

GIS-gestützte Analysen zur Erfassung anthropogener Einflüsse auf den Landschaftswasserhaushalt

GIS-based Analyses for the Detection of Anthropogenic Impact on the Regional Water Balance

Annette Christina Leuschner¹, Stephan van Gasselt², Christoph Merz^{1,3}, Jörg Steidl¹

¹Institut für Landschaftswasserhaushalt, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e. V. · ac.leuschner@gmail.com

²Institut für Geoinformatik, Universität Seoul

³Institut für Geologische Wissenschaften, FU Berlin

Zusammenfassung: Eine qualitativ hochwertige Raumanalyse ist in Hinblick auf Struktur- und Nutzungswandel einer Region für hydrologische Fragestellungen von großer Relevanz. Um dies zu gewährleisten, ist eine umfangreiche räumliche Daten- und Parameteraufnahme erforderlich. Diese können aber in großen Raumskalen flächendeckend durch In-situ-Monitoring allein nicht immer erfasst werden, sodass fernerkundliche Daten eine ideale zusätzliche Grundlage für eine hydrologische Gebietsanalyse darstellen. Im Rahmen dieses Beitrags werden Arbeitsabläufe dargestellt, welche die Ableitung hydrologischer Modelldaten aus Luftbildern erlauben. Am Beispiel einer anthropogen stark überprägten Region werden Informationen für eine multitemporale hydrologische Modellierung genutzt, um sie auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen.

Schlüsselwörter: Luftbilder, Hydrologische Modellierung, GIS, Datenmodellierung, Landschaftswasserhaushalt

Abstract: *In the view of structural anthropogenic changes high-quality spatial analyses are of great relevance for the investigation of hydrological settings. In order to implement this, a high data density and spatial coverage are required. As it is not possible to cover large-scale areas solely by in-situ monitoring, remote sensing techniques are important additional tools also for hydrological investigations. In this article, we present a workflow which helps extracting hydrological data from aerial images. The obtained information is subsequently being used for multi-temporal hydrological modelling of a region that is highly influenced by anthropogenic overprint in order to assess its applicability.*

Keywords: *Aerial images, hydrological modeling, GIS, data modelling, water balance*

1 Motivation und Einleitung

Für die Gewährleistung eines qualitäts- und quantitätssicheren Managements der Grundwasserressourcen müssen vorhandene Ressourcen (Grund- und Oberflächenwasser) erfasst und die sie steuernden hydrologischen und geochemischen Prozesse verstanden werden. Der Landschaftswasserhaushalt beschreibt diese steuernden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse im Boden-, Grund- und Oberflächenwasser ländlicher Räume (Wohlrab et al., 1999). Einen wichtigen Teilprozess des Landschaftswasserhaushaltes stellt die Grundwasserneubildung dar. Da die Hauptquelle der Trinkwasserversorgung in Deutschland das Grund- und Quellwasser mit einem Anteil von ca. 70 %, darstellt, ist die Grundwasserneubildung als Zufuhr dieser Ressource von besonderem Interesse (Land Brandenburg, Stand 2014).

Somit ist das Verständnis über die Funktion des Landschaftswasserhaushaltes und seiner einzelnen Prozesse im gesamten hydrologischen und geochemischen System von großem wissenschaftlichen, aber auch wirtschaftlichem Interesse (Jacob, 2008).

Da hydrologische Modelle zur Abbildung und zum Verständnis der Prozesse und Interaktionen der Komponenten des Wasserhaushaltes genutzt werden, sind möglichst detaillierte Eingabeparameter für das Modell notwendig, um belastbare Aussagen der hydrologischen Entwicklungen zu erhalten.

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der GIS-basierten Erfassung von hydrologisch relevanten Parametern durch die Analyse von Luftbilddaten sowie deren effiziente Anwendung zur Bearbeitung hydrologischer Fragestellungen. Es wurde ein Ansatz entwickelt, der es erlaubt, aus nur einem fernerkundlichen Datensatz, verschiedenste hydrologisch relevante Parameter einer Landschaft zu extrahieren. Luftbilder liegen für viele Gebiete in einer sehr hohen räumlichen Auflösung (< 50 cm) vor, bei vergleichbar geringeren Kosten. Zudem liegen sie, wenn auch teilweise in geringerer spektraler Auflösung, in einer hohen räumlichen Auflösung auch für Zeiträume vor dem Einsatz von Erdbeobachtungssatelliten (1970er-Jahre) vor und erlauben so eine multitemporale Erfassung einer Landschaft mit ihren Änderungen. In Hinblick auf systematisches Monitoring kann von einem verstärkten Einsatz von Multi-sensor Small Unmanned Aerial Systems (sUAS) in der Zukunft ausgegangen werden, die das Angebot hochauflösender Luftbilder weiter verbessern (Eisenbeiss & Sauerbier, 2011).

