

# Ableitung von Eisen(II, III)oxid in Fließgewässern mittels Multispektraldaten

CHRISTOPH ULRICH<sup>1</sup>, LUTZ BANNEHR<sup>1</sup> & ANGELA LAUSCH<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Aufgrund der weltweiten Bergbauaktivitäten in unmittelbarer Nähe von Seen und Flüssen stellt die Verockerung (Verschlammung durch Eisen(III)hydroxid) von Gewässern ein latentes globales Umweltproblem dar. Der Verockerungsprozess entsteht durch eisenhaltiges Mienenabwasser und Grundwasserableitungen während der Bergbauaktivitäten.*

*Zur Ableitung von Eisen(II, III)oxiden in Fließgewässern in Tagebauregionen werden Spektralindizes herangezogen, die Indikatoren für die Konzentration von Eisen(II) und Eisen(III) darstellen. In der Literatur wurden diese Indizes bislang zur Bodenanalyse herangezogen. Als Datenbasis für die Multispektralanalyse dienen Daten vom Landsat 8 OLI. Im November 2015 ist infolge eines Dammbrochs in Brasilien eine hohe Eisenoxidkonzentration im Fluss „Rio Doce“ eingeschwemmt worden. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Spektralindizes durchaus auf Fließgewässer übertragbar sind und einen guten Indikator für hohe Eisenoxidkonzentrationen darstellen.*

## 1 Einleitung

Weltweit führen Bergbauaktivitäten in unmittelbarer Nähe von Seen und Flüssen zu Umweltproblemen. Durch die Absenkung des Grundwasserspiegels, der Lagerung des Abraums und den Bergbauabflüssen kommt es zu einem erhöhten Eintrag gelöster Metalle (Fe, Al, Mn, Cu) und Säure (SÁNCHEZ 2008). Diese Eintragungen führen zu einem Artensterben im Gewässer. Besonders dramatisch war dies im November 2015 in Brasilien zu sehen, wo große Mengen an Mienenabwasser aufgrund zweier Dammbroche den Fluss „Rio Doce“ verseuchten (BRÜHWILLER 2015).

Im geringeren Ausmaß sind die Folgen des Tagebaus auch in der deutschen Lausitz anhand dem Fluss „Spree“ und dessen Zuflüsse zuerkennen (AKTIONSBÜNDNIS KLARE SPREE E.V. 2013). In beiden Fällen hat sich der Fluss ockerartig verfärbt, was auf einen hohen Eisengehalt schließen lässt.

Unter normalen und natürlichen Bedingungen ist Eisen in vielen Gewässern vorhanden, jedoch in geringerer Konzentration. So beträgt der Gesamteisengehalt in Flüssen etwa 0,5 – 1 ppm und im Grundwasser ca. 100 ppm. Im Vergleich dazu beträgt der Eisengehalt im Meereswasser nur etwa 0,001 – 0,003 ppm (LENNTECH 2015).

Elementares Eisen sowie zahlreiche Eisenverbindungen sind unter normalen Umständen wasserunlöslich (LENNTECH 2015). Ausnahmen bilden das reduzierte, zweiwertige Eisen (Eisen II ( $\text{Fe}^{2+}$ )) und das dreiwertige Eisen (Eisen(III) ( $\text{Fe}^{3+}$ )). Während Eisen(II) nur unter reduzierten

---

<sup>1</sup> Hochschule Anhalt, Institut für Geoinformation und Vermessung, Bauhausstraße 8, D-06846 Dessau, E-Mail: [c.ulrich, l.bannehr]@afg.hs-anhalt.de

<sup>2</sup> Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Department Landschaftsökologie, Permoserstraße 15, D-04318 Leipzig, E-Mail: angela.lausch@ufz.de

Bedingungen mit neutralen pH-Wert gelöst vorliegt, ist es Eisen(III) nur in sauren Gewässern (ENDER et al. 2012).

Durch Hydrolyse von Eisen(III) entsteht Eisen(III)hydroxid. Dieses fällt bei einem neutralen pH-Wert des Gewässers als Schlamm aus und führt zu einer ockerartigen Verfärbung des Gewässers (Uhlmann et al. 2013). Dieses Phänomen wird als Verockerung bezeichnet (Ministerium für Wirtschaft und Energie des Landes Brandenburg 2015). Verockerung resultiert unter anderem aus den Eisenfrachten der Bergbaue.

Im Allgemeinen beinhaltet die Bestimmung der Schwermetallkonzentration in Gewässern mehrere Arbeitsschritte:

1. Systematisches Sammeln von Gewässerproben,
2. Laboranalysen und
3. Interpolation der punktuellen Ergebnisse (CHOE et al. 2008).

Dies ist jedoch zeit- und kostenintensiv. Eine Alternative bietet der physikalisch-analytische Ansatz der multi- und hyperspektralen Fernerkundung. In der Vergangenheit wurde versucht, mittels Methoden der Fernerkundung, flächendeckend kostengünstige Algorithmen zur Ableitung der Wasserinhaltsstoffe zu entwickeln (CHOE et al. 2008). Die ersten Verfahren entstammen der Bildspektroskopie in den Achtzigerjahren des letzten Jahrhunderts. Gleichzeitig erfolgte die Entwicklung der ersten hyperspektralen Fernerkundungssensoren, die sich seitdem rasant weiterentwickelt haben und besonders für die Identifikation von Schwermetallen im Boden eignen (MELENDENZ-PASTOR et al. 2011).

