

1. Einleitung

Was sind grossräumige Klimaschwankungen? Die Begriffe „Klimaschwankung“, „Klimaänderung“ oder „Klimavariabilität“ werden oft nicht immer im selben Sinne verwendet und sind abhängig von der betrachteten Zeitskala, ebenso ist „grossräumig“ keine klar definierte Raumeinheit.

Im Kontext dieser Vorlesung ist eine grossräumige Klimaschwankung *eine Abweichung der klimatischen Verhältnisse vom mittleren Klima auf einer kontinentalen bis globalen Skala über ein Jahr bis mehrere Jahrzehnte*. Die Zeitskala ist dabei relativ willkürlich festgelegt; tatsächlich zeigt die Atmosphäre Schwankungen in allen Zeitskalen. Der Begriff „Klimaschwankung“ impliziert auch, dass die Abweichung zeitlich begrenzt, reversibel oder oszillatorisch ist (ansonsten wäre der Begriff „Klimaänderung“ angebracht). Bleibt zu definieren was „Klima“ respektive „klimatische Verhältnisse“ bedeutet. Umfasst „Klima“ nur die Atmosphäre? Oder auch Ozeane, Biosphäre etc.? Wir folgen hier der Definition von Schönwiese (1995):

- Das Klima wird als eine Folge der physikochemischen Prozesse und Wechselwirkungen im Klimasystem sowie der externen Einflüsse auf dieses System gesehen.
- Der ursächlicher Aspekt: Das terrestrische Klima beschreibt statistisch die relevanten Klimaelemente an einem Standort, in einer Region oder weltweit während einer zeitlichen Grössenordnung und charakterisiert die Gegebenheiten und Änderungen der Erdatmosphäre.
- Der beschreibender Aspekt: Klimaänderungen sind dann alle die in diesem Rahmen ablaufenden zeitlichen Variationen der Prozesse (im Klimasystem) und der statistischen Charakteristika (der Klimaelemente) in einem bestimmten Raum und einer bestimmten Zeit.

Beispiele für grossräumige Klimaschwankungen sind (vgl. Fig. 1):

- Grossräumige Dürren (Zeitskala 1-10 Jahre, Raumskala: regional bis kontinental)
- El Niño-La Niña Ereignisse (1-2 Jahre, hemisphärisch bis global)
- Schwankungen der Nordatlantischen Oszillation (Jahre, kontinental)
- Klimatische Folgen von Vulkanausbrüchen (1-2 Jahre, hemisphärisch bis global)
- Schwankungen der Sonnenaktivität (>10 Jahre, global).

Das Verständnis von grossräumigen Klimaschwankungen ist wichtig für die Beurteilung des vergangenen und zukünftigen Klimas. Darüber hinaus erhofft man sich Erkenntnisse, die zu einer besseren saisonalen Prognose führen. Klimaschwankungen können mit starken Dürren, Hochwassern, Kälte- oder Hitzeperioden verbunden sein. Entsprechend ist das Interesse an Vorhersagen gross (z. B. El Niño). Sie können auch zu extremen Wetterereignissen führen (respektive deren Wahrscheinlichkeit verändern); extreme Wetterereignisse an sich sind aber keine „grossräumigen Klimaschwankungen“ und werden hier deshalb nicht weiter behandelt. Ebenfalls nur am Rande behandelt wird der Einfluss des Menschen auf das Klima. Das ist zwar unbestrittenermassen ein zentraler Einfluss auf das Klima, wird jedoch durch andere Lehrveranstaltungen (701-0412-00 Klimasysteme, PD DR. Ch. Appenzeller, 651-2117-00 Geschichte des globalen Klimas, Prof. Atsumu Ohmura) genügend gut abgedeckt. Ausserdem müsste der anthropogene Einfluss wohl eher als „Klimaänderung“ denn als „Klimaschwankung“ bezeichnet werden.

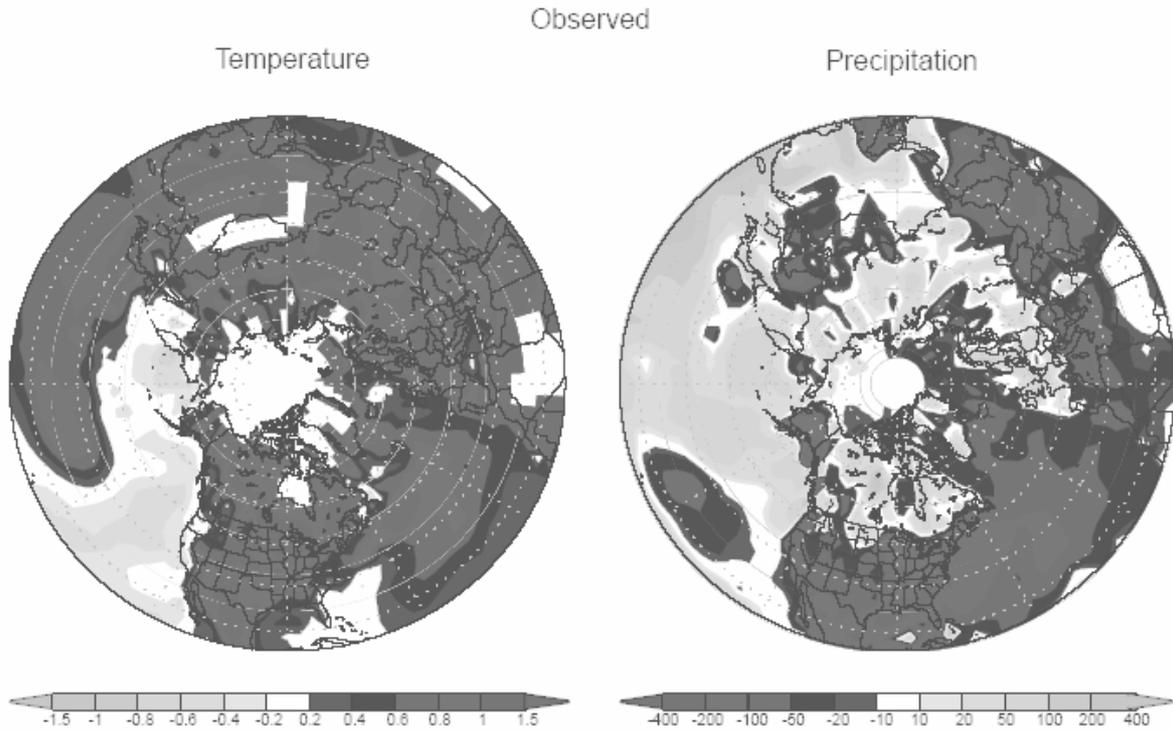


Fig. 1: Beispiel einer grossräumigen Klimaschwankung: Abweichungen von Temperatur und Niederschlag von 1998 bis 2002 im Vergleich zum langjährigen Mittel (aus Hoerling und Kumar, 2003). Die Dürre dauert in Teilen der USA noch immer an.

Das folgende Schema (Fig. 2) ordnet verschiedener Mechanismen, welche zu grossräumigen Klimaschwankungen führen, zeitlichen Skalen zu.