Des Weiteren erlaubt eine metrische und spektrale Auswertung der photogrammetrischen Produkte eine räumliche detaillierte und fachspezifische Informationsvielfalt. So können Daten individuell erhoben werden. Sie können an die Genauigkeitsanforderungen angepasst, in unterschiedlichen Raum- und Zeitmaßstäben mit unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Diskretisierungen zur hydrologischen Modelluntersuchung extrahiert werden. Luftbilder bieten ein breites Anwendungsspektrum mit vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und stellen somit eine ideale Quelle zur Gewinnung multitemporaler Umweltdaten dar.

Ein wesentliches Ziel der Arbeit war es einen geeigneten GIS-basierten, durchgehenden Arbeitsablauf zu generieren, der es erlaubt die anthropogenen und klimatischen Einflüsse auf den Wasserhaushalt und seine Komponenten mithilfe von Luftbildern und einem adäquaten hydrologischen Modell zu erfassen. Dies wurde mithilfe einer geeigneten Kombination verschiedenster GIS-Analysen umgesetzt. Hierbei reichte das Spektrum der Methoden von digitalen Verfahren der Reliefanalyse über Object-Based Image Analysis (OBIA) oder Kartierung von unterirdischen Dränungssystemen anhand spektraler Merkmale, bis hin zu geostatistischen Analysemethoden zur Überführung punktueller Informationen in die Fläche. Eine besondere Herausforderung bestand darin, Dränungsnetze für numerische Modelle auf der Skala eines Einzugsgebietes zu erfassen und die Auswirkungen der Meliorationsmaßnahmen auf die Wasserressourcen modellbasiert abbilden zu können. Hierfür wurde im Rahmen der Arbeit der Ansatz von Tetzlaff et al. (2009) zur Kartierung von Dränungsnetzen aufgegriffen und weiterentwickelt.

Als Untersuchungsgebiet wurde eine für das norddeutsche Tiefland typische stark anthropogen geprägte Pleistozäne Landschaft gewählt. Es handelt sich um das mesoskalige Einzugsgebiet des Quillow, welches sich im nördlichen Teil des Bundeslandes Brandenburg befindet. Der nördliche Teil Brandenburgs zeichnet sich durch eine hohe Gewässerdichte und geringe jährliche Niederschläge von durchschnittlich 450-490 mm aus (Lahmer & Pfützner, 2003). Der Quillow durchfließt unterschiedliche Landnutzungsstrukturen und -klassen, welche größ-

tenteils (> 70 %) anthropogen überprägt sind. Zahlreiche offene Entwässerungsgräben mit Anschluss an ein flächenhaftes Dränagenetz fließen dem Gewässer zu (Lischeid et al., 2009). Historisch fanden vor allem in den letzten 50 Jahren durch die Umstrukturierung zur Großflächenwirtschaft in der DDR prägende Eingriffe in die Landschaftsstruktur durch Meliorationsmaßnahmen, wie Maßnahmen zur Werterhöhung des Bodens sowie zur landwirtschaftlichen Nutzbarmachung durch Entwässerung, statt. Daher bietet dieses Einzugsgebiet ideale Voraussetzungen, um innovative Verfahren der hydrologischen Analyse in komplexen Landschaftseinheiten zu testen.

2 Methoden und Daten

2.1 Datengrundlage

Im Rahmen der Arbeit wurden Luftbilddatensätze aus den Jahren 1953 und 2014 als primäre Datensätze genutzt. Die Luftbilder des Jahres 2014 wurden vom Amt für Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB) als RGB-NIR-Luftbilddatensätze bezogen und decken den brandenburgischen Teil des Einzugsgebiets ab, ebenso die Luftbilder des Jahres 1953, welche nur als monochrome, digitalisierte Luftbilddaten vorliegen. Die RGB-NIR-Luftbilddatensätze weisen eine Auflösung von 20 cm/px auf und stammen aus einer regelmäßig stattfindenden Befliegung des Landes Brandenburg im Auftrag der LGB aus dem Jahr 2014. Diese wurden bei einer durchschnittlichen Flughöhe von ca. 3.350 m mit dem Kamerasystem UltraCamXp (Serial Number UC-SXp-1-70119346) aufgenommen. Auf Grundlage der CIR-Luftbilder des Jahres 2014 wurde eine photogrammetrische Auswertung zur Gewinnung eines Digitalen Geländemodells (DGM) vorgenommen. Ein hoch aufgelöstes DGM ist eine wichtige Komponente des hydrologischen Modells. Zur Validierung der aus der photogrammetrischen Auswertung gewonnenen Höheninformation wurde der frei verfügbare Datensatz das GDEM2 Produkt N53E013 (2011) des Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER et al., 2014) genutzt.

