

**DEICHÜBERWACHUNG UNTER EINSATZ
DER
FERNERKUNDUNG**

***MONITORING OF LEVEES
USING
REMOTE SENSING TECHNOLOGY***

von

Nino Ohle, Anne Elsner, Claus Zimmermann

KURZFASSUNG

Fernerkundungsdaten eröffnen die Möglichkeit, Gebiete großräumig qualitativ und quantitativ im Hinblick auf physikalische, chemische und biologische Prozesse zu bewerten. Durch die Nutzung von luft- oder weltraumgestützten Trägersystemen (Flugzeugen, Satelliten) können auch Regionen erkundet werden, die nur schwer oder im Hochwasserfall auch gar nicht zugänglich sind. Damit bietet sich die Fernerkundung als Instrument der Überwachung des zeitlichen und räumlichen Verlaufs eines Hochwassers an. Ziel des Vorhabens war es, die Möglichkeiten der Fernerkundung für die Erfassung von Deichzuständen sowie potentiellen Schwachstellen zu untersuchen. Dazu wurden neben den in der Natur durch Befliegungen und Begehungen gewonnenen Fernerkundungsdaten entsprechende Daten an einem Labordeich überprüft.

In dem vom Franzius-Institut bearbeiteten Teilprojekt „Wasserbauliche Untersuchungen in Labor und Natur“ des BMBF-Kooperationsprojektes „Deichmonitoring“ wurden vier Fernerkundungssensoren auf ihre Einsatzfähigkeit zur Identifizierung von Schwachstellen an Deichen untersucht, und zwar Infrarotkameras im Bereich des Mittleren Infrarots (3 bis 5 μm) und des Thermalinfrarots (8 bis 12 μm), sowie eine Multispektral-Kamera HRSC-AX im visuellen (440 bis 760 nm) und im Nahinfrarot (780 bis 850 nm) Bereich und ein Mikrowellen-Radiometer mit den Messbereichen 90 GHz, 37 GHz und 9,6 GHz. Für die Untersuchungen am Labordeich kamen die Infrarotkameras sowie der Mikrowellen-Radiometer der DLR und bei den Überfliegungen die HRSC-AX Kamera und eine Thermalinfrarot-Kamera zum Einsatz.

In diesem Bericht sind ausgewählte Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen mit der Infrarot-Kamera (NIKON LAIRD-3AS) dargestellt.

Die Auswertung der Untersuchungen der Infrarot-Kameras zeigte, dass bei optimalen meteorologischen Randbedingungen gute Übereinstimmungen zwischen den Labordaten und den abgeleiteten Fernerkundungsdaten erzielt wurden. Optimale Klimabedingungen sind hierbei eine hohe Einstrahlung durch einen senkrechten Sonnenstand ohne Bewölkung (geringer Schattenwurf), geringe Windgeschwindigkeiten (geringe Verdunstung) sowie eine längere Trockenperiode vor den Messungen. Bei zunehmender Verschlechterung der klimatischen Randbedingungen nimmt die Aussagefähigkeit der Thermaldaten deutlich ab. Insbesondere bei Nebel- und Taubildung, dem Belastungsereignis vorhergegangene Niederschlagsereignisse sowie bei geringem Strahlungsfluss (niedriger Sonnenstand, Bewölkung, Nacht) konnte keine Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Bodenfeuchtigkeiten festgestellt werden. Daraus ergibt sich für die Aufklärung von Schwachstellen an Deichen unter ungünstigen Wetterbedingungen nur ein eingeschränkter Einsatz von Thermalinfrarot-Sensoren.

Im Verlauf des Projektes wurde auch ein Mikrowellen-Radiometer untersucht, dessen Einsatz unter unterschiedlichsten meteorologischen Randbedingungen möglich ist (Allwettertauglichkeit). Die Untersuchungen am Labordeich haben bestätigt, dass auch unter ungünstigen Bedingungen (Niederschlag, Nacht) Feuchtigkeitsbereiche und Sickerwasseraustritte detektiert werden.

In Naturuntersuchungen wurden Fernerkundungsdaten der HRSC-AX- sowie der Thermalinfrarot-Kamera für zwei Gebiete (Elbe und Mulde) analysiert. Hierbei lieferte die HRSC-AX-Kamera ein panchromatisches Bild (PAN), ein Farbbild (RGB), ein Nahinfrarotbild (CIR) und ein Digitales Oberflächenmodell (DOM), während die Infrarot-Kamera ein Thermalbild (TIR) erzeugte. Die Befliegungen fanden vor und während Hochwasserereignissen statt, so dass unterschiedliche Belastungszustände untersucht werden konnten.

Die Daten wurden in Hinblick auf erkennbare Anomalien (Strukturen und Objekte) in dem hierfür aufgebauten Geographischen Informationssystem „DeSiMo“ (Deichsicherheitsmonitoring) dargestellt. Während die Bilddaten hierbei im Wesentlichen zur visuellen Auswertung der Anomalien herangezogen wurden, konnten aus dem Digitalen Oberflächenmodell Geländemerkmale, wie Deichquerschnitte, Senken u. ä., herausgefiltert werden. Anomalien und das Digitale Geländeoberflächenmodell wurden bei Begehungen in den Untersuchungsgebieten verifiziert. Dabei zeigte sich, dass in den Bilddaten Anomalien mit einer

Ausdehnung von mindestens 50 cm in der Fläche bzw. 20 cm in der Breite bei linienförmigen Strukturen sicher erkannt werden können. Hingegen können kleinflächige, für die Deichsicherheit wesentliche Anomalien, wie Maulwurfshügel, Zaunpfähle u. ä., nicht erfasst werden. Probleme bereitet die sichere Zuordnung von kleinräumigen Vegetationseinheiten, da gleiche Pflanzenarten bei unterschiedlichen Vitalitäts- und Wachstumsgraden unterschiedliche Ausprägungen in den Bilddaten aufweisen.

Die Analyse von Geländemerkmale ist von Ausprägung und Größe abhängig. So sind großflächige, flache Senken mit einer Höhendifferenz von 20 - 30 cm im Digitalen Oberflächenmodell DOM nachweisbar, während sie in den Bilddaten meist nur durch eine veränderte standortangepasste (feuchtigkeitsliebende) Vegetation erkennbar sind. Kleinräumige Vertiefungen mit steilen Kanten sind bei einheitlicher Vegetationsbedeckung oft nur dann in den Bilddaten zu erkennen, wenn durch Schattenwurf Kontraste an der Böschung entstehen, die Vertiefungen selber aber von dem DOM nicht oder nur unzureichend aufgelöst werden.

Bei der visuellen Auswertung der Bilddaten zeigte sich, dass sowohl Beleuchtungseffekte, als auch ähnliche Farbausprägungen in den RGB- bzw. ähnliche Graustufenwerte in den panchromatischen Bildern zu Problemen in der Auswertung führen können. Diese Bereiche mussten vor einer abschließenden Beurteilung erkannt und herausgefiltert werden. Schließlich konnten relevante und eindeutig zuweisbare Anomalien zur Beurteilung von partiellen Schadensmechanismen zugeordnet werden.

Zur Analyse der Fernerkundungsdaten war neben dem Aufbau eines Geographischen Informationssystems auch der Aufbau einer Datenbank für vordefinierte Eingabemöglichkeiten in einem Dialogfenster zur Datenerfassung und –bereitstellung, zur einheitlichen Erfassung und Benennung der Anomalien bei unterschiedlichen Bearbeitern und zur Katalogisierung erforderlich. Fernerkundungsdaten, wie auch die daraus erfassten und abgeleiteten Daten, können hierin über Auswahlmasken eingelesen und dargestellt werden. Zu den abgeleiteten Daten zählen neben den Anomalien auch Informationen zur Lage von Deichfuß und Deichkrone, sowie Deichhöhen inklusive beliebiger Profile sowie eine Dokumentation von Fotos, welche im GIS geographisch verortet dargestellt werden.

ABSTRACT

Data obtained with remote sensing technologies allow qualitative and quantitative evaluation of physical, chemical and biological processes over large areas. Using air or space based technologies, such as aircrafts or satellites, it is possible to cover areas even during floods. Remote sensing technologies can be used as an instrument to supervise the temporal and areal variation of floods. Objectives of this project were to investigate the various possibilities of remote sensing technologies for the acquisition of data on the situation as well as potential defects of levees. For this purpose remote sensing data were collected in the field and from a laboratory levee.

This project "Hydraulic Studies in the Laboratory and in the Field" was part of the German BMBF joint project "Levee Monitoring" carried out by the FRANZIUS-INSTITUT for Hydraulic, Waterways and Coastal Engineering, University of Hannover, using four sensors to detect defects of levees in the laboratory and in the field. At a laboratory levee infrared cameras were used operating in the range of medium infrared (3 to 5 μm) and thermal infrared (8 to 12 μm), a multispectral camera, HRSC-AX, operating in the infrared range (440 to 760 μm) and the infrared range (780 to 850 μm), as well as a Microwave Radiometer of the German DLR operating in the range of 90 GHz, 37 GHz and 9.6 GHz.

This report presents selected results of the laboratory and field tests with the infrared camera (NIKON LAIRD-3AS).

The interpretation of the results from the infrared cameras showed good compliance between laboratory data and field data only under best meteorological conditions. Best meteorological conditions were a high radiation with vertical altitude of the sun without cloudiness (smaller shadows), low wind speeds (low evaporation) and dry periods before surveys. With worsening of meteorological conditions the information of the thermal data decreased considerably. Especially under foggy and dewy conditions, rain before start of the surveys and low radiation (low altitude of the sun) measured and calculated data did not show any matching. Therefore, only a restricted use of thermal infrared sensors must be reported for the detection of levees under unfavourable weather conditions.

In this project also a Microwave Radiometer was applied, which can operate under different meteorological conditions. Surveys with a levee in the laboratory confirmed that levee spots with seepage could be detected even under unfavourable weather conditions, i. e. precipitation and darkness.

During field surveys remote sensing data were collected in two regions, Elbe and Mulde, by using the HRSC-AX as well as the Thermal Infrared Camera. The HRSX-AX camera produced a panchromatic photograph (PAN), a colour picture (RGB), an infrared picture (CIR) and a thermal picture (TIR). Inspections by aircraft were made before and after floods to detect various stress situations.

Detectable objects and structures were processed with a Geographical Information System called "De-SiMo" (Deichsicherheitsmonitoring), which had been developed during this project.

Visual interpretation of anomalies was carried out by using the photographic data. Site characteristics such as levee sections, low grounds etc. were filtered from the digital surface model. Anomalies and the digital surface model were verified with local inspections. Objects or structures of at least 50 cm by 20 cm length were well detectable. Small anomalies, such as molehills, fences etc., could not be detected. It was also difficult to detect small objects of vegetation because photographs display similar plants in various situations of development and vitality.

Analysis of site characteristics depends on structure and extension. Extended low grounds of between 20 to 30 cm are displayed in the digital surface model DOM (Digitales Oberflächenmodell). Smaller depressions with a steep angle can only be detected in photographs with shadows along the slope while slow grounds are not sufficiently resolved by the DOM.

Visual interpretation of panchromatic photographs may result in wrong conclusions due to illumination, colours (RGB) or grey shading effects. Such areas have to be filtered out before final evaluation of data.

For analysis of remote sensing data, besides the development of the GIS, also a databank had to be installed to enable different processors for a predefined input in a dialogue window for consistent acquisition and supply of data. Remote sensing data as well as all data derived from those data can be fed into such data bank for visual display.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	3
ABSTRACT	5
INHALTSVERZEICHNIS	7
ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	11
SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	19
1 PROBLEMBESCHREIBUNG UND AUFGABENSTELLUNG	21
2 DEICHSCHÄDEN UND VERSAGENSMECHANISMEN	25
2.1 Allgemeine Belastungen und Versagensmechanismen	25
2.2 Schäden durch Gleiten des Deiches und Deichfußes	29
2.3 Schäden durch Böschungsrundbruch	30
2.4 Schäden durch Böschungsbruch mit örtlichem Standsicherheitsverlust	30
2.5 Schäden durch Erosionsrundbruch (Piping)	31
2.6 Schäden durch Setzungen	32
2.7 Schäden durch Durchsickerung nach hydraulischem Grundbruch	32
2.8 Schäden an der Außenböschung durch zu schnellen Wasserspiegelabsenk	33
2.9 Erosion der Außenböschung infolge Wellenschlag	33
2.10 Erosion der Binnenböschung infolge Wellen- oder Wasserüberlauf	33
2.11 Erosion an Deichen durch mechanische oder natürliche Beanspruchung	34
2.12 Schädigung der Grasnarbe durch Wildbewuchs	35
2.13 Schädigung der Grasnarbe durch Treibsel oder Wildtierpfade	36
2.14 Kahlstellen am Deich bei Durchwurzelung und durch Schatten und Laub von Bäumen	37
2.15 Erosionen an Bauwerken am Deich (Treppen, Gebäude, etc.)	38
3 ERKENNUNG UND ANALYSE VON DEICHSCHWACHSTELLEN DURCH FERNERKUNDUNG	39
3.1 Grundlagen der Fernerkundung	39
3.2 Verwendete Fernerkundungssensoren und ihre Datenprodukte	42
3.2.1 High Resolution Stereo Camera - HRSC-AX Sensor	42
3.2.2 Infrarot Sensor	45
3.2.3 Mikrowellen Radiometer Sensor (MWR)	47
3.3 Untersuchungsgebiete	49
3.3.1 Untersuchungsgebiet Elbe	50
3.3.2 Untersuchungsgebiet Mulde	50

3.4	Aufbau und Auswertung im Geographischen Informationssystem (GIS)	51
3.4.1	Aufbau eines GIS	51
3.4.2	Eingabe von Anomalien	52
3.4.3	Ermitteln von Deichhöhen und Deichprofilen aus dem Digitalen Oberflächenmodell	54
3.5	Schlussfolgerungen	58
4	NATURUNTERSUCHUNGEN	59
4.1	Verifizierung der Anomalien	59
4.2	Fotodokumentation von Anomalien und Deichlinie	61
4.3	Verifizierung des Digitalen Oberflächenmodells	63
4.3.1	Projektgebiet Elbe	63
4.3.2	Projektgebiet Mulde	65
4.4	Erkennbare Anomalien und Schäden an Deichen	67
4.4.1	Gleiten eines Deiches	67
4.4.2	Gleiten des Deichfußes	68
4.4.3	Böschungsrundbruch	69
4.4.4	Böschungsrundbruch mit örtlichem Standsicherheitsverlust	70
4.4.5	Erosionsrundbruch (Piping)	70
4.4.6	Setzungen	71
4.4.7	Durchsickerungen	74
4.4.8	Erosion infolge Wellenschlag und Wasserüberlauf	75
4.4.9	Schäden durch mechanische oder natürliche Beanspruchung	76
4.4.10	Höhenveränderungen	78
4.4.11	Schädigung der Grasnarbe durch Wildbewuchs	80
4.4.12	Schädigung der Grasnarbe durch Treibsel oder Wildtierpfade	83
4.4.13	Durchwurzelung und durch Schatten und Laub von Bäumen erzeugte Kahlstellen	84
4.4.14	Bauwerke am Deich (Treppen, Gebäude, etc.)	85
4.5	Schlussfolgerungen	87
5	UNTERSUCHUNGEN AN EINEM LABORDEICH	89
5.1	Aufbau des Labordeichs und Meßeinrichtung	89
5.2	Versuchsdurchführung	89
5.3	Soil Vegetation Atmosphere Transfer Modell (SVAT)	90
5.4	Ergebnisse der Laborversuche	92
5.4.1	Versuchsreihe 1 - 09.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - keine künstliche Schädigung	92
5.4.2	Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung	94

5.4.3	Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - Komplette Durchsickerung - Optimale äußere Bedingungen	98
5.4.4	Versuchsreihe 04. - 09.09.2005 - Komplette Durchsickerung - Niederschlag	102
5.5	Bewertung	106
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	109
7	SCHRIFTTUM	111

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Abbildung 1-1:	Projektpartner und Bearbeitungsbereiche	22
Abbildung 2-1:	Wellenüberlauf und Ausspülungen in der Krone eines Deiches [EAK, 1993]	25
Abbildung 2-2:	Belastungen und Schadensursachen an Deichen [Vrijling, J. K., 1994]	26
Abbildung 2-3:	Belastung aus erhöhten Wasserständen und Wellen bis zum Deichversagen infolge Infiltration und Erosion [Richwien, W., 1995]	27
Abbildung 2-4:	Gleiten des Deiches (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	29
Abbildung 2-5:	Gleiten des Deichfußes (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	29
Abbildung 2-6:	Böschungsrundbruch (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	30
Abbildung 2-7:	Böschungsrundbruch in der Natur [Foto: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, 2004]	30
Abbildung 2-8:	Örtlicher Standsicherheitsverlust (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	31
Abbildung 2-9:	Erosionsrundbruch, rückschreitende Erosion (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	31
Abbildung 2-10:	Durch Sandsäcke stabilisierter Deich mit Erosionsrundbruch [Foto: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, 2004]	31
Abbildung 2-11:	Deichsetzung (Schnitt)	32
Abbildung 2-12:	Durchsickerung nach hydraulischem Grundbruch (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	32
Abbildung 2-13:	Durchsickerung nach hydraulischem Grundbruch [Foto: Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, 1982]	32
Abbildung 2-14:	Hydraulisches Versagen einer Außenböschung (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	33
Abbildung 2-15:	Erosion einer Außenböschung (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	33
Abbildung 2-16:	Erosion einer Binnenböschung (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)	34
Abbildung 2-17:	Überströmen eines Elbdeichs [Foto: Kokemüller, 2005]	34
Abbildung 2-18:	Kahlstellen durch Schaftritt an einem Zaun (links) und an einem Pfahl (rechts) auf der Binnenseite eines Deiches [Fotos: NLWKN, 2005]	35
Abbildung 2-19:	Fahrspuren (links) und Maulwurfbefall (rechts) an einem Deich [Fotos: NLWKN, 2005]	35
Abbildung 2-20:	Schematische Ausprägung von Kahlstellen durch Viehtritt an Deichen und Auftritt von Wühltieren in der Draufsicht	35
Abbildung 2-21:	Wildbewuchs am Deich (mögliche Ausprägung in der Draufsicht)	36
Abbildung 2-22:	Wildbewuchs an einem Deich [Foto: NLWKN, 2005]	36
Abbildung 2-23:	Kahlstelle durch Treibsel in der Draufsicht	36
Abbildung 2-24:	Kahlstelle (links) und Erosion (rechts) infolge von ungeräumtem Treibsel an einem Deich [Fotos: NLWKN, 2005]	37
Abbildung 2-25:	Baumbewuchs am Deichfuß (mögliche Ausprägung in der Draufsicht)	37

Abbildung 2-26:	Baumbewuchs am Deichfuß (links) und Kahlstelle unter einem Baum (rechts) [Fotos: Kokemüller, 2005]	37
Abbildung 2-27:	Deicherosion durch Bauwerk am/im Deich	38
Abbildung 2-28:	Deicherosion durch Bauwerk im Deich [Foto: NLWKN, 2005]	38
Abbildung 3-1:	Reflexion – Wellenlängen Diagramm [Kappas, 1994]	40
Abbildung 3-2:	Spektraler Reflexionsgrad [Albertz, 1991]	40
Abbildung 3-3:	Verhältnis der Vegetationsvitalität zum Reflexionsvermögen [Kronberg, 1985]	41
Abbildung 3-4:	Verhältnis der Feuchte bei Sandböden zum Reflexionsvermögen [Kronberg, 1985]	41
Abbildung 3-5:	Verhältnis Feuchte bei Tonböden zum Reflexionsvermögen [Kronberg, 1985]	42
Abbildung 3-6:	HRSC–AX Kamera (links) und Einsatz der Kamera im Flugzeug (rechts) [Fotos: DLR, Adlershof]	42
Abbildung 3-7:	Blickwinkel der HRSC - AX Kamera [DLR, 1999]	44
Abbildung 3-8:	Deichabschnitt an der Elbe dargestellt in vier verschiedenen Datenprodukten der HRSC-AX Kamera: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild, d) Digitales Oberflächenmodell - Ausschnitt	45
Abbildung 3-9:	NIKON LAIRD-3AS (links) und analoge Matrixkamera Typ IR-18 (rechts), [Fotos: ScanDat]	46
Abbildung 3-10:	Wärmestrahlung der Erdoberfläche im Tagesverlauf [Francois, C., 2002]	46
Abbildung 3-11:	Thermalinfrarot-Bild einer Messung der ScanDat GmbH vom Labordeich des Franzius-Instituts	47
Abbildung 3-12:	Modifiziertes Mikrowellen Radiometer (MWR) als Experimentalaufbau der DLR in Oberpfaffenhofen	47
Abbildung 3-13:	Anteil der Strahlungstransmission in der Erdatmosphäre in Abhängigkeit des Frequenzbandes [Francois, C., 2002]	48
Abbildung 3-14:	Klassifiziertes Bild einer Messung mit Mikrowellenradiometer bei 90 GHz der DLR Oberpfaffenhofen am Labordeich des Franzius-Instituts	49
Abbildung 3-15:	Spektrum der Dielektrizitätskonstanten von Wasser [Francois, C., 2002] (Rot: Realteil, grün: Imaginärteil)	49
Abbildung 3-16:	Projektgebiet Elbe - Deichabschnitt bei Lutherstadt Wittenberg	50
Abbildung 3-17:	Projektgebiet Mulde - Deichabschnitt bei Löbnitz	51
Abbildung 3-18:	Synchrone Darstellung verschiedener Fernerkundungsdaten im GIS – panchromatisches Bild oben links, Farbbild oben rechts, Digitales Oberflächenmodell unten links und Orientierungskarte unten rechts (Screenshot)	52
Abbildung 3-19:	Erfassen von Anomalien im Umfeld der Deichlinie im GIS „DeSiMo“ mit Hilfe einer Eingabemaske (Hintergrund: panchromatisches Bild)	53
Abbildung 3-20:	Einladen und Darstellen der Themen über ein Dialogfenster in "DeSiMo"	54

Abbildung 3-21:	Ausschnitt aus dem Digitalen Oberflächenmodell für das Projektgebiet an der Mulde	55
Abbildung 3-22:	Fehlinterpretationen im Digitalen Oberflächenmodell	55
Abbildung 3-23:	Entlang der Deichkrone in einem Abstand von 5 m ausgelesene Höhenwerte aus dem Digitalen Oberflächenmodell für einen Deichabschnitt an der Mulde	56
Abbildung 3-24:	Automatisierte Querprofilerstellung aus dem Digitalen Oberflächenmodell	57
Abbildung 3-25:	Aus dem DOM ausgelesene Deichprofile auf einer Strecke von 50 m (links: Originalwert aus dem DOM, rechts: nach Anwendung eines Glättungsfilters)	57
Abbildung 4-1:	Beispiele für in den Fernerkundungsdaten erkannte Anomalien, Hintergrundbild: Farbbild der HRSC-AX Kamera	60
Abbildung 4-2:	Beleuchtungseffekt an der Deichböschung im Nahinfrarotbild	60
Abbildung 4-3:	Beleuchtungseffekt in den Bilddaten der HRSC-AX Kamera, a) panchromatisches Bild, b) Farbbild und c) Nahinfrarotbild	61
Abbildung 4-4:	Fotodokumentation von Anomalien (links: Scharfstelle von Wildtieren, rechts: Deichüberfahrt)	62
Abbildung 4-5:	Fotodokumentation des Muldedeichs: Blick über den Deichverlauf (links) und Detailaufnahme der Deichkrone (rechts)	62
Abbildung 4-6:	Im "DeSiMo" verortete Fotodokumentation der Deichlinie	62
Abbildung 4-7:	Lage der vermessenen Deichquerprofile am Elbedeich	64
Abbildung 4-8:	Festpunkt 042 (links), gemessene und ausgewiesene Höhen laut Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (rechts) [Foto: Elsner/Ohle, 2005]	64
Abbildung 4-9:	Höhenvergleiche der gemessenen Profilquerschnitte an der Elbe mit den Werten aus dem Digitalen Oberflächenmodell	65
Abbildung 4-10:	Lage der vermessenen Querprofile am Muldedeich	66
Abbildung 4-11:	Festpunkt 002 (links), gemessene und ausgewiesene Höhen laut Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (rechts) [Foto: Elsner/Ohle, 2005]	66
Abbildung 4-12:	Höhenvergleiche der gemessenen Profilquerschnitte an der Mulde mit den Werten aus dem Digitalen Oberflächenmodell	67
Abbildung 4-13:	Digitales Oberflächenmodell DOM eines Deichabschnitts an der Mulde mit einem durch Gleiten verschobenen Deich, erhoben während Mehrfachbefliegungen im a) Jahr 2001 und b) Jahr 2003	67
Abbildung 4-14:	Differenzendarstellung im Digitalen Oberflächenmodell eines Deichabschnitts der Mulde mit einem durch Gleiten verschobenen Deich, ermittelt aus einer Mehrfachbefliegung [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]	68
Abbildung 4-15:	Identifizierung eines verformten Binnenböschungsfußes a) im DOM des Jahres 2001 und b) in der Differenzendarstellung [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]	68
Abbildung 4-16:	Digitales Oberflächenmodell DOM eines Deichabschnitts an der Mulde mit einem Böschungsgrundbruch auf der Binnenseite, erhoben aus Mehrfachbefliegungen im a) Jahr 2001 und b) Jahr 2003	69

