert wurde. Weil die jährlichen Geburtenraten in einer langfristigen Perspektive nicht so stark fluktuieren wie die jährlichen Sterberaten, gelten sie in der Forschung als zuverlässiger. Dank einer Kohortenzählung aus dem Jahr 1860 konnte die Entwicklung der Geburtskohorten in der ganzen Eidgenossenschaft auf Bezirksebene nachgezeichnet werden. Die Verletzlichkeit erwies sich in den Hungerjahren als dynamisch, nicht als statisch: Im ersten Jahr der Krise erwiesen sich die klimasensiblen Weinbauregionen an den grossen Seen im Mittelland, die Städte und der Kanton Bern als besonders verletzlich. Im zweiten Jahr verlagerte sich die Krise in die Ostschweiz und in die Täler des Jura, in welchen sich die Uhrenindustrie ausgebreitet hatte. Während in der Westschweiz statistisch betrachtet nur Mangel herrschte, kam es in der Ostschweiz zu einer Hungersnot.¹⁹³ Im Kanton Appenzell Innerrhodan verloren einzelne Gemeinden in diesen Jahren selbst ohne Emigration rund einen Neuntel ihrer Bevölkerung. Es war vermutlich «die grösste demographische Krise seit der Pest von 1629».¹⁹⁴

Hunger ist ein komplexes Phänomen, bei welchem das Klima ein Faktor unter vielen ist. Einerseits trifft kaum ein Ereignis eine Gesellschaft so umfassend wie eine Hungersnot. Andererseits gehen dem Ereignis zahlreiche Prozesse voraus, welche die Verletzlichkeit der Gesellschaft beeinflussen und dem Hunger eine Struktur verleihen. Dieses Paradox erschwert einen einheit-



Hungermedaille

Eine andere Form der Erinnerungskultur sind Gedenkmünzen oder -medaillen. Zahlreiche solcher Münzen wurden 1817 geprägt.

Bild: Medaille, geprägt in Nürnberg, 1817. Inschrift: «O gieb mir Brod mich hungert» und «Verzaget nicht – Gott lebet noch»

lichen Zugang zu den verschiedenen Ausprägungen des Hungers und hat in der Forschung zu einem Schnittstellenproblem geführt. Das Forschungsfeld ist deshalb nicht nur unübersichtlich, es besteht auch keine Einigkeit darüber, von welcher Seite sich die Forschung dem Phänomen nähern soll.¹⁹⁵

Die verschiedenen Zugangsweisen zum Phänomen Hunger haben zur Ausprägung von zwei Ansätzen geführt, die sich diametral gegenüberstehen. Auf der einen Seite wird Hunger als Folge «natürlicher» Ursachen wie klimatisch bedingter Missernten betrachtet. In dieser Perspektive wird er als Problem des Angebots wahrgenommen und einzig auf die Produktion zurückgeführt (Food Availability Decline-Ansatz). Auf der anderen Seite werden politische Faktoren wie ungleich verteilte Zugangsrechte (entitlement) als Ursache des Hungers hervorgehoben. In dieser Perspektive rückt die Verteilung der Nahrung ins Zentrum der Betrachtungen (Food Entitlement Decline-Ansatz).¹⁹⁶ Bei der Analyse der Ursachen des Hungers ist es unabhängig von der Zugangsweise sinnvoll, zwischen drei Ebenen zu unterscheiden: Region, Haushalt und Individuum. Je nach Ebene können die Ursachen, die Konsequenzen, die kurzfristigen Anpassungen und die langfristigen Adaptionen variieren.^{197,198}

Die letzte grosse Subsistenzkrise in der westlichen Welt nach dem Ausbruch des Tambora gilt in der Historischen Klimatologie als ideale Fallstudie, um auf globaler Ebene die Interaktionen zwischen Klima und Gesellschaft zu untersuchen.¹⁹⁹ Die Fülle des Materials erlaubt nicht nur eine Bündelung von Klima, Ernährung und Politik, sie lässt auch ein differenziertes Bild der menschlichen Reaktionen auf ein klimatisches Extremereignis entstehen.

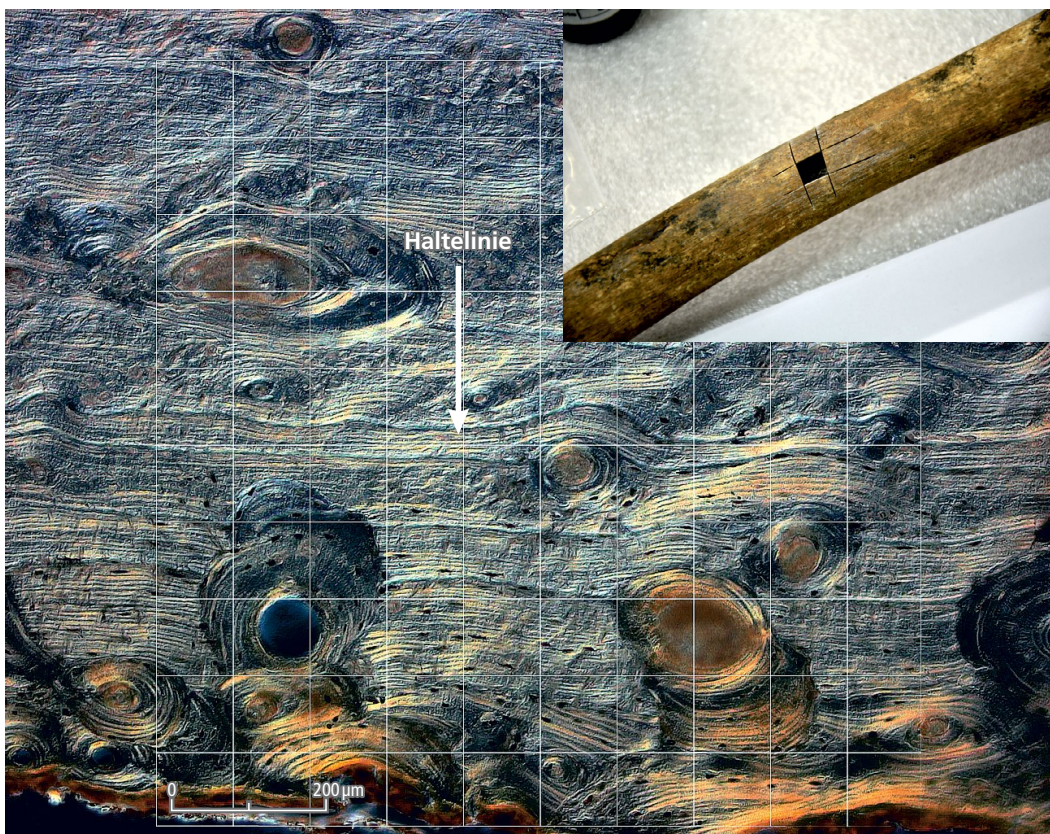


Abb. 19. Oberschenkelknochen von Susanna Hunziker-Widmer (ca. 1799–1853), welche die Hungersnot als 18-jährige durchlebt hatte. Spuren davon sind im Knochenbau nachweisbar. Die durchgehende weisse Linie in der Bildmitte entspricht einer Stress- oder Haltelinie, die sich im Knochen umweltplastisch eingepreßt hat und die mit der Hungers- und Krisenzeit 1816/17 korrespondiert. Histologischer Schnitt und Aufnahme von Stefanie Doppler.²⁰⁰



Die Hungerkrise 1817 führte zu Tod und Verzweiflung

Die Krise von 1817 wirkte sich auf die Bevölkerungsentwicklung aus. Einerseits nahm die Zahl der Todesfälle zu. Andererseits sank die Anzahl der Geburten. In Appenzell Innerrhoden verloren einzelne Gemeinden bis zu einem Neuntel ihrer Einwohner.

Foto: «Zum Andenken an die grosse Theuerung und Hungersnoth im Jahr 1817». Farbige Illustration im Stil der «art brut» eines Engels mit Höchstpreisen der wichtigsten Getreidearten 1817.



Teuerungsunruhen

Teuerungsproteste waren zu Beginn des 19. Jahrhunderts eine Form der Selbsthilfe der kleinen Leute. Sie kämpften für gerechte Preise und bei der Suche nach Schuldigen für die Teuerungskrise kam es hin und wieder zu antisemitischen Ausschreitungen. Das Bild zeigt die gewalttätigen Hep-Hep-Unruhen, die während der fortdauernden Wirtschaftskrise 1819 auftraten und gegen Juden gerichtet waren.

Foto: Johann Michael Voltz, Grafik der Hep-Hep-Unruhen in Frankfurt am Main, 1819.

Teuerungsunruhen

In den Jahren 1816–1818 häuften sich Teuerungsunruhen. Profile für einzelne Regionen fehlen zwar, die Politik wurde aber symbolisch aufgeladen und diente dem Austarieren der Macht im Innern eines Staates. Die Abwendung von Hungerkrisen war sowohl naturrechtlich begründet als auch eine der ältesten Quellen der Herrschaftslegitimation. Trotzdem gehörten kollektive Nahrungsproteste zu Beginn des 19. Jahrhunderts in Europa zu den wichtigsten Formen des sozialen Protests. Die Konsumenten beriefen sich auf die Vorstellung eines Marktes, der in Krisenphasen zu ihrem Schutz reguliert wurde. Blieben Zugeständnisse der Regierungen aus und stand der Verdacht auf unlautere Praktiken im Raum, erlaubte diese «moralische Ökonomie» die kollektive Selbsthilfe von unten: Die Konsumenten überfielen Transporte oder plünderten Vorratslager und setzten «gerechte Preise» für die lebensnotwendigen Güter des täglichen Bedarfs fest. Weil die rechtlichen Konsequenzen solcher Formen des Protests nur schwer abzuschätzen waren, führten die sozialen Spannungen allerdings nicht immer zu Teuerungsunruhen.^{201,202,203} In den Hungerjahren 1816 und 1817 erreichte die Gewalt ein Ausmass, das an die Zeiten der «Grossen Furcht» in der Französischen Revolution erinnerte.²⁰⁴

Zum Zentrum der Proteste und der Tumulte entwickelte sich Frankreich. Der Widerstand blieb zunächst eher passiv, im Frühling 1817 häuften sich aber die Überfälle auf Bauernhöfe und Getreidespeicher sowie die gewaltsame Besetzung ganzer Ortschaften. Auffällig war zweierlei: Erstens fehlte den Tumulten meistens eine politische Dimension und zweitens reagierten die lokalen Obrigkeiten erstaunlich pragmatisch. Obwohl die Unruhen gewaltsam niedergeschlagen wurden und vereinzelt Tote und Verletzte zu beklagen waren, führte die Gewaltanwendung auf beiden Seiten nicht zu blutigen Exzessen.²⁰⁵

Hunger war kein Gleichmacher. Proteste gab es auch im restlichen Europa. Im Königreich Bayern wurden fünf Tumulte mit Hilfe des Militärs niedergeschlagen, in Koblenz und in Mainz musste das Militär ebenfalls eingreifen. In England erreichten die Proteste ihren Höhepunkt im Sommer 1817, weshalb die Tory-Regierung an der Suspendierung der Habeas-Corpus-Akte festhielt. In Schottland, Irland, Wales, Norwegen, Norditalien, Spanien und Nordafrika wurden ebenfalls Proteste registriert. Unklar ist, was ausserhalb Europas geschah. Immerhin sind aus Asien antikoloniale Aufstände bekannt.^{206,207}

In den Vereinigten Staaten kam es zwar nicht zu Teuerungsunruhen, die Missernten veränderten das Gesicht des Landes aber trotzdem. Die Zahl der Einwanderer schnellte in die Höhe und die Wanderung nach Westen beschleunigte sich. Politisch schlugen sich die Teuerung und der Hunger bei den Kongresswahlen im Herbst 1816 nieder. Rund 70 Prozent der Kongressmitglieder wurden nicht wiedergewählt. Ein Grund für die Unzufriedenheit der Bevölkerung war der Compensation Act von 1816: Mitten während der Malaise hatten sich die Mitglieder des Kongresses rückwirkend auf Mai 1815 eine Erhöhung ihrer Entschädigungen bewilligt.²⁰⁸