Darüber hinaus wurden weitere wichtige Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung, wie Landnutzung und Meliorationsmaßnahmen aus den daraus abgeleiteten Orthofotos extrahiert. Die monochromen Luftbilddaten aus dem Jahr 1953 stammen von einer sowjetischen Befliegung und wurden durch das LGB digital aufbereitet. Da es sich um historische Luftbilddaten handelt, liegen keine technischen Befliegungsdaten vor. Daher ist eine korrekte orthographische Darstellung mit erhöhten Ungenauigkeiten in der Lage zwischen 10-15 m und in der Höhe von bis zu 100 m verbunden. Sie wurden aufgrund ihrer niedrigen spektralen Qualität nur zur Landnutzungskartierung verwendet um einer Veränderungsanalyse durchzuführen.

Weitere für die hydrologische Modellierung notwendige meteorologische Daten, wurden von acht Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im umliegenden Radius von < 20 km bezogen. Die Bodencharakterisierung erfolgte anhand der BÜK 300 (Bodengeologische Übersichtskarte im Maßstab 1:300.000, LBGR, 2012). Um die Güte der Ergebnisse des hydrologischen Modells zu überprüfen wurden gemessene Abflüsse von zwei Messstellen im Untersuchungsgebiet als Validierungsgröße erfasst.

2.2 Ableitung der hydrologischen Parameter aus Luftbildern

Für die Erfassung zeitlich variabler hydrologischer Parameter wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, welcher sich in vier Bereiche untergliedert und dessen Arbeitsablauf in Abbildung 1 dargestellt ist. Für eine geeignete photogrammetrische Auswertung wurden 72 4-Farbkanal-(RGB-NIR)-Luftbildaufnahmen aus dem Jahr 2014 verwendet, die über ERDAS IMAGINE 2013 verarbeitet wurden. Hierbei erfuhren die Daten sowohl eine Mosaikierung, als auch eine Histogrammausgleichung. Das mithilfe des LPS-Werkzeugs extrahierte Digitale Oberflächenmodell (DOM) spiegelt die Höhe der abgebildeten Oberfläche, inklusive aller Objekte, wieder. Da Objekte wie Gebäude, Gewässer, als auch vor allem die zahlreichen Forstflächen eine störende Größe bei der Darstellung der Topographie darstellen, wurde eine Korrektur des DOMs mithilfe klinometrischer Vorgaben durchgeführt (siehe u. a. Van Laar & Akça, 2007; Kraus, 1996).

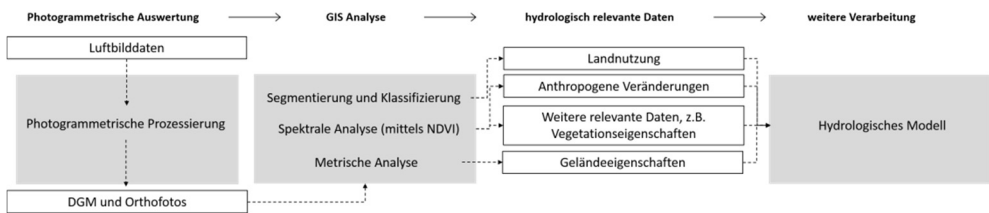


Abb. 1: Schematische Darstellung des GIS-basierten Arbeitsablaufs

Anhand des erstellten DOMs und der Orthofotos konnten hydrologisch relevante Daten, wie Landnutzungsverteilung, Topografie und unterirdische Dränungsanlagen, abgeleitet werden. Als Datensätze zur Landnutzung wurden die Ergebnisse aus der spektralen Auswertung der Orthofotos aus dem Jahr 2014 und die Luftbilder aus dem Jahr 1953 verwendet. Die Ermittlung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet erfolgte anhand des OBIA-Ansatzes, in Form eines Segmentierungs- und Klassifizierungsverfahren, da die pixelbasierte Klassifikation unter anderem bei hoch aufgelösten Bildprodukten aufgrund der hohen Varianz der spektralen Bereiche einzelner Pixel innerhalb einer Klasse zu einem starken „Salz-und-Pfeffer-Effekt“ führen kann (Neubert, 2006). Für die Segmentierung der CIR- und monochromen Luftbilddaten wurde das in ArcGIS enthaltene Tool „Mean Shift Segmentation“ verwendet. Hier basiert die Bildsegmentierung auf dem Mean-Shift-Ansatz, bei dem Bildsegmente ähnlicher spektraler Eigenschaften gruppiert werden. Zur Charakterisierung der gewonnenen Landnutzungsklassen wurde ein gängiger CIR-Interpretationsschlüssel, der Biotoptypen- und Landnutzungskartierung 2005 „BTLNK 2005“ genutzt (Ueberfuhr & Glaser, 2005).