Abbildung 4-17:	Differenzendarstellung im Digitalen Oberflächenmodell eines Deichabschnitts der Mulde mit einem Böschungsbruch auf der Binnenseite, ermittelt aus einer Mehrfachbefliegung [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]	69
Abbildung 4-18:	Identifizierung von terrassenförmigen Abrutschungen im a) panchromatischen Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild (nachbearbeitet) und d) in der Natur	70
Abbildung 4-19:	Quellkalde eines Erosionsgrundbruches in der Natur [Foto: Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, 1995]	71
Abbildung 4-20:	Digitales Oberflächenmodell eines Deichabschnitts mit Deichbruch an der Mulde, erhoben aus einer Mehrfachbefliegung, a) Zustand 2001, b) Zustand 2002 und c) Zustand 2003	72
Abbildung 4-21:	Differenzendarstellung des Digitalen Oberflächenmodells eines Deichabschnitts an der Mulde aus einer Mehrfachbefliegung zur Bestimmung der Setzung [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]	72
Abbildung 4-22:	Vertiefungen auf einem Deich	73
Abbildung 4-23:	Identifizierung von Vertiefungen: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitales Oberflächenmodell	73
Abbildung 4-24:	Durchsickerungen am binnenseitigen Deichfuß	74
Abbildung 4-25:	Großflächigen Senkenbereich am Deichfuß: a) panchromatisches Bild und b) Digitales Oberflächenmodell	74
Abbildung 4-26:	HRSC-AX Aufnahmen von Wasserflächen a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitales Oberflächenmodell	75
Abbildung 4-27:	Identifizierung der Erosion einer Außenböschung infolge Wellenangriff a) im DOM des Jahres 2003 und b) in der Differenzendarstellung des DOM [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]	75
Abbildung 4-28:	Offene Grasnarbe mit einem Durchmesser von ca. 70 cm	76
Abbildung 4-29:	Erkennung von punktuellen Kahlstellen: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild und c) Nahinfrarotbild	76
Abbildung 4-30:	Gestörte Grasnarbe durch Befahren eines unbefestigten Weges	77
Abbildung 4-31:	Mit Schotter befestigter Weg im panchromatischen Bild	77
Abbildung 4-32:	Identifizierung von unbefestigten Fahrspuren mit der HRSC-AX Kamera: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild und c) Nahinfrarotbild	78
Abbildung 4-33:	Großflächige Geländeerhöhung auf der Deichböschung	79
Abbildung 4-34:	Identifizierung von Erhöhungen: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitales Oberflächenmodell	79
Abbildung 4-35:	Verbesserung der Erkennbarkeit einer Erhöhung im panchromatischem Bild (oben) und im Nahinfrarotbild (unten) – links unbearbeitet und rechts bearbeitet	80
Abbildung 4-36:	Hohes, trockenes Gras (HRSC-AX Kamera)	81
Abbildung 4-37:	Hohes, vertrocknetes Gras (links) und offener Boden einer Baustelle (rechts) - oben im Farbbild und unten im Nahinfrarotbild	81
Abbildung 4-38:	Rasenfläche am Deich mit kräftigerem Wachstum	82

Abbildung 4-39:	Identifizierung von unterschiedlichen Vitalitäten einer Pflanzenart a) panchromatisches Bild, b) Farbbild (bearbeitet) und c) Nahinfrarotbild (bearbeitet)	82
Abbildung 4-40:	Wildtierpfad (vertikal) und Treibselsaum (horizontal)	83
Abbildung 4-41:	Wildtierpfad und Treibselsaum: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild (bearbeitet) und c) Nahinfrarotbild (bearbeitet)	84
Abbildung 4-42:	Gestörte Grasnarbe auf dem Deichkörper infolge Abschattung durch einen Baum	84
Abbildung 4-43:	Identifizierung von Bäumen: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitales Oberflächenmodell	85
Abbildung 4-44:	Identifizierung von Bauwerken - Mastfundament: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitalen Oberflächenmodell	86
Abbildung 4-45:	Foto Betonfundament	87
Abbildung 5-1:	Foto der Öffnungen auf der wasserseitigen Böschung des Deiches	89
Abbildung 5-2:	Lage der wasserseitigen Durchlässe	90
Abbildung 5-3:	Prinzip der Funktionsweise und Randbedingungen beim SVAT-Modell (Thonfeld, 2000)	91
Abbildung 5-4:	Thermal Infrarot (TIR) Aufnahme des Deichversuchs während der Versuchsreihe 1 - 09.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - keine künstliche Schädigung	93
Abbildung 5-5:	Messergebnisse der Versuchsreihe 1 - 09.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - MQ 2 - 24 h nach Beginn des Einstaus - keine künstliche Schädigung	93
Abbildung 5-6:	Ansicht des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 1 - 09.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - keine künstliche Schädigung	94
Abbildung 5-7:	Messergebnisse der Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung - MQ 1 - zu Beginn des Einstaus	95
Abbildung 5-8:	Messergebnisse der Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung - MQ 2 - zu Beginn des Einstaus	95
Abbildung 5-9:	Messergebnisse der Versuchsreihe 2 - 27.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung - MQ 1 - nach Beendigung des Versuchs	96
Abbildung 5-10:	Messergebnisse der Versuchsreihe 2 - 27.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung - MQ 2 - nach Beendigung des Versuchs	96
Abbildung 5-11:	Thermalinfrarot (TIR)-Aufnahme des Deichs während der Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung	97
Abbildung 5-12:	Ansicht der Luftseite des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung	97

Abbildung 5-13:	Steuerbare (links) und weitere nicht steuerbare Öffnungen in der wasserseitigen Böschung des Deichs (rechts) während des Einstaus bzw. während des Einbaus	98
Abbildung 5-14:	TIR Aufnahme des Deichs während der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung	98
Abbildung 5-15:	Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 1 - zu Beginn des Einstaus	99
Abbildung 5-16:	Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 2 - zu Beginn des Einstaus	99
Abbildung 5-17:	Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 1 - 68 h nach Beginn des Einstaus	100
Abbildung 5-18:	Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 1 - nach Beendigung des Versuchs	100
Abbildung 5-19:	Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 2 - nach Beendigung des Versuchs	101
Abbildung 5-20:	Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - Optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 2 - nach Beendigung des Versuchs	101
Abbildung 5-21:	Ansicht des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung	102
Abbildung 5-22:	Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 1 - zu Beginn des Einstaus	103
Abbildung 5-23:	Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 2 - zu Beginn des Einstaus	103
Abbildung 5-24:	Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 1 - 28 h nach Beginn des Einstaus	104
Abbildung 5-25:	Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 2 - 28 h nach Beginn des Einstaus	104
Abbildung 5-26:	Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 1 - nach Beendigung des Versuches	105
Abbildung 5-27:	Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 2 - nach Beendigung des Versuchs	105
Abbildung 5-28:	Thermalinfrarot(TIR)-Aufnahme des Deichs während der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag -komplette Durchsickerung	106
Abbildung 5-29:	Ansicht des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung	106
Abbildung 5-30:	Aufnahmen mit einem Mikrowellensensor (DLR Oberpfaffenhofen, 2005)	107

Tabelle 2-1:	Schadensursachen für mögliche Versagensgründe von Deichen	28
Tabelle 3-1:	Technische Daten der HRSC-AX Kamera [DLR, 2004]	43
Tabelle 3-2:	Spektralbänder und Blickwinkel [DLR, 2004]	43

SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

1 nm	1 Nanometer = 0,000000001 m	CIR	<u>C</u> lose <u>I</u> n <u>i</u> nfr <u>a</u> red – Nahinfrarot Bild
1 μm	1 Mikrometer = 0,000001 m	DeSiMo	<u>D</u> e <u>i</u> ch <u>s</u> icherheits <u>m</u> onitoring
1 mm	1 Millimeter = 0,001 m	DGPS	<u>d</u> ifferential <u>g</u> lobal <u>p</u> ositioning <u>s</u> ystem
1 cm	1 Zentimeter = 0,01 m	DLR	<u>D</u> eutsches Zentrum für <u>L</u> uft- und <u>R</u> aumfahrt
1 dm	1 Dezimeter = 0,1 m	DOM	<u>D</u> igitales <u>O</u> berflächen <u>m</u> odell
α	Absorptionsgrad	FE	<u>F</u> ern <u>e</u> r <u>k</u> undung
ε	Dielektrizitätszahl	GIS	<u>G</u> eo <u>i</u> nformation <u>s</u> ystem
φ	Strahlungsfluss	GPS	<u>G</u> lobal <u>p</u> ositioning <u>s</u> ystem
η	Sicherheitsquotient gegen Versagen	HRSC-AX	<u>H</u> igh <u>r</u> esolution <u>s</u> tereo <u>c</u> amera - <u>a</u> irborne <u>e</u> xtended
ρ _w	Dichte des Wassers	HW	<u>H</u> och <u>w</u> ert im Gauß – Krüger Koordinatensystem
τ	Transmissionsgrad	MIR	<u>M</u> ittleres <u>I</u> nfrarot Bild
Ψ	Matrixpotential des Wassers in der Tiefe z	MWR	<u>M</u> ikrowellen <u>R</u> adiometer
D(s)	Hydraulische Diffusivität in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt	Nadir	Senkrechter Blickwinkel von oben
e	Emissivität der Wasseroberfläche	NIR	<u>N</u> ah <u>I</u> nfrarot Bild
K _f	Hydraulische Leitfähigkeit.	NLWKN	<u>N</u> iedersächsischer <u>L</u> andesbetrieb für <u>W</u> asserwirtschaft, <u>K</u> üsten- und <u>N</u> aturschutz
L _g	Latente Wärmefluss im Boden	PAN	<u>P</u> anchromatisch – Graustufen Bild
L _v	Verdampfungswärme	RGB	<u>R</u> ot – <u>G</u> rün – <u>B</u> lau – Farben Bild
PO	Poren pro Bodenvolumen abhängig von der Bodenart	RW	<u>R</u> echtswert im Gauß – Krüger Koordinatensystem
Q(z)	Wasserabfluss zu den Wurzeln in der Tiefe z	SVAT	<u>S</u> oil <u>V</u> egetation <u>A</u> tmosphere <u>T</u> ransfer Modell
r	Reflexionsverhalten / -grad an der Grenzschicht Wasser/Luft	TDR	<u>T</u> ime <u>d</u> omain <u>r</u> eflectometry
s	Bodenwassergehalt bezogen auf das Porenvolumen	TIR	<u>T</u> hermal <u>I</u> nfrarot Bild
V(z)	Wasserfluss in der Tiefe Z D(s) kennzeichnet die hydraulische Diffusivität [m ² /s], s den Bodenwassergehalt bezogen auf das Porenvolumen [m ³ /m ³] und K _f bezeichnet die hydraulische Leitfähigkeit [m/s].		
CCD	Charge-Coupled Device - Halbleiterdetektor in der digitalen Fotografie		

1 Problembeschreibung und Aufgabenstellung

Seit über tausend Jahren werden an Flüssen und Küsten Deiche und Wurten errichtet, um das Leben sowie das Hab und Gut von Menschen vor Sturmfluten zu schützen. Trotz solcher Schutzmaßnahmen sind in den letzten 1000 Jahren an der deutschen Nordseeküste über 258.000 Menschen durch Sturmfluten getötet worden. Aber auch die bis heute ständig laufend verbesserte Deichbautechnik zur Verringerung des Risikos für Land und Mensch bietet keinen absoluten Schutz, wie besonders die Sturmflut am 16.02.1962 in Hamburg belegt.

Seither waren die 1990'er Jahre von außergewöhnlichen Binnenhochwassern geprägt. Im Flussgebiet des Rheins traten gleich mehrere sehr seltene Hochwasser kurz aufeinander auf. Im Sommer 1997 brachen während eines Hochwassers an der Oder Deiche und verursachten in Polen und Deutschland einen Schaden von etwa 5 Mrd. €. Schließlich erreichte an der Elbe im August 2002 ein Hochwasser noch nie aufgezeichneter Werte und verursachte Schäden von ungefähr 25 Mrd. €.

Bei der Auswertung von Schadensbildern während und nach Hochwassersituationen an Deichbauwerken wurde deutlich, dass vor allem ältere Deiche aus unterschiedlichen Baumaterialien und zum Teil auf wenig tragfähigem Untergrund errichtet wurden. Lokale Änderungen des Baumaterials bzw. der geotechnischen Materialeigenschaften im Deich und im Untergrund führten oftmals zur Bildung von Schwachstellen und in der Folge zu Deichbrüchen (Knoll, P. et al., 1998).

Durch die Nutzung von luft- oder weltraumgestützten Trägersystemen (Flugzeuge, Satelliten) können Fernerkundungsdaten für die Erfassung von Deichzuständen auch auf nicht oder nur begrenzt zugängliche Regionen ausgedehnt werden. Die Akquisition von Daten ist auch dann noch möglich, wenn die Begehung eines Geländes auf Grund bestehender Gefahrenpotentiale nicht mehr zu verantworten ist, z.B. während eines Hochwassers. Auch bietet sich die Fernerkundung als Instrument für die Überwachung des zeitlichen und räumlichen Verlaufs eines Extremhochwassers an. In Gefahrensituationen können Überfliegungsdaten von hochwassergefährdeten Gebieten das frühzeitige Aufspüren von Deichschwachstellen erleichtern und damit ein schnelles Einleiten von Maßnahmen zur Katastrophenabwehr gewährleisten.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) von 2002 bis 2005 geförderten Projektes sollten die grundsätzlichen Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung für den Einsatz bei der Überwachung von Deichen im Vorfeld eines Hochwassers und im Hochwasserfallgebiet untersucht werden.

Die Gesamtziele des Vorhabens umfassten die Erweiterung des Kenntnistanandes zu den Eigenschaften von Deichauflageflächen und Deichen, sowie die Feststellung potentieller Schwachstellen entlang der Deiche durch Auswertung von vorhandenen Daten und ergänzenden Daten, gewonnen an einem Labordeich, und gezielt angesetzter Befliegungen, d. h. mit Hilfe von luftgestützten Fernerkundungstechnologien. Dieses Projekt wurde als Verbundprojekt mit zwei Partnern aus dem Gebiet der Fernerkundungstechnologie durchgeführt, Abbildung 1-1.

Die Untersuchungen an einem Labordeich im Wasserbaulabor des Franzius-Instituts mit unterschiedlichen Fernerkundungssensoren erfolgten in der ersten Phase des Forschungsvorhabens zunächst unter den Gesichtspunkten der Erfassung von Basisdaten für die Befliegungsplanung (Zeitpunkt und Witterungs- und Umwelteinflüsse) und der Aufnahme von Basisdaten zur Analyse von Auswerte- und Interpretationsschlüsseln, d. h.:

- Erfassung von Basisdaten für den luftgestützten Einsatz für die FE-Sensoren
- Parallele Messungen von Klimadaten, Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Porenwasserdruck
- Erfassung der Untersuchungsobjekte hinsichtlich Dimension, Materialzusammensetzung, Bepflanzung und möglicher Durchsickerungen

- Vergleich der Abbildungseigenschaften von div. Sensoren und deren Bilddaten
- Messungen von Zeitreihen zur Optimierung der Befliegungen hinsichtlich Zeit und Witterungsbedingungen und anderer Umwelteinflüsse sowie von störenden Einflüssen (z.B. Wasserverunreinigungen, unterschiedliche Pflanzen usw.)
- Entwicklung von Auswerte- und Interpretationsschlüsseln für deichbezogene Sachverhalte und Schadensmerkmale

FI	SCANDAT	DLR
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen Wiss. Leitung: Prof. Dr.-Ing. C. Zimmermann Bearbeitung: Nino Ohle, A. Elsner	SCANDAT – Gesellschaft für innovative Fernerkundungstechnologien mbH Wiss. Leitung: H.-J. Krickau Bearbeitung: A. Wolters	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Wiss. Leitung: Dr.-Ing. F. Lehmann Bearbeitung: S. Pless
Durchführung von Naturuntersuchungen	Durchführung von Befliegungen in der Natur	Auswahl und Einsatz der Fernerkundungssensoren
Durchführung von Laboruntersuchungen	Ermittlung verschiedener Einflüsse auf die Sensoren mit Laboruntersuchungen	Optimierung und Modellierung der Sensoreinstellungen
Entwicklung und Einsatz von Datenbanken (GIS) zur Analyse von Deichschäden	Datenaufbereitung und Interpretation der Fernerkundungsdaten	Entwicklung von Auswertelgorithmen für die Datenaufbereitung

Abbildung 1-1: Projektpartner und Bearbeitungsbereiche

Ziel der ersten Phase war weiterhin die Aufnahme von Basisdaten für alle einzusetzenden Sensoren unter definierten Laborbedingungen und die Optimierung der modifizierbaren Sensoreinstellungen. Hierzu wurden am Labordeich folgende Einzelschritte erforderlich:

- Naturnaher Aufbau einer Deichabschnittes im Maßstab 1:1, u. a. mit definierten Schädigungen
- Einstau von Wasser und Messung der Durchfeuchtung bzw. Durchsickerung an definierten Deichquerschnitten
- Aufnahme von Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Porenwasserdruck im Profil
- Vergleich der Ergebnisse mit den Daten der Fernerkundungssensoren im Profil und in der Fläche
- Erfassung der Klimadaten während der Laufzeit der Untersuchungen

Hieraus ergaben sich folgende Untersuchungen unter Einbeziehung der meteorologischen Randbedingungen und Leistungsfähigkeit der Fernerkundungssensoren:

- Darstellung und Simulation des Einflusses unterschiedlicher Vegetationen, Witterungen und Belastungen
- Darstellung und Simulation des Einflusses der Belastung auf die Ergebnisse und Analyse der Visualisierbarkeit bestimmter deichtypischer Schadensmerkmale, wie z.B. Sickerwasseraustritte an der Binnenböschung über die Zeit

In einer zweiten Phase wurden mit Kenntnissen, Befliegungen mit den im Labor getesteten Fernerkundungssensoren an unterschiedlichen Deichstrecken durchgeführt. Mit der Befliegung wurde zugleich eine

Bestandsaufnahme der Deiche vor Ort durchgeführt, um eine Korrelation der Fernerkundungsdaten mit vorhandenen Deichmerkmalen vornehmen zu können.

Für die Erreichung dieser Ziele im Projektverbund übernahm das Franzius-Institut die Ermittlung der Felddaten für die unterschiedlichen Fernerkundungssensoren in der Natur und an dem Labordeich des Instituts. Weiterhin erarbeitete das Franzius-Institut ein Geografisches Informationssystem zur Deicherfassung und Überwachung von Deichen vor und während eines Hochwasserereignisses.

Parallel hierzu gingen die Projektpartner DLR und Scandat der Fragestellung nach, welche Fernerkundungssensoren für das Deichmonitoring geeignet sind und welche Sensoren bestimmte Aufgaben unter verschiedenen Witterungssituationen erfüllen können.

Als Gebiete mit verschiedenen Deichtypen wurde die Elbe und als Sondergebiet, in dem im Untersuchungszeitraum ein unerwartetes Hochwasser auftrat, die Mulde ausgewählt.

Die nachfolgenden Ausführungen sind ein Auszug aus dem Abschlussbericht des Projektes "DEICHMONITORING, Entwicklung und Verifizierung von Einsatzvarianten zur Aufklärung von Schwachstellen an Deichen mit luftgestützten multisensoralen Fernerkundungstechnologien zur Verbesserung des Hochwasserschutzes", Teilprojekt 2: "Wasserbauliche Untersuchungen in Labor und Natur" (Bericht Nr. 675 III (Juli 2006), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF, Förderkennzeichen: 02WH0410, Förderzeitraum: 01.01.2003 bis 31.12.2005, Projektträger: Forschungszentrum Karlsruhe (FTZ), Projektträger für Wassertechnologie, Außenstelle Dresden).

2 Deichschäden und Versagensmechanismen

2.1 Allgemeine Belastungen und Versagensmechanismen

Die Belastungen und hieraus mögliche Schäden mit der Folge des Versagens von Deichen lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- äußere Einflüsse (Wellen, Wasserstand, Eis, mechanische Belastungen, Wühltiere, Pflanzen)
- innere Einflüsse (Untergrund, Deichmaterial, Erosion, Suffosion u. a.)
- menschliche Einflüsse (Bemessung, Bauausführung, Unterhaltung, Nutzung, Fehlverhalten u. a.)

Deiche müssen den oben genannten Einflüssen und Belastungen und den hieraus resultierenden Schäden für eine zu definierende Dauer standhalten, ehe ein Versagen oder Teilversagen eintritt. Versagen eines Deiches bedeutet die Nichterfüllung seiner Funktion, das Hinterland vor Überflutungen zu schützen. Versagen sind Wellenüberläufe und Überströmungen als Folge hoher Wasserstände, Abbildung 2-1, mit begrenzten Zerstörungen oder lokalen Schäden bis hin zum Bruch des Deiches (Totalversagen). Als Folge von Belastungen und daraus resultierenden Beschädigungen können Stabilitätseinschränkungen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit des Versagens bei nachfolgenden Belastungen auftreten.



Abbildung 2-1: Wellenüberlauf und Ausspülungen in der Krone eines Deiches [EAK, 1993]

Abbildung 2-2 zeigt Belastungen und Schadensursachen an unterschiedlichen Deichtypen. Maßgebend für die Deichsicherheit ist auch die Dauer der Belastung. So treten Belastungen an Küsten- und Ästuardeichen nur über kürzere Perioden auf, d. h. eine Sturmflut dauert bis zu 72 Stunden, während Hochwassersituationen an Binnendeichen mehrere Tage bis zu Wochen anhalten können, z. B. beim Elbhochwasser 2002.

Erhöhte Wasserstände mit langen Standzeiten und eventuellen Wellenbelastungen, führen zunächst zu Beschädigungen der Deichaußenflächen. Danach kann es zu einem vollständigen Durchsickern des Deiches kommen. Möglich ist auch eine Erosion der Binnenböschung, verursacht durch Überströmung, Wellenüberschlag und/oder Abrutschen der Oberfläche, die zum Versagen eines Deiches führen können. Der örtliche Bruch eines Deiches führt durch fortschreitende Seitenerosionen und Grundbruch zum Versagen

breiterer Abschnitte mit allen Folgen für das Hinterland. Diesem Fall liegen in der Regel Verkettungen unterschiedlicher Belastungen mit variabler Höhe und Dauer der Einwirkung in Verbindung mit verschiedensten Schadensmechanismen zugrunde.

