

CLAUDIA KUENZER¹, CORINNE FREY¹, UND JIANZHONG ZHANG²

Kohleflözbrände im internationalen Kontext: Ursachen, Auswirkungen und geowissenschaftliche Methoden der Detektion und nachhaltigen Überwachung

Zusammenfassung des Vortrags vom 23. September 2013

Einleitung

Sie werden Kohleflözbrände, Kohlebrände oder auch Kohlefeuer genannt: unterirdisch oder an der Geländeoberfläche schwelende und brennende Feuer in verdeckten oder freigelegten Kohleflözen, Kohlelagerhalden, oder Abraumhalden. Eine Umweltkatastrophe, der wenig Beachtung zukommt, die jedoch in vielen Ländern der Erde zu finden ist. In den USA, China, Indien, Australien, Südafrika, und auch in einigen Ländern Europas: überall existieren Kohlebrände, die zu verheerenden ökologischen und wirtschaftlichen Schäden führen. Ca. 0,1 bis 0,3% der jährlichen, globalen, anthropogen verursachten CO₂ Emissionen gehen auf solche Kohleflözbrände zurück. Der Ausstoss an Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid und Methan liegt in der Grössenordnung der durch den deutschen Autoverkehr verursachten Emissionen.

Kohlebrände: Definition, Genese und Klassifikation

Aber was sind Kohlebrände genau?

Kohle enthält in erster Linie Kohlenstoff, und dieser oxidiert mit dem Sauerstoff der Luft in einer exothermen chemischen Reaktion, bei der Energie in Form von Wärme frei gesetzt wird. Existiert nun ein Kohlevolumen – ganz gleich ob ein Kohlehaufen auf einem grossen Frachter, eine Kohlehalde an Land, ein freigelegtes Flöz an der Geländeoberfläche, oder aber ein unterirdisches Flöz – das mit Sauerstoff in Kontakt gerät, so steht die Chance gut, dass sich die Kohle nach einiger Zeit von selbst entzündet. Dieser Prozess der Selbstentzündung oder auch Spontanentzündung (auf Englisch «self ignition» oder auch «spontaneous com-

¹ Dr. Claudia Künzer, Dr. Corinne Frey, Earth Observation Center, EOC, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, DLR, Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Deutschland

² Dr. Jianzhong Zhang, Beijing ESKY Technology Ltd, Beijing, China

bustion» genannt), der bereits bei 80°C auftreten kann, wird durch verschiedene Faktoren begünstigt. Geologische, klimatologische, und anthropogene Einflüsse, die die Selbstentzündung fördern, sind unter anderem eine geringe Qualität der Kohle mit hohen Schwefelanteilen und Verunreinigungen, eine hohe Angriffsfläche für den Sauerstoff (e.g. lockere Schüttung oder Belüftung in Minen), eine hohe Aussentemperatur, häufiges Durchfeuchten und Austrocknen (dadurch interne Quellung und Schrumpfung und somit Vergrößerung der inneren Oberfläche). Nicht zuletzt führt auch menschliches (Fehl-)Verhalten zur Entzündung von Kohle: Müllverbrennung in der Nähe von Kohleflözen, Grubengasexplosionen, Kurzschlüsse oder eine achtlos weggeworfene Zigarette; auch diese Ereignisse können zur Entzündung eines Flözes oder einer Kohleschüttung führen. Aber auch Waldbrände oder Blitzeinschlag oberhalb eines Kohleflözes kommen als Ursache der Entzündung in Frage. In der Mehrheit der Fälle sind es aber nicht menschliches Fehlverhalten oder ein externer Brand, der die Kohle entfacht. Die Mehrheit der Kohlebrände entsteht ganz unspektakulär. Das Kohlevolumen ist – durch Geologie, Erosion, Bergbau, oder Transport – der Luft ausgesetzt, Sauerstoff und Koh-



Abbildung 1: (A, B): Unterirdische Kohleflözbrände in Wuda, Innere Mongolei, China; (C): Feuer in einer Abraumhalde im Witbank Abbaugbiet in Südafrika; (D): Unterirdischer Kohlebrand unter einer zerstörten Strasse in Centralia, Pennsylvania, USA. Fotos: C. Kuenzer (A,B) and G. Stracher (C,D). Quelle: Kuenzer & Stracher 2011.

lenstoff oxidieren, Wärme wird freigesetzt, und wenn diese nicht abgeführt werden kann, dann beginnt die Kohle zu schwelen und schliesslich zu brennen. Dieser Prozess findet tagtäglich zum Beispiel auf offenen Frachtschiffen statt, die Kohle transportieren, aber auch auf Lager- und Abraumhalden der grossen Bergbaugebiete. Dieser Prozess findet sich auch überall dort, wo Kohleflöze durch Erosion oder Bergbau an der Erdoberfläche exponiert frei liegen («ausstreichen» wie der Geologe sagt).