Auf Grundlage der spektralen Eigenschaften der CIR-Luftbilddaten wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Identifizierung und Kartierung unterirdischer Dränungsanlagen ermöglicht. Hierbei wurde der Ansatz von Tetzlaff et al. (2009) weiterentwickelt, indem die Wachstumshöhen der Pflanzen über eine spektrale Analysemethode erfasst wurden. Die Möglichkeit der Interpretation unterirdischer Dränungsanlagen ergibt sich aus Unterschieden im Pflanzenwachstum, beeinflusst durch die dränungsbedingten Unterschiede in der Bodenfeuchte. Infolge der Veränderungen in der Bodenfeuchte wird auch das Pflanzenwachstum beeinflusst, sodass sich die Dränungsmuster nicht nur optisch auf freien Ackerflächen, sondern auch durch die spektral erfassten unterschiedlichen Wuchshöhen auf Orthofotos inter-

pretieren lassen (Tetzlaff et al., 2009). Die Analyse wurde mittels „Normalized Difference Vegetation Index“ (NDVI) durchgeführt, da dieser zu den klassischen spektralen Analysen zur Ermittlung des Vegetationsstatus zählt. Darüber hinaus treten durch die spektrale Analyse Gewässer, wie oberirdische Entwässerungsgräben oder Sölle deutlich in Erscheinung.

2.3 Modellierung in ArcSWAT

Für die hydrologische Modellierung wurde ArcSWAT, ein ArcGIS gekoppeltes hydrologisches Modell basierend auf SWAT 2012 (Soil and Water Assessment Tool; Version 2012, Arnold et al., 1998) verwendet. Es wurden zwei Simulationszeiträume für die hydrologische Modellierung festgelegt. Diese umfassen die historischen Bedingungen von 1950-1960 sowie die aktuellen Bedingungen der Jahre 2003-2013. Für jede dieser Perioden wurden zwei Szenarien jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Meliorationsmaßnahmen in Form unterirdischer Dränungsanlagen durchgeführt. So wurden insgesamt vier Szenarien, modelliert. Für den Zeitraum 2003-2013 wurden die Szenarien „mD 2000er“ und „oD 2000er“ und für den Zeitraum 1950-1960 die Szenarien „mD 1950er“ und „oD 1950er“ auf Tagesbasis modelliert. Die modellierten Abflüsse des Szenarios „mD 2000er“ wurden mit gemessenen verglichen, um die Güte der Eingabeparameter zu prüfen.

2.4 Überprüfung der Ergebnisse

Photogrammetrische, metrische und spektrale Auswertung

Zur weiteren Aufbereitung und Validierung der gewonnenen Höheninformation der Oberfläche wurden zum einen die statistischen Fehlerwerte der horizontalen und vertikalen Auflösung sowie Korrelationskoeffizienten der Triangulation der photogrammetrischen Prozessierung ausgewertet. Es ergab einen *Total Image Unit-Weight RMSE* von 0,3 (entspricht ca. 0,6 m). Für den *Controlpoint RMSE* ergab sich ein mittlerer Fehler von 0,28. Für das Gebiet konnte bis zu 94 % der Fläche einen Korrelationskoeffizienten von 0,85-1,00 erreichen. Somit kann die statistische Abweichung des erstellten DOMs insgesamt als gut betrachtet werden. Da die Qualität eines DOMs nicht ausschließlich durch die Triangulationsergebnisse der Bildblöcke bewertet werden kann wurde der Datensatz zusätzlich mit dem frei verfügbaren ASTER-Datensatz verglichen. Dieser weist zwar eine stark abweichende Auflösung von 25 m/px auf, wurde aber ebenfalls aus Aufnahmen von NIR-Kanälen prozessiert und besitzt somit eine ähnliche Bildquelle (ASTER GDEM Validation Team et al., 2009). Das Raster aus den Differenzen zwischen korrigiertem DOM und ASTER-Datensatz zeigt eine gute Korrelation. 72,6 % der Flächen weisen eine Abweichung von unter 5 m auf. (vergl. Abb. 2). Die durchschnittliche Abweichung liegt bei 3,22 m/px. Allerdings zeigen sich in den Bereichen der bewaldeten Hochflächen erhöhte Differenzen um durchschnittlich 20 m, was der Vegetation geschuldet ist. Zusammenfassend kann das erzeugte DGM aus der photogrammetrischen Auswertung als qualitativ hochwertiger Datensatz für hydrologische Fragestellungen genutzt werden.