Im Weiteren wird die Anwendung verschiedener Spektralindizes zur Ableitung von Eisen(II) und Eisen(III) auf das Gebiet vom „Rio Doce“ angewendet. Bislang wurden diese Indizes für Bodenanalysen herangezogen. Der vorliegende Fall zeigt, dass sich Spektraloperationen auch sehr gut auf verockerte Fließgewässer anwenden lassen. Zur Beurteilung der Anwendbarkeit der Indizes werden der Fluss „Rio Doce“ mittels der Sensoren vom Landsat 8 OLI analysiert.

## **2 Untersuchungsregion - Fluss „Rio Doce“ in Brasilien**

Der Fluss „Rio Doce“ war ein artenreicher Fluss, bis im November 2015 zwei Staumauern eines Eisenerzbergwerkes brachen. Die ausgelöste Schlammlawine ergoss sich in den Fluss, der die Abflüsse der Eisenerzmine 660 km bis an die Atlantikküste transportierte (UPADEK 2016). Die Abflüsse des Bergbaus enthielten verschiedene Schwermetalle, beispielsweise Arsen, Aluminium, Blei, Kupfer und Eisenoxide (EISENHAMMER 2015; FLÖRKE 2015). Folglich kam es zu einem großen Artensterben sowie zur rotbraunen Verfärbung des Flusses (UPADEK 2016). Ein Überblick über das betroffene Gebiet ist in Abb. 1 dargestellt.

Zur Ableitung von Eisenoxiden wurden für das Flussgebiet entlang des „Rio Doce“ betroffene Gebiet im Zeitraum der Naturkatastrophe Landsat 8 – Satellitendaten genutzt. Andere Satellitendaten wie Sentinel 2 waren für diesen Zeitraum nicht verfügbar. Die Analysen wurden zum einen an der betroffenen Mine selbst und zum anderen an einem Staudamm westlich der Stadt „Colatina“ durchgeführt.

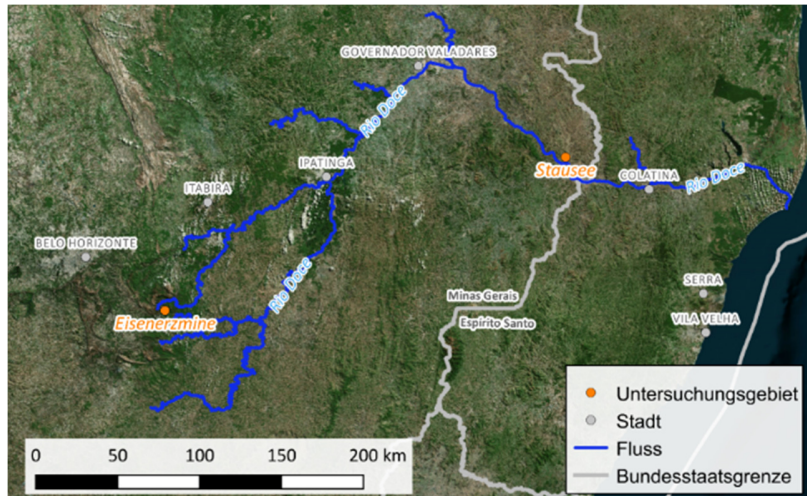


Abb. 1: Darstellung der Untersuchungsgebiete in Brasilien; Datenquelle: Openstreetmap; Hintergrundkarte: Bing Aerial

Die untersuchte Eisenerzmine liegt nahe der Bergbaustadt „Mariane“. Dort brachen zwei Dämme der Rückhaltebecken aufgrund des Abraums und der Abwässer. Dies löste eine Schlammlawine aus, die sich in den Fluss „Rio Doce“ ergoss (FLÖRKE 2015). Der Bereich rund um die Eisenerzmine ist interessant, um die Methodiken anhand der trockenen Abraumsedimente zu prüfen. Ferner ist der Stausee aufgrund der großen Gewässerfläche geeignet. Da die Bodenpixelauflösung vom Landsat 8 OLI 30 m beträgt, ist die normale Flussbreite für eine genaue Analyse nicht ausreichend.

### 3 Methodik

Die hier aufgeführten Methoden wurden schon mehrfach von den Geologen zur Ableitung von Eisenoxiden im Boden eingesetzt. Im Folgenden wird versucht, mit diesen Methoden Rückschlüsse auf Eisen(II)- bzw. Eisen(III)oxid in Fließgewässern zu schließen. Im Allgemeinen lassen sich Wasserinhaltsstoffe mittels Fernerkundungsmethoden nur im sichtbaren Bereich des Lichtes (VIS) bestimmen (GEGE 2004). Wie in Abb. 2 zu erkennen ist, absorbiert das Wasser zum großen Teil das solare Spektrum, Ausnahme bildet jedoch der Spektralbereich des VIS von 390 nm bis 780 nm (KELLER 1999).