Aufgrund Lokation, Alter und Charakteristika kann man die Brände in verschiedene Typen klassifizieren. Als Obergruppe kann man Brände natürlichen Ursprungs von solchen anthropogenen Ursprungs unterscheiden. Je nach Alter unterscheidet man rezente- von Paläokohlefeuern (letztere sind immer natürlichen Ursprungs) und je nach Ort des Vorkommens kann man nun weiter in unterirdische Kohlebrände, oberirdische Flözbrände sowie Brände auf Lager- und Abraumhalden unterscheiden. Unterirdische Kohlebrände sind dabei die am schwierigsten zu erfassenden und zu kontrollierenden Brände. In der einen oder anderen Form tritt das Phänomen dabei in fast jedem Land auf, welches über Kohlelagerstätten verfügt.

Globale Verbreitung der Brände

Der bekannteste Kohlebrand der Welt wütet in den USA, im Bundesstaat Pennsylvania, unterhalb der Stadt Centralia. Centralia war einst eine florierende Kleinstadt, bis vor mehreren Jahrzehnten eine Müllkippe in Brand geriet, die dann ihrerseits das unter der Stadt liegende Kohleflöz entfachte. Langsam schwelte das Kohleflöz im Untergrund dahin – die Kohle verwandelte sich in Asche. Durch den Volumenschwund im Untergrund gaben unerwartet die Deckschichten über dem Kohleflöz nach, und es kam zu klaffenden Erdspalten in Gärten und Strassen. Nun erst wurde man sich des Problems bewusst. Teure Schäden an Infrastruktur und Spalten in der Erde, aus denen heisser, schwefelig riechender Dampf austrat, waren ein starkes Warnsignal. Mit verschiedenen Methoden versuchte man das Feuer im Untergrund zu löschen. Ziel war es, dem Feuer den Sauerstoff zu entziehen. Dies versuchte man durch Wasserinjektion, Verschüttung der Spalten mit Sanden und Schlacken und sogar der Injektionen von Feuer-bekämpfenden Spezialschäumen zu erreichen – ohne Erfolg. Das Flöz im Untergrund brannte weiter, und man bekam das Problem nicht in den Griff. Einbrüche in der Geländeoberfläche nahmen zu, die toxischen Gase beeinträchtigten die Gesundheit der Einwohner, und schliesslich wurde die ganze Kleinstadt evakuiert und umgesiedelt. Das Kohleflöz unter Centralia brennt dagegen bis heute.

Auch im amerikanischen Bundesstaat Colorado existieren an über 50 Lokationen kleinere Kohlebrände. In dem Staat, der ehemals stark von Kohle- und Erzabbau lebte, entzündeten sich die Brände besonders in still gelegten, nicht professionell



Abbildung 2: Locust Avenue Centralia. Zwischen den beiden Aufnahmen liegen 20 Jahre (links 1983, rechts 2001). Die beiden Aufnahmen zeigen eindrücklich, wie drastisch sich die Stadt aufgrund des Kohleflözbrandes innerhalb von bloss 20 Jahren verändert und entvölkert hat (Fotos David DeKok / Centralia Photo Archive).

versiegelten Minen. Aber auch Waldbrände führen in Colorado oft zur Entzündung unterirdischer Flöze. Die «Colorado Division of Reclamation, Mining & Safety» erfasst diese Brände regelmässig und propagiert – wo möglich und wirtschaftlich sinnvoll – die Löschung. Ebenfalls der Bundesstaat Wyoming ist von Bränden betroffen. Hier gibt es sogar Regionen, in den nachgewiesen werden kann, dass schon vor tausenden von Jahren die Flöze brannten: durch unterirdische Asche- als auch Klinker-Schichten. Als «Clinker» bezeichnen amerikanische Kohlegeologen ein rötliches, ziegelähnliches Gestein, welches durch starke Hitzeeinwirkung entsteht. Im deutschsprachigen Raum nennen wir dies auch pyrometamorphes Gestein: Gestein, dass durch Feuer verändert wurde. Kohlebrände erreichen Temperaturen von über 1000°C, und so kommt es zur Pyrometamorphose des umliegenden Gesteines, welches durch die Hitzeeinwirkung Farbe, Mineralogie und Textur verändert – teilweise kommt es sogar zur partiellen Aufschmelzung. Auch weitere Staaten verzeichnen Kohlebrände. Jedoch sind aktuelle amerikanische Abbauregionen aufgrund guter Vorsichtsmassnahmen nicht nennenswert betroffen, so dass sich (ausser in Centralia) der wirtschaftliche Schaden durch die verlorene Ressource in Grenzen hält. Besorgt zeigt man sich eher um die Sicherheit der Zugänglichkeit in ehemaligen Minenregionen, aber auch um die Emission von