Die Ergebnisse der Landnutzungsverteilung sowie der Identifizierung unterirdischer Dränagesysteme wurden visuell überprüft. Die Landnutzungsklassen bilden einen wichtigen Eingangsparameter für die hydrologische Modellierung, da beispielsweise Oberflächenabflüsse in Abhängigkeit von der Landnutzungsklasse stark variieren können. Die kartierten unterirdischen Dränagesysteme konnten zusätzlich mit einer vorhandenen Gewässersystem-Karte des Wasser- und Bodenverbandes Prenzlau (BVP, 2014), welche bekannte unterirdische

Dränungen enthält, auf Korrelation und Plausibilität überprüft werden. So wurde festgestellt, ob erfolgreich bereits bekannte Dränungen erfasst wurden und ob die kartierten Dränungen in das bekannte Gewässernetz passen oder sich in Niederungsgebieten mit geringem Grundwasserflurabstand befinden.

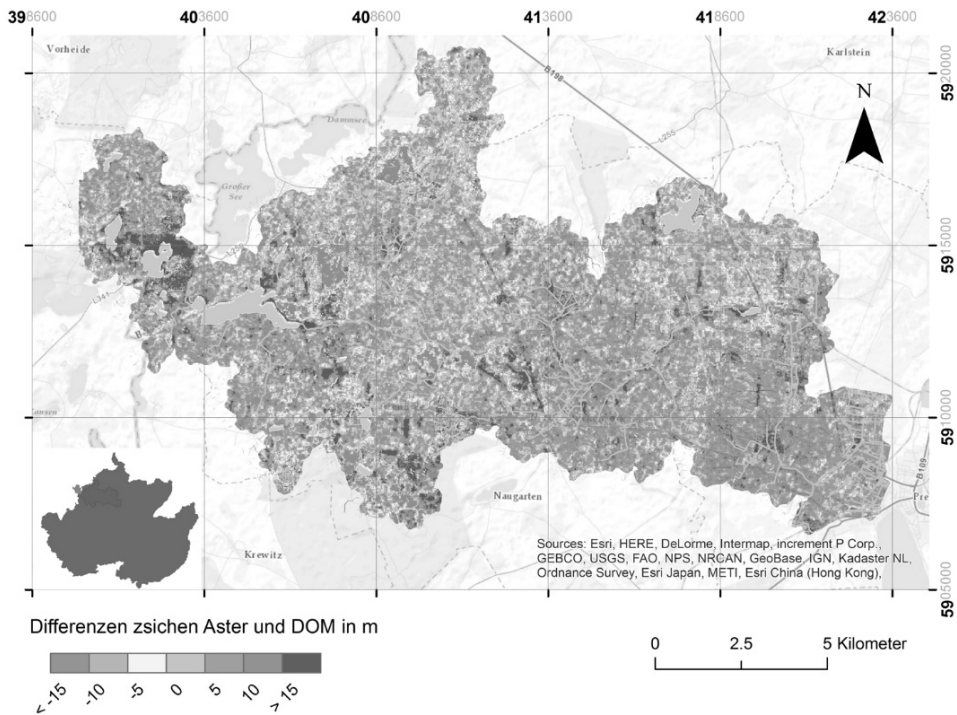


Abb. 2: Vertikale Differenzen zwischen Aster- und der berechneten DOM-Rasterdatei (Lat:53.3°(N), Lon:13.5°(E), WGS84). Links unten ist die Position des Einzugsgebietes innerhalb der Uckermark (Brandenburg, Deutschland) gezeigt.

Hydrologische Modellierung

Bei der Betrachtung der simulierten Abflussganglinien des unkalibrierten Modells zeigten sich erhebliche Abweichungen im Vergleich zu den gemessenen Quillow-Abflüssen. Es wurde daher eine Sensitivitätsanalyse nach Lenhardt et al. (2002) durchgeführt, auf deren Grundlage die Kalibrierung des Modells stattfand. Nach Anpassung der sensitiven Parameter im Modell konnten nach Santhi et al. (2001) für Gütemaße, wie das Bestimmtheitsmaß (R^2), den Nash-Sufflife Index (NSI) und den Percent Bias (PBIAS) gute Ergebnisse erzielt werden, sodass die Modellergebnisse als valide gewertet werden können.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der GIS-basierten Analyse der Landnutzung

Das Luftbild DGM weist bei einer Auflösung von 2 m/px eine hohe Präzision sowohl in der absolut horizontalen, wie auch vertikalen Genauigkeit auf. Somit hat es einen hohen Detailgrad der Morphologie, was eine hoch aufgelöste Ableitung weiterer topografischer Parameter, wie die Hangneigung und die Ausrichtung der Geländeoberfläche erlaubt.