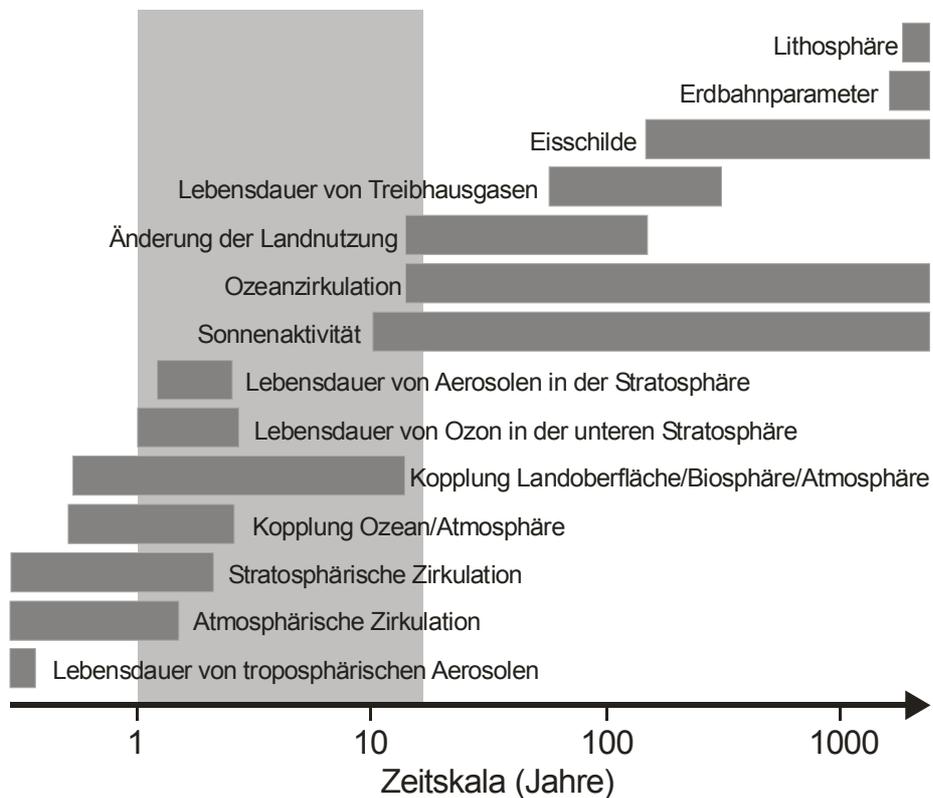


Fig. 2: Schematische Darstellung der wichtigsten Mechanismen, welche zu grossräumigen Klimaschwankungen führen, und ihren zeitlichen Skalen. Der in dieser Vorlesung behandelte Skalenausschnitt ist markiert.

2. Methoden

Die Analyse grossräumiger Klimaschwankungen erfordert grossräumige Daten über den zu untersuchenden Zeitraum (sowie über Vergleichszeiträume). Diese Daten können gemessen worden sein, aus direkten oder indirekten Beobachtungen abgeleitet, aus natürlichen Klimaarchiven („Proxydaten“) rekonstruiert oder mit einem numerischen Modell erzeugt worden sein. In diesem Kapitel wird für verschiedene Zeitabschnitte dargelegt, welche Datentypen es gibt, welche Qualitätsaspekte zu berücksichtigen sind, und wie daraus klimatologische Datensätze erstellt werden. Am Schluss wird auch auf die Auswertung sowie auf Modelle eingegangen.

2.1. Heutiges Klima

Riesige Mengen an meteorologischen Daten werden heute weltweit stündlich und täglich gemessen und verwaltet. Diese Daten erlauben einen detaillierten Einblick in den Zustand der globalen Atmosphäre zu einem (fast) beliebigen Zeitpunkt. Dank guter Kommunikation sind die Daten schnell verfügbar und dank guten Analysetools können daraus hochwertige Datenprodukte erstellt werden. Die Qualität dieser Daten ist für klimatologische Fragestellungen meist sehr gut, sie sind dreidimensional und stehen mehrere Jahrzehnte zurück zur Verfügung. Unser Prozesswissen beruht zu einem grossen Teil aus diesen Daten. Leider ist das ein verhältnismässig kurzer (und nicht notwendigerweise repräsentativer) Zeitausschnitt für die Analyse grossräumiger Klimaschwankungen.

2.1.1. Beobachtungsnetz

Meteorologische Daten stammen von verschiedenen Plattformen und Stationstypen: Automatische Wetterstationen liefern in-situ Messungen in Bodennähe (Temperatur, Luftdruck, Feuchte, Strahlung, Wind, Niederschlag, chemische Zusammensetzung, etc.). Ergänzt werden diese Messungen durch kodifizierte Beobachtungen (Bewölkungsgrad, -art und -höhe, Wetter). Auf den Ozeanen werden meteorologische Grössen (und ozeanographische Grössen) unter anderem an Bojen gemessen. Entlang der grossen Schifffahrtslinien stehen viele meteorologische Messungen von kommerziellen Schiffen zur Verfügung, ausserdem gibt es ortsfeste Wetterschiffe mit einem umfassenden Messprogramm.

Besonders wichtig für die Wettervorhersage wie auch für klimatische Analysen ist die Höhenströmung (planetare Wellen, Jet Stream, Polarwirbel, etc.). Daten hierzu stammen zum einem grossen Teil aus Radiosondierungen. Daneben tragen Linienflugzeuge einiges an Information bei. Mit Fernerkundungsmethoden können bodengestützt (RADAR wind profiler, LIDAR etc.) Höheninformationen gewonnen werden. Die wichtigste Plattform sind aber wohl die Satelliten, welche dreidimensionale Datensätze sowie Oberflächen- und Wolkeneigenschaften relativ hochaufgelöst messen. Diese Daten stehen allerdings nur für die letzten 25 Jahre zur Verfügung – ein sehr kurzer Zeitraum für klimatologische Fragestellungen.

2.1.2. Qualitätssicherung

Alle Messdaten sind immer ungenau. Qualitätssicherung gehört daher zu den wichtigsten Aufgaben eines globalen Beobachtungssystems. Ein wichtiger Schritt sind dabei standardisierte Verfahren. SO können Messungen auch tatsächlich verglichen werden. Wichtig ist die regelmässige Kalibration der Geräte, die Etablierung eines Weltstandards auf den Transferstandards und letztlich die einzelnen Kalibrationen zurückgeführt werden können. Sehr wichtige Aspekte sind auch die Wartung der Geräte und der Einsatz von gut geschultem Personal.

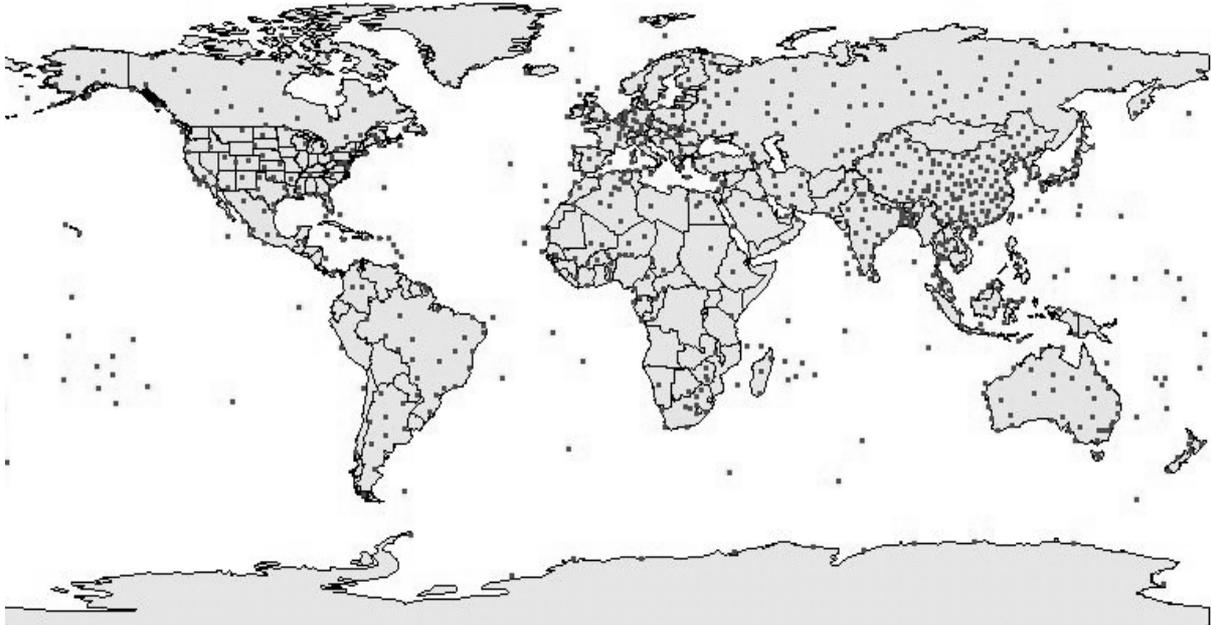


Fig. 3: CARDS Radiosondennetz 2000 (http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/cards/cards_map_act.html).