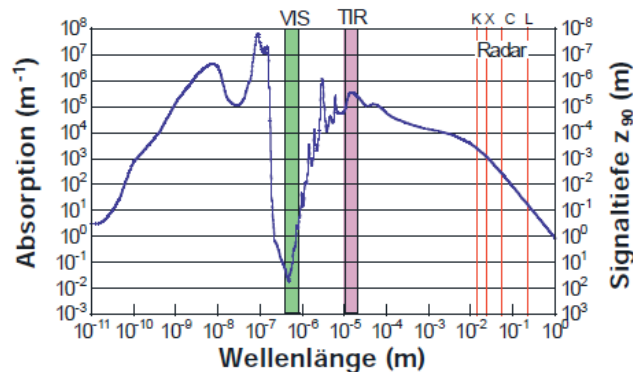


Abb. 2: Absorption von reinem Wasser und die daraus berechnete Dicke der Wasserschicht (GEGE 2004: 73).

Aufgrund des Reflektionsvermögens elektromagnetischer Energie von Gewässern, können im VIS verschiedene Gewässerinhaltsstoffe fernerkundet werden. Diese werden allgemein in drei Klassen untergliedert: Phytoplankton, gelöste organische Substanzen und nicht-organische Schwebstoffe (Gege 2004).

Aufgrund der Inhaltsstoffe reflektieren alle Gewässer unterschiedlich und werden deshalb in Case-I - (offene Ozeane) und Case-II - (Küsten- und Binnengewässer) Gewässer untergliedert (Morel und Antoine 2007). In Abb. 3 wird dies illustriert.

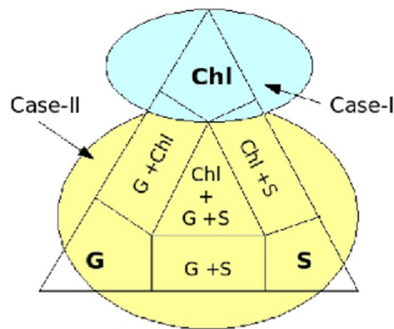


Abb. 3: Gewässereinteilung nach den drei Sichtbaren Inhaltsstoffen Chlorophyll-a (Chl), Gelbstoffe (G) und Schwebstoff-Gehalt (S) in Case I (hellblau) und Case II (gelb) (FRANK 2008: 16).

Während bei Case I-Gewässern vor allem durch Phytoplankton die optischen Eigenschaften bestimmt werden, so können bei Case II-Gewässern auch Gelb- und Schwebstoffe Einfluss auf diese Eigenschaften ausüben. Dadurch lassen sich Case II-Gewässer in sechs Untergruppen gliedern (FRAUENDORF 2002).

### 3.1 Falschfarbenbilder

Zur Bildinterpretation werden unterschiedliche Kanalkombinationen durchgeführt. In der Geologie wurde daher häufig beim Landsat 7 TM die RGB-Kombination (TM 7-4-2) genutzt (MWANIKI et al. 2015). Diese Kanalkombination entspricht beim Landsat 8 OLI den Kanälen (OLI 7-5-3). Dadurch lassen sich unterschiedliche Gesteins- und Bodentypen gut erkennen (MWANIKI et al. 2015).

### 3.2 Spektralindizes

Zur Ableitung von Eisenoxiden mittels eines Spektralindizes werden in der Literatur einige Methoden vorgestellt (siehe Tab. 2). Diese beziehen sich in den meisten Fällen auf die Detektion von Eisenoxiden im Boden mittels eines Fernerkundungssatelliten wie beispielsweise Landsat 7 TM oder ASTER (VAN DER MEER et al. 2014). Da für den Zeitraum der Untersuchungen nur Landsat 8 OLI-Daten zur Verfügung standen, wurden die Spektralindizes vom Landsat 7 TM- und ASTER-Satelliten an die Kanäle des Landsat 8 OLI-Satelliten angepasst. In Tab. 1 sind die Bänder der drei genannten Fernerkundungssatelliten entsprechend der Wellenlänge aufgelistet. Wie zu erkennen ist, überlappen sich einige Kanäle der Landsat-Satelliten mit denen vom ASTER-Satelliten. Während die Landsat-Baureihe eher auf den VIS-Bereich ausgelegt ist, besitzt ASTER eine starke Differenzierung im SWIR-Bereich (VAN DER MEER et al. 2014).

Aufgrund der Überlappung der Kanäle vom Landsat 7 TM und ASTER zum Landsat 8 OLI können die Spektralindizes entsprechend an den Landsat 8 angepasst werden. Dieser Sachverhalt ist in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 1: Auflistung der benötigten Kanäle der Fernerkundungssatelliten Landsat 7 TM, Landsat 8 OLI und ASTER.