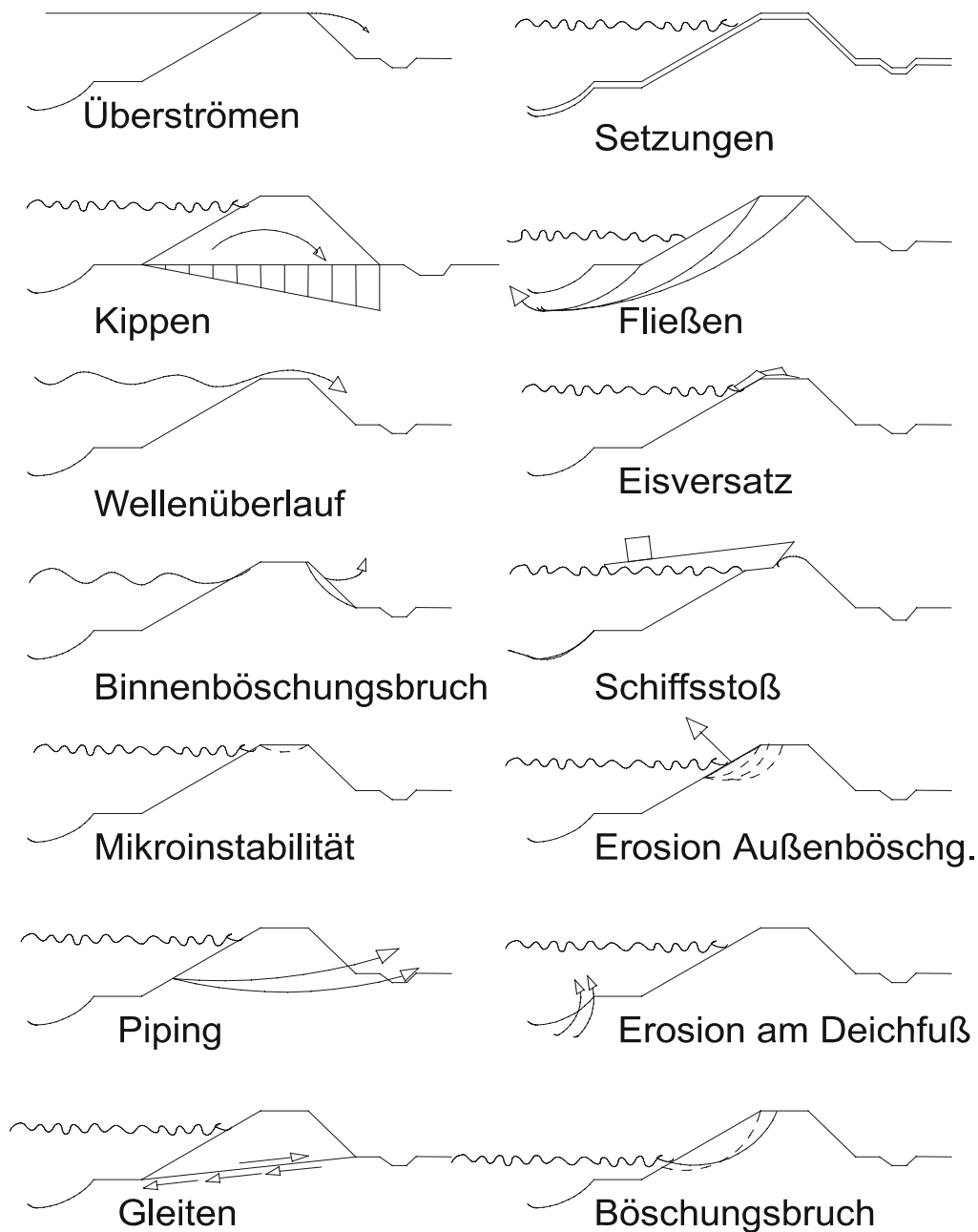


Abbildung 2-2: Belastungen und Schadensursachen an Deichen [Vrijling, J. K., 1994]

Auch kann die innere Erosion von Deichen, welche in Hohlräumen des Deichkörpers auftreten, entstanden durch tierische oder pflanzliche Einwirkungen (Wühltiere, Wurzeln) oder durch Auswaschung und Erweiterung eines Porenkanals, zum Versagen eines Deiches führen. Richwien (1995) gibt eine anschauliche Schadensabfolge bei der Belastung eines Deiches bei erhöhten Wasserständen und Wellen, Abbildung 2-3.

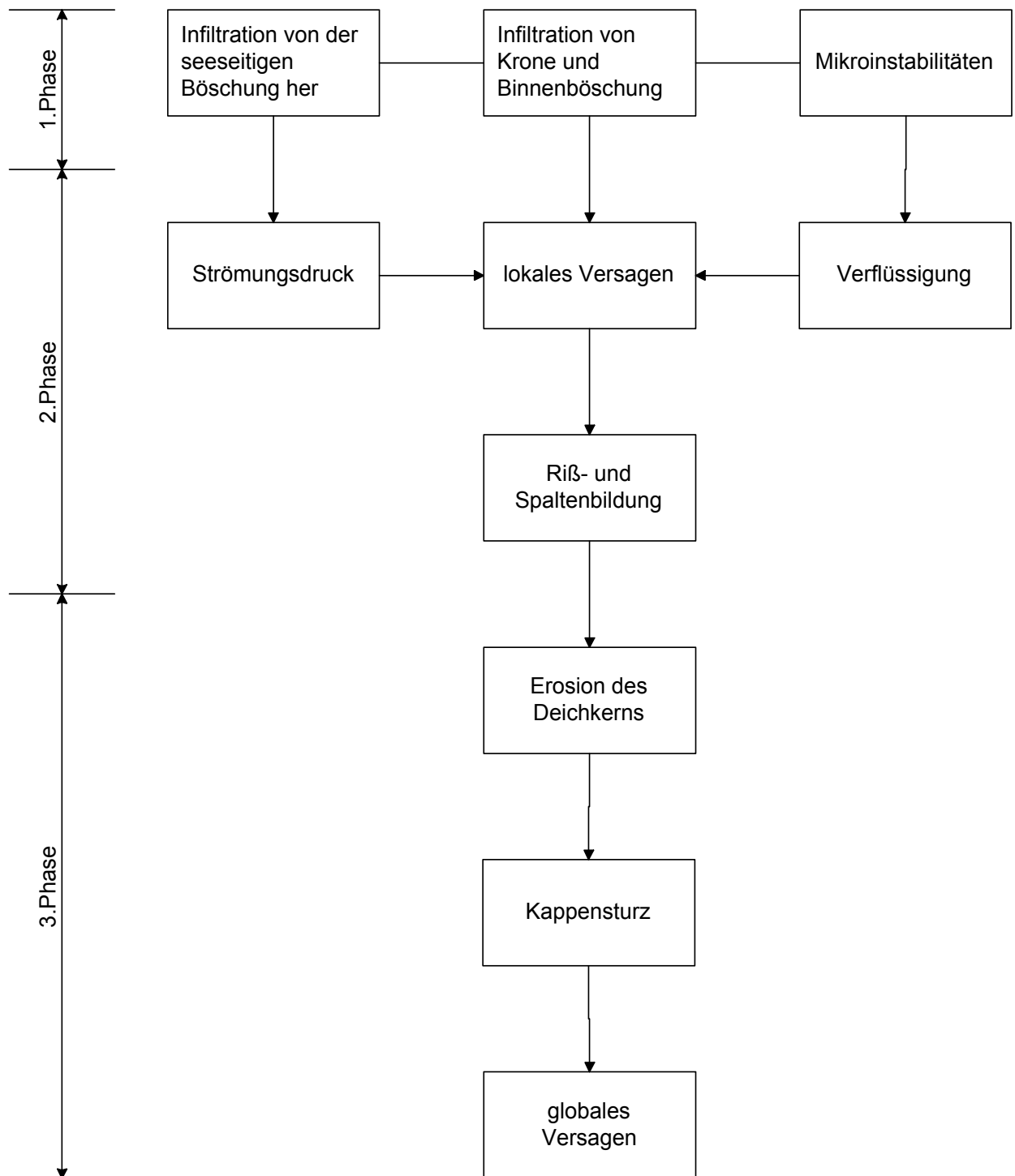


Abbildung 2-3: Belastung aus erhöhten Wasserständen und Wellen bis zum Deichversagen infolge Infiltration und Erosion [Richwien, W., 1995]

Folgende Schäden werden unterschieden:

a) direkte Schäden

- Veränderung von Form, Textur und Oberfläche
- Aufreißen der Grasdecke, Wühltierlöcher

- Bewuchs, Abschattung
- Setzungen
- großflächige Absenkungen

b) indirekte Schäden

- Veränderung des Korngefüges
- Feuchtigkeit, Temperatur
- Veränderung der Flora

In Tabelle 2-1 werden die wichtigsten Schadensursachen und Wirkungsweisen für ein Deichversagen aufgeführt.

Tabelle 2-1: Schadensursachen für mögliche Versagensgründe von Deichen

Faktoren und Ursachen:	Wirkungsweise:	Auswirkung:
<i>Meteorologie:</i>		
Trockenheit, Frost, Wind	Trocken- und Frostrisse	Infiltration
Frostwechsel	Gelisolifluktion	Rutschungen
Regen (Menge; Dauer)	Durchfeuchtung, Erosion des Klei	Infiltration, Rutschungen
<i>Hydrologie:</i>		
Wasserstand	Überspülung	Infiltration, Rutschungen
Wellen	Wellenschlag	Ausschläge, Kliffbildung
Strömung	Überlauf	Rutschung der Binnenböschung
<i>Material:</i>		
Deichboden	Schlechte Materialbeschaffenheit	Geringere Widerstandsfähigkeit
Geringe Verfestigung	Bauausführung/Alter	Höhere Infiltration
Untergrundbeschaffenheit	Standfestigkeit und Setzung	Unterströmung, Infiltration
<i>Installationen:</i>		
Leitungen, Pipelines	Ansatzpunkt für Erosion durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeit	Infiltration, Rutschungen, Erosion
Zaunpfähle, Masten		
Straßen, Treppen	Ansatzpunkte für Erosion	Durchfeuchtung, Rutschungen
<i>Fauna/Flora:</i>		
Wühltiere	Fraßschädigung der Wurzeln	Kleine Primärschäden
Wühlterhöhlen	Sackungen	Infiltration, Erosion, Ausschläge
Weidetiere, Bewuchsfehler	Schädigung der Grasdecke	Primärschäden, Infiltration
Bäume	Beschattung, Lockerung des Bodens	Durchfeuchtung, Rutschungen
<i>Deichunterhaltung:</i>		
Geringe Pflege der Grasdecke	Schädigung der Grasdecke	Primärschäden
Fahrspuren	Schädigung der Kleidecke, Krone	Infiltration, Primärschäden
Trampelpfade, Tourismus	Schädigung der Grasdecke, Krone	Infiltration, Primärschäden
Kaum Treibselräumung	Unkrautbildung	Primärschäden
<i>Treibgut:</i>		
Holz, Baumstämme etc.	Schädigung der Grasdecke	Primärschäden, Ausschläge
Großes Treibgut	Schädigung der Deckschicht	Kliffbildung bis Deichbruch

Diese Schäden werden bis heute im Rahmen von jährlichen Routineuntersuchungen durch visuelle Inspektionen (Deichläufer) und in einigen Fällen durch Befliegungen festgestellt (Monitoring). Viele Schäden, die nur durch Superposition oder nach Mehrfachereignissen zu Deichversagen führen, werden nicht

oder nur in Einzelfällen erkannt und beseitigt, u. a. wegen der Kurzzeitigkeit der Ereignisse oder schwieriger Zugänglichkeit (Vernässung) unmittelbar nach Ereignissen.

Während eines Hochwasserereignisses oder kurz davor eine Schadensvorhersage für einzelne Deichabschnitte zu geben, so dass Helfer und technische Maßnahmen ausreichend und zielführend eingesetzt werden, ist bisher nur sehr begrenzt möglich.

Daher werden hier die aufgeführten möglichen Schäden und Versagensmechanismen an Deichen auf ihre Erkennbarkeit anhand von Fernerkundungsdaten untersucht und mit ihren visuellen Ausprägungen beschrieben. Es werden Definitionsmuster erstellt, mit denen Deichschäden mit Hilfe der Fernerkundung erkannt werden sollen.

2.2 Schäden durch Gleiten des Deiches und Deichfußes

Das Gleiten eines Deiches wird infolge eines zu hohen seitlichen Wasserdrucks eingeleitet. Der Deich beginnt sich durch die Sohldruckspreizwirkung zu bewegen. Die Sicherheit η gegen das Versagen des Deiches wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\eta = \frac{\text{Sohlstreibung_am_Fu\ss}}{\text{Seitendrücke}} \geq 1,0$$

Abbildung 2-4 zeigt schematisch das Gleiten eines Deiches.

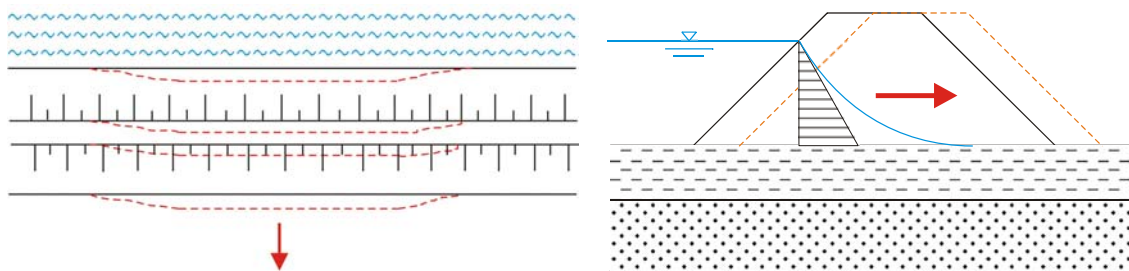


Abbildung 2-4: Gleiten des Deiches (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

Das Gleiten eines Deichfußes tritt ein, wenn durch Infiltration in den Deichkörper der Sohlschub die Sohlstreibung übersteigt. Durch die Spreizwirkung gibt der Deich im Bereich des Deichfußes nach. Die Sicherheit η gegen das Versagen des Deiches wird durch die Formel beschrieben:

$$\eta = \frac{\text{Sohlstreibung_am_Fu\ss}}{\text{Sohlschub_am_Fu\ss}} \geq 1,0$$

Abbildung 2-5 zeigt schematisch das Gleiten eines Deichfußes.

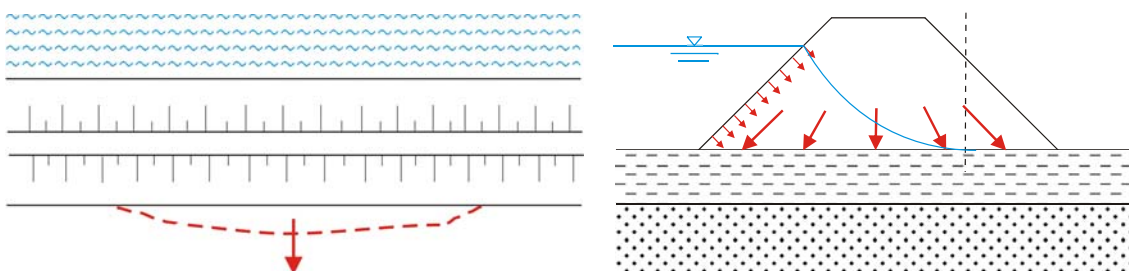


Abbildung 2-5: Gleiten des Deichfußes (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

2.3 Schäden durch Böschungsgrundbruch

Ein Böschungsgrundbruch tritt ein, wenn die Scherkraft des Deichkörpers und des Bodens im Bereich mit hoher Wasserinfiltration nicht ausreichen, um die Gewichtskraft des Gleitkreises aufzunehmen. Die Sicherheit η gegen das Versagen des Deiches wird wie folgt beschrieben:

$$\eta = \frac{\sum M(\text{Scherkraft})}{\sum M(\text{Gewichtskraft})} \geq 1,0$$

Abbildung 2-6 zeigt schematisch einen Böschungsgrundbruch.

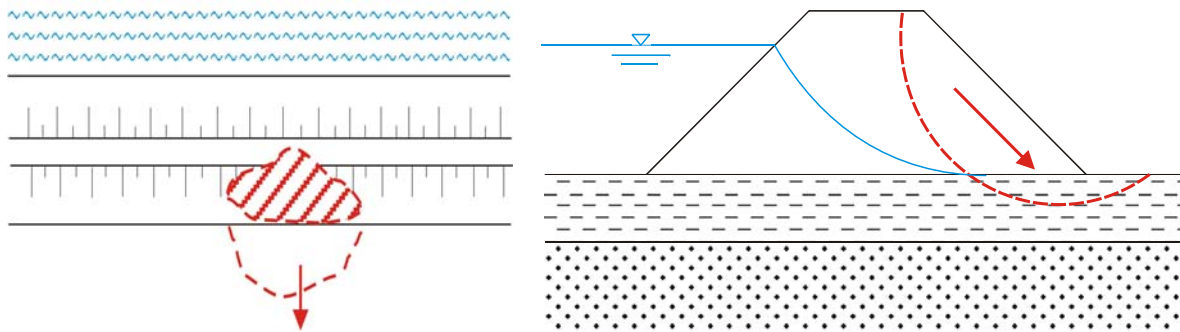


Abbildung 2-6: Böschungsgrundbruch (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

Abbildung 2-7 zeigt einen Böschungsgrundbruch in der Natur.



Abbildung 2-7: Böschungsgrundbruch in der Natur [Foto: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, 2004]

2.4 Schäden durch Böschungsbruch mit örtlichem Standsicherheitsverlust

In örtlich begrenzten Bereichen mit hoher Infiltration reicht die Scherkraft des Deichkörpers nicht aus, um die Gewichtskraft aufzunehmen. Die Sicherheit η gegen das Versagen des Deiches wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\eta = \frac{\sum M(\text{Scherkraft})}{\sum M(\text{Gewichtskraft})} \geq 1,0$$

Abbildung 2-8 zeigt schematisch einen Böschungsbruch mit örtlichem Standsicherheitsverlust.

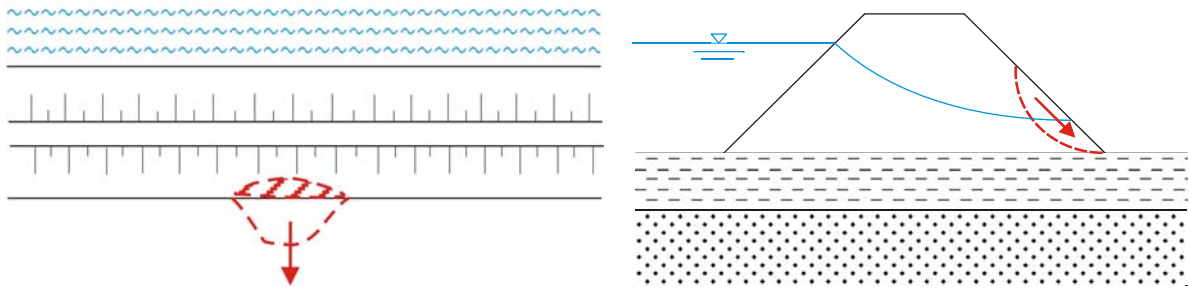


Abbildung 2-8: Örtlicher Standsicherheitsverlust (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

2.5 Schäden durch Erosionsgrundbruch (Piping)

Ein Erosionsgrundbruch, auch Piping genannt, entsteht durch erhöhten Wasserdruck am Deich und erhöhte Sickerströmungen bei locker gelagertem Untergrund. Dadurch kann ein Erosionskanal entstehen. Die Sicherheit η hierfür wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\eta = \frac{\text{Bodenauftriebswichte}}{\text{spez. Strömungsdruck}} \geq 3$$

Abbildung 2-9 zeigt schematisch einen Erosionsgrundbruch mit örtlichem Standsicherheitsverlust.

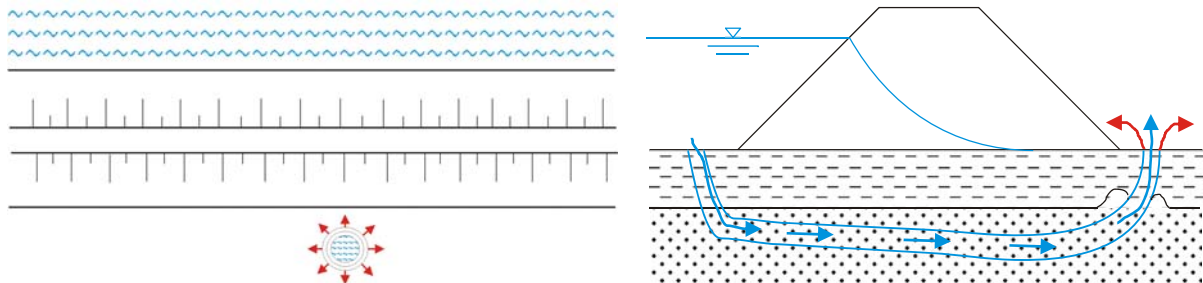


Abbildung 2-9: Erosionsgrundbruch, rückschreitende Erosion (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

Abbildung 2-10 gibt ein Beispiel eines durch Sandsäcke stabilisierter Deiches mit Erosionsgrundbruch.



Abbildung 2-10: Durch Sandsäcke stabilisierter Deich mit Erosionsgrundbruch [Foto: Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, 2004]

2.6 Schäden durch Setzungen

Setzungen entstehen langfristig in Bereichen mit unkonsolidiertem Untergrund bei einer hohen Eigenlast des Deiches. Abbildung 2-11 zeigt schematisch das Prinzip einer Deichsetzung.

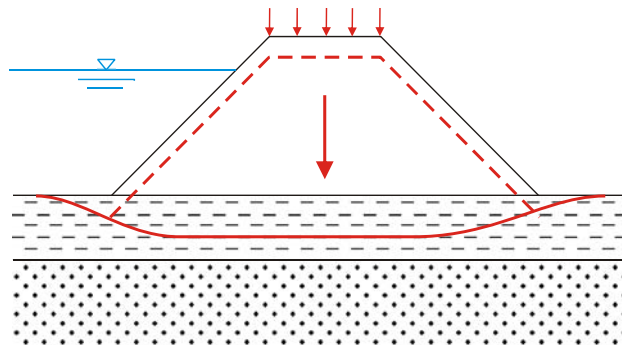


Abbildung 2-11: Deichsetzung (Schnitt)

2.7 Schäden durch Durchsickerung nach hydraulischem Grundbruch

Die Durchsickerung eines Deiches oder des Untergrundes wird durch die Infiltration von Sickerwasser in den Deich durch länger anstehendes Hochwasser verursacht.

Abbildung 2-12 zeigt schematisch die Durchsickerung eines Deichs bzw. des Untergrundes.

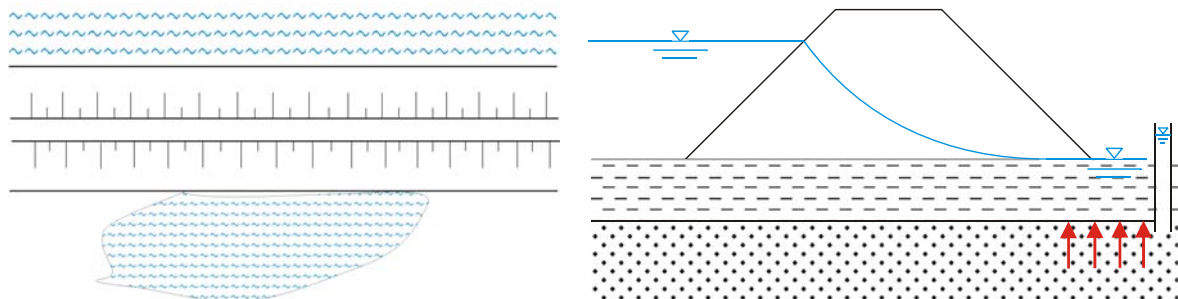


Abbildung 2-12: Durchsickerung nach hydraulischem Grundbruch (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

Abbildung 2-13 zeigt eine Durchsickerung der binnenseitigen Böschung infolge eines hydraulischen Grundbruchs in der Natur.



Abbildung 2-13: Durchsickerung nach hydraulischem Grundbruch [Foto: Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, 1982]

2.8 Schäden an der Außenböschung durch zu schnellen Wasserspiegelabsenk

Ein Bruch der Außenböschung entsteht bei schnellem Wasserspiegelabsenk durch einen erhöhten Porenwasserüberdruck im Deich. Abbildung 2-14 zeigt schematisch das hydraulische Versagen der Außenböschung in der Draufsicht (links) und in der Seitenansicht (rechts).