Obwohl kein Land stärker unter dem Jahr ohne Sommer litt als die Schweiz, waren Proteste eine Seltenheit.²⁰⁹ In der Waadt planten im März 1817 verarmte Familien aus dem Jura einen Marsch nach Lausanne, um sich dort mit Nahrungsmitteln einzudecken. Die Regierung schickte zwei Männer ihres Vertrauens in die Region, welche die Lage beruhigen konnten.²¹⁰ Einzig in Genf kam es im Oktober 1817 zu einem Teuerungskrawall mit Plünderungen und Schlägereien, der sich an den steigenden Kartoffelpreisen entzündet hatte. Erstaunlich war nicht nur der Zeitpunkt des Krawalls, sondern auch der Ort. Genf schien die Krise im Vergleich zu den Städten in der Ostschweiz gut überstanden zu haben und der Krawall trat auf, als die grösste Not vorüber war. Im Krawall manifestierten sich deshalb neben den unterschwelligsten sozialen Spannungen und der Unzufriedenheit auch die Angst vor einer erneuten Teuerung und dem damit einhergehenden Elend.²¹¹

«Erinnerung an die freundschaftliche Übereinkunft zur Beförderung des allgemeinen Hungers im Jahr 1817»



Aquatinta von Rudolf Tanner: Schweizer Wucherer während der Hungersnot 1817, auf dem Weg zur Hölle. Quelle: Kunsthau Zürich, Grafische Sammlung, Gr.Inv.A.B.1111. Text: Erinnerung an die freundschaftliche Übereinkunft zur Beförderung des allgemeinen Hungers im Jahr 1817 / Sag was macht der Barometer? Regen, zeigt er ohne maass / So ihr Herren: das heisst gut Wetter. Frisch jezt eins aus meinem Fass! / Nein, ruft jener von dem Haufen: Geb ich euch ganz andern her; / Den mein Famulus läst laufen, Lernts' von Meister Luzifer. // Mögs' euch brennen in der Seele; Hartes wucherndes Geschmeiss! / Seht ihr jenen in der Hölle? Dursten, sie ist jezt noch heiss. / Was schert uns dein Bibel deuten? Bursche jagt die Engel raus / Tod! Fahr ab mit diesen Leuten: Hier ist Mammon Herr im Haus.

Die Aquatinta von Rudolf Tanner erzählt dem Betrachter eine Geschichte von Gier, Herzlosigkeit und Sünde. In der Mitte sitzt eine gut gekleidete Person auf einem Fass – wahrscheinlich enthält es Wein. Er hält in seiner Hand ein Barometer, das Dauerregen anzeigt. Die klimatischen Bedingungen des «Jahrs ohne Sommer» führten zu Missernten in Mitteleuropa. Für Profiteure – in den Augen vieler Getreidehändler, Bäcker, Müller, Grossbauern und Wirte – bedeuteten die klimatischen Anomalien dieses Jahrs gute Neuigkeiten: Sie konnten aus den steigenden Getreidepreisen Gewinne erzielen. Direkt unterhalb des Fensters steht ein Mann, der eine Tabelle studiert. Der Beobachter kann sich fragen, ob er die steigenden Preise studiert. Sinnbildlich steht er für das doppelte Gesicht von Teuerungskrisen (Januskopf): Grossbauern, die ihr Getreide auf dem Markt verkaufen konnten, sowie Profiteure und Spekulanten lebten in den wirtschaftlich schlechten Jahren gut und zögerten nicht, ihren Reichtum zur Schau zu stellen. Weizensäcke, Kartoffelhaufen, Wein und Brot mit Käse oder Butter verdeutlichen im Bild das Wohlbefinden dieses «Geschmeisses» (vgl. Legende zum Bild oben). Unterstützt werden die Wucherer von Teufeln und einem Wachhund. Am Tisch sitzt zudem ein Mann mit einer Hakennase. Er stellt den «Kornjuden» dar, ein weit verbreitetes antisemitisches Vorurteil, das in Hungerkrisen im deutschsprachigen Raum bis weit ins 19. Jahrhundert hinein immer wieder auflebte.

Das Skelett auf der rechten Seite symbolisiert Rudolf Tanners letzten Wunsch. «Tod!» rufen die Armen aus, «Fahr ab mit diesen Leuten: Hier ist Mammon Herr im Haus.» Auch der Vorhang ist symbolisch: Auf der linken Seite ist er geschlossen und er verdeckt die düstere Armut der mittleren und unteren Klassen. Auf der rechten Seite öffnet ein Engel den Vorhang und das Fenster, wodurch die Völlerei ans Tageslicht tritt. Die Eule auf dem Fensterbrett tut ihre symbolische Pflicht und überbringt den Wucherern die schlechte Botschaft.



Bessere Versorgungswege bei zukünftigen Hungerkrisen

Einige der getroffenen Massnahmen zielten darauf ab, die Resilienz für zukünftige Krisen zu verbessern. Nach der Hungerkrise von 1816/17 wurden zur besseren Versorgung Graubündens sowohl der Splügen- als auch der San Bernardino-Pass ausgebaut. Mit dem Julier kam 1820–1826 eine weitere fahrbare Passstrasse hinzu.

Foto: Reisende überqueren den Julierpass mit einer Pferdekutsche.

Nachwirkungen

Als sich die klimatischen Bedingungen nach dem Tamboraausbruch wieder normalisierten, war die Welt nicht mehr dieselbe. Die Insel Sumbawa war kaum mehr bewohnbar. Nur langsam wuchs die Bevölkerung wieder an und es entwickelte sich neues gesellschaftliches Leben. Als der Schweizer Botaniker Heinrich Zollinger (Abb. 2) im Jahr 1847 die Insel bereiste, war das Leben auf der Insel noch stark durch den Ausbruch von 1815 geprägt. Manche sagen sogar, dass Sumbawa sich nie ganz von der Eruption erholt hat. So wurden die meisten Siedlungen nach 1815 neu gegründet, da die älteren Standorte nach dem Ausbruch verlassen worden waren; die Siedlungsstruktur ist deshalb noch heute durch den Ausbruch von 1815 geprägt (Abb. 20).

Auch Yunnan, China, kehrte nicht zur Normalität zurück. Anstelle der Subsistenzlandwirtschaft, die vor der Hungersnot dominiert hatte, begannen viele Bauern, Schlafmohn als «Cash Crop» anzubauen. Mohn war wesentlich robuster als Reis. Aus der Region Yunnan breiteten sich die Opiumbauern dann südwärts aus, in die Region, die später als das «Goldene Dreieck» bekannt wurde, eine der weltweit grössten Anbauflächen von Drogen. Ein Tamboraeffekt?

Die Bengalische Cholera breitete sich über den indischen Subkontinent in ganz Eurasien aus. Sie erreichte 1823 Persien, trat dann 1829 in Russland und 1830 wieder in Westeuropa auf. In Nordamerika wurden die ersten Fälle 1832 registriert, im gleichen Jahr verbreitete sich die Cholera in Afrika. Es ist allerdings umstritten, ob dies eine einzige Pandemie war oder ob die erste 1824 endete und eine zweite Pandemie, ebenfalls mit Ursprung im bengalischen Raum, sich ab 1826 ausbreitete und dann nach Europa und Nordamerika übergriff. War die Bengalische Cholera ein Tamboraeffekt?

In Mitteleuropa verbesserten sich die klimatischen Bedingungen im Sommer 1817. Allerdings hatte das Tamboraklima noch ein Nachspiel: Ein Teil des Schnees aus dem Winter 1816 schmolz im kalten Sommer nicht. In Höhenlagen über 2000m fiel zudem auch im Sommer Schnee. Im Winter und dem besonders kalten Frühling 1817 legte sich darüber ein weiteres Schneepaket, so dass im Frühsommer 1817 eine dreifache Schneedecke abschmolz. Ausgelöst durch ein Niederschlagsereignis im Juni kam es zu einer grossen Überschwemmung.²¹² Der Bodensee erreichte den höchsten je dokumentierten Stand (Abb. 21). Das Hochwasser dauerte mehrere Wochen an und verunmöglichte die Schifffahrt auf dem Rhein, welche für die Getreideversorgung in Teuerungsjahren essentiell war. Das Klima beeinträchtigte somit erneut die Gesellschaft.

Auch danach blieben Spuren der nassen und kalten Witterung in den Jahren 1812–1817 sichtbar. Viele Alpengletscher wuchsen mit einer zeitlichen Verzögerung von einigen Jahren an und erreichten ihre maximalen Längen um 1820. Das «Jahr ohne Sommer» trug damit zum zweitletzten Gletschervorstoss der «Kleinen Eiszeit» bei.

Das «Jahr ohne Sommer» hinterliess auch andere Spuren in der Landschaft. Im Zuge des Ereignisses wurden die bestehenden Wegnetze erweitert und verbessert. Neue Strassen wurden über die Alpen gebaut, damit bei zukünftigen Krisen einfacher Getreide aus Südeuropa importiert werden konnte. Der allgemeine Ausbau des Strassennetzes erhöhte nicht nur die Transportkapazitäten, sondern brachte auch neue Möglichkeiten für den Fernhandel aufgrund der höheren Zuverlässigkeit. Darüber hinaus förderte das Flutereignis ältere Pläne des Ingenieurs Johann Gottfried Tulla zur Begradigung des Rheins zwischen Basel und Worms. Ein weiterer Tamboraeffekt?



Abb. 20. Eine ländliche Szene auf der Insel Sumbawa heute (Foto: Lawson Speedway).



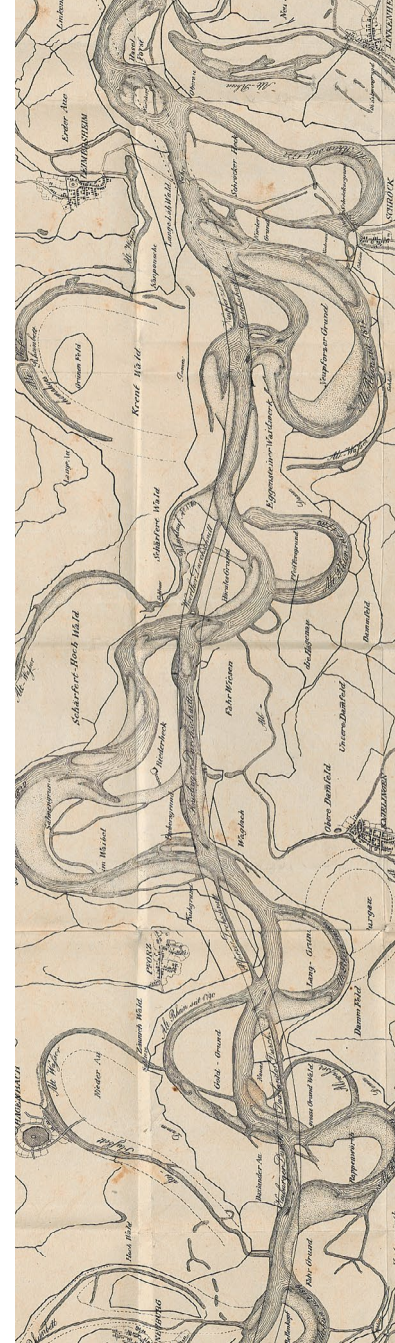
Abb. 21. Bregenz während der Überschwemmung von 1999, dem höchsten Seespiegel des 20. Jahrhunderts. Der Stein zeigt Hochwassermarken; die Marke für 1817 sollte infolge Setzung des Steins ca. 5cm höher sein (Foto: Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft).²¹³

Die Krise belebte auch die Auswanderung. Laut John D. Post wanderten hunderttausend verzweifelte Europäer aus Not aus. Allerdings haben viele ihr Ziel nie erreicht. Entweder wurden sie zur Rückkehr in ihre alte Heimat gezwungen, weil ihnen auf der Reise die finanziellen Mittel ausgingen, oder sie starben während der Reise. In Grossbritannien stieg die Zahl der Auswanderer in aussereuropäische Staaten zwischen 1816 und 1819 deutlich an. Meistens war die Auswanderung nach Amerika (und Russland) wie in Frankreich, in den deutschen Staaten und in der Schweiz auch wirtschaftlich motiviert. In Nordamerika beschleunigte die Angst vor einer Hungerkrise die binnenkontinentale Migration in den Westen parallel zur europäischen Migration.