Bei verschiedenen Messsystemen werden regelmässig Vergleichskampagnen mehrere Systeme parallel durchgeführt. Je nach Messverfahren sind Laborexperimente eine wichtige Grundlage. Die Kalibrationen führen oft zu Korrekturen, die im Nachhinein vorgenommen werden. Für die Wettervorhersage werden also oft noch unkorrigierte Daten verwendet, während für weniger zeitkritische klimatologische Studien dann die korrigierten Werte verwendet werden. Wenn die Daten aller Stationen vorliegen, werden vor allem auch statistische Verfahren eingesetzt, um die Qualität der Daten zu beurteilen und Fehler und Ausreisser festzustellen.

2.1.3. Datenprodukte: Analyse/Datenassimilation

Die in 2.1.1. erwähnten Messplattformen liefern alle operationell Daten für die Wettervorhersage. Abgesehen von den Satellitendaten handelt es sich aber um Punktdaten ohne räumliche Abdeckung. Sie können zur Klimaforschung natürlich durchaus verwendet werden. Oft wäre es aber wichtig, räumliche Felder analysieren zu können. Diese gewinnt man entweder aus zeitlich gemittelten Stationsdaten (z. B. durch Interpolation) oder man erzeugt zuerst zeitlich hochaufgelöste Felder und mittelt dann diese. Letzteres ist die bevorzugte Methode für diejenige Zeitspanne, wo zeitlich hochaufgelöste Felder bereits als Nebenprodukt der Wettervorhersage zur Verfügung stehen (für die erste Methode können Rekonstruktionen, wie in 2.2.3. beschrieben, verwendet werden).

Früher war die Erstellung von Feldern aus allen Beobachtungsdaten für einen bestimmten Zeitpunkt ein manueller Vorgang (Handanalyse): Meteorologen zeichneten Isolinien in Wetterkarten aufgrund der Punktmessungen unter Zuhilfenahme ihrer Erfahrung. Ausreisser wurden nicht berücksichtigt, Kurven geglättet gezeichnet. Der Analyst kannte die Situation vom Vortag und verwendete diese Information sowie seine jahrelange Erfahrung über die Entwicklung von ähnlichen Wettersituationen. Dieses Verfahren ist subjektiv, aber kann durchaus Produkte hoher Qualität liefern (Beispiel: Berliner Stratosphärendaten 1957-1997). Heute werden automatische Verfahren verwendet. Die numerische Wettervorhersage braucht Anfangswerte für die Modellierung an jedem Gitterpunkt und für eine grosse Zahl Variablen. Selbst das heutige dichte Messnetz liefert nicht genügend Daten, um damit die Anfangswerte vollständig zu bestimmen, und die Daten haben Fehler. Genau wie bei der Handanalyse muss

Information über Zusammenhänge in der Atmosphäre bei der Festlegung des Anfangszustandes eingebracht werden. Diese Zusatzinformation ist sowohl statistischer als auch dynamischer Art, das heisst es wird einerseits ein Interpolations- und Filterungsverfahren verwendet, andererseits ein numerisches Wettermodell. Nach ein paar Stunden Modellvorhersage werden die Prognosefelder des Modells verglichen mit den Daten zu diesem neuen Beobachtungszeitpunkt und die Fehler analysiert. Das statistische Interpolations- und Filterungsverfahren wird dann verwendet, um die Abweichungen zu korrigieren, und mit den resultierenden korrigierten Feldern wird das Wettermodell neu initialisiert. Dieser Vorgang wird mit Datenassimilation bezeichnet. Die Grundaufgabe der vierdimensionalen Datenassimilation lautet somit (vgl. <http://www.dwd.de/de/FundE/Analyse/Assimilation/Assimilation.html>): Aus unvollständigen und fehlerhaften Beobachtungen zusammen mit einer näherungsweise Beschreibung der Atmosphäre mit Hilfe der prognostischen Modellgleichungen soll der wahrscheinliche augenblickliche Zustand der Atmosphäre analysiert, sowie der Fehler dieser Analyse bestimmt werden. Um eine Serie von Feldern zu erhalten, wird dieser Vorgang alle 3-6 Stunden repetiert. In einfachen Worten: Die meteorologischen „Analysedaten“ stammen aus einem Wettervorhersagemodell, das alle paar Stunden in Richtung Realität (Beobachtungen) angestossen wird.

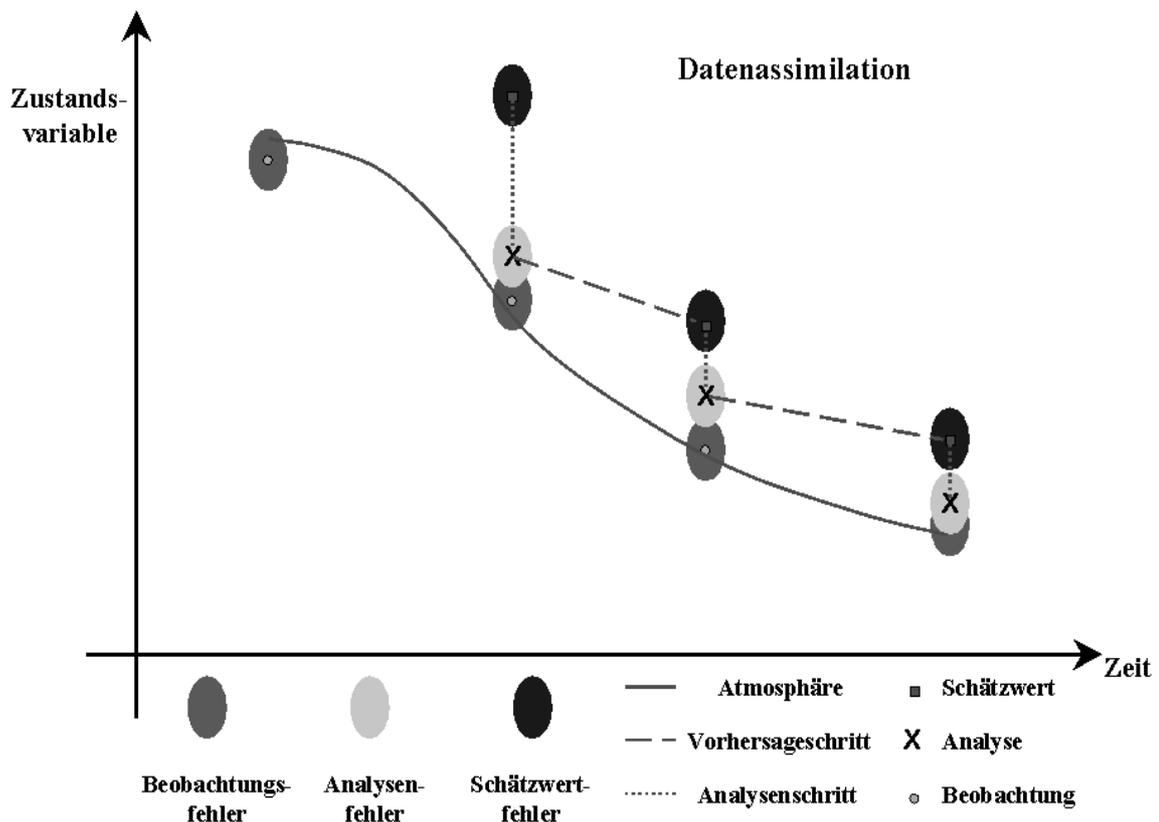


Fig. 4: Schema der Datenassimilation (<http://www.dwd.de/de/FundE/Analyse/Assimilation/Assimilation.html>).