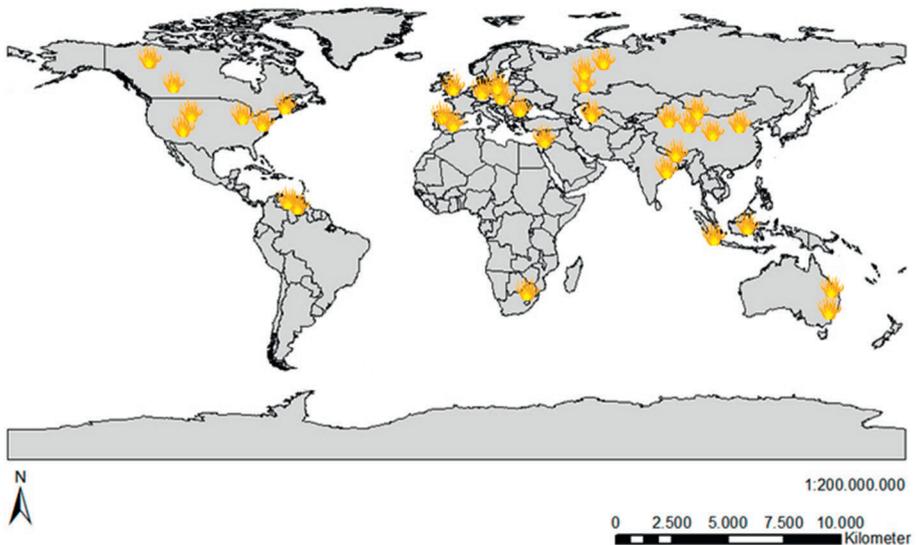


Abbildung 3: Bekannte Kohlebrandregionen weltweit. Quelle: Kuenzer et al. 2013

toxischen Gasen sowie die Möglichkeit der Entzündung von Waldbränden durch Kohlebrände. Selbiges gilt für unterirdische Brände in Australien.

In anderen Ländern der Erde kämpft man dagegen verbittert gegen die Feuer. In Indiens Nordosten schwelen in dem grossen Kohleabbaugürtel bei der Stadt Jharia Millionen Tonnen Kohle seit Jahrzehnten vor sich hin. Der Abbau geht derweil unter gefährlichen Umständen weiter. Immer wieder stürzen Häuser und Hütten ein; verschwinden Strassen in Einbrüchen des Deckgesteins, der durch den Volumenschwund im Untergrund induziert wird. Die arme ländliche Bevölkerung lebt in unmittelbarer Nähe von Spalten und Rissen, aus denen neben den klimawirksamen Gasen Kohlendioxid und Methan auch Schwefel-, Arsen- und Selen-haltige Dämpfe entweichen. Bronchialkrankheiten und Lungenkrebsraten sind in der Region erhöht. Selbiges gilt für die Brandregionen in China: Hier sind zahlreiche Kohlebrände in grossen Abbauregionen wie Wuda in der Inneren Mongolei, Ruqigou in der Provinz Ningxia, oder Keerjian in der autonomen Region Xinjiang bekannt. Schätzungen zufolge verbrennen allein in China jährlich 200.000 Tonnen Kohle. Das Zehnfache dieser Menge jedoch geht verloren, da auch die nicht brennende Kohle im Umfeld der brennenden Flöze aufgrund des Gefahrenrisikos so gut wie nicht mehr abbaubar ist. Bei Preisen von durchschnittlich 65 USD für hochqualitative amerikanische Kohle aus den Appalachen im Dezember 2013, entgeht damit einem Land mit Kohleverlusten von zwei Millionen Tonnen ein Geschäft (je nach Qualität der brennenden Kohle) von 80–130 Millionen USD. Auch in vielen anderen Schwellen- und Entwicklungsländern wie Vietnam, Süd-

afrika, Venezuela und Indonesien, für die die Energieversorgung mit Kohle, als auch der Export des Rohstoffs eine wichtige Rolle spielt, kämpft man seit Jahren gegen die schwer zu kontrollierenden Brände und erprobt neuartige Löschmethoden.