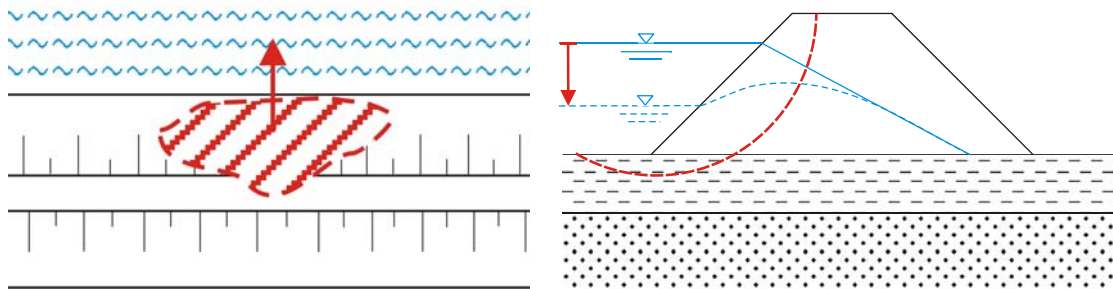


Abbildung 2-14: Hydraulisches Versagen einer Außenböschung (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

2.9 Erosion der Außenböschung infolge Wellenschlag

Eine Erosion der Außenböschung von Deichen erfolgt durch Überschreiten der Grenzsteilheit und Brechen der Wellen. Druckschlag der Wellen und rücklaufendes Wasser bewirken eine Erosion der Böschung.

Abbildung 2-15 zeigt schematisch die Erosion der Außenböschung infolge von Wellenangriff.

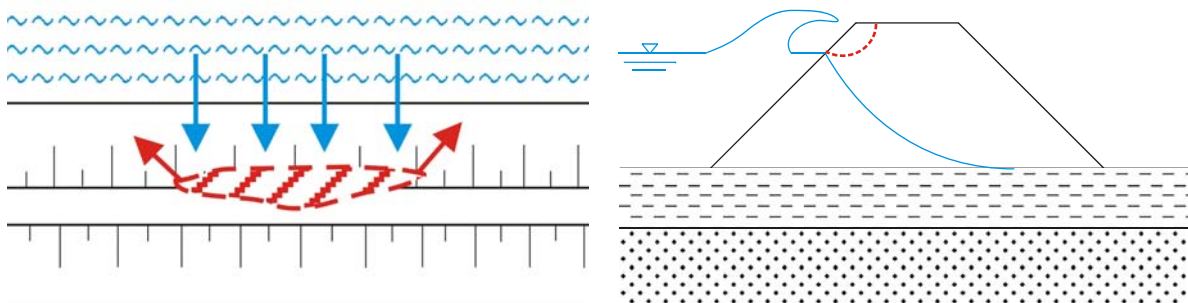


Abbildung 2-15: Erosion einer Außenböschung (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

2.10 Erosion der Binnenböschung infolge Wellen- oder Wasserüberlauf

Eine Erosion der Binnenböschung infolge Wellen- oder Wasserüberlauf tritt immer dann auf, wenn die Deichhöhe für ein auftretendes Sturmflut- oder Hochwasserereignis zu gering bemessen ist. Es kommt zu einem Überlauf an der Deichkrone mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Wird die Scherfestigkeit der obersten Gras- und Kleischicht überschritten, erfolgt eine rückschreitende Erosion der Binnenböschung. Die Sicherheit η hierfür wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\eta = \frac{\text{vorhandene_Scherfestigkeit}}{\text{zulässige_Scherfestigkeit}} \geq 1,0$$

Abbildung 2-16 zeigt schematisch die Erosion der Binnenböschung infolge Wellen- und Wasserüberlauf.

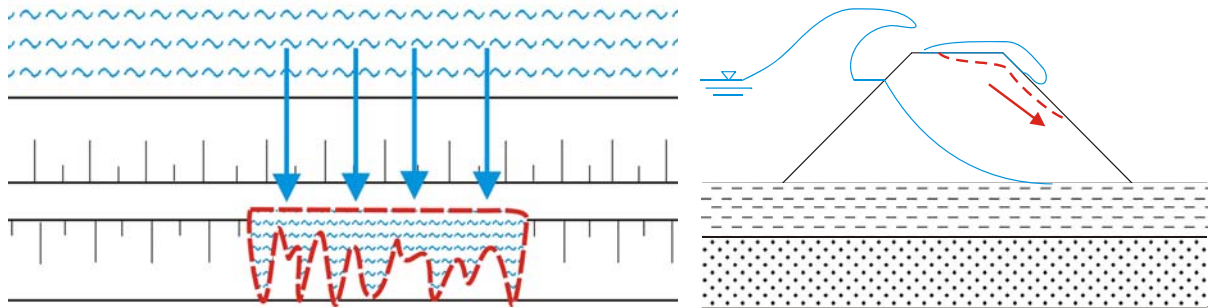


Abbildung 2-16: Erosion einer Binnenböschung (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

Abbildung 2-17 zeigt das Überströmen eines Deichs in der Natur.



Abbildung 2-17: Überströmen eines Elbdeichs [Foto: Kokemüller, 2005]

2.11 Erosion an Deichen durch mechanische oder natürliche Beanspruchung

Eine Erosion der Außen- und Binnenböschungen durch mechanische Beanspruchungen kann verschiedene Ursachen haben. So kann auch das Aufstellen von Zäunen zu Schäden führen. Wird Tieren hierdurch ein bestimmter Weg vorgegeben, führt der entstehende Pfad zur Schädigung der Grasnarbe (Abbildung 2-18).

Das Beweiden von Deichen mit schweren Tierarten, wie Kühen und Pferden, kann ebenfalls zur Zerstörung der Grasnarbe durch Trittschäden führen. Auch das Befahren oder Begehen der Deichkrone durch Spaziergänger oder Kraftfahrzeuge kann zu einer Schädigung der Grasnarbe führen (Abbildung 2-19, links). Nicht zu vernachlässigen sind auch Schädigungen der Grasnarben von innen durch Wühltiere, wie Mäuse, Ratten oder Maulwürfe. Auch Wühlgänge durch Kaninchen, Hasen, Füchse, Hunde u. ä. können die Standsicherheit von Deichen beeinträchtigen, Abbildung 2-19, rechts.



Abbildung 2-18: Kahlstellen durch Schaftritt an einem Zaun (links) und an einem Pfahl (rechts) auf der Binnenseite eines Deiches [Fotos: NLWKN, 2005]



Abbildung 2-19: Fahrspuren (links) und Maulwurfbefall (rechts) an einem Deich [Fotos: NLWKN, 2005]

Abbildung 2-20 zeigt die schematische Ausprägung von Kahlstellen durch Viehtritt an Deichen und Auftritt von Wühltieren in der Draufsicht.

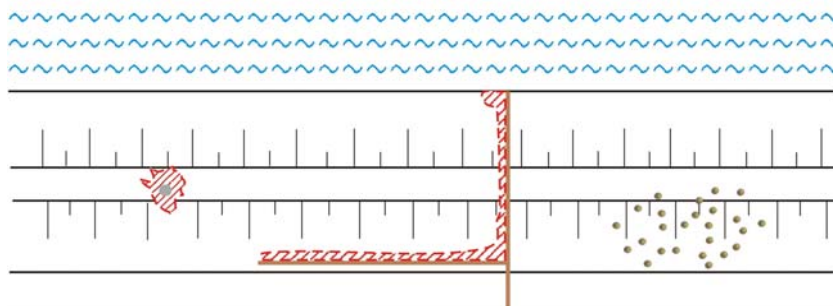


Abbildung 2-20: Schematische Ausprägung von Kahlstellen durch Viehtritt an Deichen und Auftritt von Wühltieren in der Draufsicht

2.12 Schädigung der Grasnarbe durch Wildbewuchs

Aufgrund schlechter oder fehlerhafter Unterhaltung der gleichmäßigen Grasnarbe von Deichen an Stellen mit starker Durchfeuchtung oder starker Austrocknung kann Wildbewuchs oder sonstige Vegetation entstehen, welche die für die Deichstabilität aufgebraachte Grasnarbe schädigen.

Abbildung 2-21 zeigt eine schematische Darstellung und mögliche Ausprägung von Wildbewuchs mit einhergehender Schädigung der Grasnarbe in der Draufsicht und Abbildung 2-22 zeigt einen Wildbewuchs an einem Deich in der Natur.

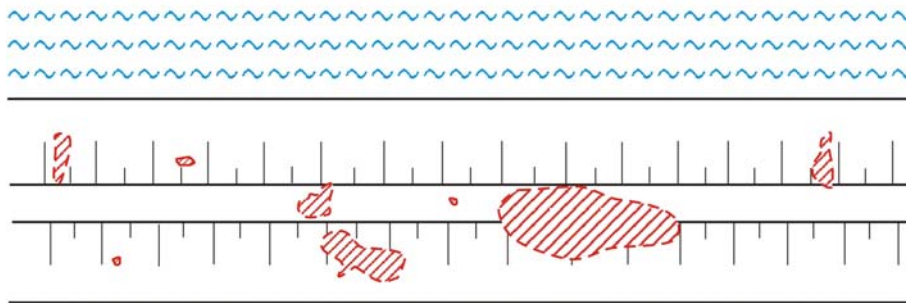


Abbildung 2-21: Wildbewuchs am Deich (mögliche Ausprägung in der Draufsicht)



Abbildung 2-22: Wildbewuchs an einem Deich [Foto: NLWKN, 2005]

2.13 Schädigung der Grasnarbe durch Treibsel oder Wildtierpfade

Kahlstellen oder Erosionen an Deichaußenböschungen können durch nicht entferntes Treibsel (Teek) nach einem Hochwasserereignis entstehen. Dies führt bei einer fehlenden Räumung zur Veränderung und zum Absterben der Grasnarbe durch Verschattung.

Abbildung 2-23 zeigt schematisch die Ausprägung von Kahlstellen durch Treibsel in der Draufsicht.

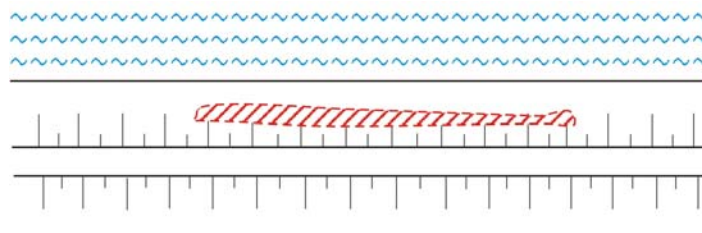


Abbildung 2-23: Kahlstelle durch Treibsel in der Draufsicht

Abbildung 2-24 zeigt links eine Kahlstelle und rechts eine Erosion infolge von nicht geräumtem Treibsel an einem Deich in der Natur.



Abbildung 2-24: Kahlstelle (links) und Erosion (rechts) infolge von ungeräumtem Treibsel an einem Deich [Fotos: NLWKN, 2005]

2.14 Kahlstellen am Deich bei Durchwurzelung und durch Schatten und Laub von Bäumen

Bäume haben durch Ihre Krone und im Herbst fallendes Laub eine abschattende Wirkung auf die Grasnarbe von Deichen und können so zu Kahlstellen führen. Wurzeln können einen Sickerweg im Deich schaffen und eine eventuelle Dichtung schädigen.

Abbildung 2-25 zeigt schematisch eine mögliche Ausprägung von Baumbewuchs. Abbildung 2-26 zeigt links Baumbewuchs an einem Deichfuß und rechts eine Kahlstelle an einer Binnenböschung infolge der Abschattung durch eine Baumkrone.

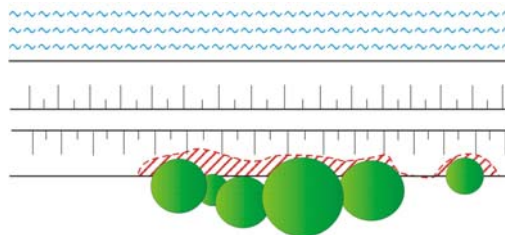


Abbildung 2-25: Baumbewuchs am Deichfuß (mögliche Ausprägung in der Draufsicht)



Abbildung 2-26: Baumbewuchs am Deichfuß (links) und Kahlstelle unter einem Baum (rechts) [Fotos: Kokemüller, 2005]

2.15 Erosionen an Bauwerken am Deich (Treppen, Gebäude, etc.)

Eine Erosion an Bauwerken kann durch mangelnde Unterhaltung und Überwachung von Gebäuden und Bauwerken am, im oder auf dem Deich entstehen. Zudem können fehlerhaft ausgeführte Bauwerke den Deichkörper schädigen. Als Beispiel sei hier ein Pfahl genannt, der durch die Deichdichtung stößt und damit einen Materialaustrag aus dem Deich ermöglicht, so dass es zu trichterförmigen Erosionen kommen kann. Abbildung 2-27 zeigt schematisch die mögliche Ausbildung von Erosionen durch ein Bauwerk am, im oder auf dem Deich, Abbildung 2-28 eine Deicherosion durch ein Gebäude im Deich.

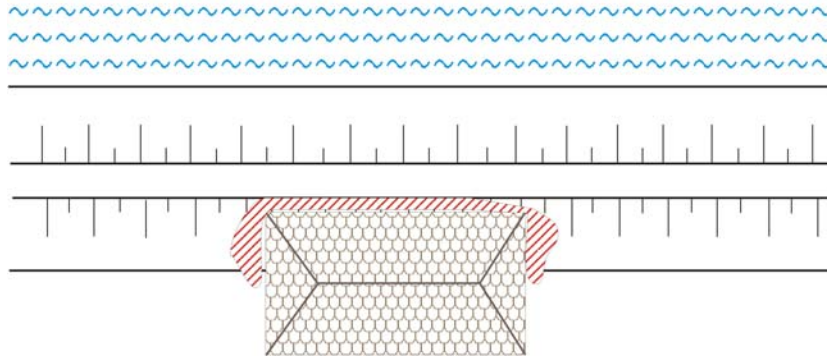


Abbildung 2-27: Deicherosion durch Bauwerk am/im Deich



Abbildung 2-28: Deicherosion durch Bauwerk im Deich [Foto: NLWKN, 2005]

3 Erkennung und Analyse von Deichschwachstellen durch Fernerkundung

3.1 Grundlagen der Fernerkundung

Zur Bewertung des Zustandes und der Eigenschaften von Deichen steht heute neben herkömmlichen Methoden, wie Begehungen oder Aufschließungen, die Fernerkundung zur Verfügung.

Mit Hilfe von Fernerkundungssystemen lassen sich Objektmerkmale punktuell und flächendeckend ableiten. Daraus resultiert eine größere Zuverlässigkeit der aus den Daten abgeleiteten Ergebnisse und es ergeben sich zum Teil neue Aufgabenstellungen.

Bei der Fernerkundung wird die elektromagnetische Strahlung genutzt. Sie wird zum Teil von der Oberfläche eines Körpers reflektiert, ein weiterer Teil wird absorbiert und restliche Teile der Strahlung durchdringen den Körper. Die Anteile dabei hängen von den Eigenschaften des Körpers und der Wellenlänge und Intensität der Strahlung ab.

Zur Beschreibung dieser Vorgänge werden Reflexionsgrad, Absorptionsgrad und Transmissionsgrad verwendet. Ein Strahlungsfluss ϕ , der auf einen Körper trifft, wird reflektiert und ϕ_r genannt. Der absorbierte Teil lautet ϕ_a und der durchgedrungene Teil ϕ_d .

Folgende Definitionen liegen dem Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrad zu Grunde:

$$\text{Reflexionsgrad } \rho = \phi_r / \phi$$

$$\text{Absorptionsgrad } \alpha = \phi_a / \phi$$

$$\text{Transmissionsgrad } \tau = \phi_d / \phi$$

Die Summe aller Anteile muss der ankommenden Strahlung entsprechen. Es gilt also:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Bei der Fernerkundung werden nur strahlungsundurchlässige Körper an der Erdoberfläche aufgenommen, so dass sich die oben angegebene Gleichung wie folgt reduziert:

$$\rho + \alpha = 1$$

Verschiedene Materialien haben bei unterschiedlichen Wellenlängen ein relatives Reflexionsmaximum. Dadurch können bei Einsatz einer bestimmten Wellenlänge verschiedene Oberflächen gezielt untersucht werden, Abbildung 3-1.

Für die in diesem Projekt dargestellten Interpolationen und Korrelationen von Fernerkundungsdaten mit Naturdaten war festzuhalten, dass das Reflexionsmaximum der Vegetation nicht im sichtbaren Spektrum, sondern im Nahinfrarotbereich ab einer Wellenlänge von 700 nm liegt. Im Nahinfrarotluftbild wird die Vegetation rot dargestellt. Je stärker der Reflexionsgrad, desto heller und kräftiger ist dieses Rot. Ist die Vegetation geschädigt, wird das Rot dunkler und matter dargestellt. Diese Kenntnis ist jedoch nur bei grünen Pflanzen anwendbar und abhängig von den spezifischen Reflexionsverhältnissen der Zellstrukturen sowie dem Chlorophyllgehalt und dem Wassergehalt innerhalb der Blätter.

Abbildung 3-1 zeigt, dass Wasser im Nahinfrarotbereich nur reflektiert, wenn Schwebstoffe darin enthalten sind. Auch Unterschiede in der Bodenart lassen sich mit einer Nahinfrarotaufnahme deutlicher her-

vorheben als mit einem normalen Farbbild. Bindiger Boden, wie zum Beispiel schluffiger Ton, hat einen bis zu 40 % besseren Reflexionsgrad als nicht bindiger Boden, wie z. B. Torf.

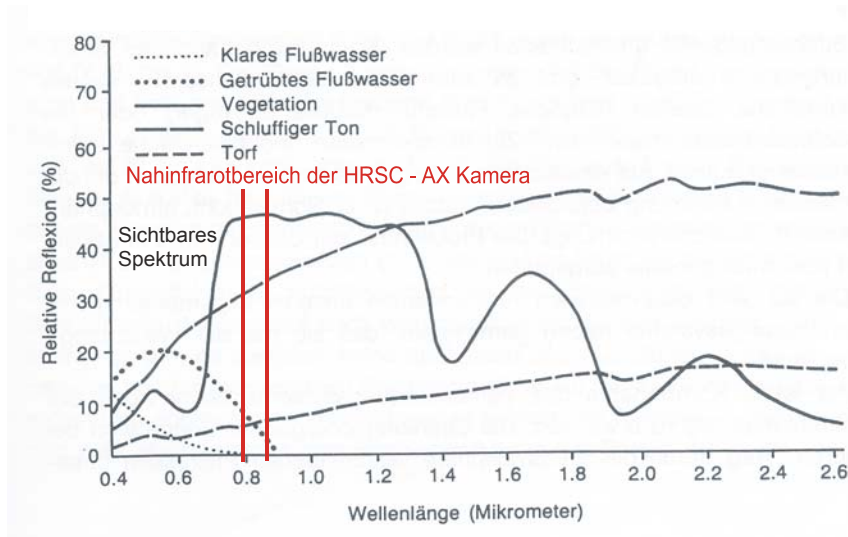


Abbildung 3-1: Reflexion – Wellenlängen Diagramm [Kappas, 1994]

Aus Abbildung 3-2 ist erkennbar, dass eine feuchte Wiese im Nahinfrarotbereich eine um 25 % höhere Reflexion zeigt als eine trockene Wiese, bei der das Wachstum beeinträchtigt ist. Auch hier zeigt sich, dass Wasser im Nahinfrarotbereich kaum reflektiert wird. Auch Straßenpflaster hat dabei ungefähr den gleichen Reflexionsgrad wie eine trockene Wiese und der Reflexionsgrad von trockenem Sand ändert sich bei einer Wellenlänge von 600 bis 850 nm kaum.

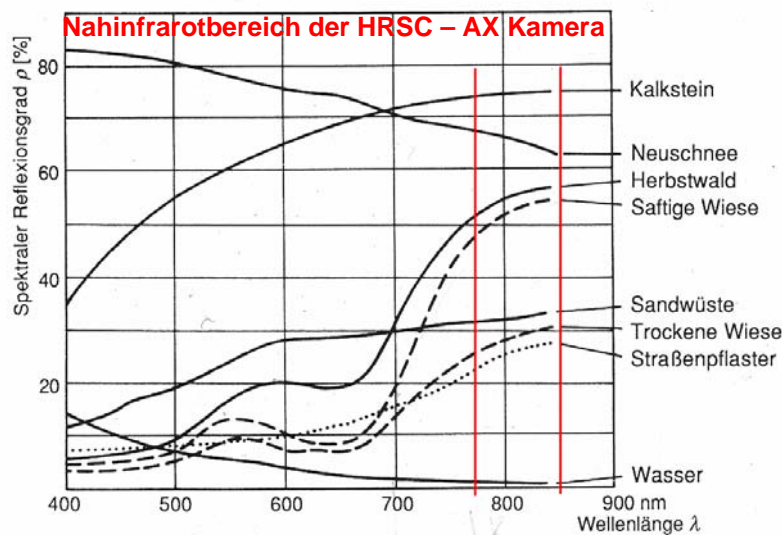


Abbildung 3-2: Spektraler Reflexionsgrad [Albertz, 1991]

Abbildung 3-3 verdeutlicht den Unterschied zwischen einer vitalen, grünen Vegetation gegenüber einer trockenen, grünen Vegetation. Der Unterschied im Reflexionsvermögen kann bis zu 45% betragen.

Für die weiteren Untersuchungen war es wichtig, den Einfluss der Feuchtigkeit auf das Reflexionsvermögen von Böden im Nahinfrarotbereich zu kennen. In Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 wird Sand und Ton dargestellt. Der Ton hat im Mittel die besseren Reflexionseigenschaften. Im trockenen Zustand ist das Reflexionsvermögen mit rund 50 % ungefähr gleich.

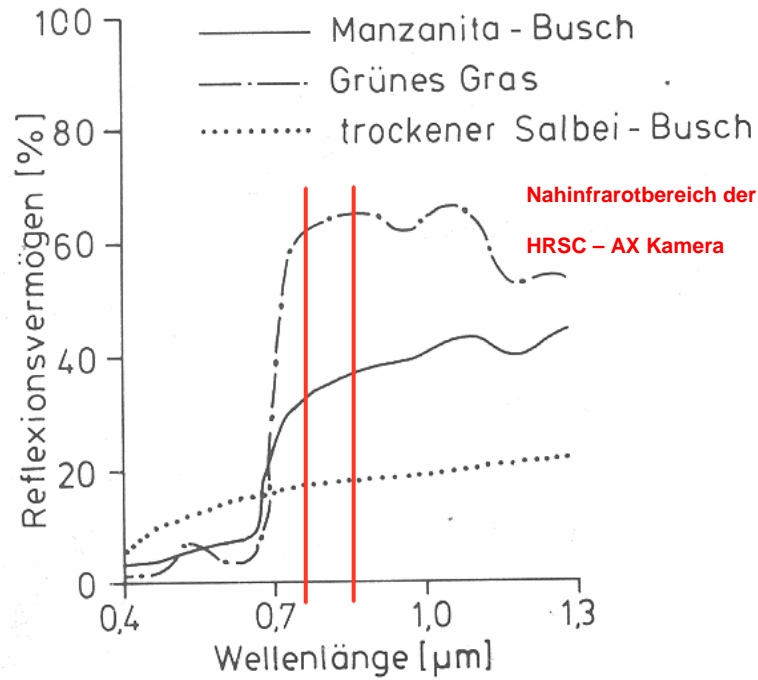


Abbildung 3-3: Verhältnis der Vegetationsvitalität zum Reflexionsvermögen [Kronberg, 1985]

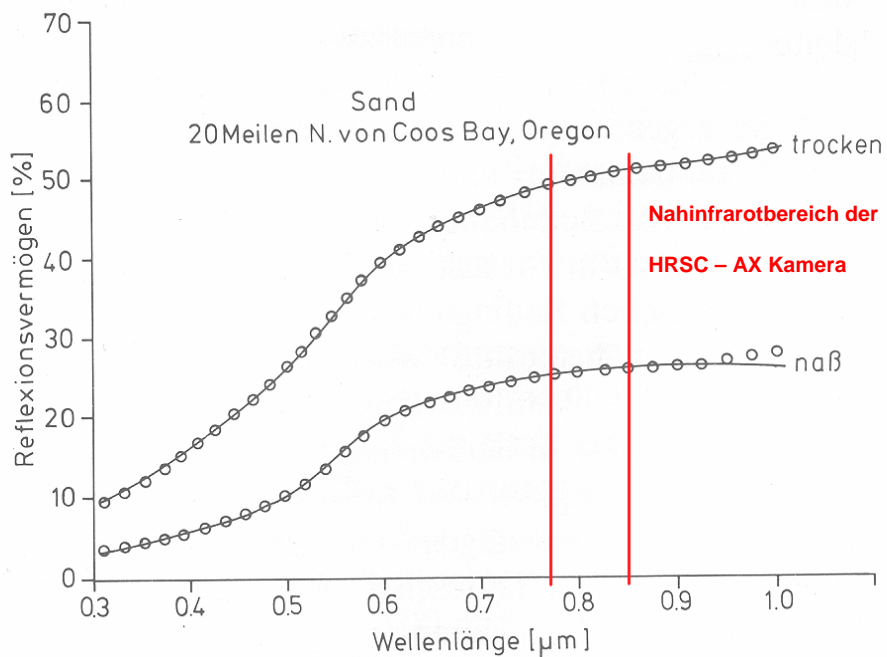


Abbildung 3-4: Verhältnis der Feuchte bei Sandböden zum Reflexionsvermögen [Kronberg, 1985]

Im nassen Zustand nimmt beim Sand das Reflexionsvermögen um 30 % und beim Ton um 10 % ab. Im sichtbaren Spektrum stellen sich die Unterschiede nicht ganz so ausgeprägt dar.