Die Wirtschaft verändert sich ebenfalls: Der Landwirtschaftssektor war unberechenbar, was zu wirtschaftlichen Abschwüngen führen konnte. Nach den schlechten Ernten 1816 wurde die Anbaufläche als Reaktion auf die steigenden Agrarpreise erheblich erweitert. Dies spielte eine wichtige Rolle für die Konjunkturzyklen nach der Krise. Die erweiterten Kapazitäten für die Produktion von Agrarprodukten führten zu sinkenden Preisen und einer langjährigen landwirtschaftlichen Depression, die bis Mitte der 1820er-Jahre dauerte. Die USA konnten 1816 und 1817 Getreide nach Europa exportieren. Als die Ernten in Europa wieder durchschnittlich ausfielen, sanken die Preise auch in den USA, wodurch eine kleine Wirtschaftskrise entstand. Während der Hungerjahre waren die hohen Lebensmittelpreise ein Problem, zwischen 1819 und 1825 wurden die tiefen Getreidepreise zum wichtigsten ökonomischen Problem.

Dennoch beschleunigte die Hungerkrise die Agrarmodernisierung. Ganzjährige Stallfütterung, Sammlung von Dung, Fruchtfolge, Anbau von Klee, Abschaffung der Brache und Umwandlung der Allmende in Kartoffeläcker erhöhte die Produktivität langfristig erheblich. In Bayern, Württemberg und der Schweiz wurden zur Beschleunigung der Reformprozesse Vorzeigebetriebe gegründet sowie Feste und landwirtschaftliche Ausstellungen initiiert.

Auf der politischen Ebene waren die Regierungen in vielen europäischen Staaten mit einer Vielzahl von Herausforderungen im Gefolge des Wiener Kongresses konfrontiert: politische Verwerfungen, soziale Unruhen, administrative Probleme, wirtschaftliche Depression und Protektionismus, Arbeitslosigkeit, Hunger, Unruhen, Plünderungen, Bettel, Landstreicherei und Auswanderung. Das tiefgreifende Malaise schuf ein Umfeld, das eine repressive Politik begünstigte. Bürgerrechte und Grundrechte wurden oft eingeschränkt, und liberale Bewegungen gerieten unter Druck. Allerdings zeigten Hunger, soziale Unruhen und Bettel auch die Notwendigkeit für tiefgreifende Reformen im Armenwesen auf. So hinterliess das «Jahr ohne Sommer» nicht nur in der Umwelt und in der Landschaft seine Spuren, sondern in der Gesellschaft als Ganzes.



Weniger Hochwasser und mehr schiffahrtstaugliche Flüsse

Nach den Überschwemmungen 1816 und 1817 wurden Flussbauprojekte an die Hand genommen, beispielsweise die bereits vorher geplante Begradigung des Rheins zwischen Basel und Worms durch Ingenieur Johann Gottfried Tulla.

Foto: Karte der Rheinbegradigung in der Nähe von Karlsruhe aus einer Publikation von Tulla.²¹⁴



FRANKENSTEIN

the glimmer of the half-extinct light, I saw the dull, yellow eye of the creature open; it breathed hard, a convulsive motion agitated its limbs. I rushed out of the room.

Published by H. Colburn and R.

Frankenstein

Der Roman von Mary Shelley ist zu einem modernen Mythos geworden, weil er ein fast unerschöpfliches Reservoir an Bildern enthält. Nicht zuletzt deshalb wurde der Roman in fast alle Sprachen der Welt übersetzt, für das Theater adaptiert und unzählige Male verfilmt, vertont und choreographisch umgesetzt.

Foto: Frankenstein beobachtet seine Kreatur, aus der 1831er Ausgabe des Romans von Mary Shelley.²¹⁵

Kultur

Viele Autoren argumentieren, dass sich der Tamboraausbruch 1815 auch auf die europäische Kultur ausgewirkt habe. Mary Shelleys Frankenstein (siehe Kasten «Wie viel der Sommerkälte 1816 in der Schweiz kann durch den Tambora erklärt werden?»), Lord Byrons Gedicht «Darkness» oder John William Polidoris «The Vampyre» werden gerne als typische Einzelfälle herangezogen. Ein weiteres Beispiel sind die Gemälde von Sonnenuntergängen von William Turner oder die Himmel von John Constable (Abb. 22). Das mögen bekannte Beispiele sein, aber die Auswirkungen des «Jahrs ohne Sommer» auf Kultur und Gesellschaft waren in der Regel subtiler und allenfalls ein schwaches Echo des Tamboraausbruchs.



Abb. 22. Weymouth Bay with Approaching Storm. Gemälde von John Constable von 1816 (Foto: Victoria and Albert Museum, London).

In Mitteleuropa sorgte die Erinnerungskultur dafür, dass das Ereignis nicht vergessen wurde. Die Leiden der denkwürdigen Jahre 1816 und 1817 – das «Jahr ohne Sommer» und die Geissel des Hungers – wurden nicht nur auf Papier, sondern auch auf Medaillen (vgl. Seite 32) oder sogar auf Schränken (vgl. Seite 29) festgehalten. Besonders die Preiserhöhungen blieben den Menschen im Bewusstsein haften. Flugblätter, satirische Drucke, Gedenkmünzen, Medaillen und Kupferstiche, farbige Abbildungen und Tabellen mit steigenden Getreidepreisen wurden häufig und in grossen Mengen produziert. Hinzu kamen Inschriften in Mauern, Hinterglasmalerei, Vitrinen mit Broten und Gedenksteine. Im Jahr 1817 war die Rückkehr der ersten Erntewagen zudem nicht nur ein beliebtes Motiv für Bilder, sondern wurde vielerorts auch gefeiert (Abb. 23). In einigen Orten sind aus den Fürbittgottesdiensten oder Festen des Jahres 1817 Traditionen geworden, beispielsweise der «Cannstatter Wasen» in Stuttgart. Schliesslich veröffentlichten Philanthropen wie Ruprecht Zollikofer oder Peter Scheitlin beeindruckende Bücher über die Not dieser Jahre in der Ostschweiz. Andere kreierten Utopien – «Korntal» entstand und im «Goldmachedorf» sollten die Menschen zu Sparsamkeit und Sittsamkeit erzogen werden. Zu guter Letzt hielten Tagebücher die Erinnerungen an das Elend dieser Zeit lebendig. All dies erinnert an das «Jahr ohne Sommer», oder vielleicht noch genauer, an die Krise von 1816/17 und deren Ende – nicht aber an den Tamboraausbruch von 1815.

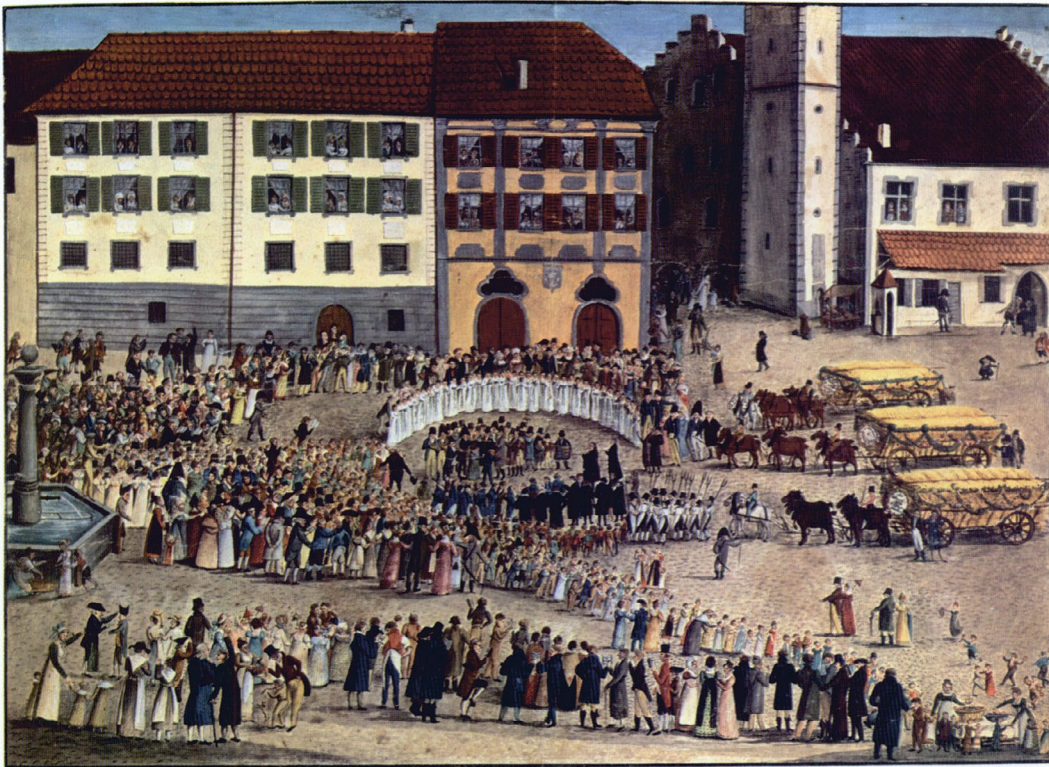


Abb. 23. Einzug der ersten Erntewagen nach der großen Hungersnot am 4. August 1817 in Ravensburg (Gouache von G. J. Edinger, 1817, © Stadtarchiv Ravensburg).

Ein weiteres Beispiel dafür, wie das «Jahr ohne Sommer» von 1816 unsere Kultur, ja sogar unseren heutigen Alltag verändert haben könnte, war die Erfindung der Laufmaschine von Karl Drais 1817 («Draisine» genannt, Abb. 24). Die Erfindung war eine Reaktion auf die Tatsache, dass der Unterhalt von Pferden durch die hohen Futterpreise sehr kostspielig war und die Ernährung der Menschen konkurrenzierte – Hafer war zu einem wertvollen Gut geworden. Carl Drais stellte sich die Draisine als eine schnelle und effiziente Art der Fortbewegung vor. Heutzutage sind Laufvelos bei Kindern wieder sehr beliebt. Allerdings war die Draisine eher ein Kuriosum und nicht ein direkter Vorläufer des heutigen Fahrrads, das erst Jahrzehnte später erfunden wurde.

Sind die Vampirgeschichten oder die Erfindung der Draisine nur einige Kuriositäten, oder hatte der Ausbruch des Tambora wirklich einen Einfluss auf die europäische Kultur? Es wäre unklug, in der Eruption von 1815 einen wichtigen Treiber kultureller Entwicklungen in Europa zu sehen, aber es wäre ebenso unklug, den Einfluss des «Jahrs ohne Sommer» völlig zu vernachlässigen.



Abb. 24. Karl Drais' Laufrad (aus seinem Patent, 1817, Wikipedia). Die hohen Haferpreise im «Jahr ohne Sommer» animierten ihn zur Erfindung einer «Fahrmaschine» ohne Pferde. Die stark angestiegenen Unterhaltungskosten für Pferde liessen eine preiswerte Alternative als lohnenswert erscheinen.²¹⁶



Like a Bike

Laufräder sind bei Kindern heute sehr beliebt und ein grosser Verkaufserfolg. Die Erfindung des Laufrads geht zurück auf Karl Drais (Abb. 24), dessen Laufrad allerdings kein Erfolg beschieden war.



Der Blitzableiter als Blitzableiter für den Unmut der Bevölkerung

In Teilen der Schweiz und Deutschlands wurden Blitzableiter als Ursache für die schlechte Witterung angesehen. Nachdem es zu Sachbeschädigungen gekommen war, erliess die Zürcher Regierung ein Dekret, das hohe Strafen für solche Sachbeschädigungen androhte (NZZ, 9. Juni 1816).

Foto: Historischer Blitzableiter in Hudlitz, Tschechische Republik.