Löschmethoden

Generell gibt es drei Ansätze, der Feuer Herr zu werden. Man kann dem Brand das Brandmaterial entziehen (die Kohle), ihm den Sauerstoff entziehen, oder ihm die Energie entziehen. Ersteres geschieht meist durch Ausgrabung der brennenden Kohle und Transport an einen anderen Ort. Dies ist ein gefährliches Unterfangen; müssen doch grosse Mengen glühender Kohle abgebaggert, auf LKWs verladen und an einen sicheren Ort zum Verbrennen transportiert werden (in China z.B. oft in die Wüste). Ein sichererer Weg ist es, den brennenden Teil eines Flözes von dem noch nicht betroffenen Teil eines Flözes abzutrennen – zum Beispiel durch Aushebung eines grossen Grabens. Jedoch unterliegen auch die isolierten, noch nicht brennenden Flözbereiche nach wie vor dem Risiko der Spontanentzündung. Der zweite mögliche Weg – die Löschung durch den Entzug von Sauerstoff – geschieht meist durch Verfüllung aller Belüftungswege zu dem unterirdischen Flöz. Spalten und Risse im Deckgestein werden mit Sanden, Löss, oder Schlämmen verfüllt. Teils werden sogar teure synthetische Schäume injiziert. Diese Methoden kamen und kommen in China, Indien und Südafrika häufig zum Einsatz – jedoch sind hier die Erfolgsaussichten stark davon abhängig, wie professionell die Löschung geplant und durchgeführt wird und wie akribisch ein einmal gelöschter Bereich überwacht wird. Es hat sich nämlich häufig gezeigt, dass einmal gelöschte Bereiche nach einiger Zeit wieder anfangen zu glimmen, schwelen und brennen. Dies liegt daran, dass selbst gut verfüllte Deckgesteinsschichten sich weiterhin verändern können. Einstürze und neue Risse über unterirdischen Ascheschichten führen zu neuen Zugangswegen für Luft und somit Sauerstoff. Die Löschung unterirdischer Kohlebrände ist hier ein Sisyphos-Unterfangen. Auch der dritte mögliche Weg zur Löschung – der Energieentzug durch Kühlung mit Wasser – ist oft langfristig nicht erfolgreich. Nicht nur ist Wasser in vielen ariden Abbauregionen nicht in grossen Mengen verfügbar, sondern die Kühlung hält auch nur so lange an, wie das Wasser injiziert wird. Zudem kann die Durchnässung zu Quellungs- und (bei Trocknung) Schrumpfungprozessen führen, die dann wiederum die spätere Spontanentzündung wahrscheinlicher machen.

Trotz auch langfristig erfolgreicher Löschkaktivitäten in ausgewählten Regionen sind Rückschläge doch häufiger, so dass in vielen Ländern dazu übergegangen wurde, die Kohle im Umfeld der Brände so schnell es geht abzubauen. «So viel wie möglich, so schnell wie möglich aus den Minen herauszuholen», ist das Motto vieler Bergbauunternehmen in den stark betroffenen Entwicklungs- und Schwellenländern. Gefährliche Arbeitsbedingungen für die Minenarbeiter werden dabei teils bewusst in Kauf genommen.

Kohlebrandforschung

Rohstoffkonzerne, lokale Behörden und Kohleminen haben sich in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen in grossen Projektverbänden dem Thema mit dem Ziel angenommen, die Brände frühzeitig zu detektieren, zu quantifizieren, zu löschen und Löscherfolge nachhaltig zu überwachen. Zum Beispiel koordinierte das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) vom Jahr 2000 bis 2009 verschiedene bilaterale Verbundprojekte, in deren Kontext die Brände mit Satelliten gestützter Fernerkundung und verschiedenen geophysikalischen Methoden von multidisziplinären Wissenschaftlerteams erforscht wurden. Gemeinsam mit zahlreichen chinesischen Partnerinstitutionen aus Wirtschaft, Administration und Forschung wurden hier insbesondere die verheerenden Brände in China untersucht – allen voran die Berg-