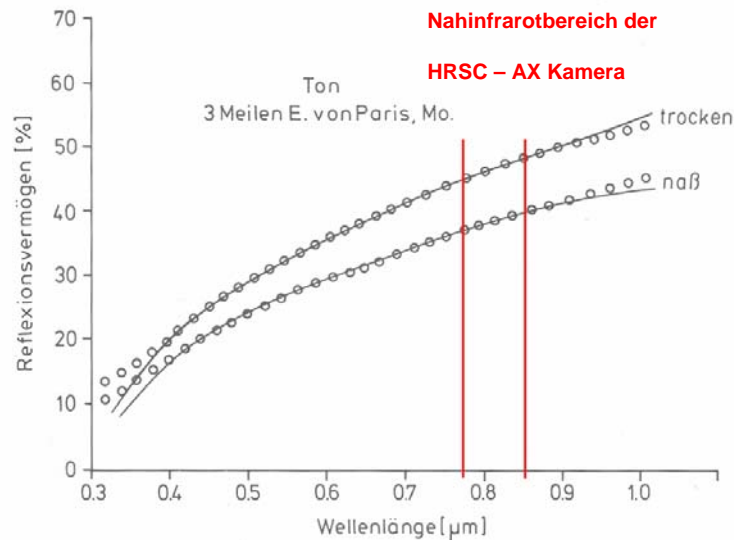


Abbildung 3-5: Verhältnis Feuchte bei Tonböden zum Reflexionsvermögen [Kronberg, 1985]

3.2 Verwendete Fernerkundungssensoren und ihre Datenprodukte

3.2.1 High Resolution Stereo Camera - HRSC-AX Sensor

Bei der High Resolution Stereo Camera (HRSC) handelt es sich um eine multispektrale Kamera, die vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt ursprünglich für die Erforschung des Mars entwickelt worden ist. Durch die kleinen Abmessungen, das geringe Gewicht, den geringen Stromverbrauch und das robuste Design der HRSC eignet sie sich nicht nur für den Einsatz auf Satelliten sondern ist auch für Anwendungen im luftgestützten Fernerkundungsbereich geeignet. Hierfür wurde die Kamera in einigen Details angepasst und heute als HRSC-A (airborne) und HRSC-AX (airborne extended) von der DLR eingesetzt, Abbildung 3-6, links.



Abbildung 3-6: HRSC-AX Kamera (links) und Einsatz der Kamera im Flugzeug (rechts) [Fotos: DLR, Adlershof]

Die Technischen Daten der verwendeten HRSC-AX Kamera sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen, Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Technische Daten der HRSC–AX Kamera [DLR, 2004]

Technische Daten der HRSC–AX Kamera	
Fokusslänge	151 mm
Sichtfeld	41° x 29°
Anzahl der CCD Zeilen	9 (4 farbige)
Pixel pro Zeilen	12172
Pixelgröße	6,5 µm
radiometrische Auflösung	12 bit
maximale Scannerfrequenz	1640 Zeilen pro Sekunde
Stabilisation	Zeiss T – AS Plattform
Datenrekorder	Hochgeschwindigkeitsdatenrekorder von Sony
Georeferenzierung	ApplAnix POS/DG Navigationssystem mit GPS und INS

Im Flugzeug wird die Kamera auf einer Plattform stabilisiert, Abbildung 3-6, rechts. Die Stabilisierung dient der Verbesserung der Abbildungseigenschaften der Kamera. Hinter der Kamera sind die notwendigen Peripheriegeräte zu erkennen, die für die Durchführung eines Bildfluges notwendig sind.

Die HRSC-AX verwendet das Pushbroom-Aufnahmeprinzip. Neun CCD-Zeilen-Detektoren (Charge-Coupled Device/Halbleiterdetektoren in der digitalen Fotografie) sind parallel auf einer Fokalplatte montiert. Es entstehen neun Bildstreifen unter unterschiedlichen Aufnahmewinkeln (Abbildung 3-7). Vier der neun CCDs sind mit unterschiedlichen Farbfiltern bestückt, um multispektrale Bilddaten zu erzeugen. Die restlichen fünf CCD-Zeilen sind panchromatische Graustufen Kanäle und ermöglichen eine photometrische Verarbeitung der HRSC Daten und die Erstellung eines Digitalen Oberflächenmodells (DOM).

Tabelle 3-2 gibt eine Übersicht über die verwendeten Kanäle der HRSC-AX Kamera.

Tabelle 3-2: Spektralbänder und Blickwinkel [DLR, 2004]

Kanal	Spektrum	Winkel	Wellenlänge
Band SF (Stereo Forward)	Panchromatisch	+ 20,5 °	520 - 760 nm
Band Rd (Red)	Rot	+ 2,3 °	620 - 680 nm
Band PF (Photogrammetric Forward)	Panchromatisch	+ 12 °	520 - 760 nm
Band Bl (Blue)	Blau	+ 4,6 °	440 - 510 nm
Band Nd (Nadir)	Panchromatisch	0 °	520 - 760 nm
Band Gr (Green)	Grün	- 2,3 °	520 - 590 nm
Band PA (Photogrammetric Afterwards)	Panchromatisch	- 12 °	520 - 760 nm
Band IR (Infrared)	Infrarot	- 4,6 °	780 - 850 nm
Band SA (Stereo Afterwards)	Panchromatisch	- 20,5 °	520 - 760 nm

Die Aufteilung der neun Spektralbänder erfolgt, wie in der Abbildung 3-7 gezeigt, fächerförmig nach unten, so dass jeder Punkt aus verschiedenen Winkeln erfasst wird.

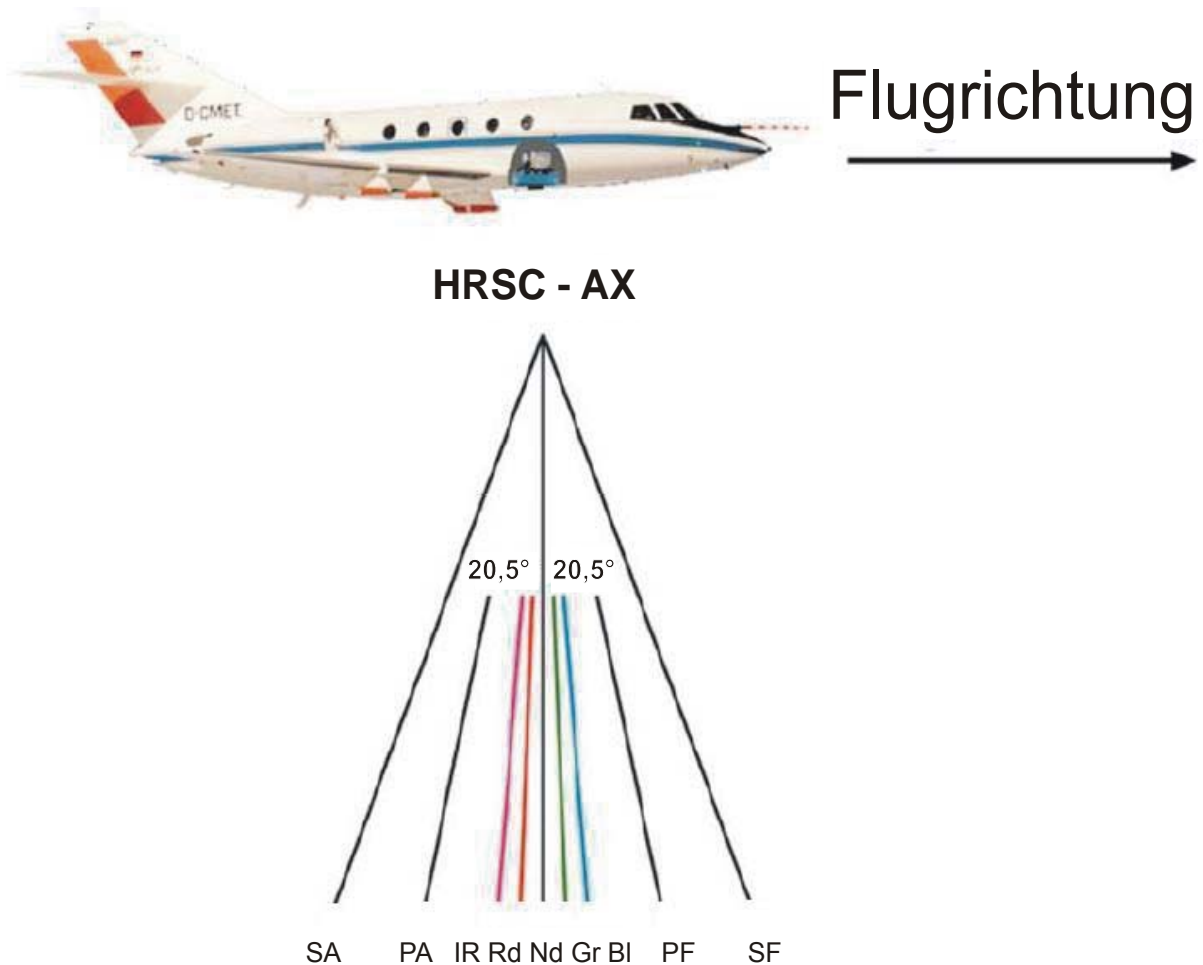


Abbildung 3-7: Blickwinkel der HRSC - AX Kamera [DLR, 1999]

Nach der Prozessierung stehen für die Auswertung vier Datenprodukte zur Verfügung:

- Panchromatisches Bild (PAN) - Abbildung 3-8 a)
- Farbbild (RGB) - Abbildung 3-8 b)
- Nahinfrarotbild (CIR) - Abbildung 3-8 c)
- Digitales Oberflächenmodell (DOM) - Abbildung 3-8 d)

Die Daten liegen durch das Prozessieren in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen vor. Das panchromatische Luftbild hat eine Auflösung in x/y-Richtung von 20 cm, während die Auflösung beim Nahinfrarot- bzw. Farbbild jeweils 40 cm beträgt. Für das gelieferte Digitale Oberflächenmodell mit einer x/y-Auflösung von 50 cm und einer Höhengenaugigkeit von 10 cm, wird die Höhengenaugigkeit mit ca. ± 20 cm angegeben.

In Abbildung 3-8 ist als Beispiel ein Deichabschnitt an der Elbe als panchromatisches Bild, Farbbild, Nahinfrarotbild und als Digitales Oberflächenmodell gezeigt. In den Bildausschnitten ist der Deichverlauf am Deichfuß mit einer gelben Linie markiert. Südlich der Deichlinie grenzt ein befestigter Weg an den Deichrand, parallel dazu verläuft ein Graben mit einer Überfahrt. Am südlichen Bildrand sind mehrere Fahrspuren zu erkennen, ebenso auf der Deichmitte. Am nord-östlichen Bildrand befindet sich ein Gewässer.

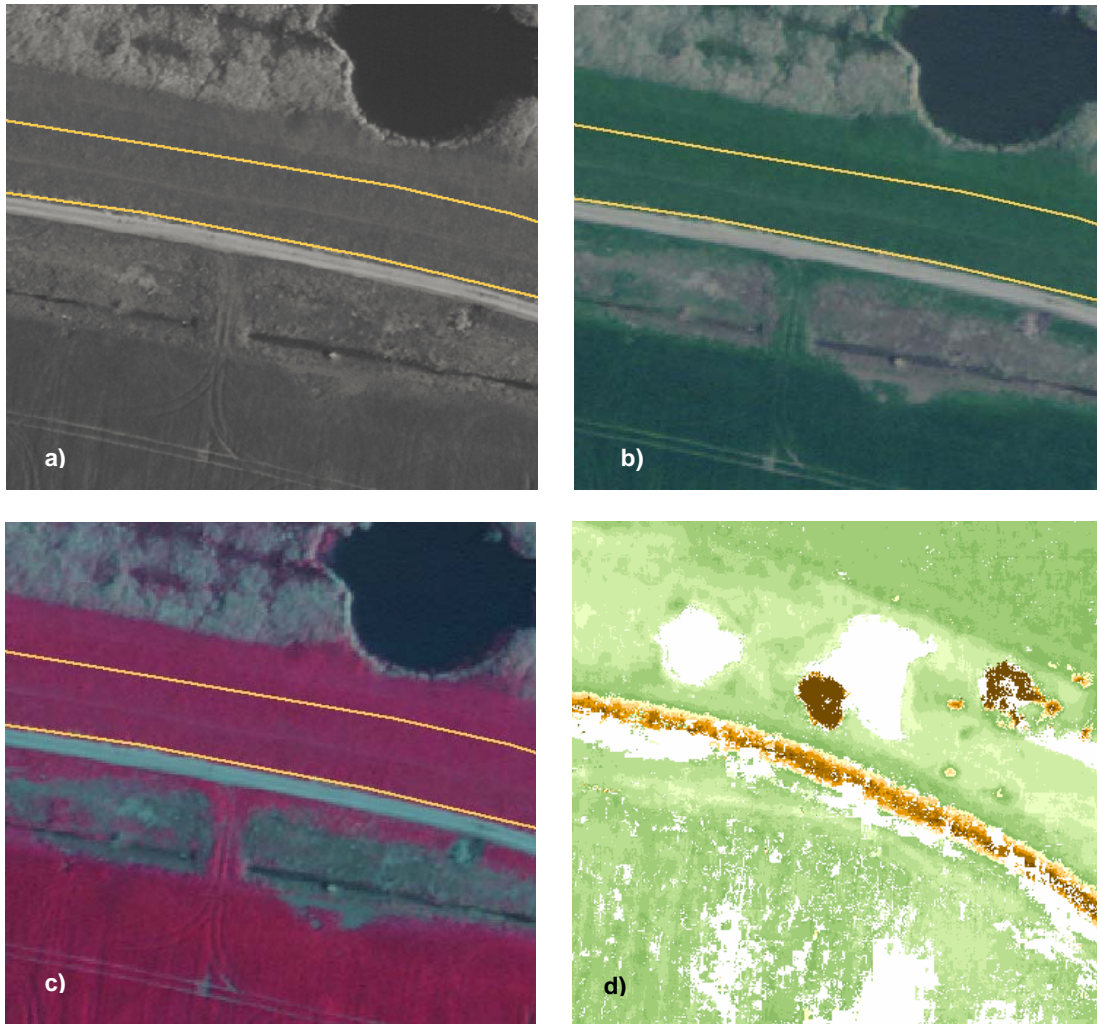


Abbildung 3-8: Deichabschnitt an der Elbe dargestellt in vier verschiedenen Datenprodukten der HRSC-AX Kamera: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild, d) Digitales Oberflächenmodell - Ausschnitt

3.2.2 Infrarot Sensor

Gebietsüberfliegungen mit einer Thermal-Kamera wurden vom Projektpartner ScanDat durchgeführt. Zum Einsatz kam hier eine NIKON „Thermal Vision Infrared Camera“ des Typs LAIRD-3AS,

Abbildung 3-9, links. Die Kamera detektiert die thermische Emission im Wellenlängenbereich von 3 - 5 μm , also im mittleren Thermal-Infrarot-Bereich (TIR). In diesem Wellenlängenbereich treten bei der Messung geringere Störungen durch Wolken, bzw. hohe Wasserdampfkonzentrationen in der Atmosphäre auf, als z. B. bei Thermal-Infrarot Messungen im längeren Wellenlängenbereich von 10 - 12 μm . Im Wellenlängenbereich von 10 - 12 μm lassen sich jedoch Feuchteunterschiede deutlicher erkennen und Bodenfeuchtigkeiten besser ermitteln.

Daher wurde im Projekt neben der NIKON LAIRD-3AS Kamera auch eine analoge Matrixkamera vom Typ IR-18 eingesetzt, Abbildung 3-9, rechts). Die Auflösung dieser Kamera beträgt, wie bei der NIKON, 768x500 Pixel und detektiert die thermische Emission im Spektralbereich von 8 bis 14 μm .

Bei beiden Kameras handelt es sich um passiv messende Nahbereichsensoren, welche die thermischen Emissionen der Erdoberfläche messen. Durch Temperaturunterschiede der Geländeoberfläche ergeben sich in den Datenprodukten warm-kalt bzw. hell-dunkel Kontrastierungen, die je nach gewählter Farbkeileinstellung und Bandbreite unterschiedlich intensiv auftreten. Bei der Messung werden alle thermischen

Emissionen detektiert, so dass die Aufnahmen unabhängig von anderen Strahlungsquellen, wie beispielsweise der Sonne, sind und somit auch Nachtflüge möglich sind.

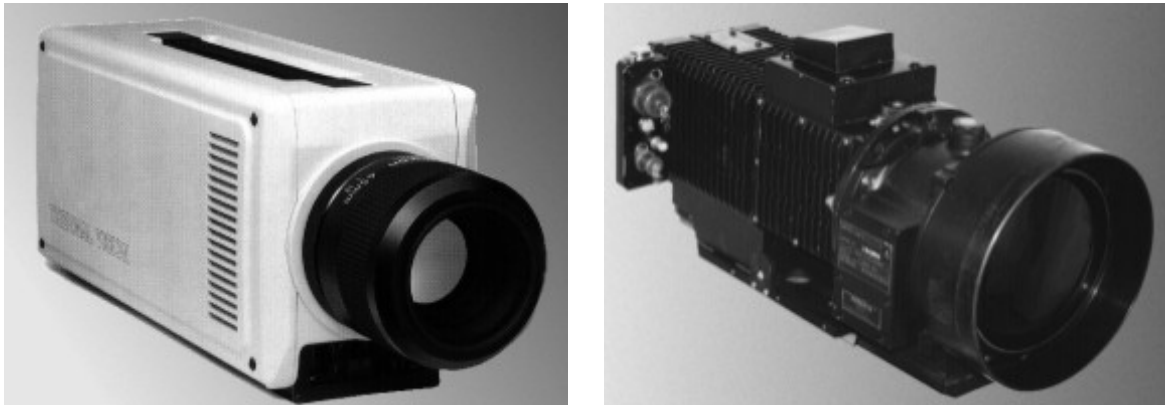


Abbildung 3-9: NIKON LAIRD-3AS (links) und analoge Matrixkamera Typ IR-18 (rechts), [Fotos: ScanDat]

Problematisch sind jedoch Beleuchtungseffekte, welche sich aufgrund von Verfälschungen der Strahlungsaufnahme durch Wolken, Dunst oder Sonnenstand ergeben. Bei längeren Flügen ergeben sich häufig tageszeitlich auftretende Unterschiede, die durch unterschiedliche Erwärmung durch die Sonne auftreten. So ändern sich die Wärmeemissionen von Wasser und Land im Tagesverlauf. Diese kehren sich vom frühen Morgen über die Mittags- bis zur Abendsituation um, Abbildung 3-10.

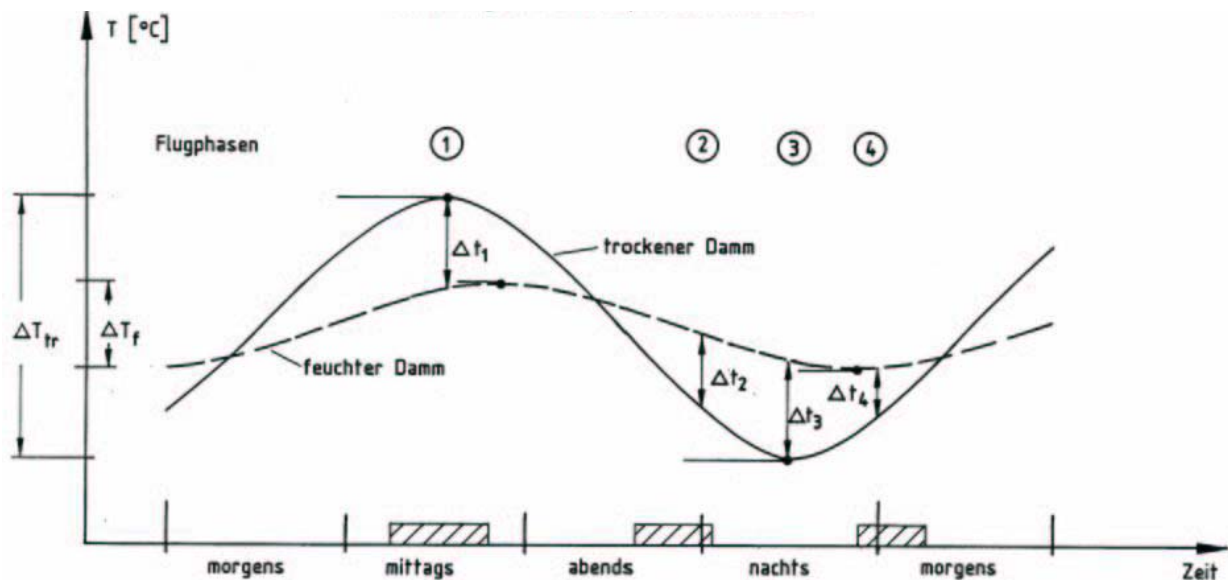


Abbildung 3-10: Wärmestrahlung der Erdoberfläche im Tagesverlauf [Francois, C., 2002]

Abbildung 3-11 zeigt ein Thermalinfrarot-Bild einer Messung mit der NIKON LAIRD-3AS Kamera der ScanDat GmbH, welches einer Fotoaufnahme des Labordeichs des Franzius-Instituts überlagert ist.



Abbildung 3-11: Thermalinfrarot-Bild einer Messung der ScanDat GmbH vom Labordeich des Franzius-Instituts

3.2.3 Mikrowellen Radiometer Sensor (MWR)

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde ein modifiziertes Mikrowellen Radiometer (MWR), wie es als Experimentalaufbau bei der DLR in Oberpfaffenhofen existiert (Abbildung 3-12), am Labordeich getestet.



Abbildung 3-12: Modifiziertes Mikrowellen Radiometer (MWR) als Experimentalaufbau der DLR in Oberpfaffenhofen

Bei dem eingesetzten Mikrowellenradiometer handelt es um einen passiven Sensor, welcher die natürliche thermische Zentimeter- und Millimeterstrahlung aus Richtung des sondierten Gebiets aufnimmt. Eine Detektion dieser Strahlung ist möglich, da jede Materie aufgrund der Interaktionsstrahlung ihrer Atome und Moleküle elektromagnetische Energie emittiert.

Zudem wird, wie bei jeder Strahlung auch in anderen Wellenlängenbereichen, von jeder Materie Energie absorbiert, emittiert und reflektiert, welche ebenfalls vom Mikrowellenradiometer erfasst wird. Im Gegensatz zur Infrarotstrahlung zeigen Mikrowellen neben den Absorptions- und Emissionseigenschaften von

Materie auch die Reflexionseigenschaften der Materie und damit auch die dielektrischen Eigenschaften der Objekte.