Im operationellen Betrieb werden ständig Verbesserungen durchgeführt, Modelle und Verfahren ständig optimiert. Die Resultate sind damit zwar die besten Schätzungen für den jeweiligen Zeitpunkt, aber zeitlich nicht homogen. In gross angelegten Reanalyseprojekten werden deshalb die gesamten Daten über mehrere Jahrzehnte neu prozessiert, wobei keine Änderungen am Verfahren vorgenommen werden. Diese Reanalysedatensätze (z. B. NCEP/NCAR, ERA15, ERA40) sind die wichtigste Datenbasis für einen grossen Teil der meteorologischen und klimatologischen Literatur.

2.2. Vergangene Klimata: Frühinstrumentelle Periode

2.2.1. Frühinstrumentelle Messungen

Für vergangene Klimata ist die Datensituation schwierig und wird noch schwieriger, je weiter man zurück geht. Dies betrifft sowohl Qualität (Genauigkeit, zeitliche Auflösung) als auch Quantität (Anzahl Reihen, räumliche Abdeckung der Daten).

Normalerweise wird vor allem das Klima am Erdboden untersucht. Hier liegen grossräumige Daten zurück bis etwa Mitte des 19. Jahrhunderts vor. Aus diesen Daten können, wenn auch mit einigem statistischem Aufwand, globale oder hemisphärische, räumlich aufgelöste Datensätze erstellt werden. Die berühmte Reihe der globalen Mitteltemperatur der Climatic Research Unit (die auch in den IPCC-Berichten verwendet wird), geht zurück bis 1856 (vgl. Fig. 5 unten). Regionale Messreihen reichen zum Teil bis ins 17. Jahrhundert zurück. Die längste Messreihe ist die „Central England Temperature“, welche 1659 einsetzt (Fig. 5 oben). Dabei handelt es sich aber um eine aus vielen Messreihen zusammengesetzte Reihe. Aus dem frühen 18. Jahrhundert gibt es immerhin etwa schon ein Dutzend Reihen. Die längste Temperaturreihe der Schweiz beginnt im Jahr 1755 (Basel, Fig. 5 Mitte).

Es wäre äusserst interessant, in klimatologischen Studien auch die Höhenströmung (insbesondere Druck- und Temperaturfelder der mittleren und oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre) zu berücksichtigen. Dies würde erlauben, die Lage der Jetstreams, die Stärke des Polarwirbels und andere dynamisch relevante Grössen zu untersuchen. Solche Daten liegen heute meist nur zurück bis 1948 vor. Es gab aber vorher bereits operationelle Messungen mit Flugzeugen, Radiosonden und Pilotballonen, zum Teil zurück bis um die Jahrhundertwende (Fig. 6). Zurzeit werden Anstrengungen unternommen, diese Daten aufzubereiten.

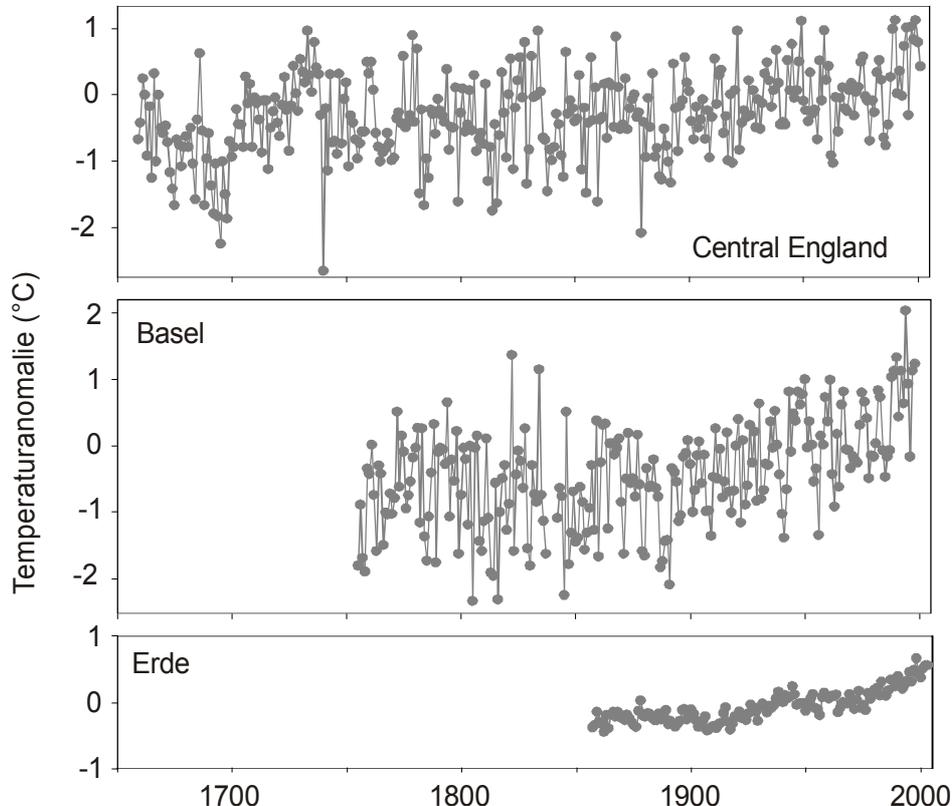


Fig. 5: Jahresmitteltemperaturen (Abweichung vom Mittel 1901-2000) in Zentralengland, Basel und gemittelt für die Erde. Die Skala ist in allen drei Figuren die selbe. Gemeinsame Merkmale sind: Anstieg der Temperatur 1900-1945 und ab 1970, dazwischen eine Plateauphase.