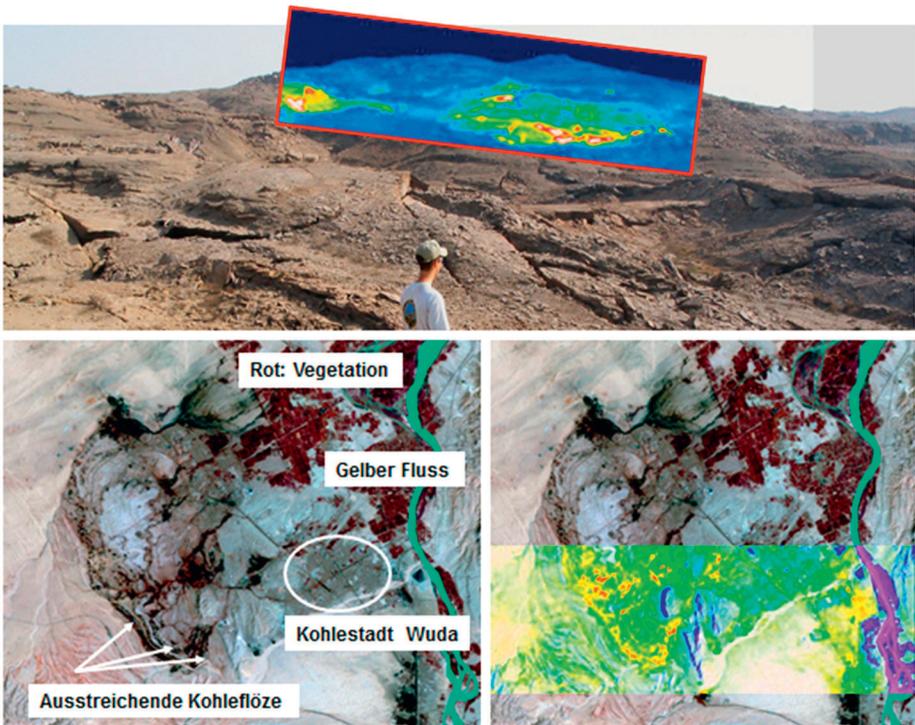


Abbildung 4: Kohlefeuer in der chinesischen Region Wuda. Oben: optisches Foto und überlagertes in-situ Thermalbild, bei dem deutlich die Spalten sichtbar werden, aus denen unsichtbare heisse Luft und Gase austreten. Unten links: die Kohlestadt Wuda (hier ein Falschfarben-Infrarotbild des Satelliten Landsat von 2001) liegt am Ufer des Gelben Flusses, direkt neben einer Ohrförmigen Synklinale, in der zahlreiche Kohleflöze ausstreichen. In diesen Flözen brennen auch heute noch über 10 Kohlebrände. Unten rechts: der Teil eines Thermalbildes wurde dem optischen Bild überlagert. Die Brandzonen sind durch rötliche Färbung zu erkennen.

bauregionen um Wuda und Baijigou in der Inneren Mongolei, die Abbaugelände um Ruqigou in Ningxia sowie Brandregionen in der nordwestlichen autonomen Region Xinjiang. Doch was können Geowissenschaften zur Lösung des pressierenden Umweltproblems beitragen?

Von Satelliten aus gewonnene Erdbeobachtungsdaten können nicht nur mit Instrumenten erfasst werden, die optische Bilder liefern (typische Satellitenbilder analog derjenigen auf GoogleEarth), sondern auch mittels Thermalsensoren. Thermalsensoren liefern digitale Temperaturbilder der Erdoberfläche. Solche Daten können analysiert werden, um Auffälligkeiten – sogenannte Thermalanomalien – oberhalb von kohleführenden Schichten frühzeitig zu erkennen. Die Schwierigkeit bei unterirdischen Kohlebränden liegt in dem an der Erdoberfläche nur geringen thermalen «Fussabdruck». Während bei einem Waldbrand riesige Areale der Erdoberfläche sehr stark erhitzt sind und Flächen von mehreren Kilometern offen brennen, können bei einem Kohlebrand zwar unterirdisch in mehreren 10-er Metern Tiefe ebenfalls grosse Bereiche brennen – an der Erdoberfläche manifestiert sich das aber aufgrund der dicken, isolierenden Deckgesteinsschichten möglicherweise nur durch einige wenige Spalten, an denen extrem heisse Gase austreten. Diese Anomalien von wenigen Zentimetern oder Metern Ausdehnung müssen nun heiss genug sein, um die integrale Temperatur eines z.B. 100 mal 100 m grossen Bildelements (eines sogenannten Pixels) deutlich im Vergleich zu den Umgebungspixeln zu erhöhen. Satelliten, die über einen oder mehrere Thermalkanäle in guter Auflösung verfügen sind unter anderem die amerikanische Landsat Reihe, die neueren chinesisch-brasilianischen CBERS Satelliten (China-Brazil Earth Resources Satellite) sowie – aufgrund seiner geringeren räumlichen Auflösung – für gewisse Fragestellungen der amerikanische MODIS Sensor (Moderate Resolution Imaging Spektrometer). Fernerkundliche Arbeiten im Bereich der Kohlebrandforschung umfassen die automatisierte Detektion von Risikoregionen zur automatischen Erkennung thermaler Anomalien, zur Quantifizierung der an der Oberfläche abgestrahlten Energie sowie zur Untersuchung der Brandauswirkungen auf die Umgebung. Weit ausgedehnte Spaltenfelder, Dolinen-ähnliche Einbrüche, grossflächige Landabsenkungen, die Auskristallisation fumaroler Minerale, aber auch Vegetationsdegradation und pyrometamorphes Gestein weisen auf die Nähe zu Bränden hin.