Der Vorteil eines Mikrowellensensors liegt darin, dass der Einsatz unter unterschiedlichsten meteorologischen Randbedingungen möglich ist (Allwettertauglichkeit). So können in Abhängigkeit von der Messfrequenz und des Wellenbands Wolken, Nebel und teilweise sogar Regen in der Atmosphäre durchdrungen werden, da Mikrowellen in bestimmten Frequenzbereichen einen hohen Transmissionsgrad gegenüber durchquerten Wasserpartikel und Aerosolen haben (Abbildung 3-13).

Die ausgewählten Empfängerfrequenzen des Laboraufbaus lagen im Bereich von 35 GHz und 90 GHz. Diese liegen in dem für physikalische Messungen reservierten Bereich, so dass keine Störungen durch andere Strahlung zu erwarten sind. Von der Auswahl der Empfängerfrequenz hängen aber auch physikalische Auflösungsvermögen und kontrastreiche Darstellungen ab. So spricht eine geringere MWR-Frequenz für eine höhere räumliche Auflösung, dafür aber für eine kontrastärmere Darstellung, während höhere Frequenzen eine geringere räumliche Auflösung, dafür aber eine kontrastreichere Darstellung zulassen

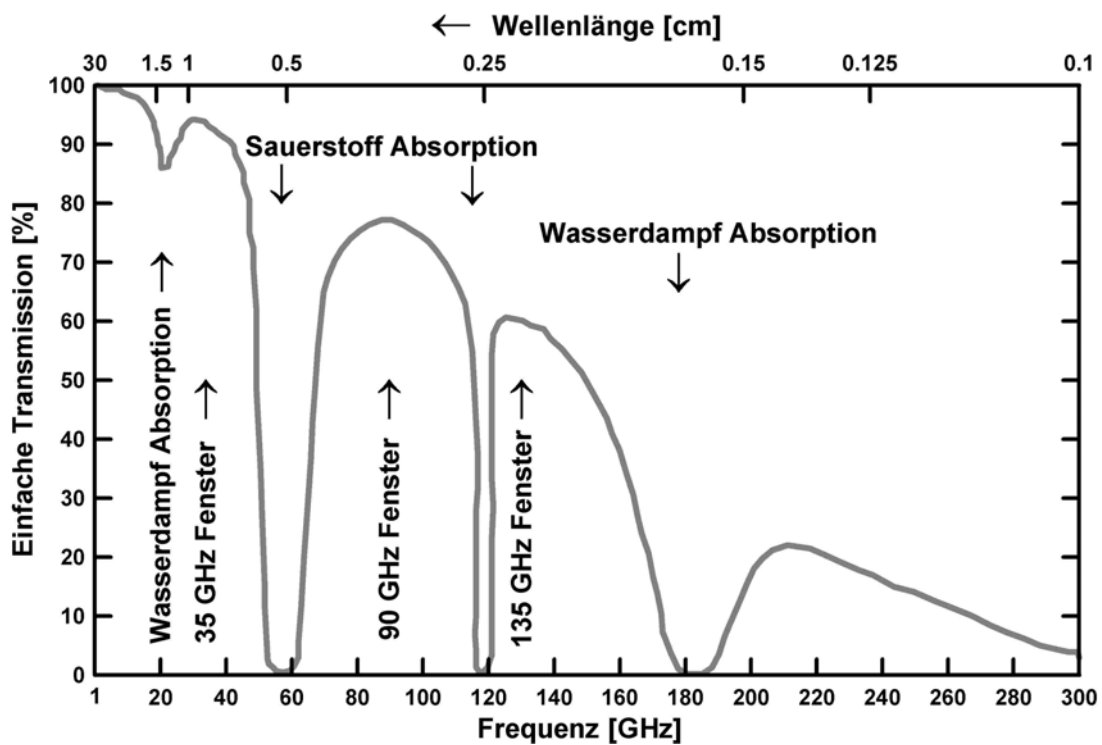


Abbildung 3-13: Anteil der Strahlungstransmission in der Erdatmosphäre in Abhängigkeit des Frequenzbandes [Francois, C., 2002]

Abbildung 3-14 zeigt eine klassifizierte Bild einer Messung mit einem passiven Mikrowellenradiometer der DLR Oberpfaffenhofen vom Labordeich des Franzius-Instituts. Deutlich sind hier im Bereich des Binnendeichfußes Sickerwasserstellen erkennbar.

Der Vorteil einer Detektion von Sickerwasser mit Hilfe eines passiven Mikrowellensensors liegt auch an der guten Erkennbarkeit von Wasser. Da die Dielektrizitätszahl ϵ von Wasser gegenüber Boden aufgrund der inneren Reflexion sehr hoch ist, sind Sickerwasserstellen und Feuchtigkeitsstellen mit Hilfe eines MWR leicht erkennbar und auch berechenbar. Trockene Materialien mit einer niedrigen Dielektrizitätszahl erscheinen hierbei kälter bzw. emissionsärmer, feuchte Materialien mit einer hohen Dielektrizitätszahl erscheinen wärmer bzw. emissionsstärker. Emissivität e der Wasseroberfläche und Reflexionsverhalten r an der Grenzschicht Wasser/Luft verhalten sich hierbei wie folgt:

$$e = 1 - r$$

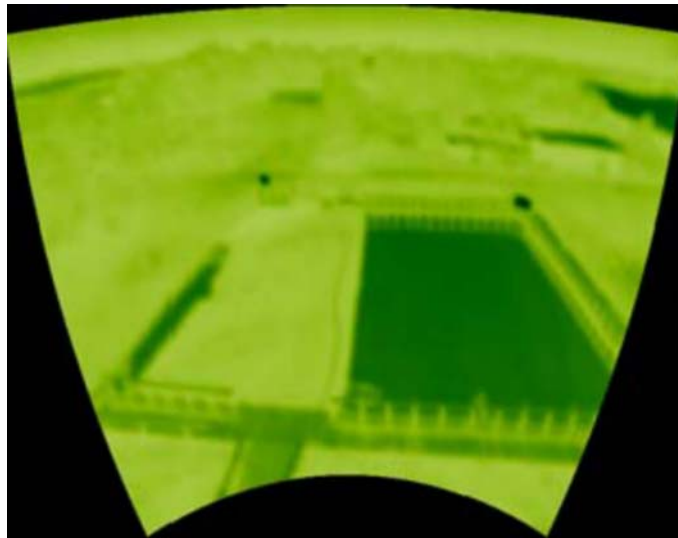


Abbildung 3-14: Klassifiziertes Bild einer Messung mit Mikrowellenradiometer bei 90 GHz der DLR Oberpfaffenhofen am Labordeich des Franzius-Instituts

Das Reflexionsverhalten r lässt sich wiederum mit den Brechungsbedingungen nach Fresnel direkt aus den Dielektrizitätskonstanten ableiten. Die Dielektrizitätskonstante von Luft beträgt 1, während die von Wasser größer ist (Abbildung 3-15). Dieser physikalische Zusammenhang bedeutet, dass je größer die Reflexion an der Grenzschicht Wasser/Luft ist, desto größer ist der Kontrast der Wasseroberfläche und umso geringer deren Emissivität.

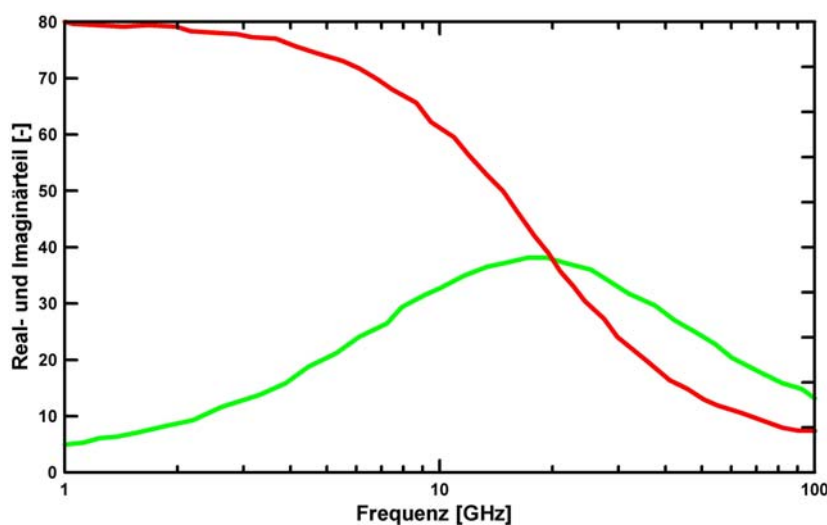


Abbildung 3-15: Spektrum der Dielektrizitätskonstanten von Wasser [Francois, C., 2002] (Rot: Realteil, grün: Imaginärteil)

3.3 Untersuchungsgebiete

Die Auswertung der Fernerkundungsdaten erfolgte mit den Daten aus Überfliegungen von zwei Projektgebieten. Eine Deichlinie wurde an der Elbe bei Lutherstadt Wittenberg befliegen und eine weitere an der Mulde bei Pouch. Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 zeigen die Deichabschnitte an der Elbe und der Mulde, die von der DLR mit der HRSC-AX Kamera und von der ScanDat GmbH mit der Thermal-Kamera befliegen wurden.

3.3.1 Untersuchungsgebiet Elbe

Das Untersuchungsgebiet der Elbe wurde aufgrund seiner Vorschädigung durch das Elbehochwasser im August 2002 gewählt. Es weist daher eine repräsentative Anzahl von Deichschadensmerkmalen auf engem Raum auf. Hinzu kam der Vorteil, dass in dem gewählten Teilgebiet die Möglichkeit bestand, einen Deich vor und nach einer Deichertüchtigung zu befliegen. Die Deiche wiesen in dem ausgewählten Abschnitt folgende Charakteristika auf:

- Im Gebiet befinden sich unterschiedliche Bodenverhältnisse, umfangreiche Uferbefestigungen und ein gut ausgebautes Pegelnetz.
- Das Gebiet weist häufig lang anhaltende Hochwässer auf, die durch die Schneeschmelze und lang anhaltende Niederschläge ausgelöst werden und somit in verschiedenen Jahreszeiten auftreten können.
- Als klimatische Besonderheiten weist das Gebiet milde Winter ohne ausgeprägte Perioden mit Bodenfrösten und warme Sommer mit intensiven Niederschlägen und Starkniederschlägen auf.

Abbildung 3-16 zeigt den beflogenen Deich im Bereich der Elbe südlich von Lutherstadt Wittenberg (blau-gestrichelte Linie).

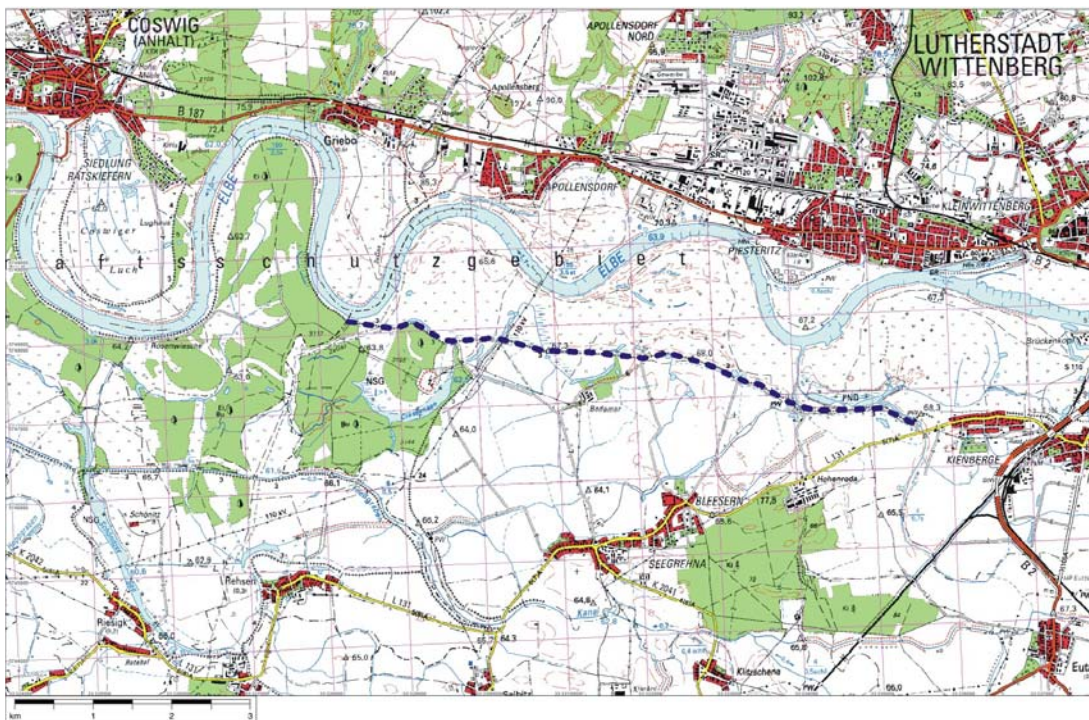


Abbildung 3-16: Projektgebiet Elbe - Deichabschnitt bei Lutherstadt Wittenberg

3.3.2 Untersuchungsgebiet Mulde

Das Untersuchungsgebiet der Mulde wurde ebenfalls aufgrund seiner Vorschädigung durch das Elbehochwasser im August 2002 gewählt. Es wies auch eine repräsentative Anzahl von Deichschadensmerkmalen auf engem Raum auf. Zudem hatte die DLR Adlershof in dem gewählten Teilgebiet eine Vielzahl von Befliegungen vor dem Elbehochwasser durchgeführt, so dass mit diesen Daten auch ein zeitliches Monitoring möglich war. Die Deiche wiesen in dem ausgewählten Teilabschnitt folgende Charakteristika auf:

- Diverse Deichtypen mit und ohne Deckschicht
- Bäume direkt neben oder sogar auf den Deichen
- Frisch aufgefüllte Grund- und Deichbrüche neben alten und neuen Deichabschnitten
- Die Mulde kann im Frühjahr und Sommer Hochwasser aufweisen, ausgelöst durch Schneeschmelze oder starke Sommerregen
- Milde Winter ohne ausgeprägte Perioden mit Bodenfrösten und warme Sommer mit intensiven Niederschlägen und Starkniederschlägen

Abbildung 3-17 zeigt den beflogenen Deich im Bereich der Mulde nördlich von Löbnitz und dem Goitzsche Tagebau (die blaugestrichelte Linie).

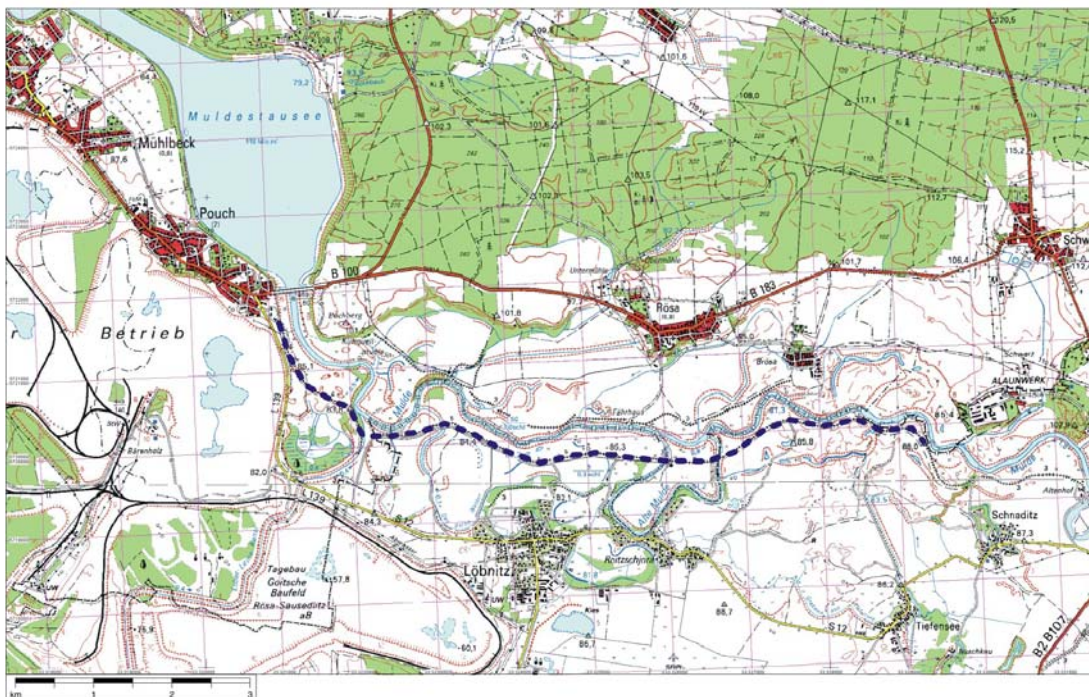


Abbildung 3-17: Projektgebiet Mulde - Deichabschnitt bei Löbnitz

3.4 Aufbau und Auswertung im Geographischen Informationssystem (GIS)

3.4.1 Aufbau eines GIS

Die Auswertung der Fernerkundungsdaten der HRSC-AX Kamera und der Thermalinfrarot-Kamera erfolgte in dem Geographischen Informationssystem (GIS) ArcView der Firma ESRI. In einem GIS ist es möglich, die Funktionalität benutzerspezifisch anzupassen, d. h. anwendungsbezogene Tools zu entwickeln und hinzuzufügen.

Im Rahmen des Projektes wurde daher das GIS „DeSiMo“ (Deichsicherheitsmonitoring) entwickelt und für die Analyse der Fernerkundungsdaten herangezogen. Der Schwerpunkt des GIS lag dabei in der Erfassung der momentanen Deichzustände und dem Katalogisieren von Anomalien anhand der Fernerkundungsdaten.

Zur besseren Orientierung in den Fernerkundungsdatensätzen wurde „DeSiMo“ mit der Funktionalität aufgebaut, sich in mehreren Datensätzen gleichzeitig zu bewegen, so dass die Möglichkeit besteht, mehrere Informationen visuell nebeneinander darzustellen (Abbildung 3-18).

Dies ermöglicht es dem Operator schnell zu prüfen, in welchem der Datensätzen eine Anomalie zu erkennen ist. Das Einladen der Fernerkundungsdaten erfolgt dabei über ein Dialogfenster, in dem der Benutzer auswählen kann, welche Datensätze parallel angezeigt werden sollen.

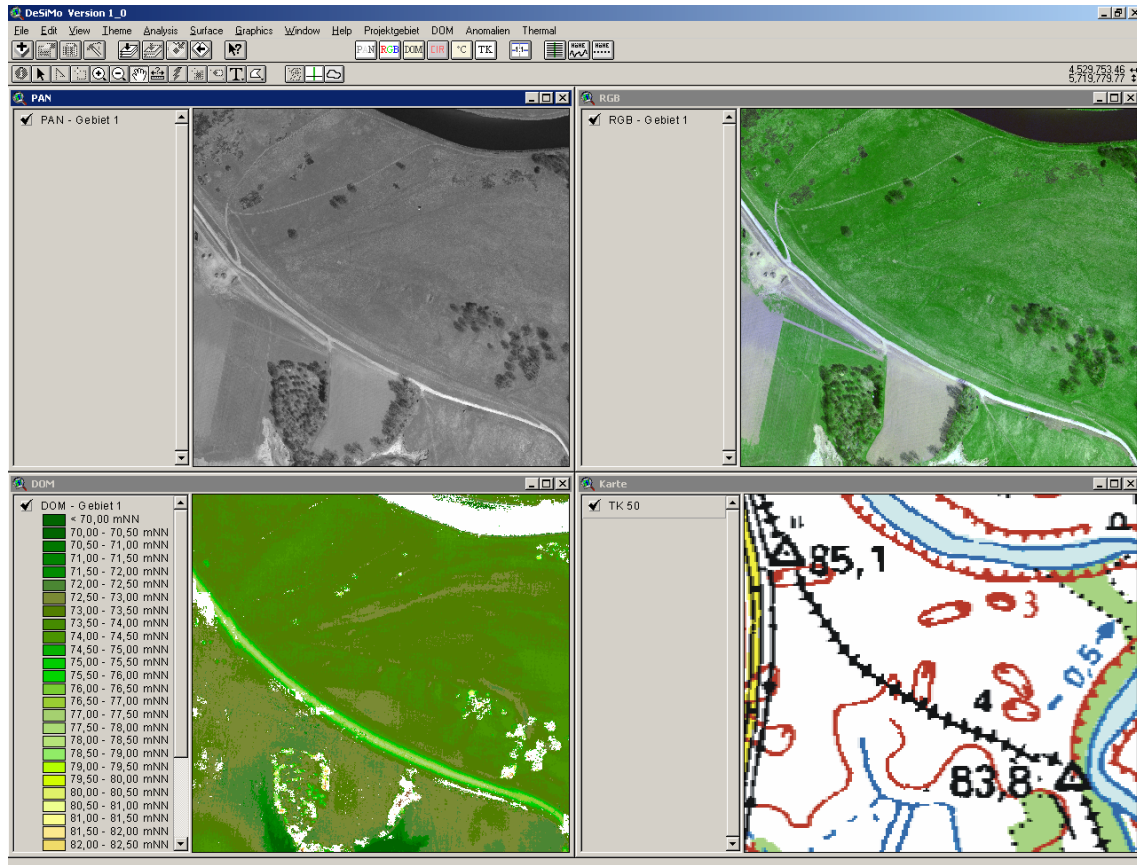


Abbildung 3-18: Synchroner Darstellung verschiedener Fernerkundungsdaten im GIS – panchromatisches Bild oben links, Farbbild oben rechts, Digitales Oberflächenmodell unten links und Orientierungskarte unten rechts (Screenshot)

3.4.2 Eingabe von Anomalien

Sämtliche in den Fernerkundungsdaten erfassten Anomalien wurden in eine Datenbank eingebunden und beschrieben. Als Anomalien werden Unregelmäßigkeiten am Deich, zu denen Objekte (z.B. Überwege, Bäume, Bauwerke) als auch auffällige Strukturen der Geländeoberfläche (z.B. vegetationslose Flächen, Senken) gehören, benannt. Hierbei wurde für jede Anomalie folgendes festgehalten:

- Erkennbarkeit in den Fernerkundungsdaten eingestuft nach 0 = keine, 1 = gering, 2 = mittel und 3 = hoch
- Lage der Anomalie als Rechts- und Hochwert
- Fotonummer (falls Foto vorhanden)
- Einordnung in eine Kategorie
- Einordnung in eine Objektgruppe
- Zusätzlicher Informationstext

Um ein einheitliches Erfassen und Zuordnen der Anomalien zu gewährleisten, erfolgte die Eingabe der Informationen über eine Eingabemaske, in der die Eintragungsmöglichkeiten vorgegeben sind, Abbildung 3-19. Über die Maske wurden sowohl die Erkennbarkeiten in den Fernerkundungsdaten festgelegt als auch die Zuordnung einer Anomalie in einer Kategorie und Objektgruppe. Zur Einordnung einer Anomalie stehen dem Operator die Kategorien „Natur“, „Oberfläche“, „Infrastruktur“ und „unbekannt“ zur Verfügung.

Diesen Kategorien sind verschiedene Objektgruppen zugeordnet. In der Kategorie „Natur“ werden Anomalien zusammengefasst, die sich z.B. als Baum, Gebüsch, unterschiedliche Vegetationseinheit oder Wasserfläche einordnen lassen. Zur Kategorie „Oberfläche“ gehören die Objektgruppen, die eine veränderte Oberflächenstruktur aufweisen, z.B. durch Fahrspuren, Trampelpfad oder andere Flächen mit einer gestörten Grasnarbe. In diese Kategorie fallen auch erkennbare Höhendifferenzen auf oder in der Nähe des Deiches (z.B. wellige Oberfläche). Zur Kategorie „Infrastruktur“ gehören bauliche Objekte wie Auffahrten, Bauwerke und Objekte wie Schranken und Zäune. Anomalien, die nicht eindeutig erkannt werden können, werden der Kategorie „unbekannt“ zugeordnet.