Die Auswertung der *Change-Detection*-Ergebnisse für die Landnutzungsklassenanalyse der Jahre 1953 und 2014 zeigte, dass es geringe Veränderung in der Landnutzung von Ackerflächen und Weideflächen hin zu Feuchtwiesen mit extensiver Grünlandnutzung gibt. Vor allem in den Niederungsgebieten zeigt sich ein Trend hin zu Wiesen/Feuchtwiesen. So kann eine leichte Zunahme von Feuchtgebieten mit Grünlandnutzung von 2,8 % im Jahr 1953 auf 3,5 % im Jahr 2014 beobachtet werden. Diese Entwicklung lässt sich mit Renaturierungsmaßnahmen erklären, welche seit den 1990er-Jahren insbesondere in den Niederungsgebieten umgesetzt werden. Zusammengefasst lässt sich aus der Entwicklung der Landnutzungsverteilung in den letzten drei Jahrzehnten eine leichte Verbesserung des Wasserrückhaltes in der Landschaft durch Reaktivierung ehemaliger Feuchtgebiete ableiten. Die Ergebnisse der automatisierten Erfassung der Landnutzungsverteilung konnten quantitativ die bereits qualitativ erfassten Veränderungen der Landnutzungsklassenverteilung im Laufe der Zeit als Folge der historischen Entwicklung der Region bestätigen.

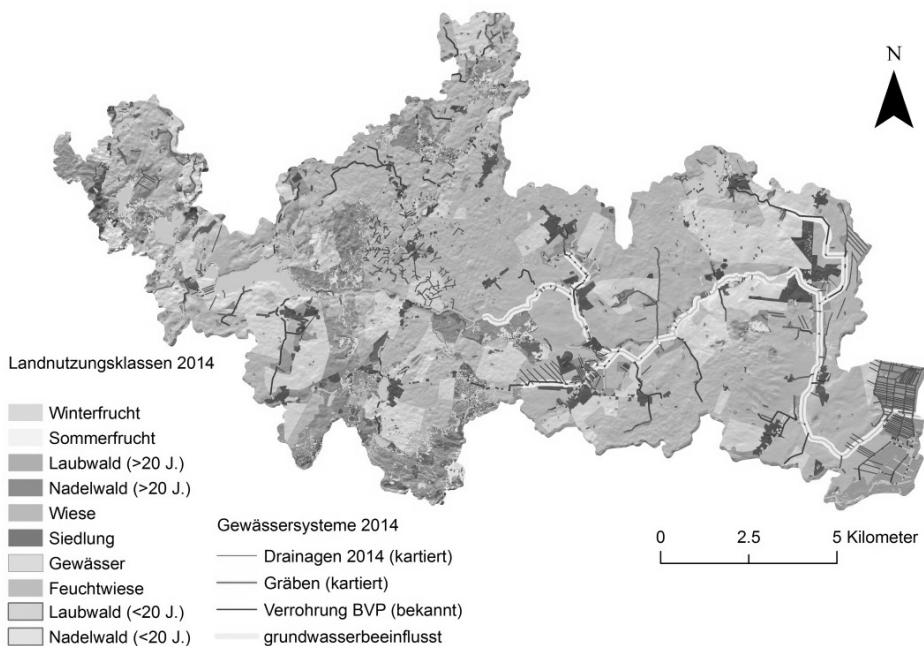


Abb. 3: Darstellung aller kartierten Entwässerungssysteme mithilfe des NDVI, welche dem vorhandenen Gewässernetz des BVP ergänzt werden konnten sowie der mithilfe der Segmentierung abgeleiteten Landnutzungsklassen für das Jahr 2014

3.2 Ergebnisse der GIS-basierten Analyse der Dränung

Insgesamt wurden 1071 Strukturen kartiert, wobei 361 davon offenen oberirdischen Entwässerungssystemen zuzuordnen sind (Abb. 3). Die Validierung der Ergebnisse erfolgte anhand bekannter Entwässerungssysteme (Wasser- und Bodenverband Prenzlau, 2014). Im Untersuchungsgebiet findet sowohl eine selektive Entwässerung (Bedarfsdränung), als auch systematische Entwässerung statt. Diese Art der Dränung ist anhand der Anordnung von mehreren parallel verlaufenden Dränungen gut zu identifizieren. Die selektive Entwässerung konnte vorwiegend auf den Grundmoränenflächen kartiert werden, da sie für die Entwässerung von Senken und kleinen Standgewässern (Söllen) eingesetzt wird. Hingegen sind systematische Entwässerungsmuster für Niederungsgebiete bzw. grundwassernahe Standorte typisch. Alle als Niederung bezeichneten Flächen weisen Entwässerungssysteme auf. Insgesamt sind 8,9 % des Untersuchungsgebietes dräniert und somit wasserbaulich massiv beeinflusst.