Für thermale Untersuchungen eignen sich hier besonders bei Nacht aufgenommene Thermaldaten, bei denen der Einfluss der Sonne (und somit Tagesgang- und Relief-abhängige solare Effekte) minimiert sind. Bezüglich der Jahreszeit eignen sich Thermalaufnahmen im späten Herbst und frühen Winter, wenn die Geländeoberfläche kalte Temperaturen aufweist (aber noch nicht beschneit ist), während die unterirdischen Brandtemperaturen über das Jahr nur gering variieren. Bessere Daten als Satelliten gestützte Daten liefern natürlich vom Flugzeug oder Helikopter aus aufgenommene Thermalbilder. Jedoch sind Flugzeugkampagnen extrem

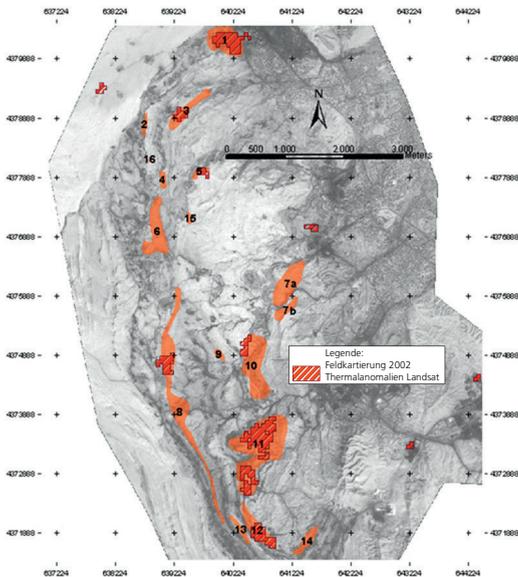


Abbildung 5: Die Synklinale westlich von Wuda. Orange: im Gelände kartierte unterirdische Brände. Gestreift: Thermalanomalien, die mittels thermaler Landsat Satellitendaten erfasst werden konnten.

kostenintensiv, nicht jedes Land verfügt über eigene Thermalscanner, und grossflächige Areale können so nicht erfasst werden. Eine nachhaltige Untersuchung und ein langfristiges Monitoring einer Region beinhalten jedoch wenn möglich immer verschiedene Beobachtungsskalen: von Satellitendatenauswertung optischer und thermaler Daten über flugzeuggestützte Aufnahmen oder Aufnahmen von erhöhten Standorten (Berggipfel etc., soweit vorhanden), bis hin zu geophysikalischen Analysen im Gelände.

Geophysikalische in-situ Methoden umfassen die Kartierung von Thermalanomalien mittels handgehaltenen Thermalkameraaufnahmen und Radiometer-Messungen sowie die unterirdische Lokalisation von Brandzentren mittels Geoelektrik, Geomagnetik, und Mikro-Seismik. Auch geophysikalische Modellierungen kommen zum Einsatz. Mittels geomagnetischer Messungen können beispielsweise Areale kartiert werden, die bis über den Curie Punkt erhitzt wurden. Der Curie Punkt ist eine materialabhängige Temperatur, bei der sich die magnetischen Anteile in einem Gestein neu nach dem aktuellen Nordpol ausrichten und somit eine andere Magnetisierung aufweisen als nicht erhitzte Gesteine. Wie schon zuvor angedeutet können unterirdische Feuer so heiss werden, dass umgebendes Gestein (z.B. Tonschiefer oder Sandsteine etc.) partiell aufgeschmolzen wird und so eine Re-Magnetisierung stattfindet. Mittels grosser Elektromagneten lassen sich in-situ im Gelände oder auch vom Helikopter aus Bilder erzeugen, die die Zonen unterschiedlicher Magnetisierung aufzeigen und somit Rückschlüsse auf rezente Brandherde zulassen. Ebenfalls mit dem Ziel der Brandherdbestimmung fusst die Mikroseismik (oder auch Seismo-Akustik) auf einem ganz anderen Prinzip. Mit