Die Lagekoordinaten einer erfassten Anomalie werden automatisch ermittelt und in die Datenbank mit aufgenommen. Zusätzliche Informationen, wie Fotodokumentation einer Anomalie und beschreibende Zusatzinformationen können nachträglich manuell eingegeben werden. Zur Abgrenzung des Bereichs, in dem Anomalien aufgenommen werden, wurde eine Zone von 30 m zur Deichkronenmitte entlang der Deichkrone herangezogen. Dieser Bereich um den Deich wurde gewählt, um auch hohe Bäume und größere Senken, die Auswirkungen auf den Deichzustand haben können, mit zu erfassen. Für die beiden Projektgebiete "Mulde" und "Elbe" wurden anhand der HRSC-AX Daten solche Anomalien erfasst und beschrieben. In einem zweiten Schritt wurden die am Bildschirm erfassten Anomalien im Gelände durch eine Begehung der Projektgebiete verifiziert (siehe Kapitel 4).



Abbildung 3-19: Erfassen von Anomalien im Umfeld der Deichlinie im GIS „DeSiMo“ mit Hilfe einer Eingabemaske (Hintergrund: panchromatisches Bild)

Zur Datenbereitstellung sind neben den Fernerkundungsdaten als Basisdaten auch die aus diesen Daten abgeleiteten Informationen ins GIS eingebunden. Zu den abgeleiteten Informationen gehören die Anomalien-Datenbank und Informationen zur Lage der Deichkrone bzw. des Deichfußes, Höheninformationen zur Deichlinie mit Deichquerprofilen und eine verortete Fotodokumentation, in der neben den Anomalien auch der Zustand des Deiches festgehalten ist.

Eine benutzerfreundliche Bereitstellung sämtlicher Informationen erfolgt über Dialogfenster, in denen die darzustellenden Themen ausgewählt werden können, Abbildung 3-20.

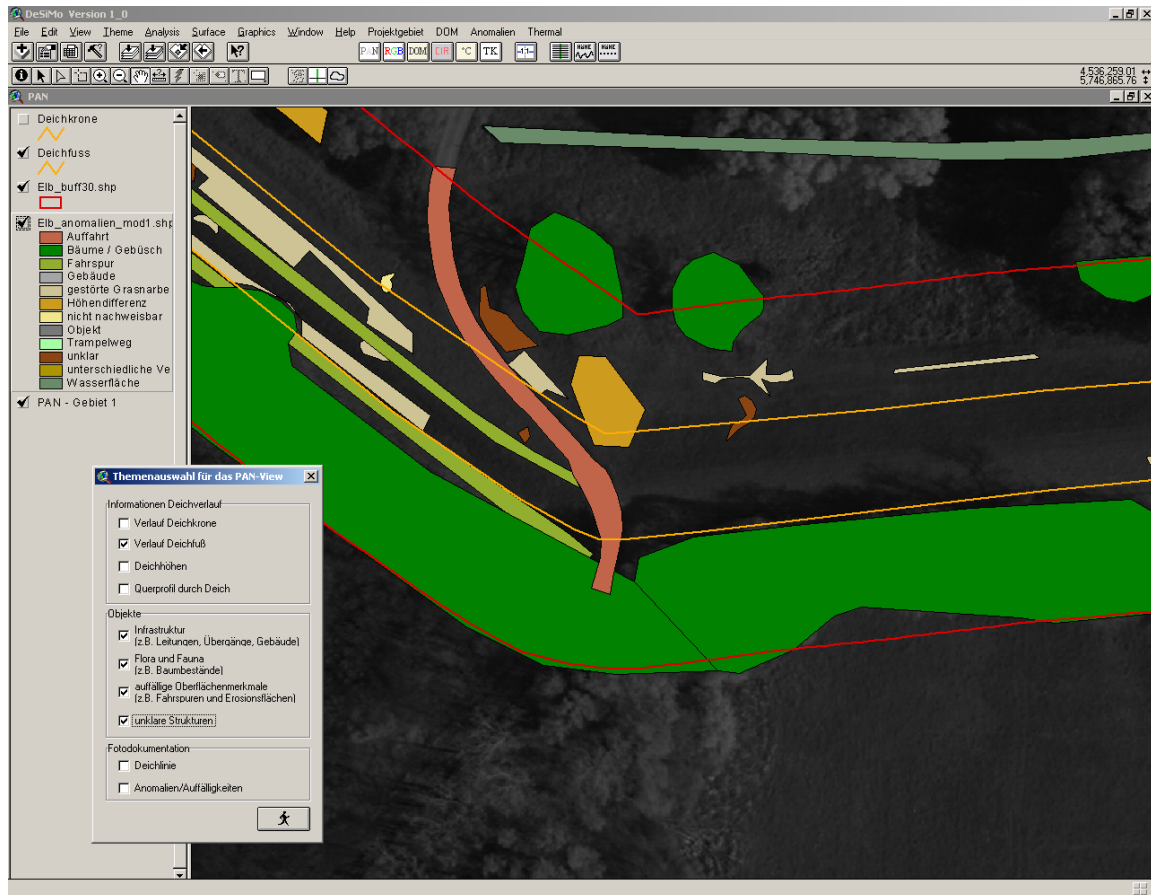


Abbildung 3-20: Einladen und Darstellen der Themen über ein Dialogfenster in "DeSiMo"

3.4.3 Ermitteln von Deichhöhen und Deichprofilen aus dem Digitalen Oberflächenmodell

Das Digitale Oberflächenmodell (DOM) entsteht durch die photometrische Verarbeitung der fünf panchromatischen Graustufenkanäle der HRSC-AX Kamera. Nach der Prozessierung enthält das DOM die lokalen Geländeoberflächenhöhen in Dezimetern mit einer Höhenstufung von 1 dm. Ein Geländeoberflächenmodell enthält nicht – wie ein Geländemodell – die genaue Geländehöhe, sondern die Oberflächenhöhe, d.h. die Höhe von Objekten (Bäume, Büsche, Gebäude,...) ist in der Höhenangabe mit enthalten.

In Bereichen von Deichen entspricht die Oberflächenhöhe annähernd der Geländeoberfläche, solange die Datenerfassung durch eine Befliegung außerhalb der Wachstumsperiode durchgeführt wird und der Rasen auf dem Deich kurz gehalten ist. Zur Einbindung des DOM in das GIS wurden die Daten in einem in ArcView lesbaren Grid-Format von der DLR geliefert.

Abbildung 3-21 zeigt einen Ausschnitt aus dem DOM für das Projektgebiet an der Mulde. Deutlich sind Deichlinien nördlich und südlich des Muldeverlaufs zu erkennen (mit zunehmender Geländehöhe ist die Farbgebung dunkler).

Bei der Prozessierung des DOM kommt es in einigen Bereichen zu Fehlinterpretationen, die sich im Datensatz als Flächen ohne Höhenwert widerspiegeln (weiß dargestellt). Besonders Wasserflächen, aber auch Bereiche im Schatten von großen Bäumen und parallel verlaufende Ackerfurchen, können im ungünstigen Fall zu Fehlinterpretationen führen. Diese Fehlwerte schränken die Auswertbarkeit des DOM in einigen Bereichen ein. Die Deichlinie selber ist meist gut erfasst, jedoch fehlen bei Deichabschnitten mit Bäumen in der Nähe des Deichfußes häufig Werte.

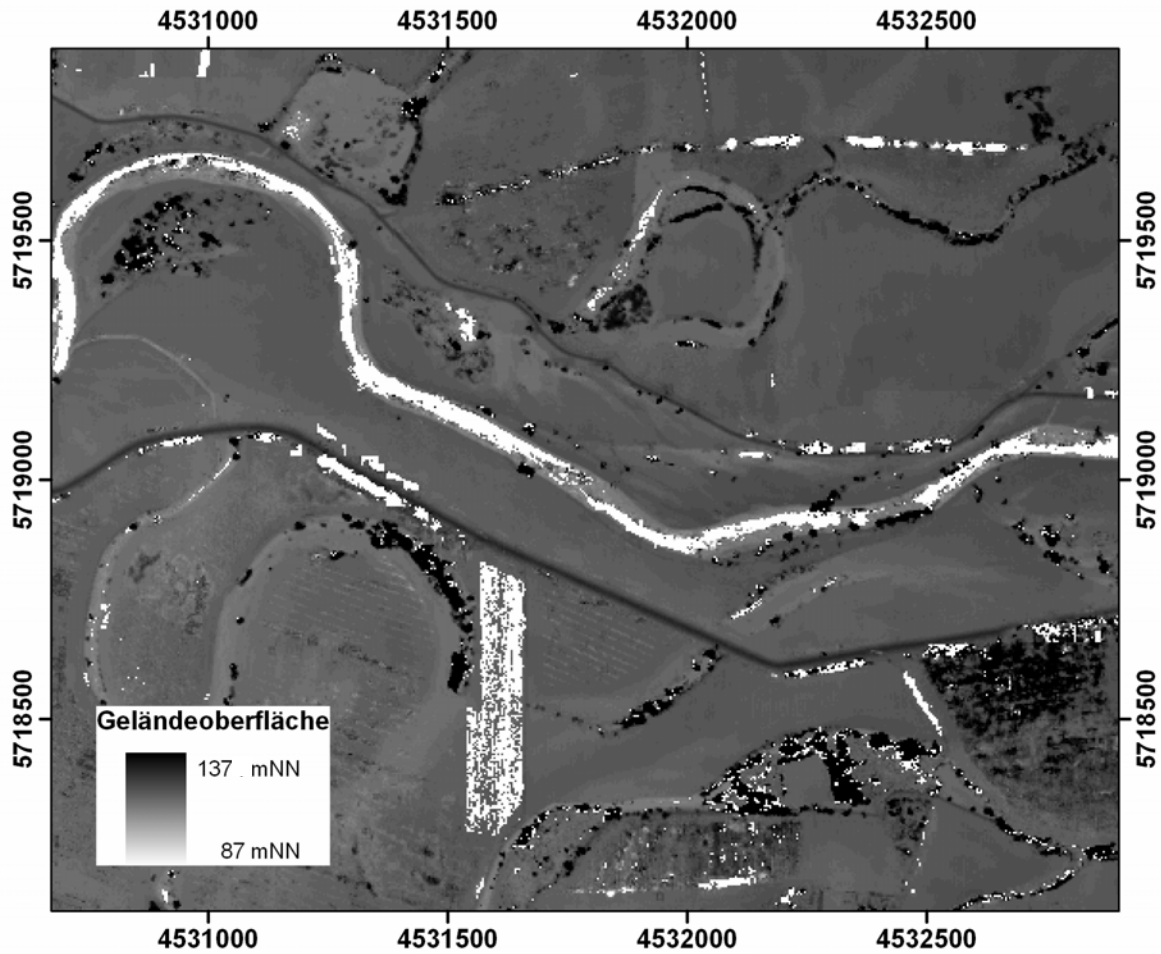


Abbildung 3-21: Ausschnitt aus dem Digitalen Oberflächenmodell für das Projektgebiet an der Mulde

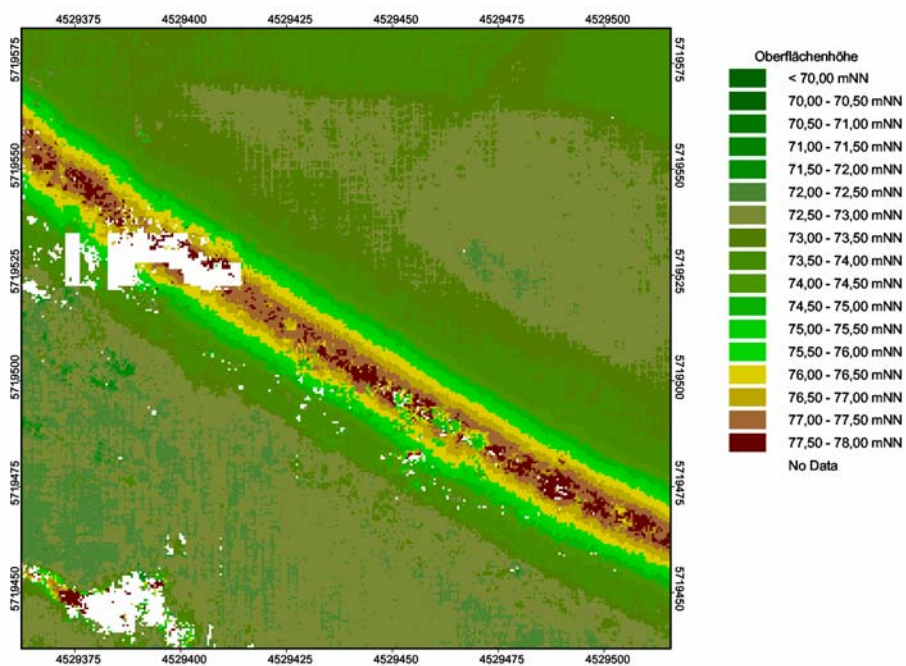


Abbildung 3-22: Fehlinterpretationen im Digitalen Oberflächenmodell

Teilweise kommt es auch zur fehlerhaften Prozessierung an Deichabschnitten ohne störende Faktoren. Abbildung 3-22 zeigt einen Detailausschnitt aus dem DOM der Muldedeichbefliegung. Hier verläuft die Deichlinie ohne Bäume oder Büsche in der Nähe des Deiches durch ein Niederungsgebiet mit großflächig fehlenden Höhenwerten für den Deichkörper. Neben diesen fehlenden Werten kann es bei der Prozessierung der Daten auch zu fehlerhaften Höhenwerten kommen.

Im rechten Bereich des Bildes finden sich auf der Deichkrone mit einer Höhe um 77,5 mNN drei Stellen mit einer Ausdehnung von 3 bis 5 m Durchmesser, in denen die Höhe um mehr als 2 m abfällt. Solche Fehlstellen wären durch Zweitauswertungen, lokale Begehungen und Neubefliegungen zu ergänzen

Aus dem DOM lassen sich für die Fragestellung des Projekts Informationen über die Deichhöhe und Deichprofile gewinnen. Zudem lassen sich Senkenbereiche erfassen, die bis an den Deichfuß heranreichen und bei denen im Falle eines Hochwassers mit einer längeren Standzeit des Wassers zu rechnen ist.

Zur Auswertung des DOM wurden Tools entwickelt, die ein automatisiertes Auslesen von Informationen ermöglichen, z. B. lassen sich Deichhöhen entlang der Deichlinie in vorgegebenen Abständen ausgeben.

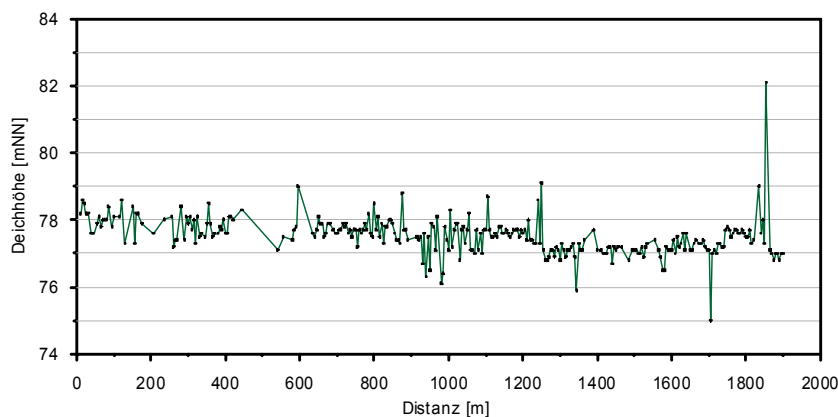


Abbildung 3-23: Entlang der Deichkrone in einem Abstand von 5 m ausgelesene Höhenwerte aus dem Digitalen Oberflächenmodell für einen Deichabschnitt an der Mulde

Abbildung 3-23 zeigt die ausgelesenen Höhenwerte für einen Deichabschnitt entlang der Mulde, die in einem Abstand von 5 m ausgelesen wurden. Bei dieser Methodik werden einzelne Pixelwerte entlang einer auf der Deichmitte verlaufenden Linie ausgelesen. Es ist zu erkennen, dass es Ausreißer gibt, die die Höhe des Deiches nicht widerspiegeln

Da es auf diesem Deichabschnitt auf der Deichkrone Vertiefungen durch Fahrspuren gibt, kann es beim Auslesen entlang der Deichmitte passieren, dass der Höhenwert direkt in einer solchen Fahrspurvertiefung ausgelesen wird, während der Nachbarpunkt außerhalb dieser Spur ausgelesen wird. Dadurch können sich Höhenänderungen zwischen benachbarten Auslesepunkten ergeben.

Um bessere Aussagen über die Genauigkeit eines Auslesepunktes machen zu können, können in einer zweiten Ausleseroutine entlang der Deichkronenmitte Querprofile automatisiert ausgelesen werden, Abbildung 3-24. Dies hat den Vorteil, dass die ausgelesenen Punkte eines Profils im Kontext zueinander stehen und Ausreißer innerhalb des Profils leichter bestimmt werden können.

Starke Ausreißer sind in der Regel auf fehlerhafte Pixelwerte zurückzuführen. Der in dem Graph erkennbare Schwankungsbereich bei 1000 m spiegelt die in Abbildung 3-22 beschriebenen größeren Bereiche mit DOM-Fehlwerten wieder.

Die Bilderfolge in Abbildung 3-25 zeigt drei Deichprofile aus einer längeren Profilsérie, die mit einem Abstand von 5 m ausgelesen wurde. Die dargestellten Profile haben einen Abstand von 20 m zueinander.

Das linke Diagramm zeigt die Originalwerte aus dem DOM. Im rechten Diagramm ist das Deichprofil dargestellt nachdem eine Filtermaske die Werte geglättet hat. Diese Filtermaske bezieht die benachbarten

Profile mit ein und führt eine Mittelung durch. Für die Glättung werden die benachbarten Profile herangezogen, da davon auszugehen ist, dass ein ungestörter Deichabschnitt innerhalb weniger Meter keine starken Höhenänderungen aufweist. Der Abschnitt des Deiches, auf dem die Querprofile gewonnen wurden, weist auf der Deichkrone vertiefte Fahrspuren auf. In allen Profilen lassen sich die Auswirkungen des Befahrens des Deichs erkennen.

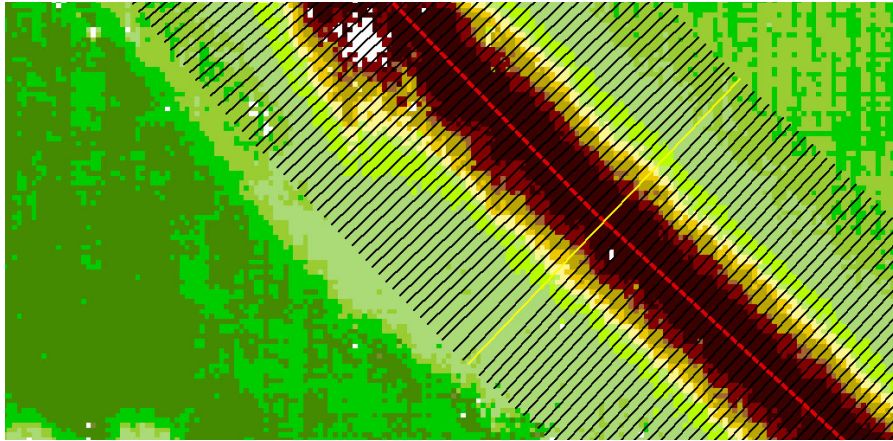


Abbildung 3-24: Automatisierte Querprofilerstellung aus dem Digitalen Oberflächenmodell

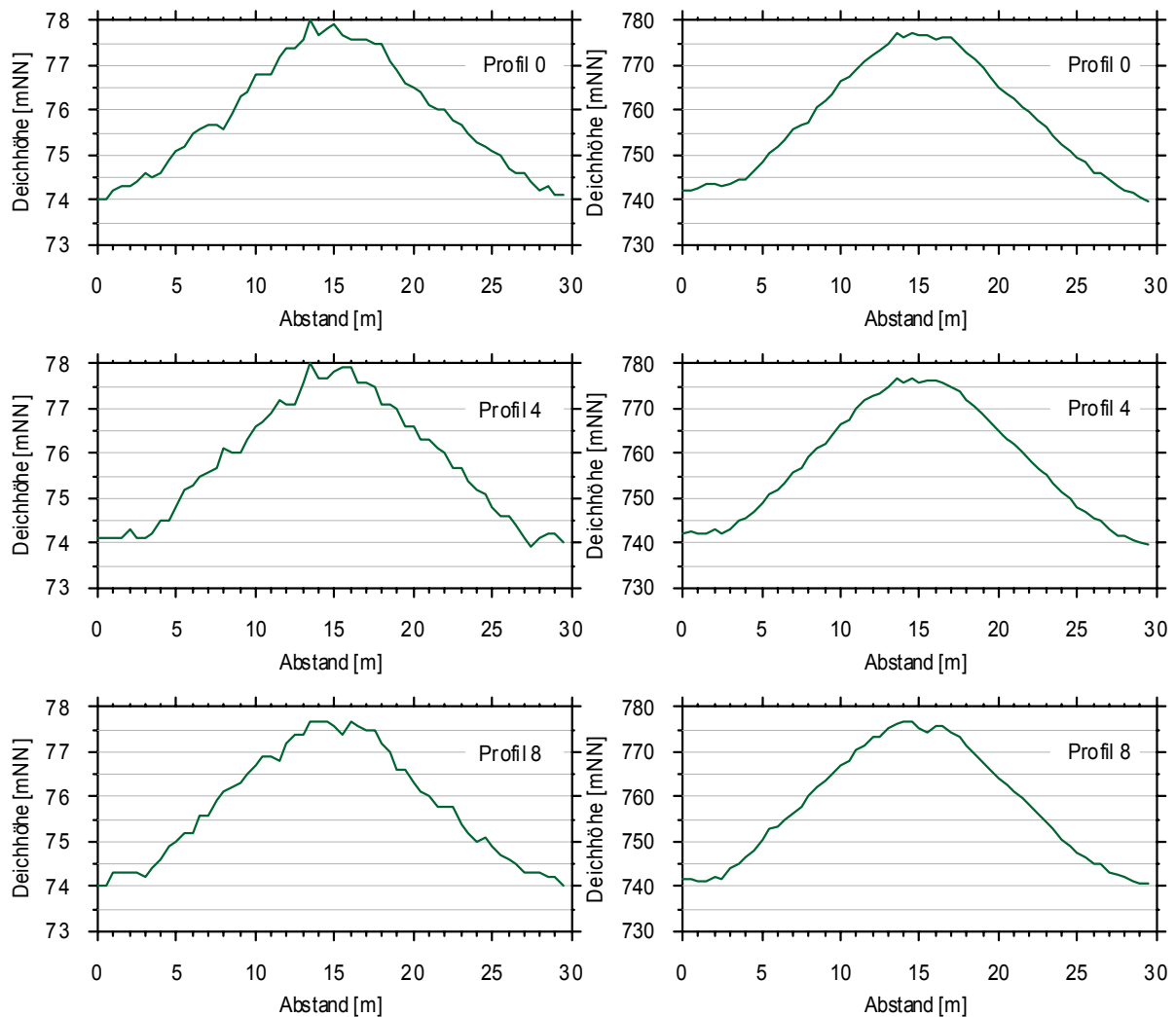


Abbildung 3-25: Aus dem DOM ausgelesen Deichprofile auf einer Strecke von 50 m (links: Originalwert aus dem DOM, rechts: nach Anwendung eines Glättungsfilters)

Weitere Tools sind das Auslesen von Höhen entlang von manuell gelegten Profillinien sowie an Punktkoordinaten. Weitere Informationen, die aus dem DOM abgeleitet werden können, sind Senkenbereiche, die an den Deichfuß angrenzen.

Weiterhin können flächenhafte Höhendaten zur Verschneidung und Differenzenbildung herangezogen und weiterverarbeitet werden. Für eine Differenzendarstellung sind jedoch Mehrfachbefliegungen von Gebieten, also ein Monitoring eines Gebiets notwendig.