Da die monochromen Luftbilder aus dem Jahr 1953 keine auswertbaren Ergebnisse in der spektralen Analyse, als auch in der optischen Auswertung hinsichtlich der Kartierung von unterirdischen Dränungen liefern konnten, kann keine Aussage über die Anzahl und Lage von Dränungen in diesem Zeitraum getroffen werden. Daher wurden für das Szenario „mD 1950er“ die für die aktuellen Bedingungen kartierten Dränungen verwendet.

3.3 Modellierungsergebnisse

Die Modellierung unter aktuellen Bedingungen mit (Szenario „mD 2000er“) und ohne Dränung (Szenario „oD 2000er“) zeigt, dass die im Rahmen der Arbeit gewonnenen Daten eine gute Annäherung des Modells an die vorherrschende wasserhaushaltliche Situation des Untersuchungsgebietes erlauben. Die simulierten Abflüsse des Szenarios „mD 2000er“ stimmen gut mit den gemessenen Daten der Pegel 107 und 98 überein. Es konnte im Durchschnitt für R^2 ein Wert von 0,7, für NSI von 0,68 und für PBIAS von 17,15 % ermittelt werden. Nach Santhi et al. (2001) liegen diese Werte im Bereich einer ausreichenden Güte.

Der Vergleich aller Simulationen zeigt, dass sich die durchschnittlichen jährlichen Summen der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten unter aktuellen und historischen Bedingungen deutlich unterscheiden. Die Differenz der Direktabflüsse zwischen dem Szenario „mD 1950er“ und Szenario „mD 2000er“ beträgt 11,2 mm. Das bedeutet, dass der Direktabfluss unter historischen Bedingungen ca. 30 % über dem Direktabfluss der aktuellen Bedingungen lag. Der deutlich höhere Direktabflussanteil unter historischen Bedingungen wirkt sich auf alle anderen Komponenten des Wasserhaushaltes, insbesondere auf die Grundwasserneubildung, aus. Aus diesen Modellberechnungen ergibt sich eine Erhöhung des Basisabflusses um 8,5 mm.

4 Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass die angewandten Methoden der GIS basierten Luftbilddauswertung zur Extrahierung verschiedener flächendifferenzierter Daten aus Luftbildern für eine Parametrisierung hydrologischer Modelle gewinnbringend eingesetzt werden konnten. Der Ansatz bietet viele Vorteile sowohl wirtschaftlicher, als fachlicher Art, die eine eigene Prozessierung trotz eines hohen Zeitaufwandes rechtfertigen. Aus wirtschaftlichen Aspekten ist

das angewendete Verfahren sehr effizient, da Luftbilder im Vergleich zu anderen Produkten, wie einem DGM, weniger kostenintensiv sind.

Fachlich bietet die Methodik viele Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren, wie der Datenbeschaffung vorhandener Daten aus unterschiedlichen Quellen. Vorteile wären etwa ein hoher Detailgrad, die Verarbeitungsgüte sowie eine gezielte Gewinnung verschiedener Informationen aus nur einem Datensatz. Als Beispiel sei hier die Anpassung eines DOM an ein DGM gegeben, da die Oberfläche eines Untersuchungsgebietes viele direkte als auch indirekte Informationen beinhaltet. Durch die gezielte Aufbereitung und Prozessierung der räumlichen Daten war es möglich eine sehr gute horizontale, als auch vertikale Genauigkeit zu erreichen. Zudem können spezifische modellrelevante Informationen mit einer hohen räumlichen Auflösung extrahiert werden. Darüber hinaus zeigte die Identifizierung zahlreicher bisher nicht erfasster unterirdischer Dränanlagen das hohe Potenzial der Luftbildauswertung. Auch neue unbekannte Informationen können anhand der angewendeten Methodik gewonnen werden. Der weiterentwickelte Ansatz von Tetzlaff et al. (2009) erwies sich unter den gegebenen Bedingungen, als sehr vorteilhaft, da durch das angewendete NDVI-Verfahren die Möglichkeit einer visuellen Kartierung der unterirdischen Dränungen deutlich verbessert wurde. Jedoch bleibt festzuhalten, dass das NDVI-Verfahren zur Kartierung der unterirdischen Dränungen limitiert und stets kritisch zu beurteilen ist. Dies liegt darin begründet, dass (symmetrische) vegetative Wachstumsmuster auch durch andere Faktoren bedingt sein können. Umgekehrt kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass Dränung die Vegetation zwangsläufig räumlich differenziert beeinflusst. Zudem können weitere externe Faktoren, wie Jahreszeit und klimatische/meteorologische Rahmenbedingungen zum Aufnahmezeitpunkt die Aussagekraft hinsichtlich einer räumlich differenzierten Kartierung von Dränungssystemen einschränken. Auf vegetationslosen Oberflächen könnten aktive Fernerkundungssysteme, wie Synthetic-Aperture-Radar-Daten, als ergänzende Methoden eingesetzt werden. Mithilfe von Radarwellen wäre in diesem Fall eine Messung der räumlich verteilten Bodenfeuchte möglich (Löhken et al., 2005).