Der Tamboraausbruch und die Wissenschaft

Der Tamboraausbruch und seine Folgen beeinflussten langfristig die Wissenschaft und die Forschung. Für das kalte und regnerische Wetter in Europa hatten die Naturforscher allerdings zunächst keine Erklärungen. In den Medien geisterten die üblichen Mutmassungen herum: Sonnenflecken seien schuld an der ungewöhnlichen Witterung, oder ein Komet habe die Erde ihrer Wärme beraubt, wurde vermutet. Manche machten die Blitzableiter verantwortlich. Für viele lagen gute und schlechte Jahre schlicht in den Händen Gottes. Scoresbys Bericht über grosse, losgerissene Eismassen im nördlichen Nordatlantik (siehe Abschnitt «Das Klima 1816 aus Messungen») lieferte eine neue Erklärung für den kalten Sommer. Obwohl die tatsächliche Ursache des kalten und regnerischen Wetters unbekannt blieb – oder vielleicht gerade deswegen –, wurde die Wissenschaft durch das Ereignis angeregt.

In der Schweiz veranlasste das kühle Wetter 1816 die neu gegründete Schweizerische Naturforschende Gesellschaft zur Ausschreibung der Preisfrage «Ist es wahr, dass die hohen schweizerischen Alpen seit einer Reihe von Jahren rauher und kälter geworden sind?»²¹⁷ Die Antwort kam nicht von der Meteorologie, einer Disziplin, die damals noch in den Kinderschuhen steckte und die unter einem Reputationsproblem litt, weil Wettervorhersagen noch die Domäne der Astrologie waren. Den Preis gewann vielmehr ein Ingenieur, der anhand des Studiums vergangener Gletscherpositionen zum Schluss kam, dass die jüngste Abkühlung zu einem Ende gekommen sei: Ignaz Venetz.

Diese Episode ist typisch und zeigt, wie etablierte Disziplinen wie Naturgeschichte oder Geologie vom «Jahr ohne Sommer» profitierten, indem sie bereits vorhandene Ideen vertiefen konnten. Obwohl auch sie das «Jahr ohne Sommer» nicht erklären konnten, wurde Venetz' Forschung ein wichtiger Impuls für die Eiszeittheorie.²¹⁸ Die Eruption des Tambora förderte somit wissenschaftliche Entdeckungen sehr unterschiedlicher Natur. Arktisforscher verwendeten Scoresbys Bericht, um Mittel für neue Expeditionen zu erhalten. Nur die Meteorologen blieben passiv, sie hatten keine Theorie anzubieten. Immerhin begannen sie mehrere neue Messreihen und förderten damit die Klimawissenschaft langfristig. Heinrich Wilhelm Brandes schlug vor, zur Untersuchung der Wetteranomalien des Sommers 1816 Wetterkarten zu zeichnen – in der Tat ein erfolgreicher Vorschlag.

Auch die anwendungsorientierte Forschung wurde gefördert. Die Universität Hohenheim in Stuttgart (Abb. 25) wurde im Nachgang zum «Jahr ohne Sommer» als Akademie für Forstwirtschaft gegründet, eine weitere etablierte Wissenschaft. Im Kanton Zürich wurde 1818 der «Strickhof» als eine «landwirtschaftliche Schule für Arme» gegründet.



Abb. 25. Die Universität Hohenheim wurde 1818 als Reaktion auf die Hungersnot von 1817 als landwirtschaftliches Institut gegründet (Foto: Eric. A. Lichtenscheidt, Universität Hohenheim).

Obwohl der Tamboraausbruch im Jahr 1816 in Europa bekannt war, wurde keine Verbindung zwischen dem schlechten Wetter und dem Ausbruch hergestellt. Erst nach dem Krakatau-ausbruch 1883, dem ersten medialen Grossereignis in Echtzeit, begannen Wissenschaftler, atmosphärische Effekte von Vulkanausbrüchen umfassender zu studieren.²¹⁹ In einer 1913 publizierten Studie verknüpfte schliesslich William Jackson Humphreys das «Jahr ohne Sommer» von 1816 mit dem Tamboraausbruch.²²⁰

Aus heutiger Sicht wird der Tamboraausbruch zu einem «Experiment der Natur»: einer Störung des normalen Laufs der Dinge, deren Einfluss auf Erdsystem, Mensch und Gesellschaft untersucht werden kann. Die Fragen, mit denen die Wissenschaft an das Experiment herantrat, änderten sich im Lauf der Zeit, und so konnte sie daraus immer wieder Neues lernen.²²¹ Die ersten Studien entstanden im Kontext der Eiszeittheorie.²²² In den 1960er-Jahren beschäftigte sich die neue Disziplin der Historischen Klimatologie mit Auswirkungen von Klimaschwankungen.²²³ In den frühen 1980er-Jahren wurde der Tamboraausbruch als Analogfall für die Klimawirkung von Asteroideneinschlägen (beim Aussterben der Dinosaurier) oder für den nuklearen Winter herbeigezogen.²²⁴ In jüngerer Zeit veranlasste die Diskussion über Geoengineering die Wissenschaft, sich erneut der Eruption des Tambora zuzuwenden. Die Wissenschaft lernt immer noch von diesem zweihundert Jahre alten Ausbruch.

Warum studieren Wissenschaftler heute die Tamboraeruption? Der Ausbruch von 1815 gilt als «Worst-Case»-Szenario von Klimavariabilität, als interessanter Vergleich für Geoengineering, als Möglichkeit zur Verbesserung saisonaler Vorhersagen, als Testfall für Wechselwirkungen im Mensch–Umwelt-System und vieles mehr. Im Fall eines künftigen Ausbruchs hilft das Studium der Eruption des Tambora, saisonale Vorhersagen zu erstellen und Messkonzepte oder Beobachtungsstrategien zu entwickeln. Das «Jahr ohne Sommer» von 1816 wird zum Testfall für die Analyse der aktuellen Ernährungssicherheit²²⁵ und Historiker untersuchen daran die Vulnerabilität und Resilienz von Gesellschaften.

Schliesslich belebt das «Jahr ohne Sommer» von 1816 bis heute die Entwicklung neuer Methoden zur Klimarekonstruktion. Anlässlich des zweihundertsten Jahrestags des Tamboraausbruchs wurde eine globale, sechstündliche, dreidimensionale Wetterkonstruktion des Zeitraums 1815–1817 erstellt. Dazu wurde ein Wettervorhersagemodell in grösstmögliche Übereinstimmung mit den spärlichen Beobachtungen gebracht. Als ein Beispiel zeigt Abbildung 26 die Temperatur und geopotenzielle Höhe (entspricht der Druckverteilung) in der mittleren Troposphäre sowie Wind, Niederschlag und Hebungsraten für den 29. Juli 1816, 18:00 UTC. Gezeigt ist der Mittelwert aus 56 gleich wahrscheinlichen Modellrealisierungen. Die Daten erlauben die Interpretation der Wetterereignisse. Eine Front über West- und Mitteleuropa brachte am 29. Juli ergiebige Niederschläge (vgl. S. 20, links). Hinter der Front strömte kalte Luft ein, welche zwei Tage später dazu führte, dass man in der Schweiz die Häuser heizen musste (vgl. S. 10).

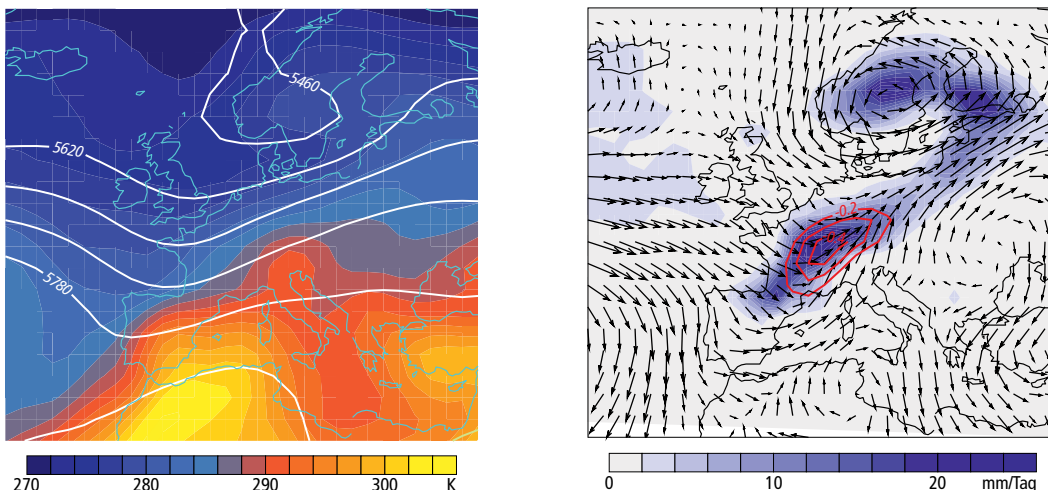
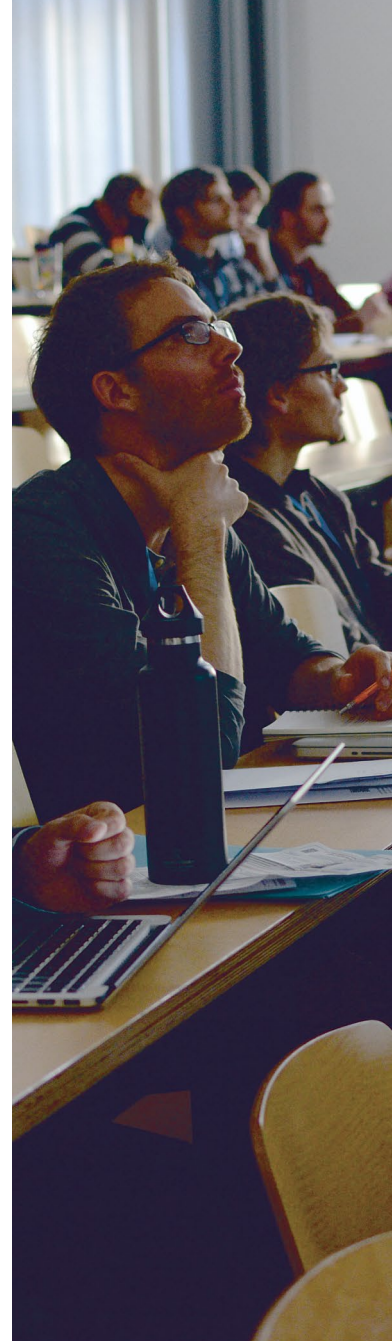


Abb. 26. (Links) Temperatur auf 850 hPa (Farben) und geopotenzielle Höhe auf 500 hPa, (rechts) Niederschlag (Farben), Wind auf 850 hPa (Pfeile) und Hebung auf 500 hPa (Pa/s, negativ bedeutet aufwärts, nur Konturen -0.2 bis -0.4) am 29. Juli 1816, 18:00 UTC in der «Twentieth Century Reanalyse» (Ensemble-Mittelwert).



Auch nach zweihundert Jahren können wir noch vom Tamboraausbruch lernen

Die Teilnehmer der Berner Konferenz zum zweihundertsten Jahrestags des Tamboraausbruchs, 7.–10. April 2015, kamen aus den unterschiedlichsten Fachbereichen. Die Referenten behandelten so vielfältige Themen wie Aerosolmikrophysik, Klimaproxies und Modelle, hemisphärische Asymmetrie der Aerosole und Klimawirkungen, Einfluss auf Mensch und Gesellschaft, sowie kulturelle Auswirkungen.

Foto: Teilnehmer der Berner Konferenz.



Die Niederlande als Kolonialmacht in Indonesien

Die britische Herrschaft über Indonesien war nur von kurzer Dauer. Bereits 1816 übernahmen die Niederlande wieder die Regierung über Indonesien. Ihre Herrschaft dauerte bis zum Zweiten Weltkrieg und der Besetzung durch Japan. Seit 1945 ist Indonesien ein unabhängiger Staat.

Bild: Andrees Handatlas, Bielefeld und Leipzig, 1893.