Abbildung 6: Geomagnetische Messungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) aus Hannover, Deutschland, in der chinesischen Kohlebrandregion Wuda. Fotos: BGR



Abbildung 7: oben links: Kohlestadt Rugigou. Zwischen den eindrucksvoll geschichteten Sandstein und Schieferhügeln liegen zahlreiche Kohleflöze. Eine Brauhalde überragt die Stadt. Oben rechts: Minenarbeiter und Mineneingang in einer ländlichen Region Chinas. Unten links: eine Mischung aus Löss, Asche und Wasser wird zur Löschung in den Untergrund gepresst. Unten rechts: Geophysikalische Messungen zur Bestimmung der Kohlequalität mittels eines Spektrometers. Alle bis auf unten rechts: C. Kuenzer. Unten rechts: J. Zhang.

verschiedenen in der Erde um den Brand herum vergrabenen Mikrofonen wird das Feuer sozusagen «belauscht», und die akustischen Aufzeichnungen von unterirdischem Knistern und Knacken auf verschiedenen Richtungen erlauben dann – ähnlich wie beim Prinzip der GPS Satelliten – eine Eingrenzung der Ursprungsregion der Geräusche.

Allen Untersuchungen ist ein Ziel gemein: die Ausdehnung des unterirdischen Feuers als auch das Brandzentrum genau zu lokalisieren, um zu gewährleisten, dass Löschkaktivitäten zielgerichtet ausgeführt werden können. Wenn beispielsweise über Bohrlöcher Lösch-Schäume in den Untergrund injiziert werden, ist es sehr wichtig, dass die Lokationen dieser Zugangswege so optimal wie möglich gewählt sind. Auch bei der Verfüllung und Abdeckung von Brandzonen erlauben fernerkundliche Kartierungen einen guten Überblick über die Verteilung von Spalten und Absenkungen sowie über bestmögliche Zugangswege. Im Nachgang ist dann wichtig Löschkzonen regelmässig zu überwachen («Monitoring»), um direkt reagieren zu können, falls ehemalige Brandzonen erneut zu schwelen beginnen. Löschkaktivitäten und ein nachgeschaltetes Monitoring von Kohlebrandregionen wird dabei entweder von privatwirtschaftlichen Unternehmen finanziert, die in einem Gebiet die Konzessionen zum Kohleabbau haben oder aber (in der Mehrheit der Fälle) von der Regierung des jeweiligen Landes direkt oder via Mittel der Entwicklungshilfe indirekt. Die Löscherfolge sind dabei umso besser, je grösser der Anteil der Fördergelder, die wirklich in die Löschung fließen, je besser ausgebildet das lokale Personal und je besser die lokalen Gegebenheiten charakterisiert sind. Hier kann geowissenschaftliche Forschung also einen direkten Beitrag zu Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz leisten.

Literaturempfehlungen für den interessierten Leser (nur «Science Citation Index» gelistete Journal Paper und ISBN Buchkapitel):

SCI Journal Beiträge:

- KUENZER, C. AND STRACHER, G.B., 2011: Geomorphology of Coal Seam Fires. *Geomorphology*, 138, doi:10.1016/j.geomorph.2011.09.004, 209–222.
- KUENZER, C., BACHMANN, M., MUELLER, A., LIECKFELD, L. and WAGNER, W. 2008: Partial unmixing as a tool for single surface class detection and time series analysis. In: *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/01431160701469107, i first article, pp. 1–23.
- KUENZER, C., HECKER, C., ZHANG, J., WESSLING, S. AND WAGNER, W., 2008: The potential of multi-diurnal MODIS thermal bands data for coal fire detection. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, 923–944, DOI: 10.1080/01431160701352147.
- KUENZER, C., ZHANG, J., LI, J., VOIGT, S., MEHL, H. and WAGNER, W., 2007: Detection of unknown coal fires: synergy of coal fire risk area delineation and improved thermal anomaly extraction. In: *International Journal of Remote Sensing*, , DOI: 10.1080/01431160701250432, Vol. 28, pp. 4561–4585.
- KUENZER, C., ZHANG, J., SUN, Y., JIA, Y., and S. DECH, 2012: Coal fires revisited: the Wuda coal field in the aftermath of extensive coal fire research and accelerating extinction activities. *International Journal of Coal Geology*, 102, 75–86, doi: 10.1016/j.coal.2012.07.006.
- KUENZER, C., ZHANG, J., TETZLAFF, A., VOIGT, S., VAN DIJK, P., WAGNER, W. and MEHL, H., 2007: Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: Investigating two arid mining environments in north-central China. In: *Applied Geography*, Vol. 27, pp. 42–62.
- VAN DIJK, P., ZHANG, J., JUN, W., KUENZER, C. and K.H. WOLF, 2011: Assessment of the contribution of in-situ combustion of coal to greenhouse gas emission; based on a comparison of Chinese mining information to previous remote sensing estimates. *International Journal of Coal Geology, Special Issue RS/GIS*, DOI: 10.1016/j.coal.2011.01.009; pp. 108–119.