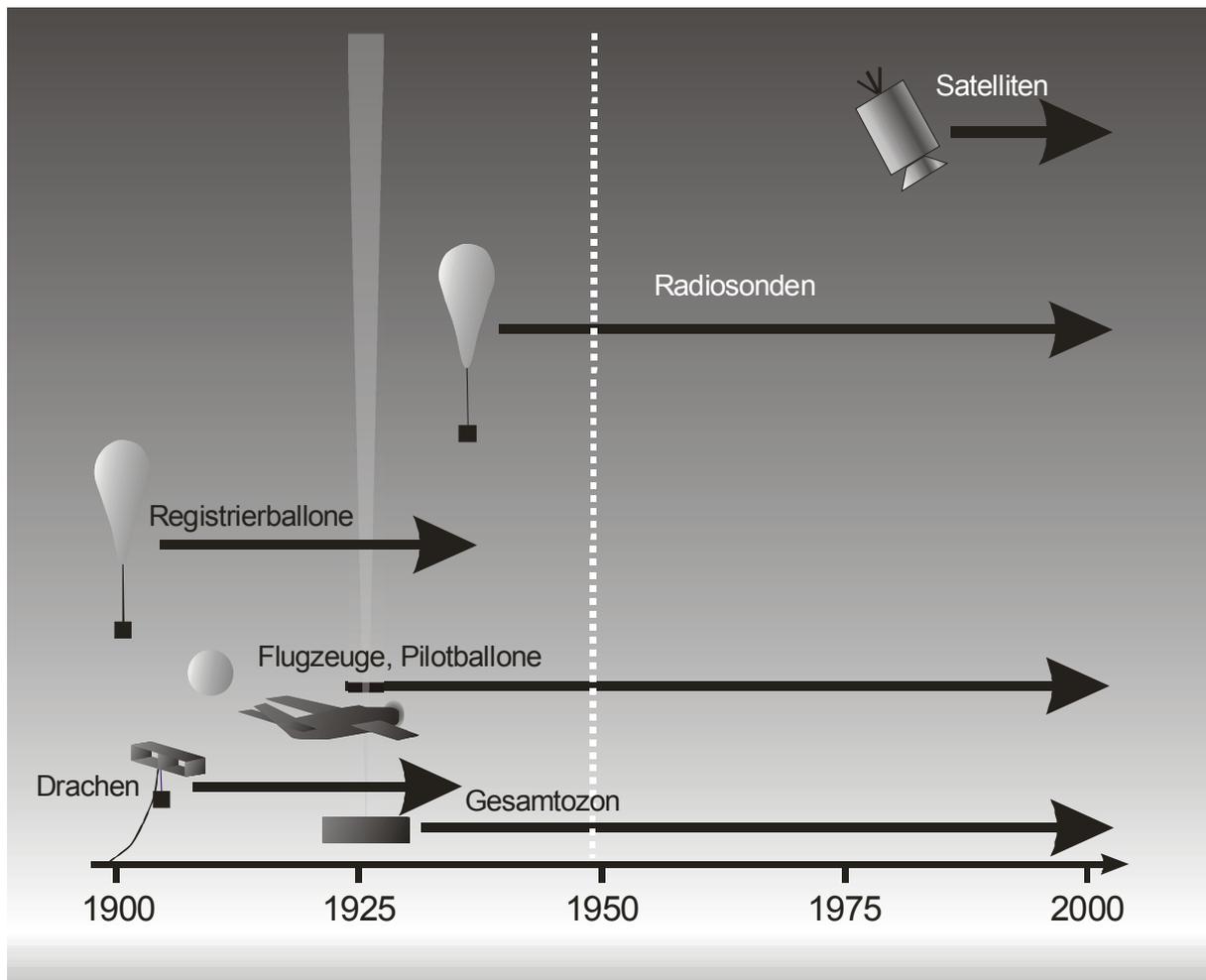


Fig. 6: Schematische Darstellung der in Archiven verfügbaren Typen von Höhendaten für das 20. Jhd. Die gestrichelte Linie markiert den Beginn der heute verfügbaren dreidimensionalen Datensätze (NCEP/NCAR Reanalyse, ab 1948).

2.2.2. Datenqualität: Inhomogenitäten

Die Qualität alter instrumenteller Daten ist ein grosses Problem. Es wurden andere Instrumente als heute verwendet, es wurde nicht nach standardisierten Verfahren gemessen und oft fehlt jede Dokumentation. Die systematischen Fehler können beträchtlich sein. Die Anzahl und räumliche Abdeckung der Messreihen ist so bescheiden, dass kaum redundante Information für statistische Methoden vorliegt. Ebenfalls sehr wichtig (für Trendanalysen) ist die Berücksichtigung der sich verändernden Stationsumgebung (Verstädterung). In den letzten Jahren und Jahrzehnten wurden grosse Anstrengungen (meist aufwändige, sorgfältige Handarbeit) unternommen, verlässliche frühinstrumentelle Datenreihen zu erzeugen. Es bleiben aber Unsicherheiten, und es gibt auch immer noch Verbesserungsmöglichkeiten.

2.2.3. Datenprodukte: Assimilation/Klimarekonstruktion

Die räumliche Abdeckung der instrumentellen Daten ist so dass erst ab ungefähr 1870, und auch dann nur mit grosser Mühe und ausgeklügelten Interpolationsverfahren, globale, räumlich aufgelöste, monatliche Felder der wichtigsten meteorologischen Grössen am Erdboden erstellt werden können. Regional wurden auch tägliche Felder erstellt.

Bisher wurden noch kaum dreidimensionale meteorologische Datensätze für die Zeit vor 1948 erstellt. Das wäre aber möglich sowohl mittels Datenassimilation (vgl. voriges Kapitel) als auch mittels statistischer Rekonstruktion (s. nächstes Kapitel) möglich. Die Datenassimilation ist in diesem Fall sehr stark von der Information vom Erdboden abhängig. Dafür ist die Anzahl der in die Assimilation einflussenden Variablen klein. Das erlaubt den Einsatz von besser optimierten Methoden zur Datenassimilation. Bisher gibt es allerdings dazu erst Teststudien. Die statistische Rekonstruktion wird im nächsten Kapitel im Detail beschrieben. Ein monatlicher dreidimensionaler globaler Datensatz zurück bis 1900 der bis zur Tropopause vernünftige Felder zeigen soll, wird bald vorhanden sein.

2.3. Vergangene Klimata: Proxydaten

2.3.2. Historische Quellen und natürliche Archive

Für Zeitperioden oder Regionen wo keine instrumentellen Reihen zur Verfügung stehen, müssen andere Daten verwendet werden: historische Quellen oder natürliche Archive. Obwohl ein zentrales Thema, wird dieser Bereich hier nur summarisch dargestellt, weil in anderen Lehrveranstaltungen (701-0412-00 Klimasysteme, PD Dr. C. Appenzeller, 651-2117-00 Geschichte des globalen Klimas, Prof. A. Ohmura) ebenfalls auf diese Problematik eingegangen wird.

Eine Übersicht über die verschiedenen Proxydatentypen zeigt Figur 7. Bei den historischen Quellen wird unterschieden zwischen direkten und indirekten Angaben zum Klima. Direkte Angaben sind: Witterungstagebücher, Wolkenbeobachtungen, Pegelstände, etc. Indirekte Angaben messen klimatische Auswirkungen, von welchen auf die Klimaverhältnisse zurückgeschlossen wird (zum Beispiel Phänologie, also der Zustand der Vegetation, Erntedaten, Getreidepreise, Bittprozessionen, Segelzeiten über den Atlantik usw.). Trotz zahlreicher Kalibrationsprobleme (vgl. nächster Abschnitt) können historische Quellen wichtige und präzise Information zur Klimageschichte beitragen. Sie sind zeitlich und räumlich hoch aufgelöst und zumindest für Europa (aber auch beispielsweise China) in grosser Fülle vorhanden.

Neben den historischen Quellen gibt es natürliche Archive, das heisst Umweltvorgänge (physiologische, chemische oder physikalische Prozesse), welche stark vom Klima abhängig sind und diese Information in hoher zeitlicher Auflösung speichern. Beispiele sind: Baumringe, Korallen, Sedimente und Eisbohrkerne. Verwendete Grössen sind beispielsweise Ringwachstum, Eisakkumulation, Verhältnisse stabiler Isotopen, Häufigkeit bestimmter indikativer Pollen oder Plankton und andere.

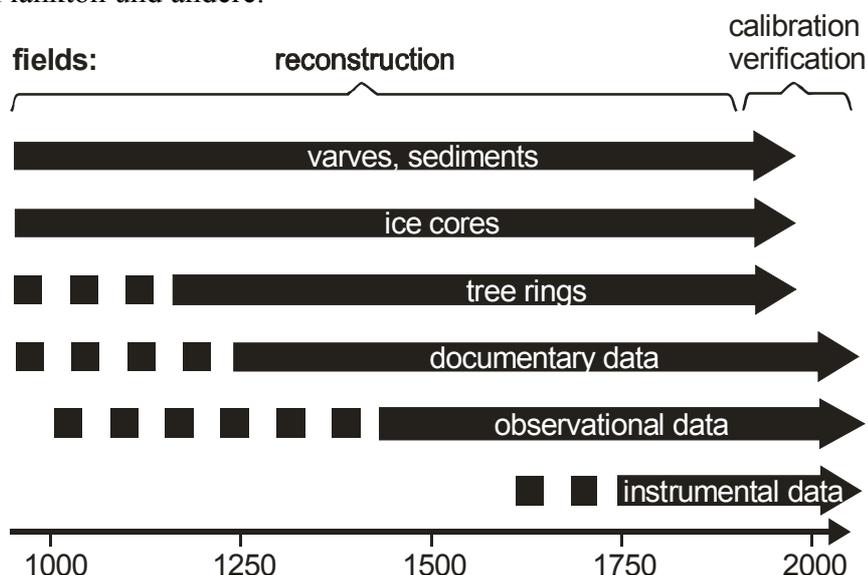


Fig. 7: Schematische Darstellung verschiedener in der Klimaforschung verwendeter Proxydaten.