Beschreibung	Landsat 7 TM <sup>3</sup>		Landsat 8 OLI <sup>3</sup>		ASTER <sup>4</sup>	
	Band	Zentrale Wellenlänge [nm]	Band	Zentrale Wellenlänge [nm]	Band	Zentrale Wellenlänge [nm]
Aerosole	-	-	1	440	-	-
Blau	1	485	2	480		
Grün	2	560	3	560	1	560
Rot	3	660	4	655	2	660
Nahes Infrarot	4	835	5	865	3N	820
Cirruswolken	-	-	9	1.370	-	-
SWIR I	5	1.650	6	1.610	4	1.650
SWIR II	7	2.220	7	2.200	5	2.165
Panchromatic	8	710	8	590	-	-

Die Anpassung der Kanäle an den Landsat 8 OLI erfolgt problemlos, da Landsat 7 und 8 nahezu gleich aufgebaut sind und der ASTER-Satellit zur Ableitung von Eisenoxiden nur die Kanäle eins bis fünf benötigt.

Tab. 2: Darstellung der Spektralindizes zur Bestimmung von Eisen(II)- und Eisen(III)oxide.

Spektralindizes	Landsat TM 7		Landsat 8 OLI
Eisen(II)- u. Eisen(III)oxide	$\frac{TM_3}{TM_1}$	(van der Meer et al. 2014; Mwaniki et al. 2015)	$\frac{OLI_4}{OLI_2}$
Eisen(III)	$\frac{TM_3}{TM_1}$	(Durning et al. 1998)	$\frac{OLI_4}{OLI_2}$
Eisen(II)	$\frac{TM_5}{TM_4}$	(Durning et al. 1998; Mwaniki et al. 2015)	$\frac{OLI_6}{OLI_5}$
Spektralindizes	ASTER		Landsat 8 OLI
Eisen(III)	$\frac{Aster_2}{Aster_1}$	(KALINOWSKI und OLIVER 2004)	$\frac{OLI_4}{OLI_3}$
Eisen(II)	$\frac{Aster_5}{Aster_3} + \frac{Aster_1}{Aster_2}$	(KALINOWSKI und OLIVER 2004)	$\frac{OLI_7}{OLI_5} + \frac{OLI_3}{OLI_4}$

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Eisenerzmine nahe der Bergbaustadt „Mariane“

Anhand der Falschfarbenkombination (Landsat 8 OLI, Kanal 7-5-3) der Eisenerzmine sind die einzelnen Bodentypen gut zu differenzieren. Diese Methodik ist jedoch nicht geeignet, um die Eisen(II)- und Eisen(III)oxide im Gewässer abzuleiten. Denn diese werden in Abb. 4 (*rechts*) blau dargestellt, obwohl in Abb. 4 (*links*) eine deutliche Verockerung zuerkennen ist.

<sup>3</sup> Landsat-Kanäle nach Satellit: [http://landsat.usgs.gov/best\\_spectral\\_bands\\_to\\_use.php](http://landsat.usgs.gov/best_spectral_bands_to_use.php)

<sup>4</sup> ASTER-Kanäle: [http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_Documents/aster\\_user\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf)

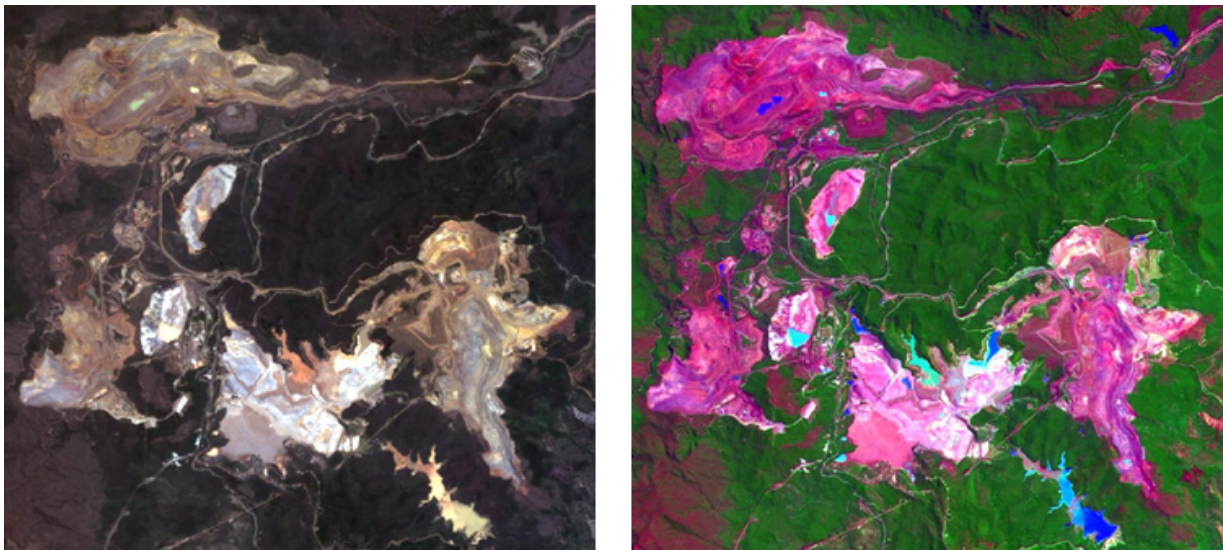


Abb. 4: Eisenerzmine vor dem Unglück am 5.11.2015. Links als RGB-Bild (OLI 4-3-2) und rechts als Falschfarbenbild (OLI 7-5-3). Im Falschfarbenbild ist Vegetation grün, Gewässer blau und Boden in rötlichen Variationen.