Eine veränderte Welt

Jede Katastrophe wird als Bruch wahrgenommen. Für den Einzelnen oder für die Gesellschaft ist die Welt danach nicht mehr dieselbe. Viele Autoren argumentieren, dass die Eruption des Tambora die Welt verändert habe.^{226,227} Sicher veränderte sie Indonesien und tötete Zehntausende von Menschen. China und Indien wurden von einer Dürre heimgesucht. Der Ausbruch veränderte Europa durch das regnerische Wetter und Nordamerika durch Kaltluftbrüche. Eine Karte aller Auswirkungen ist in Abbildung 27 gezeigt, unterschieden in klimatische, biophysikalische und sozioökonomische oder politische Auswirkungen. Die klimatischen Anomalien, durch andere Faktoren verstärkt, wirkten sich auf die biophysikalische Ebene aus, was sich – wiederum verschärft durch weitere Faktoren – auf die Gesellschaften auswirkte. So gesehen verursachte der Tamboraausbruch 1815 gegen 200 000 Tote rund um die Welt und veränderte Gesellschaften tiefgreifend. D’Arcy Wood,²²⁸ Behringer²²⁹ und andere gehen sogar noch weiter und führen den Drogenanbau im «Goldenen Dreieck», die Sozialpolitik Grossbritanniens oder Deutschlands und Wirtschaftskrisen in den USA sowie vieles mehr letztlich auf die «Tamborakrise» zurück.

Die Broschüre zeigt, wie die Wissenschaft im Nachgang der Eruption beeinflusst wurde und wie sie bis heute daraus lernt. Auch in der europäischen Kultur hat der Ausbruch Spuren hinterlassen, und ein ganz alltäglicher Gegenstand – das Fahrrad – erinnert uns noch heute indirekt an die Tamboraeruption.

Aber inwieweit können all diese Effekte dem Tamboraausbruch zugeschrieben werden? Ist es gerechtfertigt, die Migration von Europa nach Nordamerika oder westwärts innerhalb der USA mit dem Tamboraausbruch zu begründen? Viele würden sich gegen eine solche «klimadeterministische» Argumentation wehren, auch wenn sie einräumen würden, dass klimatische Faktoren eine Rolle spielten. Aber es würde zu weit gehen, diese gesellschaftlichen Phänomene auf ein einzelnes Ereignis – den Ausbruch des Tambora – zurückzuführen.

All diese Effekte müssen in ihrem eigenen, spezifischen Kontext analysiert werden. Höchstwahrscheinlich waren andere Faktoren mindestens ebenso wichtig. Gleichzeitig entsteht zusammengenommen ein Bild globaler Veränderungen, das sich zu anderen in der Gesellschaft ablaufenden, tiefgreifenden Veränderungen fügt.

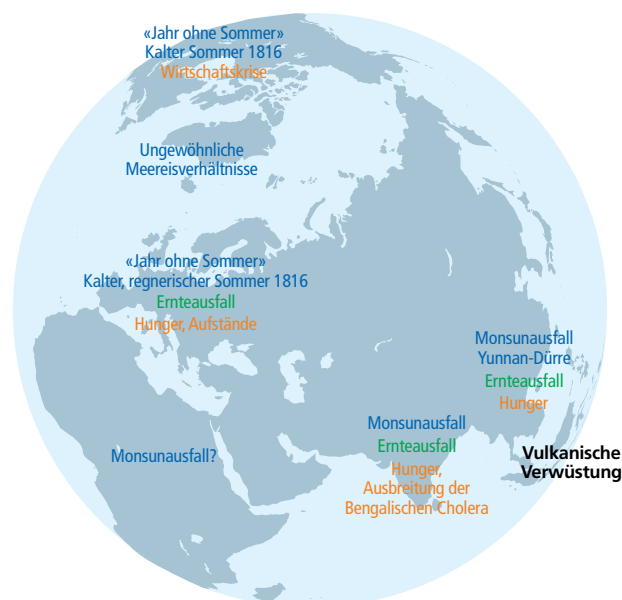


Abb. 27. Schematische Karte der Auswirkungen des Tamboraausbruchs 1815 (blau: Klimafolgen, grün: biophysikalische Wirkungen, orange: sozio-politische oder wirtschaftliche Auswirkungen).

Schlussfolgerungen

Der Tamboraausbruch 1815 verwüstete Sumbawa und die benachbarten Inseln, er beeinflusste die globale Atmosphäre durch chemische und mikrophysikalische Vorgänge und er veränderte den Strahlungshaushalt, was zu einer Abkühlung der Erdoberfläche führte. Er beeinflusste die globale atmosphärische Zirkulation, ebenso die Ozeane, das Meereis und die biogeochemischen Kreisläufe. Das gesamte Erdsystem war betroffen, entsprechend ist eine Erdsystemperspektive erforderlich, um das Ereignis in seiner vollen Komplexität zu verstehen.

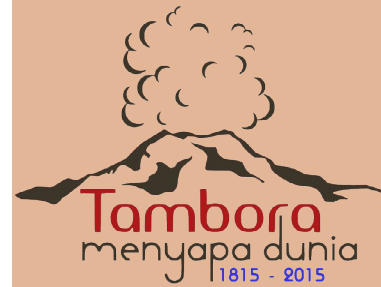
Vor allem waren aber Menschen betroffen. Die Bevölkerung Mitteleuropas erlebte einen kalten, verregneten Sommer, schlechte Ernten, steigende Preise und Hunger. Ihre Verletzlichkeit war aufgrund der politischen Umwälzungen und der vorangegangenen Kriege gross, Unruhen brachen aus. Kurzum, der Tamboraausbruch 1815 und das «Jahr ohne Sommer» von 1816 hatten nachhaltige Auswirkungen auf die wirtschaftlichen, sozialen und politischen Verhältnisse, auf technische Errungenschaften, Kultur und Wissenschaft. Es wäre jedoch verfehlt, all dies als eine monokausale Erklärungskette zu betrachten. Bei jedem Glied in der Kette – vom Ausbruch zum globalen Klima, zum Wetter in Europa, zu den Missernten, den steigenden Preisen und schliesslich dem Hunger – waren andere Faktoren ebenfalls relevant und oft sogar dominant: andere Klimafaktoren, zufällige Wettervariabilität, die politische und wirtschaftliche Situation der europäischen Staaten und eine bereits sehr verletzte Bevölkerung.

Daraus lernen wir auch für zukünftige Klimafolgen: Krisen werden wahrscheinlich nicht primär klimabedingt sein, aber es wird immer ungünstige Konstellationen geben, in denen es unter anderem durch klimatische Effekte zu Krisen kommen kann. Das hier vorgestellte Modell der Wechselwirkungen im Mensch–Umwelt-System hilft, solche Prozesse zu verstehen. Dies macht den Tamboraausbruch als Forschungsobjekt attraktiv, da viele der grossen Herausforderungen unserer Zeit wie der Umgang mit dem globalen Klimawandel und die Ernährungssicherheit eine Perspektive erfordern, die sowohl ein Erdsystem wie auch Mensch und Gesellschaft umfassen.

Was würde heute nach einem Tambora-ähnlichen Ausbruch passieren? Vielleicht könnte der Ausbruch vorhergesagt und die Menschen gewarnt werden, aber sichere Vorhersagen sind noch immer nicht möglich.²³⁰ Selbst dann würde sich das globale Klima in ähnlicher Weise verändern wie 1816, es käme also zu einer globalen Abkühlung und einem verlangsamten Wasserkreislauf. Die Auswirkungen auf die Monsune hängen von der Jahreszeit und dem Breitengrad des Ausbruchs ab; wäre der Einfluss gross, könnte die globale Ernährungssicherheit empfindlich bedroht werden.²³¹ Allerdings wäre die Wissenschaft im Gegensatz zu 1816 in der Lage, zumindest einige der langfristigen klimatischen Folgen vorherzusagen und die Gesellschaften hätten im Gegensatz zum frühen 19. Jahrhundert eine gewisse Vorlaufzeit, um sich auf die drohenden Missernten einzustellen.

Nicht alle grossen Eruptionen führen in Mitteleuropa zu einem «Jahr ohne Sommer». Der Ausbruch müsste mit einer ungewöhnlichen natürlichen Variabilität zusammenfallen. Selbst in diesem Fall wäre unsere Gesellschaft aber weit weniger verletzlich als 1816. Zwar würde die Ernte in gewissen Regionen unterdurchschnittlich ausfallen, aber es würde wie 1816 nicht zu einer globalen Missernte kommen und die Ausgleichsräume sind mittlerweile ungleich besser erschlossen als vor zweihundert Jahren – ganz abgesehen davon, dass heutige Gesellschaften Lebensmittel wesentlich besser konservieren können als damals und über ausgefeilte Notfallpläne verfügen. Zuverlässige Informationen würden die Konsequenzen ebenfalls beeinflussen. Saisonale Vorhersagen würden helfen, Ernteauffälle vorauszusehen und Wettervorhersagen könnten herangezogen werden, um die landwirtschaftlichen Tätigkeiten in einem schlechten Sommer zu optimieren. Wegen dem weit geringeren Anteil der Nahrungsmittel am Haushaltsbudget im Vergleich zu 1816 würde die Bevölkerung heute in wohlhabenden Staaten nicht mehr so stark unter deutlich höheren Preisen leiden. Für sich alleine betrachtet wären die Auswirkungen in Mitteleuropa beherrschbar.

Trotzdem könnte ein «Jahr ohne Sommer» zusammen mit anderen Stressfaktoren in einigen Teilen der Welt zu sozialen, politischen und wirtschaftlichen Krisen führen und tiefgreifende Veränderungen auslösen. Die Wissenschaft würde dann den Tamboraausbruch 1815 unter diesen Vorzeichen erneut studieren. Gewiss ist aber, dass wir bis zum 250. Jahrestag des Tamboraausbruchs viele der offenen Fragen gelöst und gleichzeitig viele neue Fragen haben werden.



Ein Nationalpark

Am 11. April 2015 wurde die Region Tambora durch den Präsidenten Indonesiens, Joko Widodo, zum Nationalpark erklärt. Dies erfolgte aus dem Anlass des zweihundertsten Jahrestags des Ausbruchs. Es besteht der Plan, den Park in das «Global Geopark Network» zu integrieren und den sanften Tourismus in der Region zu stimulieren.