2.3.2. Kalibration von Proxies

Um aus einer Reihe von Proxydaten (beispielsweise die Ringweite von Baumringen) eine Klimazeitreihe zu erhalten, braucht es verschiedene Zwischenschritte. Es braucht Korrekturfunktionen, Datierung und schliesslich die Kalibration mit Klimadaten. Das gilt sowohl für dokumentarischen Daten als auch für natürliche Archive.

Bei den dokumentarischen Daten stellt sich die Frage der Quelleninterpretation: Warum haben Menschen Wetterereignisse notiert, welche Ereignisse wurden als dokumentierungswürdig angesehen, welche nicht? Dann stellt sich das Problem der Quantifizierung: Extremereignisse wurden oft überschätzt. Massstäbe wie „seit Menschengedenken“ sind kaum quantifizierbar. Dann muss aus der gesammelten Information ein Index erstellt werden, der anhand von Instrumentendaten kalibriert werden kann. Dafür ist die Datierung meist kein Problem.

Bei den Baumringen stellt sich beispielsweise die Frage, worauf das Baumwachstum an diesem Standort sensitiv ist und war (Temperatur oder Niederschlag, und in welcher Jahreszeit?), inwiefern der Baum oder die Baumgruppe repräsentativ ist für das regionale Klima und wie schnell sich Baumarten an Umweltveränderungen anpassen. Ist es überhaupt möglich, aus Baumringen niederfrequente Klimaschwankungen zu rekonstruieren? Ausserdem muss das „biologische“ Signal (die Alterung jedes Baumes) aus den Daten entfernt werden und die Reihen zahlreicher Bäume aneinander gehängt und neu kalibriert werden.

In allen Fällen stellt sich die Frage der Stationarität. Es wird also postuliert, dass die statistische Beziehung zwischen dem Weinlesedatum (um ein Beispiel zu nennen) und dem Klima sich mit der Zeit nicht verändert hat. Die Kalibration kann aber nur anhand der Instrumentenperiode erfolgen, typischerweise das 20. Jahrhundert. Ist eine im 20. Jhd. abgeleitete Transferfunktion tatsächlich auf frühere Jahrhunderte anwendbar? So leben wir heute in einer CO₂-angereicherten Atmosphäre, was die Transferfunktion für Baumringe verändert haben könnte. Die eigentliche Kalibration erfolgt meist statistisch, es gäbe aber auch andere Methoden (z. B. pflanzenphysiologische Modelle). Trotz all dieser Schwierigkeiten hat sich immer wieder gezeigt, dass sinnvolle Klimarekonstruktionen möglich sind. Unabhängige Archive (Eisbohrkerne, Sedimente, Baumringe) stimmen oft überein. Figur 8 zeigt eine Rekonstruktion der Frühlings- und Sommertemperatur im Golf von Alaska anhand von Baumringen.

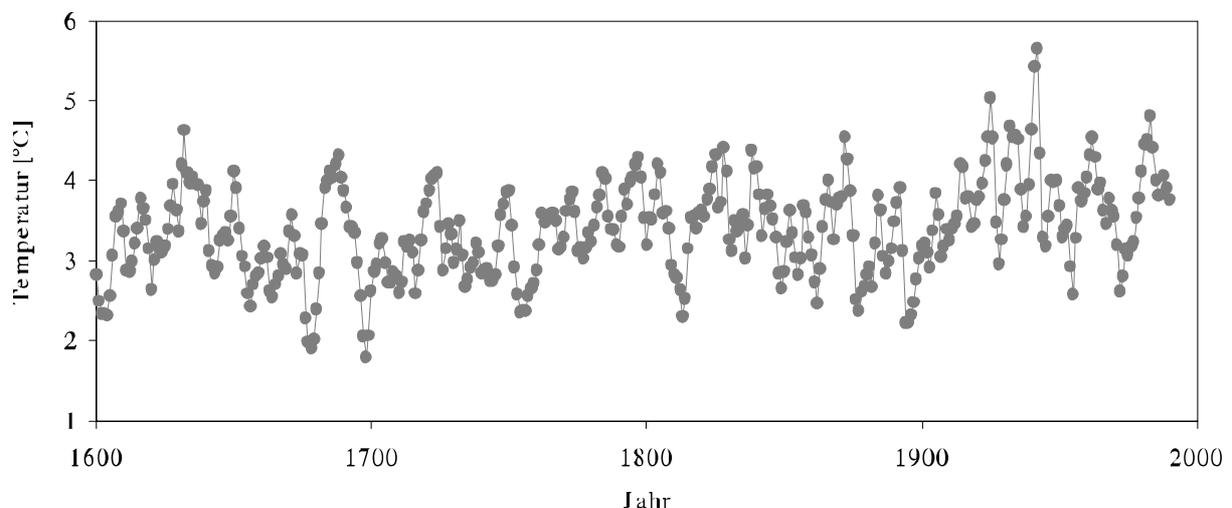


Fig. 8: Rekonstruktion der Frühlings- und Sommertemperatur im Golf von Alaska anhand von Baumringen (Wiles et al., 1999, Tree-Ring Data Bank. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology).

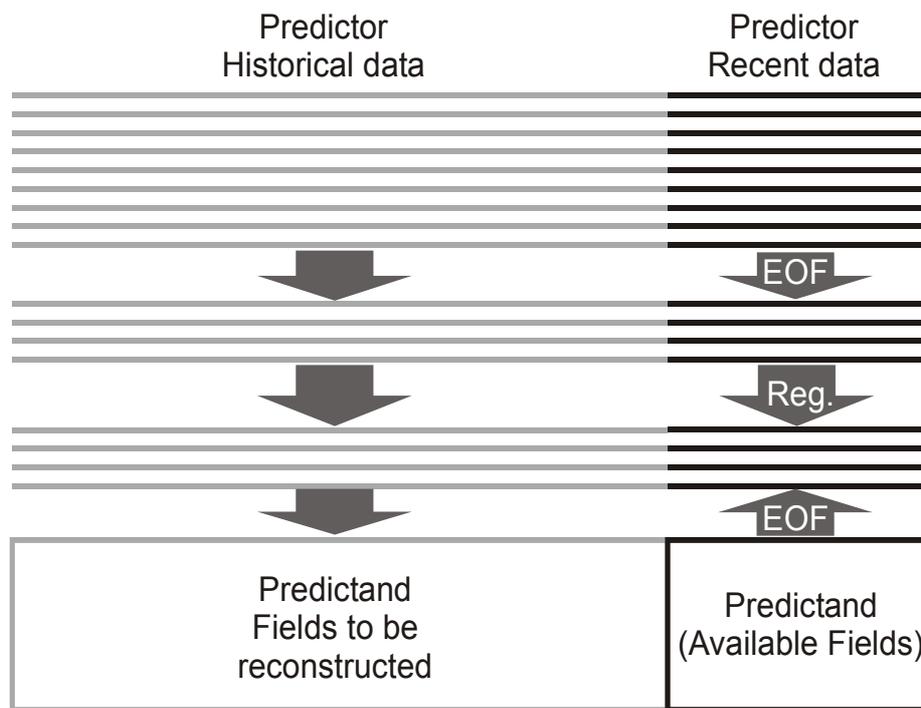


Fig. 9: Schema der Klimarekonstruktion (EOF = Empirical Orthogonal Function oder Hauptkomponentenanalyse Reg. = Regressionsmodell).