In Abb. 5 ist eine Indexdarstellung von Eisen(II)- und Eisen(III)oxiden im Bereich der Eisenerzmine vor den Damnbrüchen dargestellt. Das linke Bild der Abb. 5 stellt das Resultat mittels der Spektralindizes vom Landsat 7 TM und das rechte mittels der ASTER-Indizes dar. Die Skala beider Berechnungen ist gleich, sodass die Ergebnisse vergleichbar sind. In Abb. 5 sind nur die Farben innerhalb des angegebenen Wertebereiches dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Resultate der Spektralindizes stellenweise dieselben Orte aufzeigen, lediglich der Umfang ist unterschiedlich groß. Des Weiteren sind die Eisenoxide räumlich deutlich voneinander getrennt. Während Eisen(II)oxide nur an trockenen Stellen vorhanden sind, befinden sich die Eisen(III)oxide in den Gewässern.

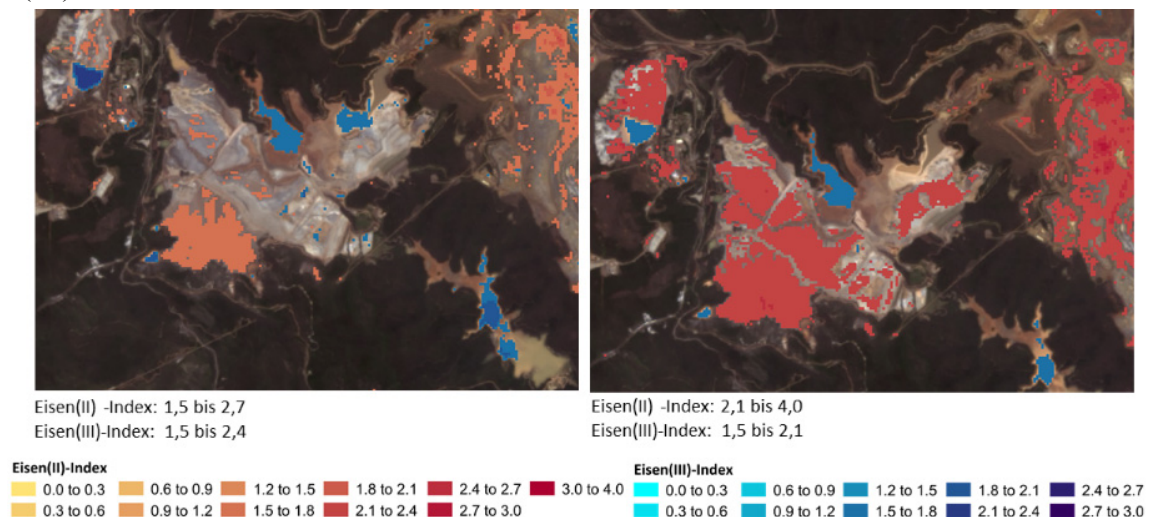


Abb. 5: Darstellung der Eisen(II)- und Eisen(III)oxid - Menge als Index vor dem Minenunglück. Übertragung der Spektralindizes von Landsat 7 TM (links) und ASTER (rechts) auf Landsat 8 OLI.

Die ASTER-Indizes liefern eine bessere Differenzierung von Eisen(II)oxiden. Dem gegenüber ist der Landsat 7 TM-Index zur Ableitung von Eisen(III)oxiden besser geeignet, da der ASTER-Satellit keinen blauen-Kanal besitzt.

Abb. 6 stellt die betroffene Eisenerzmine nach den Staudammbrüchen dar. Anhand der starken Durchmischung der Eisen(II)- und Eisen(III)oxide, sind die Folgen der Schlammlawine offensichtlich zu erkennen. Allerdings befindet sich das Eisen(II)oxid noch auf den Abraumflächen und das Eisen(III)oxid im Flussbett. Ferner ist anhand des Eisen(III)-Indizes des Landsat 7 TM ein Rückgang der Konzentration zu erkennen. Folglich wurde Eisen(III)oxid mit der Schlammlawine in den „Rio Doce“ eingeschwemmt.