Anmerkungen und Bibliographie

- 1 Die hier dargestellten Forschungsergebnisse wurden unter anderem vom Schweizerischen Nationalfonds (Projekt FUPSOL-II), dem europäischen HORIZON2020 Forschungsprojekt «EUSTACE» und der cogito-Stiftung unterstützt.
- 2 Zollinger H. 1855. *Besteigung des Vulkanes Tambora auf der Insel Sumbawa und Schilderung der Eruption desselben im Jahr 1815*. Winterthur: Wurster, 22 S.
- 3 Wanner H. 1984. *Heinrich Zollinger 1818–1859. Ein Zürcher Schulmann als Naturforscher und Pflanze in Indonesien: sein Leben und seine Zeit*. Zürich: Orell Füssli, 32 S.
- 4 Wallace AR. 1863. On the physical geography of the Malay Archipelago. *J Royal Geogr Soc* **7**:205–212.
- 5 Wallace AR. 1869. *The Malay Archipelago: The land of the orang-utan, and the bird of paradise. A narrative of travel, with sketches of man and nature*. London: Macmillan, 515 S.
- 6 Oppenheimer C. 2003. Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Prog Phys Geogr* **27**:230–259.
- 7 Stothers RB. 1984. The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath. *Science* **224**:1191–1198.
- 8 Klingaman WK, Klingaman NP. 2013. *The year without summer: 1816 and the volcano that darkened the world and changed history*. New York: St Martin's Press, 338 S.
- 9 Sudrajat A, Rachmat H. 2015. *Greetings from Tambora. A potpourri of the stories on the deadliest volcanic eruption*. Bandung: Geological Museum, 173 S.
- 10 Crowley TJ, Obrochta SP, Liu J. 2014. Recent global temperature 'plateau' in the context of a new proxy reconstruction. *Earth's Future* **2**:281–294.
- 11 Chenoweth M. 1996. Ships' logbooks and "the year without a summer". *Bull Am Meteorol Soc* **77**:2077–2094.
- 12 Trigo RM, Vaquero JM, Alcoforado MJ, Barriendos M, Taborda J, Garcia-Herrera R, Luterbacher J. 2009. Iberia in 1816, the year without a summer. *Int J Climatol* **29**:99–115.
- 13 Post JD. 1977. *The last great subsistence crisis in the Western World*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 240 S.
- 14 Wood GD. 2014. *Tambora: the eruption that changed the world*. Princeton: Princeton University Press, 293 S.
- 15 Behringer W. 2015. *Tambora und das Jahr ohne Sommer. Wie ein Vulkan die Welt in die Krise stürzte*. München: C.H.Beck, 398 S.
- 16 Harington CR. 1992. *The year without a summer? World climate in 1816*. Ottawa: Canadian Museum of Nature, 576 S.
- 17 Raible CC, Brönnimann S, Auchmann R, Brohan P, Frölicher TL, Graf HF, Jones P, Luterbacher J, Muthers S, Neukom R, Robock A, Self S, Sudrajat A, Timmreck C, Wegmann M. 2016. Tambora 1815 as a test case for high impact volcanic eruptions: Earth system effects. *WIREs Clim Change* (accepted).
- 18 Self S, Rampino MR, Newton MS, Wolff JA. 1984. Volcanological study of the great Tambora eruption of 1815. *Geology* **12**:659–663.
- 19 Self S, Gertisser R, Thordarson T, Rampino MR, Wolff JA. 2004. Magma volume, volatile emissions, and stratospheric aerosols from the 1815 eruption of Tambora. *Geophys Res Lett* **31**:L20608.
- 20 Sigurdsson H, Carey S. 1989. Plinian and co-ignimbrite tephra fall from the 1815 eruption of Tambora volcano. *Bull Volcanol* **51**:243–270.
- 21 Kandlbauer J, Sparks RSJ. 2014. New estimates of the 1815 Tambora eruption volume. *J Volcanol Geotherm Res* **286**:93–100.
- 22 Self et al. 1984, op. cit.
- 23 Sutawidjaja IS, Sigurdsson H, Abrams L. 2006. Characterization of volcanic deposits and geoarchaeological studies from the 1815 eruption of Tambora volcano. *Jurnal Geologi Indonesia* **1**:49–57.
- 24 Sudrajat and Rachmat 2015, op. cit.
- 25 Sudrajat and Rachmat 2015, op. cit.
- 26 Sudrajat and Rachmat 2015, op. cit.
- 27 Wood 2014, op. cit.
- 28 Sutawidjaja et al. 2006, op. cit.
- 29 Gertisser R, Self S. 2015. The great 1815 eruption of Tambora and future risks from large-scale volcanism. *Geology Today* **31**:132–136.
- 30 Raffles, TS. 1816. *Narrative of the effects of the eruption from the Tomboro mountain, in the island of Sumbawa on the 11th and 12th of April 1815*. Netherlands: Batavian Society for Arts and Sciences (Bataviaasch Genootschap der Kunsten en Wetenschappen), 25 S.
- 31 Raffles 1816, op. cit.
- 32 Humphreys WJ. 1913. Volcanic dust and other factors in the production of climatic changes, and their possible relation to ice ages. *Bull Mt Weath Obs* **6**:1–34.
- 33 Kandlbauer and Sparks 2014, op. cit.
- 34 Sigurdsson and Carey 1989, op. cit.
- 35 Arfeuille F, Weisenstein D, Mack H, Rozanov E, Peter T, Brönnimann S. 2014. Volcanic forcing for climate modeling: a new microphysics-based dataset covering years 1600–present. *Clim Past* **10**:359–375.
- 36 Herzog M, Graf HF. 2010. Applying the three-dimensional model ATHAM to volcanic plumes: Dynamic of large co-ignimbrite eruptions and associated injection heights for volcanic gases. *Geophys Res Lett* **37**:L19807.
- 37 Arfeuille et al. 2014, op. cit.
- 38 Bigler M, Wagenbach D, Fischer H, Kipfstuhl J, Miller H, Sommer S, Stauffer B. 2002. Sulphate record from a northeast Greenland ice core over the last 1200 years based on continuous flow analysis. *Ann Glaciol* **35**:250–256.
- 39 Crowley TJ, Unterman MB. 2013. Technical details concerning development of a 1200-yr proxy index for global volcanism. *Earth Syst Sci Data* **5**:187–197.
- 40 Arfeuille et al. 2014, op. cit.
- 41 Arfeuille et al. 2014, op. cit.
- 42 Zerefos CS, Tetsis P, Kazantzidis A, Amiridis V, Zerefos SC, Luterbacher J, Eleftheratos K, Gerasopoulos E, Kazadzis S, Papayannis A. 2014. Further evidence of important environmental information content in red-to-green ratios as depicted in paintings by great masters. *Atmos Chem Phys* **14**:2987–3015.
- 43 Stothers RB. 2005. Stratospheric transparency derived from total lunar eclipse colors, 1801–1881. *Publ Astron Soc Pac* **117**:1445–1450.
- 44 Sigl M, McConnell JR, Layman L, Maselli O, McGwire K, Pasteris D, Dahl-Jensen D, Steffensen JP, Vinther B, Edwards R, Mulvaney R, Kipfstuhl S. 2013. A new bipolar ice core record of volcanism from WAIS Divide and NEEM and implications for climate forcing of the last 2000 years. *J Geophys Res* **118**:1151–1169.
- 45 Gao C, Robock A, Ammann C. 2008. Volcanic forcing of climate over the last 1500 years: An improved ice-core based index for climate models. *J Geophys Res* **113**:2517–2538.
- 46 Stothers 2005, op. cit.
- 47 Zerefos et al. 2014, op. cit.
- 48 Timmreck C, Lorenz SJ, Crowley TJ, Kinne S, Raddatz TJ, Thomas MA, Jungclaus JH. 2009. Limited temperature response to the very large AD 1258 volcanic eruption. *Geophys Res Lett* **36**:L21708.
- 49 Arfeuille et al. 2014, op. cit.
- 50 Brönnimann S. 2015. *Climatic changes since 1700*. Adv Global Change Res, Vol 55. Switzerland: Springer International Publishing, xv+360 S.
- 51 Arfeuille et al. 2014, op. cit.
- 52 Timmreck 2009, op. cit.
- 53 Crowley et al. 2014, op. cit.
- 54 Myhre G, Shindell D, Bréon FM, Collins W, Fuglestad J, Huang J, Koch D, Lamarque JF, Lee D, Mendoza B, Nakajima N, Robock A, Stephens G, Takemura T, Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Stocker TF, Qin D, Plattner DK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, S. 659–740.
- 55 Stothers 2005, op. cit.
- 56 Rohde R, Muller RA, Jacobsen R, Muller E, Perlmutter S, Rosenfeld A, Wurtele J, Groom D, Wickham C. 2013. A new estimate of the average earth surface land temperature spanning 1753 to 2011. *Geoinfor Geostat: An Overview* **1**:1.
- 57 Briffa KR, Jones PD, Schweingruber FH, Osborn TJ. 1998. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature* **393**:450–455.

- 58 D'Arrigo R, Wilson R, Tudhope A. 2009. The impact of volcanic forcing on tropical temperatures during the past four centuries. *Nat Geosci* **2**:51–56.
- 59 Wilson R, Tudhope A, Brohan P, Briffa K, Osborn T, Tett S. 2006. Two-hundred-fifty years of reconstructed and modelled tropical temperatures. *J Geophys Res* **111**:C10007.
- 60 Chenoweth M. 2001. Two major volcanic cooling episodes derived from global marine air temperature, AD 1807–1827. *Geophys Res Lett* **28**:2963–2966.
- 61 Crowley et al. 2014, op. cit.
- 62 Mann ME, Zhang ZH, Rutherford S, Bradley RS, Hughes MK, Shindell D, Ammann C, Faluvegi G, Ni FB. 2009. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and medieval climate anomaly. *Science* **326**:1256–1260.
- 63 Frank DC, Esper J, Raible CR, Büntgen U, Trouet V, Stocker B, Joos F. 2010. Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate. *Nature* **463**:527–530.
- 64 Brönnimann 2015, op. cit.
- 65 Raible et al. 2016, op. cit.
- 66 Raible et al. 2016, op. cit.
- 67 Crowley et al. 2014, op. cit.
- 68 PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the last two millennia. *Nat Geosci* **6**:339–346.
- 69 Crowley et al. 2014, op. cit.
- 70 Büntgen U, Trnka M, Krusic PJ, Kyncl T, Kyncl J, Luterbacher J, Zorita E, Ljungqvist FC, Auer I, Konter O, Schneider L, Tegel W, Štěpánek P, Brönnimann S, Hellmann L, Nievergelt D, Esper J. 2015. Tree-ring amplification of the early-19th century summer cooling in Central Europe. *J Clim* **28**:5272–5288.
- 71 PAGES 2k Consortium 2013, op. cit.
- 72 Crowley et al. 2014, op. cit.
- 73 Neukom R, Gergis J, Karoly DJ, Wanner H, Curran M, Elbert J, Gonzalez-Rouco F, Linsley BK, Moy AD, Mundo I, Raible CC, Steig EJ, van Ommen T, Vance T, Villalba R, Zinke J, Frank D. 2014. Inter-hemispheric temperature variability over the past millennium. *Nat Clim Change* **4**:362–67.
- 74 Neukom et al. 2014, op. cit.
- 75 Ridley HE, Asmerom Y, Baldini JUL, Breitenbach SFM, Aquino VV, Prufer KM, Culleton BJ, Polyak V, Lechleitner FA, Kennett DJ, Zhang MH, Marwan N, Macpherson CG, Baldini LM, Xiao TY, Peterskin JL, Awe J, Haug GH. 2015. Aerosol forcing of the position of the intertropical convergence zone since AD 1550. *Nat Geosci* **8**:195–200.
- 76 Neukom R, Luterbacher J, Villalba R, Kuttel M, Frank D, Jones PD, Grosjean M, Esper J, Lopez L, Wanner H. 2010. Multi-centennial summer and winter precipitation variability in southern South America. *Geophys Res Lett* **37**:L14708.
- 77 Pauling A, Luterbacher J, Casty C, Wanner H. 2006. 500 years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation. *Clim Dyn* **26**:387–405.
- 78 Feng S, Hu Q, Wu Q, Mann ME. 2013. A gridded reconstruction of warm season precipitation in Asia spanning the past half millennium. *J Clim* **25**:2192–2204.
- 79 Neukom R, Nash DJ, Endfield GH, Grab SW, Grove CA, Kelso C, Vogel CH, Zinke J. 2014. Multi-proxy summer and winter precipitation reconstruction for southern Africa over the last 200 years. *Clim Dyn* **42**:2713–2726.
- 80 Gergis J, Gallant AJE, Braganza K, Karoly DJ, Allen K, Cullen L, D'Arrigo R, Goodwin I, Grierson P, McGregor S. 2012. On the long-term context of the 1997–2009 “Big Dry” in South-Eastern Australia: insights from a 206-year multi-proxy rainfall reconstruction. *Clim Change* **111**:923–944.
- 81 Cook ER, Woodhouse CA, Eakin CM, Meko DM, Stahle DW. 2004. Long-term aridity changes in the Western United States. *Science* **306**:1015–1018.
- 82 Cook ER, Seager R, Kushnir Y, Briffa KR, Büntgen U, Frank D, Krusic PJ, Tegel W, van der Schrier G, Andreu-Hayles L, Baillie M, Baittinger C, Bleicher N, Bonde N, Brown D, Carrer M, Cooper R, Čufar K, Dittmar C, Esper J, Griggs C, Gunnarson B, Günther B, Gutierrez E, Haneca K, Helama S, Herzog F, Heussner KU, Hofmann J, Janda P, Kontic R, Köse N, Kyncl T, Levanič T, Linderholm H, Manning S, Melvin TM, Miles D, Neuwirth B, Nicolussi K, Nola P, Panayotov M, Popa I, Rothe A, Seftigen K, Seim A, Svarva H, Svoboda M, Thun T, Timonen M, Touchan R, Trotsiuk V, Trouet V, Walder F, Ważny T, Wilson R, Zang C. 2015. Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. *Science Advances* **1**:e1500561.
- 83 Cook ER, Anchukaitis KJ, Buckley BM, D'Arrigo RD, Jacoby GC, Wright WE. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science* **328**:486–489.
- 84 Lamb HH. 1970. Volcanic dust in the atmosphere; with a chronology and assessment of its meteorological significance. *Phil Trans R Soc A* **A266**:425–533.
- 85 Pfister C. 1999. *Wetternachtersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995)*. Bern, Stuttgart, Wien: P. Haupt, 304 S.
- 86 Brazdil R, Řezníčková L, Valášek H, Dolák L, Kotyza O. 2016. Effects on the Czech Lands of the 1815 eruption of Mount Tambora: responses, impacts and comparison with the Lakagígar eruption of 1783. *Clim Past Discuss* (in review).
- 87 Harington 1992, op. cit.
- 88 Büntgen U, Trnka M, Krusic PJ, Kyncl T, Kyncl J, Luterbacher J, Zorita E, Ljungqvist FC, Auer I, Konter O, Schneider L, Tegel W, Stepanek P, Brönnimann S, Hellmann L, Nievergelt D, Esper J. 2015. Tree-ring amplification of the early nineteenth-century summer cooling in Central Europe(a). *J Clim* **28**:5272–5288.
- 89 Tagebuch von Johann Peter Hoffmann (1753–1842), Landwirt und Friedensrichter in Lützelstein (Elsass), Bürger von Petersbach, transkribiert 1987–1992 von Dieter W. Hoffmann, Uster, gekürzte Fassung von Hartmut Moos-Gollnisch.
- 90 Trigo et al. 2009, op. cit.
- 91 Brönnimann 2015, op. cit.
- 92 Brönnimann 2015, op. cit.
- 93 Brugnara Y, Auchmann R, Brönnimann S, Allan RJ, Auer I, Barriendos M, Bergstrom H, Bhend J, Brazdil R, Comp GP, Cornes RC, Dominguez-Castro F, van Engelen AFV, Filipiak J, Holopainen J, Jourdain S, Kunz M, Luterbacher J, Maugeri M, Mercalli L, Moberg A, Mock CJ, Pichard G, Reznckova L, van der Schrier G, Slonosky V, Ustrnul Z, Valente MA, Wypych A, Yin X. 2015. A collection of sub-daily pressure and temperature observations for the early instrumental period with a focus on the “year without a summer” 1816. *Clim Past* **11**:1027–1047.
- 94 Guevara-Murua A, Williams CA, Hendy EJ, Rust AC, Cashman KV. 2014. Observations of a stratospheric aerosol veil from a tropical volcanic eruption in December 1808: is this the Unknown 1809 eruption? *Clim Past* **10**:1707–1722.
- 95 Anet JG, Muthers S, Rozanov EV, Raible CC, Stenke A, Shapiro AI, Brönnimann S, Arfeuille F, Brugnara Y, Beer J, Steinhilber F, Schmutz W, Peter T. 2014. Impact of solar vs. volcanic activity variations on tropospheric temperatures and precipitation during the Dalton Minimum. *Clim Past* **10**:921–938.
- 96 Pfister 1999, op. cit.
- 97 Chenoweth M. 2009. Daily synoptic weather map analysis of the New England cold wave and snowstorms of 5 to 11 June 1816. In: Dupigny-Giroux LA, Mock CJ (eds.). *Historical Climate Variability and Impacts in North America*. Netherlands: Springer, S. 107–121.
- 98 Brohan P, Ward C, Willetts G, Wilkinson C, Allan R, Wheeler D. 2010. Arctic marine climate of the early nineteenth century. *Clim Past* **6**:315–324.
- 99 Chenoweth 2009, op. cit.
- 100 Stommel HM, Stommel E. 1983. *Volcano Weather. The Story of 1816, the Year Without a Summer*. Newport: Seven Seas Press, 177 S.
- 101 Auchmann R, Brönnimann S, Breda L, Bühler M, Spadin R, Stickler A. 2012. Extreme climate, not extreme weather: the summer of 1816 in Geneva, Switzerland. *Clim Past* **8**:325–335.
- 102 Auchmann et al. 2012, op. cit.
- 103 Auchmann R, Arfeuille F, Wegmann M, Franke J, Barriendos M, Prohom M, Sanchez-Lorenzo A, Bhend J, Wild M, Folini D, Stepanek P, Brönnimann S. 2013. Impact of volcanic stratospheric aerosols on diurnal temperature range in Europe over the past 200 years: Observations versus model simulations. *J Geophys Res Atm* **118**:9064–9077.
- 104 Auchmann et al. 2012, op. cit.
- 105 Zschokke H. 1817. Meteorologische Beobachtungen vom zweiten Halbjahr 1816; nebst den Krankheitsgeschichten dieses Zeitraums. *Archiv der Medizin, Chirurgie und Pharmazie* **3**:209–227.
- 106 Auchmann et al. 2013, op. cit.
- 107 Hay D. 2010. *Young Romantics: The Shelleys, Byron and other tangled lives*. New York: Farrar, Straus and Giroux, 364 S.
- 108 Auchmann et al. 2013, op. cit.