2.3.3. Klimarekonstruktion

Die kalibrierten Zeitreihen alleine geben nur ein unvollständiges Bild des Klimas. Liegt eine Vielzahl solcher Reihen über einen bestimmten Raum vor, kann versucht werden, mit Rekonstruktionsmethoden die interessierende Information zu extrahieren. Im einfachsten Fall ist dies eine Variable (nordhemisphärische Mitteltemperatur, NAO index etc.). Ein einfaches, oft verwendetes Verfahren ist die multiple Regression, wobei vorgängig die Anzahl der Variablen durch eine Hauptkomponentenanalyse reduziert wird. So wird vermieden, dass unpräzise, unbedeutende oder fehlerhafte Information in die Rekonstruktion einfließt. Die Prädiktordaten (z. B. Baumringreihen) müssen nicht nur für die zu rekonstruierende Periode vorhanden sein, sondern auch für eine möglichst lange „Kalibrationsperiode“, für welche die zu rekonstruierende Variable vorhanden ist (z. B. 1900-2000). Hauptkomponentenanalyse und Regressionsmodell werden hier statistisch angepasst und die gewonnen Parameter dann gebraucht, um in der Vergangenheit den umgekehrten Weg zu gehen. Dabei stellen sich zwei grundlegende Probleme, ähnlich wie bei der Kalibration der einzelnen Proxies. Erstens die Frage der Stationarität: Waren die Beziehungen zwischen Prädiktoren und Prädiktanden in der Vergangenheit tatsächlich gleich wie heute? Zweitens die Frage, inwiefern mit einer Kalibrationsperiode von 100 Jahren die niederfrequente Variabilität überhaupt abgebildet werden kann.

Wird ein statistisches Modell in einer anderen Periode angewendet als es erstellt wurde, ist zu erwarten, dass die Qualität schlechter ist als es die Statistik der Kalibrationsperiode vortäuscht. Es empfiehlt sich, deshalb die Kalibrationsperiode so zu wählen, dass eine genügend lange Zeitspanne unabhängiger Daten für die Validierung zur Verfügung steht (z. B. 1900-1960 für die Kalibration verwenden, 1961-2000 für die Verifizierung). Ist dies nicht möglich, gibt es die Möglichkeit der Kreuzvalidierung (eine Beobachtung auslassen, das Modell anpassen, diese eine Beobachtung rekonstruieren, und dies für alle Beobachtungen wiederholen). Dieses Verfahren ist jedoch bei autokorrelierten Reihen (was Klimareihen meistens sind) nicht optimal. Eine Möglichkeit, um Information über die Sensitivität der Rekonstruktionen gegenüber den Annahmen der Stationarität und auch über die Frage der niederfrequenten Variabilität zu gewinnen, ist die Verwendung von langen Klimamodellsimulationen zur Verifi-

zierung. Das ganze Verfahren wird also in Klimamodellläufen durchgedpielt. Als Prädiktoren dienen aus dem Modell genommene Zeitreihen, zu welchen Rauschen addiert wird.

Das gleiche Rekonstruktionsprinzip kann auch für die Rekonstruktion von Feldern verwendet werden, wobei auch hier die Felder durch ihre Hauptkomponenten ersetzt werden, um die Anzahl der Variablen zu reduzieren. Ein solches Schema ist in Figur 9 gezeigt. Anstelle der Hauptkomponentenanalyse und Regression können auch andere Verfahren gewählt werden (z. B. neuronale Netze), und es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Variablen zu gewichten, die Saisonalität einzubeziehen etc. Figur 10 zeigt rekonstruierte Bodendruckfelder (SLP) für das Jahr 1573 aufgrund von Proxydaten.

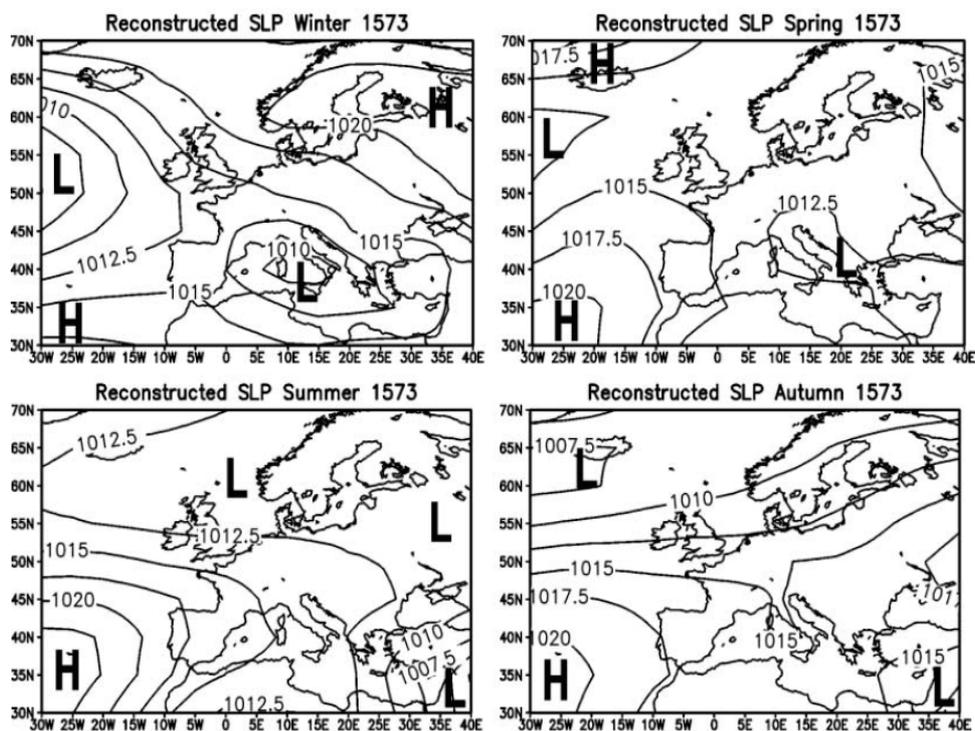


Fig. 10: Bodendruckrekonstruktionen über Europa anhand von Proxydaten (aus Luterbacher et al., 2002).

2.3. Datenauswertung

Die Rekonstruktionen der Klimavergangenheit, zusammen mit ihren Unsicherheitsbereichen dienen in erster Linie der Dokumentation des Klimas. Dies ist bisher die dominierende Anwendung solcher Rekonstruktionen (Aussagen wie: „Das 20. Jahrhundert war das wärmste Jahrhundert der letzten 1000 Jahre.“ „2003 war in Mitteleuropa der wärmste Sommer der letzten 500 Jahre.“ oder „Von 900-1300 gab es im Gebiet der heutigen USA gross Dürren.“ sind möglich). Um zu Aussagen über die Prozesse zu kommen, müssen genügend grosse Datenmengen zur Verfügung stehen und mit wissenschaftlichen Methoden ausgewertet werden. Solche Arbeiten beschränken sich meist auf das 20. Jahrhundert oder noch häufiger auf die letzten 40 Jahre. In früheren Jahrhunderten sind nur wenige Daten verfügbar, die Fehlerbereiche sind gross, eine Überprüfung bestimmter Hypothesen anhand unabhängiger Daten ist kaum möglich, und es gab (bisher) nur wenige Simulationen des vergangenen Klimas. Für die letzten 25 Jahre wird umgekehrt die Datenflut zum Problem: Wie extrahiert man die gewünschte Information aus einer solchen Datenfülle? In diesem Kapitel werden ganz kurz einige Analysemethoden vorgestellt. Es geht dabei nicht um das Erlernen dieser Methoden, sondern lediglich darum, später im Skript vorkommende Grafiken zu verstehen.

Einige grundsätzlich wichtige Methoden sind Fallstudien, statistische Analysen (Zeitreihenanalyse, Raum-zeitliche Statistik) sowie Vergleiche mit Modellsimulationen. Im ersten Fall sind keine besonderen Methoden nötig, dafür umso mehr die richtige Diagnostik (Wahl der aussagekräftigsten Variablen).

Statistische Methoden können rein explorativen oder deskriptiven Charakter haben, das heisst sie dienen der Veranschaulichung des Datenmaterials. Oft sollen aber damit Prozesse untersucht, insbesondere Hypothesen getestet werden. Die Klimavergangenheit ist dann interessant, wenn das Klima anders war als heute, oder weil die Zeitperiode nur dann lange genug wird um niederfrequente Prozesse anzusprechen. Ein Beispiel für eine solche statistische Anwendung wäre der Vergleich der Klimarekonstruktionen mit Forcingfaktoren wie Vulkanausbrüchen. Vier Methoden die hier kurz erwähnt werden sollen sind Kompositen, Korrelation (Punktkorrelation), Regression (Forcing) sowie Hauptkomponentenanalyse (und Verwandtes). Die letzten beiden sind bereits im Zusammenhang mit der Rekonstruktion erwähnt worden.