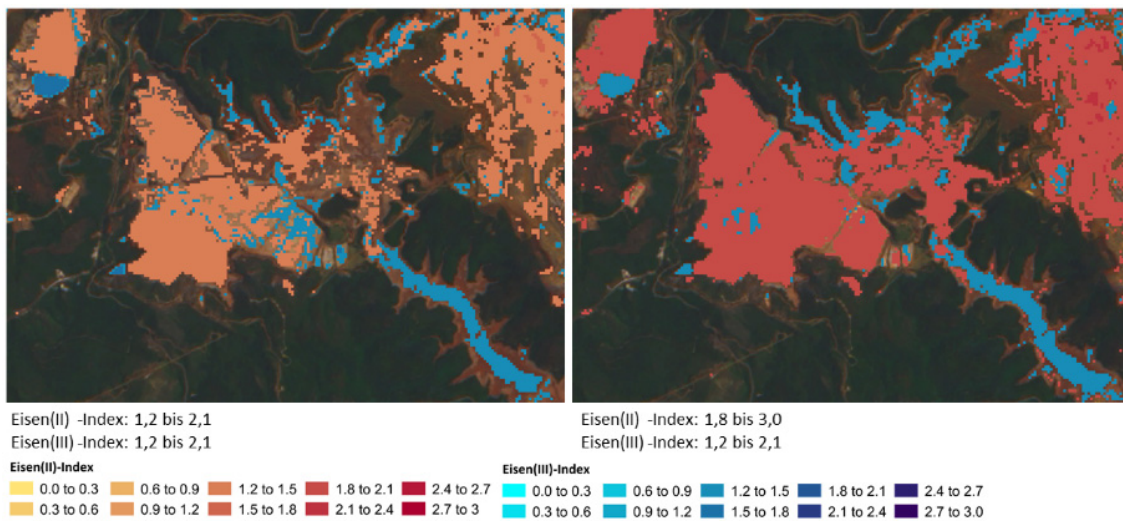


Abb. 6: Darstellung der Eisen(II)- und Eisen(III)oxid - Menge als Index nach dem Minenunglück. Übertragung der Spektralindizes von Landsat 7 TM (links) und ASTER (rechts) auf Landsat 8 OLI.

#### 4.2 Stausee westlich von Colatina

Übersichtshalber ist in Abb. 7 der Stausee vor und nach dem Minenunglück zum einen als RGB-Bild dargestellt und zum anderen als Ratio-Bild. Dazu wurden drei Spektralindizes des Landsat 7 TM ( $\frac{TM_3}{TM_1}$ ,  $\frac{TM_5}{TM_7}$ ,  $\frac{TM_5}{TM_4}$ ) auf den Landsat 8 OLI übertragen. Mit Hilfe des Index  $\frac{TM_5}{TM_7}$  können Karbonate, Mineralien mit einer Hydroxylgruppe sowie Vegetationen abgeleitet werden. Als RGB-Kombinationen stellen die Indizes ( $\frac{TM_3}{TM_1} - \frac{TM_5}{TM_7} - \frac{TM_5}{TM_4}$ ) Eisen(III) rot, Eisen(II) blau, Gewässer schwarz und Vegetation grün dar (DURNING et al. 1998). Hier ist deutlich zu erkennen, dass der „Rio Doce“ im Bereich des Stausees viel Phytoplankton besaß, was in diesem Fall ein Indikator für einen intakten Lebensraum ist. Die gravierenden Folgen der Dammbürche der Eisenerzmine sind anhand der Verockerung und somit an der hohen Eisen(III)oxid Konzentration ersichtlich.

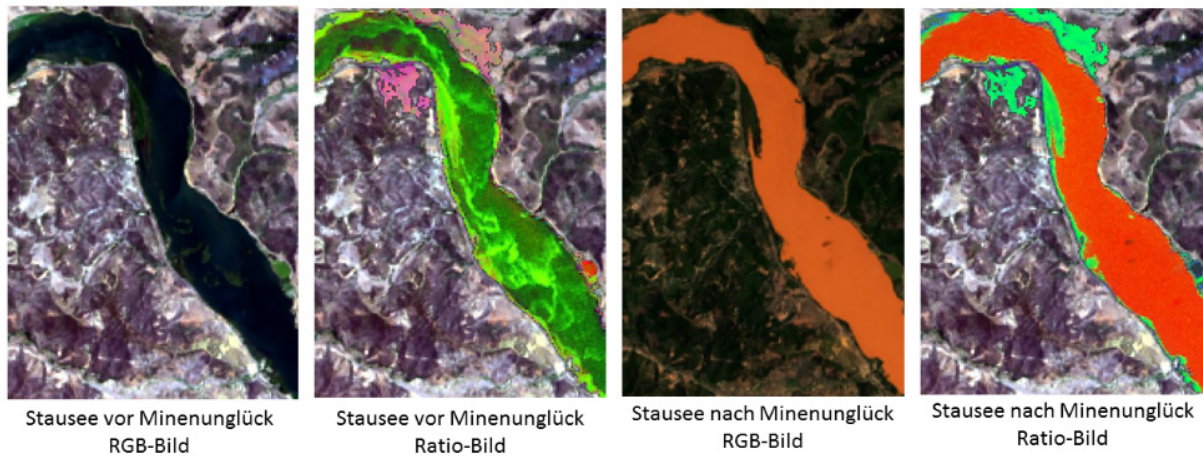


Abb. 7: Darstellung des Stausees vor und nach dem Minenunglück als RGB- und Ratio-Bild (Landsat TM 7 3/1-5/7-5/4).

Wie stark die Eisen(III)oxid Konzentration zugenommen hat, ist in Abb. 8 zuerkennen. Während der Eisen(III)-Index vor der Schlammlawine nur geringe Mengen an Eisen(III)oxide aufzeigt, so hat im Nachhinein die Konzentration deutlich zugenommen.