- 109 Bhend J, Franke J, Folini D, Wild M, Brönnimann S. 2012. An ensemble-based approach to climate reconstructions. *Clim Past* **8**:963–976.
- 110 Arfeuille et al. 2014, op. cit.
- 111 Brohan P, Allan R, Freeman E, Wheeler D, Wilkinson C, Williamson F. 2012. Constraining the temperature history of the past millennium using early instrumental observations. *Clim Past* **8**:1551–1563.
- 112 Mann ME, Fuentes JD, Rutherford S. 2012. Underestimation of volcanic cooling in tree-ring-based reconstructions of hemispheric temperatures. *Nat Geosci* **5**:202–205.
- 113 Anet et al. 2014, op. cit.
- 114 Stoffel M, Khodri M, Corona C, Guillet S, Poulain V, Bekki S, Guiot J, Luckman BH, Oppenheimer C, Lebas N, Beniston M, Masson-Delmotte V. 2015. Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. *Nat Geosci* **8**:784–788.
- 115 Thompson DWJ, Baldwin MP, Wallace JM. 2002. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. *J Clim* **15**:1421–1428.
- 116 Guevara-Murua et al. 2014, op. cit.
- 117 Anet et al. 2014, op. cit.
- 118 Muthers S, Anet JG, Stenke A, Raible CC, Rozanov E, Brönnimann S, Peter T, Arfeuille FX, Shapiro AI, Beer J, Steinhilber F, Brugnara Y, Schmutz W. 2014. The coupled atmosphere–chemistry–ocean model SOCOL-MPIOM. *Geosci Model Dev* **7**:2157–2179.
- 119 Muthers et al. 2014, op. cit.
- 120 Vupputuri RKR. 1992. The Tambora eruption in 1815 provides a test on possible global climatic and chemical perturbations in the past. *Natural Hazards* **5**:1–16.
- 121 Iles CE, Hegerl GC, Schurer AP, Zhang X. 2013. The effect of volcanic eruptions on global precipitation. *J Geophys Res* **118**:8770–8786.
- 122 Wegmann M, Brönnimann S, Bhend J, Franke J, Folini D, Wild M, Luterbacher J. 2014. Volcanic influence on European summer precipitation through monsoons: possible cause for “years without summer”. *J Clim* **27**:3683–3691.
- 123 Joseph R, Zeng N. 2011. Seasonally modulated tropical drought induced by volcanic aerosol. *J Clim* **24**:2045–2060.
- 124 Kandlbauer J, Hopcroft PO, Valdes PJ, Sparks RSJ. 2013. Climate and carbon cycle response to the 1815 Tambora volcanic eruption. *J Geophys Res* **118**:12497–12507.
- 125 Wegmann et al. 2014, op. cit.
- 126 Wegmann et al. 2014, op. cit.
- 127 Maher N, McGregor S, England MH, Sen Gupta A. 2015. Effects of volcanism on tropical variability. *Geophys Res Lett* **42**:6024–6033.
- 128 Stenchikov G, Delworth TL, Ramaswamy V, Stouffer RJ, Wittenberg A, Zeng FR. 2009. Volcanic signals in oceans. *J Geophys Res* **114**:D16104.
- 129 Frölicher TL, Joos F, Raible CC. 2011. Sensitivity of atmospheric CO₂ and climate to explosive volcanic eruptions. *Biogeosciences* **8**:2317–2339.
- 130 Fischer EM, Luterbacher J, Zorita E, Tett SFB, Casty C, Wanner H. 2007. European climate response to tropical volcanic eruptions over the last half millennium. *Geophys Res Lett* **34**:L05707.
- 131 Wegmann et al. 2014, op. cit.
- 132 Driscoll S, Bozzo A, Gray LJ, Robock A, Stenchikov G. 2012. Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) simulations of climate following volcanic eruptions. *J Geophys Res* **117**:D17105.
- 133 Graf HF, Kirchner I, Robock A, Schult I. 1993. Pinatubo eruption winter climate effects: model versus observations. *Clim Dyn* **9**:81–93.
- 134 Robock A. 2000. Volcanic eruptions and climate. *Rev Geophys* **38**:191–219.
- 135 Baldwin MP, Dunkerton TJ. 2001. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science* **294**:581–584.
- 136 Brönnimann 2015, op. cit.
- 137 Miller GH, Geirsdottir A, Zhong YF, Larsen DJ, Otto-Bliesner BL, Holland MM, Bailey DA, Refsnider KA, Lehman SJ, Southon JR, Anderson C, Björnsson H, Thordarson T. 2012. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks. *Geophys Res Lett* **39**:L02708.
- 138 Frölicher et al. 2011, op. cit.
- 139 Kandlbauer et al. 2013, op. cit.
- 140 Frölicher et al. 2011, op. cit.
- 141 Wood 2014, op. cit.
- 142 Wood 2014, op. cit.
- 143 Puma MJ, Bose S, Chon SY, Cook BI. 2015. Assessing the evolving fragility of the global food system. *Environ Res Lett* **10**:024007.
- 144 Flückiger S. 2015. *Tambora 1815: Impacts of a volcanic eruption on climate and crop yields in Switzerland*. MSc. Universität Bern, 80 S.
- 145 Wood 2014, op. cit.
- 146 Luterbacher J, Pfister C. 2015. The year without a summer. *Nat Geosci* **8**:246–248.
- 147 Craig L, García-iglesias C. 2010. Business Cycles. In: Broadberry S, O’Rourke KH (eds.). *The Cambridge Economic History of Modern Europe Volume 1: 1700–1870*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 122–144.
- 148 Post 1977, op. cit.
- 149 Krämer D. 2015. «Menschen grasten nun mit dem Vieh». *Die letzte grosse Hungerkrise der Schweiz 1816/17*. Basel: Schwabe, 527 S.
- 150 Dudzik P. 1987. *Innovation und Investition. Technische Entwicklung und Unternehmerentscheide in der schweizerischen Baumwollspinnerei 1800 bis 1916*. Zürich: Chronos-Verlag, 634 S.
- 151 Humair C. 2004. *Développement économique et état central (1815–1914): Un siècle de politique douanière suisse au service des élites*. Bern: Peter Lang, 870 S.
- 152 Post 1977, op. cit.
- 153 Krämer 2015, op. cit.
- 154 Buchheim C. 1997. *Einführung in die Wirtschaftsgeschichte*. München: C.H. Beck, 173 S.
- 155 Plumpe W. 2010. *Wirtschaftskrisen. Geschichte und Gegenwart*. München: C.H.Beck, 127 S.
- 156 Post 1977, op. cit.
- 157 Collet D, Krämer D. 2016. Famines in Austria, Germany and Switzerland – natural and political environments. In: Alfani G, Ó Gráda C (eds.). *Famine in Europe*. Cambridge University Press (in print).
- 158 Krämer 2015, op. cit.
- 159 Vasold M. 2001. Das Jahr des grossen Hungers. Die Agrarkrise von 1816/17 im Nürnberger Raum. *Zeitschrift für bayerische Landesgeschichte* **64**:745–782.
- 160 Pfister C. 1998. Deregulierung. Vom Paternalismus zur Marktwirtschaft 1798–1856. *Berner Zeitschrift für Geschichte und Heimatkunde* **60**:160–175.
- 161 Bade KJ. 2000. *Europa in Bewegung. Migration vom späten 18. Jahrhundert bis zur Gegenwart*. München: C.H.Beck, 510 S.
- 162 Grabbe HJ. 2001. *Vor der grossen Flut. Die europäische Migration in die Vereinigten Staaten von Amerika 1783–1820*. Stuttgart: Franz Steiner Verlag, 458 S.
- 163 Behringer 2015, op. cit.
- 164 Specker L. 1993. Die grosse Heimsuchung. Das Hungerjahr 1816/17 in der Ostschweiz (1. Teil). *Neujahrsblatt* **133**:7–42.
- 165 Bayer D. 1966. *O gib mir Brot. Die Hungerjahre 1816 und 1817 in Württemberg und Baden*. Ulm: Deutsches Brotmuseum, 132 S.
- 166 Spamer A. 1916. Bayerische Denkmale aus der «theuren Zeit» vor 100 Jahren. *Bayerische Hefte für Volkskunde* **3**:145–266.
- 167 Netting RM. 1981. *Balancing on an Alp. Ecological change and continuity in a Swiss mountain community*. Cambridge: Cambridge University Press, 278 S.
- 168 Ostrom E. 1990. *Governing the commons. The evolution of institutions for collective action*. Cambridge: Cambridge University Press, 280 S.
- 169 Mathieu J. 2015. *Die Alpen. Raum – Kultur – Geschichte*. Ditzingen: Reclam, 254 S.
- 170 Krämer 2015, op. cit.