Aufgrund heterogener Verhältnisse im Untergrund, massiver wasserbaulicher Eingriffe (z. B. Rohrdränagen, Entwässerungsgräben, Entwässerungen von Binneneinzugsgebieten) sowie dynamischer Landnutzungsmuster war es bisher für die hydrologischen Modelle äußerst problematisch diese komplexen Verhältnisse adäquat abzubilden. Anhand der vorgestellten Methoden und Workflows konnte gezeigt werden, dass eine qualitativ hochwertige Raumanalyse aus Luftbildern als Basis für die Modellierung hydrologischer Fragestellungen bereitgestellt werden kann. Diese Ableitung räumlich hoch aufgelöster Modellparameter ermöglicht einen bisher noch nicht erreichten Fortschritt bei Bewertung des hydrologischen Prozessverhaltens. Für großskalige Gebiete mit komplexen hydrologischen Bedingungen kann somit eine neue Qualität der Modellgüte erreicht werden – mit der Möglichkeit einer verbesserten Interpretation wasserwirtschaftlicher Maßnahmen unter Berücksichtigung von Klimawandel-Szenarien. Zukünftig könnte im Hinblick auf die steigende Verwendung von UAVs ein verbessertes, regelmäßiges Monitoring und somit eine systematische Datenlieferung und -auswertung erfolgen.

Literatur

- Arnold, J., Srinivasan, R. Muttiah, R. S., & Williams, J. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resource Association* 34(1), 73–89. doi:10.1111/j-1752-1688-1998.tb05961.x.
- ASTER GDEM Validation Team, METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, & USGS/EROS. (2009). *ASTER Global DEM Validation – Summary Report*. NGA.
- Eisenbeiss, H., & Sauerbier, M., (2011). Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record* 26(136), 400–421. doi: 10.1111/j.1477-9730.2011.00657.x
- Jacob, D. G. (2008). *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138. Climate Change 11/08. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Kraus, K. (1996). *Photogrammetrie – Band 2: verfeinerte Methoden und Anwendungen*. Berlin: De Gruyter.
- LBGR (2012). BÜK 300 – *Bodengeologische Übersichtskarte im Maßstab 1:300 000*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Ed.).
- LGB (2016). Landesamt für Geobasisinformation Brandenburg: Retrieved April 06, 2016, from https://www.geobasis-bb.de/geodaten/top_mtb.htm.
- Lahmer, W., & Pfützner, B. (2003). *Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen*. Potsdam: PIK Report 85. Potsdam-Institut für Klimaforschung.
- Lischeid, G., Kalettka, T., Merz, C., Schindler, U., & Steidl, J. (2009). *Hydrologisches und biogeo-chemisches Monitoring in der südlichen Uckermark: Wieviele Freiheitsgrade hat eine Landschaft?* LTER-D-Jahrestagung Dedelow 9.-11.03.2009.
- Löhken, I., Bergers, R., & Tezkan, B. (2005). Monitoring der Bodenfeuchte mit Georadar und FDR. In: O. Ritter, & H. Brasse (Eds.), *21. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung*. Holle.
- Neubert, M. (2006). *Bewertung, Verarbeitung und segmentbasierte Auswertung sehr hochauflösender Satellitenbilddaten*. Berlin: Rhombos.
- Santhi, C., Arnold, J., Williams, J., Dugas, W., Srinivasan, R., & Hauck, L. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37, 1169–1188.
- Tetzlaff, B., Kuhr, P., & Wendland, F. (2009). A new method for creating maps of artificially drained areas in large river basins based on aerial photographs and geodata. *Irrigation and Drainage*, 58, 569–585. doi:10.1002/ird.426.
- Ueberfuhr, F., & Glaser, F. (2005). *Beschreibung der Kartiereinheiten zur Neufassung der BTLNK 2005 auf der Grundlage und unter Verwendung des Luftbildinterpretationsschlüssels 1992/93*. Nossen, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Van Laar, A., & Akça, A. (2007). *Forest Mensuration*, 317–344. Niederlande: Springer.
- Wohlrab, B., Meuser, A., & Sokollek, V. (1999). Landschaftswasserhaushalt – ein zentrales Thema der Landschaftsökologie. In: R. Schneider-Sliwa, D. Schaub, & G. Gerold (Eds.), *Angewandte Landschaftsökologie – Grundlagen und Methoden* (pp. 277–302). Heidelberg: Springer.