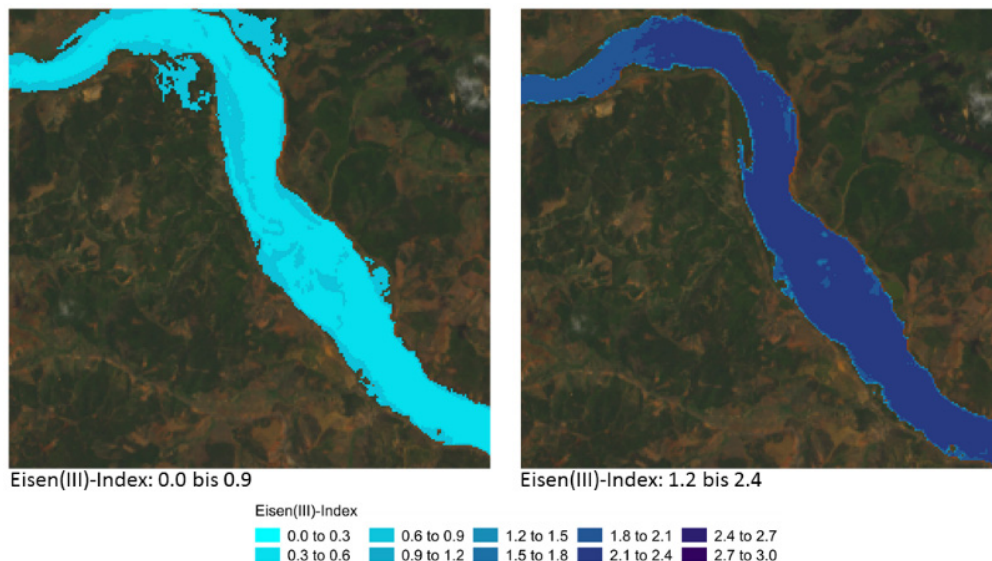


Abb. 8: Darstellung des Eisen(III)-Indexes am Stausee westlich von Colatina vor den Dammbürchen an der Eisenerzmine (links) und nach den Dammbürchen (rechts).

## 5 Fazit & Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass die im VIS Bereich liegenden spektralen Kanäle von Landsat 8 OLI genutzt werden können, um Informationen über die Eisen(II)- und Eisen(III)oxid Konzentration abzuleiten. Die Spektraloperationen machen das Ausmaß der Katastrophe der Dammbürche in Brasilien deutlich sichtbar. Die Spektralindizes des Landsat 7 TM- und ASTER-Satelliten lieferten am „Rio Doce“ unterschiedliche Ergebnisse. Der zur Ableitung von Eisen(II)oxide eingesetzte



ASTER-Index lieferte eine bessere Differenzierung als der Index des Landsat 7 TM. Für die Ableitung von Eisen(III)oxide verhielt es sich genau andersherum, da führte der Spektralindex des Landsat 7 TM zu einem differenzierteren Ergebnis.

Das Falschfarbenbild (OLI 7-5-3) lieferte bei der Ableitung von Eisen(II, III)oxide keine positiven Ergebnisse.

Probleme der Verockerung sind weltweit zu finden, wenn auch meist im geringeren Ausmaß. So findet in der Lausitz, infolge des offenen Tagebaus, eine stetige Verockerung der Spree und der künstlich geschaffenen Gewässer statt. Zur quantitativen Bestimmung der verschiedenen Eisenkonzentrationen werden derzeit Algorithmen basierend auf hyperspektralen Fernerkundungsdaten entwickelt.

## 6 Literaturverzeichnis

- AKTIONSBÜNDNIS KLARE SPREE E.V., 2013: Aktionsbündnis „Klare Spree“. Blog. Allgemeine Informationen. <http://klare-spree.de/de/informationen-zur-verockerung/allgemeine-informationen.html> (23.09.2015).
- BRÜHWILLER, T., 2015: Folgen eines Dammbrochs: Brasiliens toter Fluss - NZZ Unglücksfälle und Verbrechen. Nachrichten. Neue Zürcher Zeitung. <http://www.nzz.ch/panorama/ungluecksfaelle-und-verbrechen/brasiliens-toter-fluss-1.18648108> (09.02.2016).
- CHOE, E., VAN DER MEER, F., VAN RUITENBEEK, F., VAN DER WERFF, H., DE SMETH B. & KIM, K.-W., 2008: Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain. *Remote Sensing of Environment*, **112** (7), 3222-3233.
- DURNING, W.P., POLIS, S.R., FROST, E.G. & KAISER, J.W., 1998: Integrated Use of Remote Sensing and GIS for Mineral Exploration. [http://www.gis.usu.edu/docs/data/nasa\\_arc/nasa\\_arc97/SDSU/LaCuesta.pdf](http://www.gis.usu.edu/docs/data/nasa_arc/nasa_arc97/SDSU/LaCuesta.pdf).
- EISENHAMMER, S., 2015: Mud from Brazil dam burst is toxic, U.N. says. Reuters (26.11.2015). <http://www.reuters.com/article/us-brazil-damburst-mud-idUSKBN0TE2O520151126> (30.03.2016).
- ENDER, R., FLEISCHHAMMEL, P., GRÜNEWALD, U., SCHAPP, A., SCHOENHEINZ, D., SCHÜMBERG, S., SEILER, D., UHLMANN, W. & ZIMMERMANN, W., 2012: „Perspektive See“ - Zum Stand der Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Lausitzer Bergbaufolgeseen. Abschlussbericht Projektzeitraum 2008-2012. Cottbus, Dresden. [http://www.lmbv.de/tl\\_files/LMBV/Dokumente/Wassermanagement/Forschung%20zu%200Seen/Perspektive\\_See\\_Abschlussbericht2008-2012.pdf](http://www.lmbv.de/tl_files/LMBV/Dokumente/Wassermanagement/Forschung%20zu%200Seen/Perspektive_See_Abschlussbericht2008-2012.pdf).
- FLÖRKE, S., 2015: 660 Kilometer Fluss, 60 Millionen Kubikmeter Gift. Welt Online (26.11.2015). <http://www.welt.de/vermishtes/article149323787/660-Kilometer-Fluss-60-Millionen-Kubikmeter-Gift.html> (30.03.2016).
- FRANK, T., 2008: Chlorophyll-a-Kartierung des Kivusees (Ruanda, Kongo) mit Fernerkundungsdaten. Diplomarbeit, Zürich.
- FRAUENDORF, J., 2002: Entwicklung und Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Ableitung von Wasserqualitätsparametern verschiedener Restseen des Braunkohletagebaus in