- 171 Devereux S. 2007. Introduction: from "old famines" to "new famines". In: Devereux S (ed.). *The new famines. Why famines persist in an era of globalization*. London: Routledge, S. 1–26.
- 172 von Greyerz T. 1918. Das Hungerjahr 1817 im Thurgau. *Thurgauische Beiträge zur vaterländischen Geschichte* **57/58**:64–171.
- 173 Soland R. 2011. Johann Conrad Freyenmuth (1775–1843) und seine Tagebücher. *Thurgauische Beiträge zur vaterländischen Geschichte* **146**.
- 174 Brönnimann 2015, op. cit.
- 175 Flückiger 2015, op. cit.
- 176 Flückiger 2015, op. cit.
- 177 Krämer 2015, op. cit.
- 178 Krämer 2015, op. cit.
- 179 Ingram MJ, Farmer G, Wigley TML. 1981. Past climates and their impact on man: A review. In: Wigley TML, Ingram MJ, Farmer G (eds.). *Climate and history*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 3–50.
- 180 Pfister 1999, op. cit.
- 181 Krämer 2015, op. cit.
- 182 Luterbacher and Pfister 2015, op. cit.
- 183 Brönnimann 2015, op. cit.
- 184 Flückiger 2015, op. cit.
- 185 Flückiger 2015, op. cit.
- 186 Behringer 2015, op. cit.
- 187 Anonymus. 1816. Untitled. In: *Neue Zürcher Zeitung* June 21, 1816 and July 9, 1816.
- 188 Ó Gráda C. 2009. *Famine. A short history*. Princeton: Princeton University Press, 327 S.
- 189 Krämer 2015, op. cit.
- 190 Krämer 2015, op. cit.
- 191 Krämer 2015, op. cit.
- 192 Staub K. 2016. Der vermessene menschliche Körper als Spiegel der Ernährungs- und Gesundheitsverhältnisse am Ende des Ersten Weltkrieges. In: Krämer D, Pfister C, Segesser DM (eds.). «Woche für Woche neue Preisaufschläge». *Nahrungsmittel-, Energie- und Ressourcenkonflikte in der Schweiz des Ersten Weltkrieges*. Basel: Schwabe (in print).
- 193 Krämer 2015, op. cit.
- 194 Schürmann M. 1974. *Bevölkerung, Wirtschaft, und Gesellschaft in Appenzell Innerrhoden im 18. und frühen 19. Jahrhundert*. Appenzell: Historischer Verein Appenzell, 356 S.
- 195 Millman S. 1990. Hunger in the 1980s. Backdrop for policy in the 1990s. *Food Policy* **15**:277–285.
- 196 Devereux S. 1993. *Theories of famine*. New York: Harvester Wheatsheaf, 288 S.
- 197 Millman S, Kates RW. 1990. Toward understanding hunger. In: Newman LF (ed.). *Hunger in history. Food shortage, poverty, and deprivation*. Oxford: Basil Blackwell, S. 3–24.
- 198 Krämer D. 2012. Vulnerabilität und die konzeptionellen Strukturen des Hungers. Eine methodische Annäherung. In: Collet D, Lassen T, Schanbacher A (eds.). *Handeln in Hungerkrisen. Neue Perspektiven auf soziale und klimatische Vulnerabilität*. Göttingen: Universitätsverlag, S. 45–65.
- 199 Pfister C. 2010. The vulnerability of past societies to climatic variation. A new focus for historical climatology in the twenty-first century. *Clim Change* **100**:25–31.
- 200 Doppler S. 2008. *Alters-, Aktivitäts- und Krankheitsmerkmale in der menschlichen Knochenmikrostruktur: Eine vergleichende Studie einer individualaltersbekannten historischen Population mit rezenten Menschen*. Diss. Ludwig-Maximilians-Universität München, 503 S.
- 201 Thompson EP. 1991. The moral economy reviewed. In: Thompson EP (ed.). *Customs in common*. London: The Merlin Press, S. 259–351.
- 202 Gailus M, Volkmann H. 1994 (eds.). *Der Kampf um das tägliche Brot. Nahrungsmangel, Versorgungspolitik und Protest 1770–1990*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 477 S.
- 203 Randall A, Charlesworth A. 2000. The moral economy. Riot, markets and social conflict. In: Randall A, Charlesworth A (eds.). *Moral economy and popular protest: crowds, conflict and authority*. Basingstoke: Macmillan, S. 1–32.
- 204 Post 1977, op. cit.
- 205 Behringer 2015, op. cit.
- 206 Post 1977, op. cit.
- 207 Behringer 2015, op. cit.
- 208 Skeen CE. 1981. "The year without a summer". A historical view. *J Early Repub* **1**:51–67.
- 209 Post 1977, op. cit.
- 210 Henrioud M. 1917. L'année de la misère en Suisse et plus particulièrement dans le canton de Vaud (1816–1817). *Revue historique vaudoise* **25**:21–22.
- 211 Krämer 2015, op. cit.
- 212 Wetter O, Pfister C, Weingartner R, Luterbacher J, Reist T, Trosch J. 2011. The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. *Hydrol Sci J* **56**:733–758.
- 213 Arbeitsgruppe Wasserstandsvorhersage Bodensee. 2011. Ermittlung des Extremwasserstandes (ca. HW1000) für den Bodensee (Ober- und Untersee). URL: <http://www.bodensee-hochwasser.info>
- 214 Tulla JG. 1825. *Ueber die Rektifikation des Rheins von seinem Austritt aus der Schweiz bis zu seinem Eintritt in das Grossherzogtum Hessen*. Karlsruhe: Chr. Fr. Müller's Hofbuchdruckerey, 60 S.
- 215 Shelley MW. 1831. *Frankenstein: Or, the modern Prometheus*. London: Colburn and Bentley, 163 S.
- 216 Lessing HE. 2003. *Automobilität. Karl Drais und die unglaublichen Anfänge*. Leipzig: MAXIME Verlag Maxi Kutschera. 527 S.
- 217 Bodenmann T, Brönnimann S, Hadorn GH, Krüger T, Weissert H. 2011. Perceiving, explaining, and observing climatic changes: An historical case study of the "year without a summer" 1816. *Meteorol Z* **20**:577–587.
- 218 Krüger T. 2006. *Die Entdeckung der Eiszeiten. Internationale Rezeption und Konsequenzen für das Verständnis der Klimageschichte*. Diss. Universität Bern, 619 S.
- 219 Dörries 2005, op. cit.
- 220 Humphreys 1913, op. cit.
- 221 Dörries 2005, op. cit.
- 222 Humphreys 1913, op. cit.
- 223 Lamb 1970, op. cit.
- 224 Stommel and Stommel 1983, op. cit.
- 225 Puma et al. 2015, op. cit.
- 226 Wood 2014, op. cit.
- 227 Behringer 2015, op. cit.
- 228 Wood 2014, op. cit.
- 229 Behringer 2015, op. cit.
- 230 Self S, Gertisser R. 2015. Tying down eruption risk. *Nat Geosci* **8**:248–250.
- 231 Puma et al. 2015, op. cit.

Bildnachweise der Randabbildungen

- S. 3 Foto von Andrea Kaiser
- S. 4 NASA / Foto ID: ISS020-E-6563
- S. 5 Foto von Andrea Kaiser
- S. 6 Russel WA. 1863. On the Physical Geography of the Malay Archipelago. *The Journal of the Royal Geographical Society of London* **33**:217–234.
- S. 7 Foto von Richard P. Hoblitt (United States Geological Survey / Cascades Volcano Observatory)
- S. 8 Bild von Stefan Brönnimann
- S. 9 © Geology Today / Foto von Katie Preece / In: Gertisser R, Self S. 2015. The great 1815 eruption of Tambora and future risks from large-scale volcanism. *Geology Today* **31**:132–136.
- S. 12 Foto von Carolina Barria Kemp (CC BY SA 2.0)
- S. 13 NASA / Foto ID: STS043-22-23
- S. 14 © North Greenland Eemian Ice Drilling project (NEEM)
- S. 15 Foto von Anton Croos (CC BY SA 3.0) / URL:https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lunar_Eclipse_on_10th_of_December_2011.jpg#filelinks
- S. 16 Foto von Ulf Büntgen / In: Büntgen U et al. 2015. Tree-Ring Amplification of the Early-19th Century Summer Cooling in Central Europe. *J Clim* **28**:5272–5288.
- S. 17 (CC0 1.0) / URL:<https://pixabay.com/en/drought-earth-desert-aridity-711651/>
- S. 18 Fotolia / Image ID: #53651446 / Foto von Gina Sanders
- S. 19 Foto von Andrea Kaiser
- S. 20 Zschokke H. 1817. Meteorologische Beobachtungen vom zweiten Halbjahr 1816; nebst den Krankheitsgeschichten dieses Zeitraums. *Archiv der Medizin, Chirurgie und Pharmazie* **3**:209–227.
- S. 22 Foto von Andrea Kaiser
- S. 23 Bild von Céline Dizerens
- S. 24 NASA / LANCE: Rapid Response Image of FAS_India4 Subset 08 August 2015
- S. 25 NOAA NMFS SWFSC Antarctic Marine Living Resources (AMLR) Program / Photo by Dr. Mike Goebel, NOAA NMFS SWFSC.
- S. 26 (CC0 1.0) / URL:<https://www.pexels.com/photo/forest-trees-dark-fog-6992/>
- S. 27 © Neueste medizinische Nachrichten
- S. 28 © RMN-Grand Palais (musée d'Orsay) / Christian Jean / Hervé Lewandowski / Sortie de la garnison de Huningue le 20 août 1815, c.1892, Edouard Detaille (1848–1912)
- S. 29 © Stiftung für appenzellische Volkskunde, Herisau
- S. 32 Foto von Alexander Basok
- S. 33 Verein «Projekt 1816»
- S. 34 © bpk – Bildagentur für Kunst, Kultur und Geschichte / Hep-Hep-Krawalle in Frankfurt am Main, 1819, Johann Michael Voltz (1784–1858)
- S. 36 Postkarte «Die Juliersäulen am Julierpass». Engadin Press Co., Samedan. 10800
- S. 37 (CC0 1.0) / URL:<http://www.e-rara.ch/doi/10.3931/e-rara-20159>
- S. 38 © Wellcome Library, London (CC BY 4.0) / Image ID: L0027125 / Frankenstein observing the first stirrings of his creature. Engraving by W. Chevalier after Th. von Holst, 1831.
- S. 39 Fotolia / Image ID: #21730996 / Foto von Jörn Buchheim
- S. 40 Foto von ŠJů (CC BY SA 3.0) / URL:https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hudlice,_Jungmannova_18,_hromosvod.jpg
- S. 41 Foto von Céline Dizerens
- S. 42 Geographische Anstalt von Velhagen und Klasing in Leipzig. 1893. *Andrees Handatlas*, Dritte Auflage, Verlag von Velhagen und Klasing, Bielefeld and Leipzig.