- WESSLING, S., KUENZER, C., KESSELS, W., and WUTTKE, M., 2008: Numerical modelling to analyze underground coal fire induced thermal surface anomalies. *International Journal of Coal Geology*, Vol. 74, DOI 10.1016/j.coal.2007.12.005, pp. 175–184
- ZHANG, J. and KUENZER, C., 2007: Thermal surface characteristics of coal fires 1: Results of in-situ measurements. *Journal of Applied Geophysics*, DOI:10.1016/j.jappgeo.2007.08.002, Vol. 63, pp. 117–134.
- ZHANG, J., KUENZER, C., TETZLAFF, A., OETTL, D., ZHUKOV, B. and WAGNER, W., 2007: Thermal characteristics of coal fires 2: Results of measurements on simulated coal fires. *Journal of Applied Geophysics*, DOI:10.1016/j.jappgeo.2007.08.003, Vol. 63, pp. 135–147.
- ZHANG, X., ZHANG, J., KUENZER, C., VOIGT, S. and WAGNER, W., 2004: Capability evaluation of 3–5 μ m and 8–12,5 μ m airborne thermal data for underground coalfire detection. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 12, pp. 2245–2258.

ISBN Buchkapitel:

- HECKER, C., KUENZER, C., and ZHANG, J., 2007: Remote sensing based coal fire detection with low resolution MODIS data. In: Stracher, G.B. (Ed.) *Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World*, Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, v. XVIII, doi: 10.1130/2007.4118(15), pp. 229–239.
- KUENZER, C., ZHANG, J., TETZLAFF, A., and S. DECH, 2013: Thermal Infrared Remote Sensing of Surface and underground Coal Fires. . In (eds.) Kuenzer, C. and S. Dech 2013: *Thermal Infrared Remote Sensing – Sensors, Methods, Applications*. Remote Sensing and Digital Image Processing Series, Volume 17, 572 pp., ISBN 978-94-007-6638-9, pp. 429–451.
- KUENZER, C., 2007: Coal Mining in China. In: Schumacher-Voelker, E., and Mueller, B., (Eds.), 2007: *BusinessFocus China, Energy: A Comprehensive Overview of the Chinese Energy Sector*. gic Deutschland Verlag, 281 pp., ISBN: 978-3-940114-00-6, pp. 62–68.
- KUENZER, C., ZHANG, J., HIRNER, A., BO, Y., JIA, Y. and SUN, Y., 2008: Multitemporal in-situ mapping of the Wuda coal fires from 2000 to 2005 – assessing coal fire dynamics. In: UNESCO Beijing, 2008, *Spontaneous coal seam fires: mitigating a global disaster*. ERSEC ecological book series, Vol. 4, 602 pp., ISBN 978-7-302-17140-9, pp. 132–148.
- KUENZER, C., ZHANG, J., TETZLAFF, A. VOIGT, S. and WAGNER, W., 2008: Automated demarcation, detection and quantification of coal fires in China using remote sensing data. In: UNESCO Beijing, 2008, *Spontaneous coal seam fires: mitigating a global disaster*. ERSEC ecological book series, Vol. 4, 602 pp., ISBN 978-7-302-17140-9, pp. 362–380.
- STRACHER, G.B., KUENZER, C., HECKER, C., ZHANG, J., SCHROEDER, P.A., and McCORMACK, J.K., 2012, Wuda and Ruqigou Coalfield Fires of Northern China in Stracher, G.B., Prakash, A., and Sokol, E.V., eds., *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*, Volume 2: Photographs and Multimedia Tours, Elsevier.