- Mitteldeutschland. Dissertation. Halle (Saale). <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/02/02H226/prom.pdf> (11.01.2015).
- GEGE, P., 2004: Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen. Laufener Seminarbeiträge 2/2003. Laufen/Salzach 2004, 73-78. [http://www.anl.bayern.de/publikationen/spezialbeitraege/doc/lsb2003\\_02\\_011\\_gege\\_fernerkundung\\_wasserinhaltsstoffe.pdf](http://www.anl.bayern.de/publikationen/spezialbeitraege/doc/lsb2003_02_011_gege_fernerkundung_wasserinhaltsstoffe.pdf) (10.12.2015).
- KALINOWSKI, A. & OLIVER, S., 2004: ASTER Mineral Index Processing Manual. Remote Sensing Applications, Geoscience Australia, 36 p.
- KELLER, I., 1999: Invariante Textur-Klassifikation in der Fernerkundung. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades des Doktors der Naturwissenschaften, Berlin. [http://userpage.fu-berlin.de/geoiss/ress/15\\_Keller\\_Ivo.pdf](http://userpage.fu-berlin.de/geoiss/ress/15_Keller_Ivo.pdf) (10.12.2015).
- LENNTech, 2015: Eisen und Wasser. Eisen (Fe) und Wasser. <http://www.lenntech.de/pse/wasser/eisen/eisen-und-wasser.htm> (22.01.2016).
- VAN DER MEER, F.D., VAN DER WERFF, H.M.A. & VAN RUITENBEEK, F.J.A., 2014: Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment* **148**, 124-133.
- MELENDENZ-PASTOR, I., NAVARRO-PEDREÑO, J., GÓMEZ, I. & ALMENDRO-CANDEL, M.B., 2011: The use of remote sensing to locate heavy metal as source of pollution. *Advances in Environmental Research*, **7**, 225-233.
- MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE DES LANDES BRANDENBURG, 2015: Verockerung der Spree. Energieland Brandenburg. <http://www.energie.brandenburg.de/sixcms/detail.php/bb1.c.323611.de> (04.01.2015).
- MOREL, A. & ANTOINE, D., 2007: ATBD 2.9 - Pigment Index Retrieval in Case 1 Waters. Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (4), 25.
- MWANIKI, M.W., MOELLER, M.S. & SCHELLMANN, G., 2015: A comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualising lineaments: A case study of central region Kenya. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **40** (7/W3), 897-903.
- SÁNCHEZ, J., 2008: Acid Mine Drainage in the Iberian Pyrite Belt: an Overview with Special Emphasis on Generation Mechanisms, Aqueous Composition and Associated Mineral Phases. Band **10**, Sevilla, 34-43. [http://www.ehu.es/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_34.pdf](http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_34.pdf) (22.01.2016).
- UHLMANN, W., THEISS, S., NESTLER, W. & LAUS, T., 2013: Studie zu den Auswirkungen des Grundwasserwiederanstieges auf die Beschaffenheit der Oberflächengewässer in den Sanierungsgebieten B1 (Seese/Schlabendorf) und B2 (Greifenhain/ Gräbendorf). Im Auftrag der LMBV. Dresden. <http://www.braunespreewatch.de/images/studien/13-03-29Studie-Eisenbelastung-Nordraum-Spree-2013.pdf> (06.01.2015).
- UPADEK, C., 2016: Umweltkatastrophe am Rio Doce - Das Leben nach der Schlammflut. Nachrichten. Deutschlandfunk. [http://www.deutschlandfunk.de/umweltkatastrophe-am-rio-doce-das-leben-nach-der-schlammflut.799.de.html?dram:article\\_id=343403](http://www.deutschlandfunk.de/umweltkatastrophe-am-rio-doce-das-leben-nach-der-schlammflut.799.de.html?dram:article_id=343403) (30.03.2016).