Kompositen sind im Prinzip einfach Mittelwerte über eine Vielzahl von ausgesuchten Ereignissen. Ein Beispiel dazu wären El Niños oder Vulkanausbrüche. Mittelt man die klimatischen Anomalien für alle Winter nach starken tropischen Vulkanausbrüchen, erhält man ein Bild des vulkanischen Einflusses. Die Methode ist insbesondere dann angebracht, wenn Ereignisse gut definiert werden können. Wenn eher von einem kontinuierlichen Einfluss ausgegangen werden muss, dann werden oft Korrelationen verwendet. Das ist ein Mass für den linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen. Die Methode wird beispielsweise zum Aufspüren von „Teleconnections“ verwendet. Bei der Korrelation wird keine Aussage darüber gemacht, welche Variable die beeinflussende und welche die beeinflusste ist. Bei der Regression wird das spezifiziert. Regression kann deshalb beispielsweise dazu verwendet werden, den Klimaeffekt eines Forcingfaktors zu quantifizieren (wiederum unter der Annahme einer linearen Beziehung und eines mehr oder weniger kontinuierlich schwankenden Einflusses).

Die letzte Gruppe von Methoden (Hauptkomponentenanalyse und Verwandtes) kann verschiedenen Zwecken dienen. Klimadaten, vor allem in den letzten 50 Jahren, sind oft sehr umfangreich. Es sind vierdimensionale Datensätze mit hoher Auflösung, die nicht direkt analysiert werden können. Der erste Schritt ist deshalb oft eine Reduktion der Komplexität mittels einer Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA auch als Empirical Orthogonal Function, EOF, bezeichnet). Dabei wird der Datensatz zerlegt in eine Serie von räumlichen (zwei- oder dreidimensionalen) Mustern welche die wichtigsten Variabilitätsmuster darstellen, und dazugehörigen Zeitreihen, welche die zeitliche Variabilität dieser Muster wiedergeben. Die Muster und Zeitreihen sind so definiert, dass sie voneinander linear unabhängig sind (die Zeitreihen nicht miteinander korrelieren). Die erste Hauptkomponente ist diejenige, welche am meisten Varianz des Datensatzes erklärt, die zweite am zweitmeisten. Indem man nur die ersten x Hauptkomponenten behält, kann man zum Beispiel die Temperatur an 5000 Gitterpunkten (also 5000 Variablen) reduzieren auf vielleicht 10 oder 20 Variablen mit dazugehörigen Mustern, ohne viel an Information zu verlieren.

Die Hauptkomponentenanalyse wird manchmal aber auch dazu verwendet, Prozesse zu isolieren. Es wird davon ausgegangen, dass den dominierenden Hauptkomponenten Prozesse zugrunde liegen. Darauf wird später (Kapitel 3.2.3) eingegangen. Weitere Details zur Datenauswertung bietet die Vorlesung von PD Dr. Ch. Appenzeller (701-0412-00 Klimasysteme) bietet mehr zur Datenauswertung.

2.4. Klimamodellierung

Auch der Bereich Klimamodellierung wird hier nur kurz dargestellt (siehe Vorlesung 701-0412-00 Klimasysteme, PD DR. Ch. Appenzeller für mehr Details). Modelle stellen eine Summe oder eine Integration unseres physikalischen Wissens über die Atmosphäre dar. Sie versuchen, auf der Grundlage physikalischen Gleichungen (plus einer grossen Anzahl Parametrisierungen) die atmosphärischen Vorgänge zu simulieren. Modelle sind nicht perfekt, aber ein wichtiges Werkzeug in der Klimaforschung. Klimamodelle erlauben die Analyse von Grössen, welche in der richtigen Atmosphäre nicht beobachtet werden können. Sie erlauben das Durchspielen vieler verschiedener Möglichkeiten und das gezielte Testen von Hypothesen. Modelle zeigen uns viele verschiedene mögliche Realitäten, während der reale Klimaverlauf als eine Realisierung der „Zufallsvariable“ Klima gesehen werden kann.

Nachfolgend sind einige wichtige Begriffe im Zusammenhang mit Klimamodellsimulationen zusammengestellt:

Modelltypen:

- Atmosphärenmodelle (GCM, atmosphärische Zirkulation)
- Ozean-Atmosphärenmodelle (OA-GCM, gekoppeltes Modell mit ozeanische und atmosphärischer Zirkulation)
- Chemische Klimamodelle (CCM, gekoppeltes Modell mit atmosphärischer Zirkulation und atmosphärischer Chemie)
- Chemische Transportmodelle (CTM, Chemiemodell ohne Zirkulation)
- Erdsystemmodelle (ESM, modulares Modellierungssystem mit Atmosphäre, Ozean, Landoberflächenprozesse, Biosphäre, usw.)

Experimente:

- Freier Lauf (OA-GCM): Nach dem Spin-up werden alle Modellbestandteile frei laufen gelassen. Die externen Grössen (z. B. Treibhausgase, Sonnenaktivität, etc.) werden konstant gehalten. Ist das Modell stabil, können so mehrere Hundert oder Tausend Jahre gerechnet werden. Anwendung: Kontrolllauf. Fragen: Reproduziert das Modell das reale Klima? Wenn ja ist auch das Studium von zeitunabhängigen Prozessen, beispielsweise im Zusammenhang mit grossräumigen Klimaschwankungen, möglich. Keine Limitierung der Statistik durch zu kurze Datenreihen.
- Szenarienlauf (OA-GCM): Wie oben, wobei aber die externen Grössen variiert werden (fixiert oder zeitabhängig, siehe unten). Anwendung: Simulation vergangener und zukünftiger Klimaänderungen. Erstellen von Szenarien (Zukunft), Testen von Hypothesen (Vergangenheit). Frage: Reproduziert das Modell die beobachtete Klimaänderung des 20. Jahrhunderts?
- Transienter Lauf: Die Antriebsgrössen werden zeitabhängig variiert. Bei einem GCM werden beispielsweise die beobachteten Ozeanoberflächentemperaturen des 20. Jahrhunderts verwendet. Da hier bei Beobachtungsdaten zeitabhängig einfließen, geht diese Anwendung bereits ein Stück in Richtung Datenassimilation. Das simulierte Klima sollte Ähnlichkeiten mit dem gemessenen Klima haben. Um dieses Signal von der Modellvariabilität zu trennen, werden oft Ensembles verwendet. Dabei wird das Experiment mehrmals mit leicht veränderten Anfangsbedingungen durchgeführt. Ensemblemittelwert und Standardabweichung werden analysiert. Bestimmte Zeitschnitte werden untersucht und untereinander verglichen.

- Zeitscheibenexperiment: Die Antriebsgrößen werden für die ganze Simulation (ca. 20-30 Jahre) auf einen neuen, konstanten Wert gesetzt. Dieser Lauf wird dann verglichen mit einem alternativen Experiment (oder einem Kontrolllauf), bei welchem die Antriebsgrößen die ganze Simulation über einen anderen Wert haben. Mit anderen Worten: Klimatologien werden simuliert, Mittelwert und Streuung der Simulationen verglichen.
- Chemical Transport Model: Die meteorologischen Größen werden aus den Reanalysen, einem GCM oder einem anderem Modell genommen und nur die chemischen Prozesse simuliert. Sofern die chemischen Vorgänge nicht die Zirkulation beeinflussen und die Initialisierung mit gemessenen Daten erfolgt, ist dies eine Art Datenassimilation. Es können aber auch Szenarien durchgespielt und Hypothesen getestet werden.