3.5 Schlussfolgerungen

Eine schnelle und einheitliche Analyse von mehreren Fernerkundungsdaten hinsichtlich ihres Informationsgehaltes über Schwachstellen an Deichen muss mit Hilfe eines leistungsfähigen Geographischen Informationssystems (GIS) erfolgen, das an die Anforderungen der Analyse anzupassen ist. Dies ist im Rahmen dieses Projektes mit „DeSiMo“ – einer auf Basis von ArcView angepassten Oberfläche – realisiert worden. Die Möglichkeit, mehrere Fernerkundungsdatensätze parallel zu betrachten, erleichtert die Überprüfung, in welchen Datensätzen bestimmte Auffälligkeiten zu erkennen sind.

Zur Vereinheitlichung der aufgenommenen Informationen einzelner Anomalien ist es sinnvoll, im Vorfeld festzulegen, welche Informationen aufgenommen werden müssen und wie sie hinterlegt werden. Bei Analysen durch mehrere Bearbeiter ist es hilfreich, die Erfassung der Anomalien über eine Eingabemaske mit vordefinierten Eintragungsmöglichkeiten vorzugeben und damit zu vereinheitlichen. Ein der Fragestellung angepasstes GIS bietet zudem die Möglichkeit, die vielen unterschiedlichen Daten – zum Einen die Fernerkundungsdaten direkt als Basisdaten und zum Anderen die aus den Fernerkundungsdaten abgeleiteten und gewonnenen Informationen – übersichtlich zu verwalten und einzuladen ohne tiefere Programmkenntnisse oder Kenntnisse in der Datenablagestruktur zu haben. Neben der reinen Darstellung von Daten bietet ein GIS zudem die Möglichkeit, Analysetools zu integrieren, um weiterreichende Untersuchungen der Daten zu ermöglichen.

4 Naturuntersuchungen

Zur Verifizierung der aus den Befliegungen am Bildschirm erfassten Anomalien sowie der aus dem DOM ermittelten Deichprofile wurden mehrere Naturuntersuchungen in den Projektgebieten Elbe und Mulde vorgenommen. Insgesamt fanden drei Begehungen der Elbe- und Muldedeichs statt: Anfang Dezember 2004, Ende März 2005 und Ende April 2005. Bei diesen Naturuntersuchungen wurde versucht, die am Bildschirm erfassten Anomalien aufzufinden und zu überprüfen. Die Begehung am 22. März 2005 wurde in beiden Gebieten durch ein Hochwasserereignis beeinträchtigt. Das Hochwasser stand an den untersuchten Deichabschnitten bis nahe an der Deichkrone, so dass der gesamte Bereich der Außenböschung sowie das Deichvorland nicht untersucht werden konnten.

4.1 Verifizierung der Anomalien

Um Anomalien im Gelände zu finden, wurde ein GPS-Gerät herangezogen, mit dem die bei der Digitalisierung festgehaltenen Koordinaten aufgesucht werden konnten. Diese Vorgehensweise erwies sich als sehr hilfreich, da zwar große Objekte wie Bäume und Auffahrten im Gelände schnell zu finden sind, kleinere Objekte in Deichabschnitten ohne auffällige Merkmale zur Orientierung jedoch wesentlich schwerer.

Die Begehungen der Deichlinie ergaben, dass Anomalien, die am Bildschirm schon gut zu erkennen waren, richtig erfasst wurden. Es gab nur wenige Anomalien, in denen eine konkrete Benennung erst durch die Begehung erfolgen konnte. Zu nennen sind hier Betonplatten auf dem Deich als Sperre zum Befahren des Deiches.

Die Erkennbarkeit von unterschiedlichen Anomalien ist von verschiedenen Faktoren abhängig, vor allem von der Ausdehnung, durch die sich die Anzahl der Pixel in den Fernerkundungsdaten ergibt.

Abbildung 4-1 zeigt exemplarisch verschiedene Anomalien an einem Deichabschnitt an der Elbe (die gelbe Linie markiert den Deichfuß). Obwohl Anomalie 1 und 2 sowohl im panchromatischen Bild als auch im Farb- und Nahinfrarotbild sehr gut zu erkennen sind und als „gestörte Grasnarbe“ klassifiziert wurden, konnte diese Klassifizierung im Gelände nur für Anomalie 1 (Abbildung 4-4) bestätigt werden. Es handelt sich um eine Kahlstelle, die durch Wildtiere verursacht wurde. Anomalie 2 konnte im Gelände trotz ihrer Größe nicht nachgewiesen werden. Hierbei ist anzunehmen, dass die Kahlstelle im Zeitraum zwischen der Befliegung und der Begehung des Gebietes wieder zugewachsen ist. Anomalie 2 verdeutlicht, wie wichtig eine zeitnahe Durchführung von Befliegung, Auswertung und Begehung im Gelände ist.

Kleinere punktuelle Strukturen (Durchmesser ≤ 1 m) - wie z.B. Anomalie 3 - sind in den Fernerkundungsdaten gut zu erkennen, lassen sich jedoch in der Natur kaum nachweisen. Es bleibt unklar, ob es sich bei diesen punktuellen Auffälligkeiten um unterschiedliche Vegetation oder um eine gestörte Grasnarbe handelt. Letztere könnte inzwischen zugewachsen sein, so dass sie bei der Begehung nicht mehr aufzufinden waren.

Bei Anomalie 4 handelt es sich um einen Hochstand mit Schattenwurf, am Bildschirm zwar gut erkennbar, aber schwer klassifizierbar. Im Gelände sind solche Anomalien gut zu finden und schnell zu benennen. Bei den Anomalien 5a-c handelt es sich um längliche Senken, die sich unterschiedlich gut in den Bilddaten erkennen lassen und alle im Digitalen Oberflächenmodell zu finden sind. Hier wird die Erkennbarkeit um so besser, je tiefer die Senke ist und je größer die Ausdehnung, Die Senke 5b lässt sich im DOM gut erkennen, während 5c kaum zu erkennen ist. Anomalie 6, Abbildung 4-4, rechts, eine unzureichend befestigte Fahrspur über den Deich weist teilweise Vertiefungen auf, die im DOM zu erkennen sind.



Abbildung 4-1: Beispiele für in den Fernerkundungsdaten erkannte Anomalien, Hintergrundbild: Farbbild der HRSC-AX Kamera

Die Auswertung der Fernerkundungsdaten in Hinblick auf Anomalien am oder auf dem Deich wird durch Beleuchtungseffekte in den Bilddaten beeinflusst. Für die Erfassung von Erhöhungen bzw. Vertiefungen im Gelände oder höheren Objekten spielt der Schattenwurf eine wichtige Rolle. Durch die Abhängigkeit des Schattenwurfs vom Sonnenstand ist jedoch keine genaue Aussage über eine Höhen- bzw. Tiefenangabe zu machen. Es ist in den Bildern lediglich zu erkennen, dass es sich bei einer Anomalie um eine Erhöhung bzw. Vertiefung handelt.

Es kann sich ein Beleuchtungseffekt in den Bildern auch negativ für die Bildanalyse auswirken, da Oberflächen, die einem erhöhten Strahlungsfluss ausgesetzt sind, auch eine erhöhte Reflexion zeigen. Dies kann zur Folge haben, dass es bei der Bildanalyse zu Fehlinterpretationen kommt. Besonders am Deich sind die Auswirkungen des Beleuchtungseffekts je nach Richtungsverlauf der Deichlinie zum Sonnenstand deutlich zu erkennen.



Abbildung 4-2: Beleuchtungseffekt an der Deichböschung im Nahinfrarotbild

Im Nahinfrarotbild der Abbildung 4-2 verläuft die Deichlinie quer zur Sonne, so dass die südliche Deichseite stark beschienen wird, während die nördliche im Schatten liegt. Die Auswirkungen der erhöhten Einstrahlung sind deutlich zu erkennen. Obwohl auf dem Deich eine homogene Rasenfläche vorhanden ist, ist die Reflexion im Nahinfrarotbereich auf der beschienenen Südseite höher als auf der Nordseite.

In dem in Abbildung 4-3 a-c gezeigten Ausschnitt sind im panchromatischen Bild deutlich helle Bereiche zu erkennen, die auf eine offene Grasnarbe hindeuten. Im Farbbild ist jedoch innerhalb der Markierung kein offener Boden zu erkennen. Nur unterhalb der Markierung finden sich Merkmale einer fehlenden geschlossenen Grasdecke. Der markierte Bereich weist im Farbbild eine grüne Vegetationsdecke aus. Im Nahinfrarotbild wiederum findet sich im markierten Bereich eine intensivere Rotfärbung, was auf eine unterschiedliche Vegetationseinheit bzw. eine vitalere Vegetation hindeutet, nicht aber auf eine fehlende Vegetation.

Begehungen vor Ort konnten weder das Eine noch das Andere bestätigen. Es wurde eine fast homogene Grasfläche vorgefunden, die – wie im Farbbild erkennbar – einige offene Bereiche hat. Da das Gelände hier leicht wellig ist, können die starken Auffälligkeiten im panchromatischen und Nahinfrarotbild eventuell auf einen Beleuchtungseffekt zurückzuführen sein.

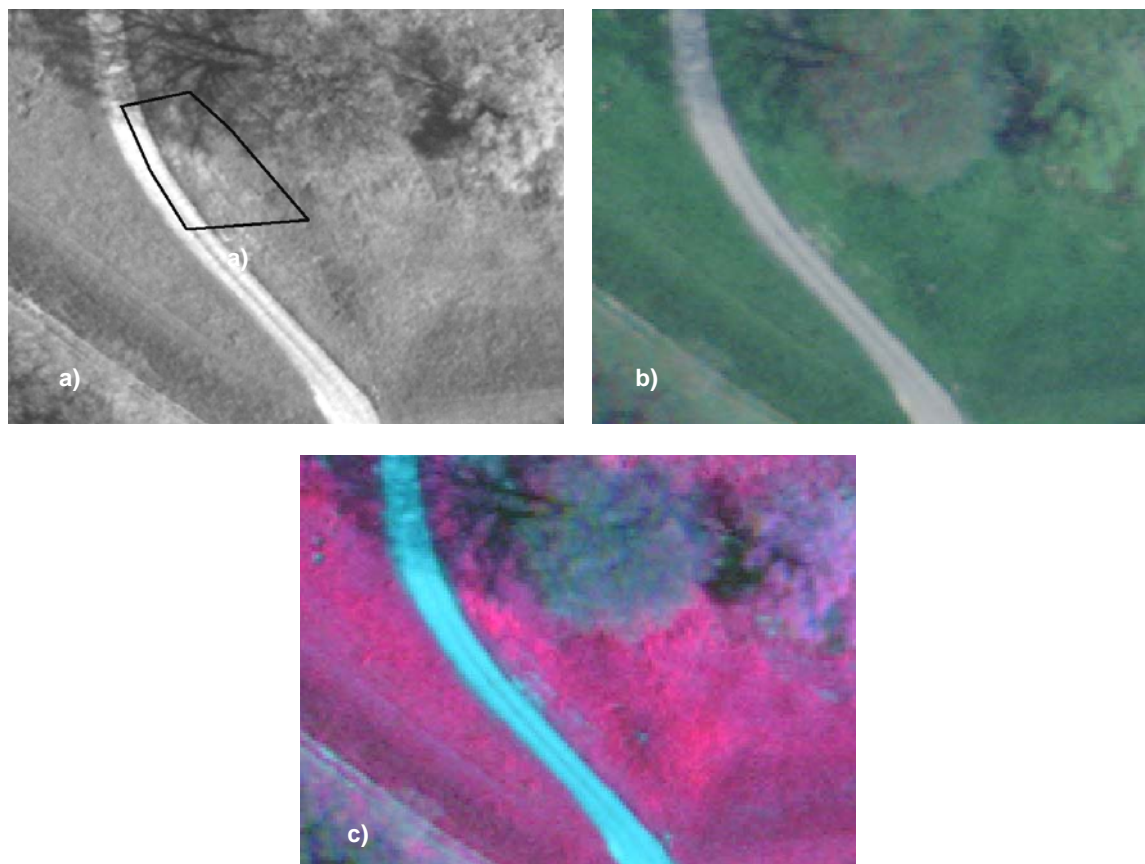


Abbildung 4-3: Beleuchtungseffekt in den Bilddaten der HRSC-AX Kamera, a) panchromatisches Bild, b) Farbbild und c) Nahinfrarotbild

4.2 Fotodokumentation von Anomalien und Deichlinie

Zur Dokumentation wurden während der Begehung der Deiche die erfassten Anomalien fotografisch festgehalten und später als Zusatzinformation für die Anomalien im GIS eingebaut. Abbildung 4-4 zeigt zwei aufgenommene Anomalien: links eine durch Wildtiere verursachte gestörte Grasnarbe und rechts eine unzureichend befestigte Auffahrt mit Vertiefungen und einer gestörten Deichkante.



Abbildung 4-4: Fotodokumentation von Anomalien (links: Scharrstelle von Wildtieren, rechts: Deichüberfahrt)

Neben dieser Dokumentation der Anomalien wurden Deichabschnitte fotografisch festgehalten. An der Mulde wurde bei der ersten Begehung ein Abschnitt von ca. 3 km dokumentiert, indem jeweils alle 100 m ein Bild von der Oberfläche der Deichkrone und ein Bild entlang des Deichverlaufs gemacht wurde, Abbildung 4-5.



Abbildung 4-5: Fotodokumentation des Muldedeichs: Blick über den Deichverlauf (links) und Detailaufnahme der Deichkrone (rechts)

Sämtliche Fotos der Anomalien und der Deichabschnitte wurden in „DeSiMo“ integriert und verortet, Abbildung 4-6.

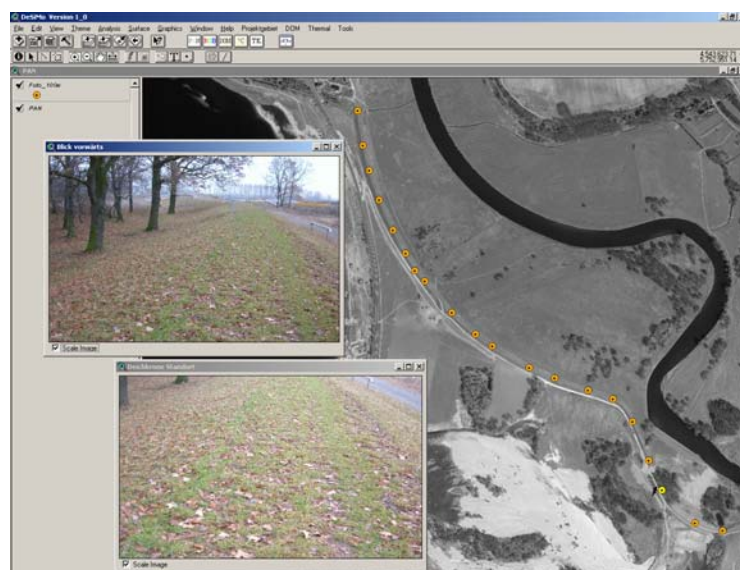


Abbildung 4-6: Im "DeSiMo" verortete Fotodokumentation der Deichlinie

4.3 Verifizierung des Digitalen Oberflächenmodells

Die Verifizierung des Digitalen Oberflächenmodells wurde für die beiden Projektgebiete Mulde und Elbe vorgenommen. Dazu wurden in beiden Projektgebieten jeweils vier Deichquerprofile mit einem dGPS vermessen. Die Vermessungspunkte wurden dabei in dem geodätischen Bezugssystem WGS84 aufgenommen und mussten für den Vergleich mit den Höhendaten aus den jeweiligen Digitalen Oberflächenmodellen in das dazugehörige Bezugssystem umgewandelt werden.

Für den Höhenvergleich werden die Höhen aus dem DOM für jeden Vermessungspunkt herausgelesen. Mit Hilfe eines in „DeSiMo“ eingebauten Tools lassen sich an den Koordinaten der Vermessungspunkte die Höhen aus dem Oberflächenmodell gewinnen. Im Folgenden werden die Analyseergebnisse der Höhenvergleiche für die Projektgebiete Elbe und Mulde dargestellt.

4.3.1 Projektgebiet Elbe

Das aus den HRSC-AX Stereokanälen gewonnene Digitale Oberflächenmodell für das Projektgebiet Elbe wurde von der DLR im örtlichen Bezugssystem RD83, welches in Sachsen-Anhalt standardmäßig verwendet wird, geliefert und enthält die Gebrauchshöhen dmNN. Um einen Vergleich der DOM-Höhendaten mit den vermessenen Querprofilen vornehmen zu können, muss gewährleistet sein, dass beide Datensätze auf dem gleichen Bezugssystem basieren. Dazu werden die Koordinaten und Höhenwerte der Vermessungspunkte in das Bezugssystem RD83 für Sachsen-Anhalt transformiert.

Die Transformierung der Daten erfolgt anhand folgender Parameter:

- Translation um x [m]: 586
- Translation um y [m]: 87
- Translation um z [m]: 409
- Maßstab [ppm]: 9×10^{-6}
- Rotation um x [°]: -0,52
- Rotation um y [°]: -0,15
- Rotation um z [°]: 2,82

An der Elbe wurden für die Verifizierung des Digitalen Oberflächenmodells vier Querprofile herangezogen. Die Vermessung der Querprofile erfolgte in einem Abstand von 0,5 m und führte von der Binnenseite über die Deichkrone zur Außenseite des Deichs. Abbildung 4-7 zeigt die Lage der vermessenen Querprofile.

Die Kontrolle der Höhengenauigkeit der benutzten dGPS erfolgte über die Höhenmessung an einem Festpunkt des "Landesamts für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt".

Abbildung 4-8 zeigt den Festpunkt an der Elbe mit der gemessenen Höhe des dGPS und der ausgewiesenen Höhe des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt. Die Differenz zwischen der gemessenen sowie der ausgewiesenen Höhe des Landesamtes liegt bei 2 cm, wobei die ausgewiesene Höhe mit einer Genauigkeit von 3 cm und die Messung des dGPS mit 0,7 cm angegeben werden. Die Kontrolle der Festpunkte zeigt, dass mit dem dGPS die Geländehöhen genau erfasst werden.



Abbildung 4-7: Lage der vermessenen Deichquerprofile am Elbedeich



Festpunkt 042	Messung dGPS	Messpunktangaben
Höhe [m]	108,960	108,940
Angegebener Genauigkeitsbereich	0,7 cm	3,0 cm

Abbildung 4-8: Festpunkt 042 (links), gemessene und ausgewiesene Höhen laut Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (rechts) [Foto: Elsner/Ohle, 2005]

Die Höhenvergleiche der gemessenen Profilquerschnitte mit den Werten aus dem Digitalen Oberflächenmodell sind in Abbildung 4-9 dargestellt. Deutlich ist eine Verschiebung in der Lage von ca. 50 cm und in der Höhe von ca. 40 cm zu erkennen. Als Ursache für diese Verschiebung kann eine unterschiedliche Datums-Transformation der beiden Datensätze ausgeschlossen werden. Beide Datensätze wurden von WGS84 in RD83 SA transformiert.

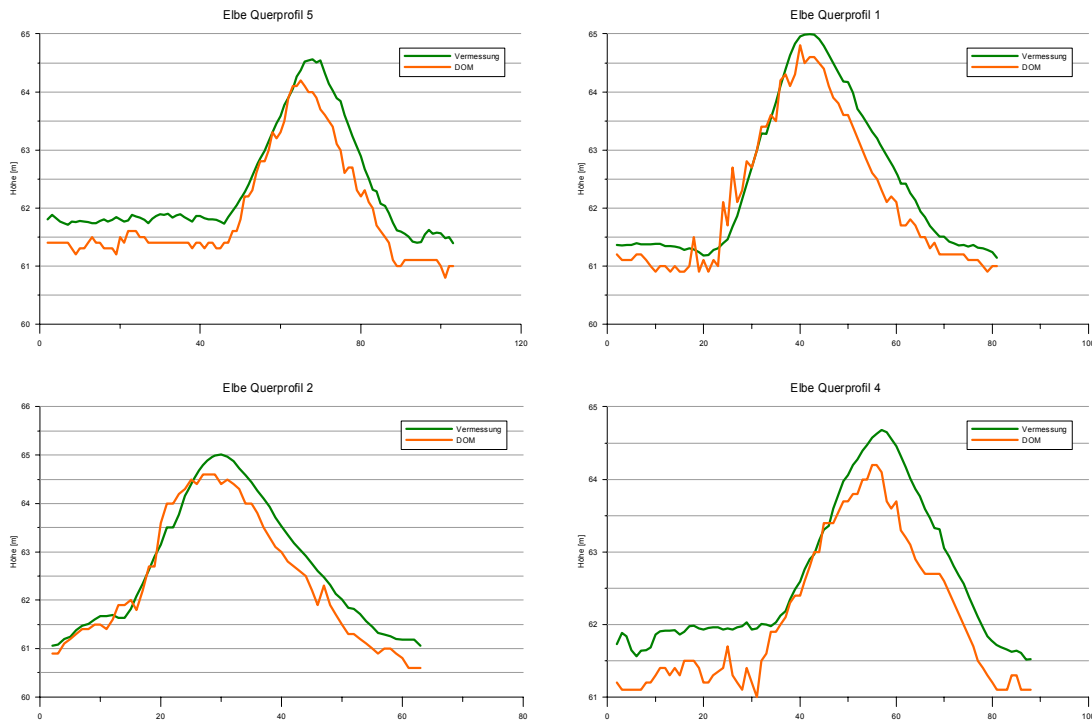


Abbildung 4-9: Höhenvergleiche der gemessenen Profilquerschnitte an der Elbe mit den Werten aus dem Digitalen Oberflächenmodell

Die Kontrolle der Messgenauigkeit des dGPS anhand der Festpunkte zeigt, dass die Messwerte der Profilvermessung die Höhen gut wiedergeben. Die Ursache der seitlichen Verschiebung ist im Digitalen Oberflächenmodell zu suchen. Eine Überprüfung dieser Daten seitens der DLR ergab, dass die während der Überfliegung aufgenommenen GPS-Daten alle im Genauigkeitsbereich von 10 cm liegen. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich diese Verschiebung erst im Verlauf der einzelnen Datenprozessierschritte ergeben hat. Da die Datenprozessierung recht aufwendig ist, lässt sich die Ursache der Verschiebung nur schwer nachprüfen. Die Regelmäßigkeit der Verschiebung zeigt jedoch, dass die relative Höhe im Digitalen Oberflächenmodell sehr gut wiedergegeben wird.

4.3.2 Projektgebiet Mulde

Zur Verifizierung des Digitalen Oberflächenmodells wurden im Projektgebiet Mulde vier Profile an verschiedenen Deichabschnitten mit einem dGPS vermessen. Die Querprofile 1 und 2 liegen westlich und die Querprofile 3 und 4 östlich der neu errichteten Flutrinne (Abbildung 4-10). Die Kontrolle der Höhengenaugigkeit des benutzten dGPS erfolgte über die Höhenmessung von einem Festpunkt des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt.

Abbildung 4-11 zeigt den Festpunkt an der Mulde mit der gemessenen Höhe des dGPS und der ausgewiesenen Höhe des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt. Die Differenz zwischen der gemessenen sowie der ausgewiesenen Höhe des Landesamtes liegt bei 1,4 cm, wobei die ausgewiesene Höhe mit einer Genauigkeit von 3 cm und die Messung des dGPS mit 1 cm angegeben werden.

Auch für das Gebiet der Mulde ergab sich eine Verschiebung zwischen den gemessenen Deichprofilen und den aus dem DOM ausgelesenen Werten. Die Höhen des DOMs liegen ca. 4,75 m unter den gemessenen Werten. Zusätzlich kommt es zu einer seitlichen Verschiebung von ca. 2,00 m, Abbildung 4-12. Wie die Kontrolle der dGPS-Messungen mit Hilfe eines Festpunktes zeigt, geben die gemessenen Deichprofile die Höhen gut wieder, so dass die Ursache der Verschiebungen auch hier im Digitalen Oberflächenmodell zu suchen ist. Vermutlich handelt es sich um eine Verschiebung aufgrund unterschiedlicher Datums-Transformationen, da es nicht in das Bezugssystem RD83 für Sachsen-Anhalt transformiert wur-

de. Dennoch zeigt die Regelmäßigkeit der Verschiebung, dass die relative Höhengenaugkeit im Digitalen Oberflächenmodell durchaus gut ist.

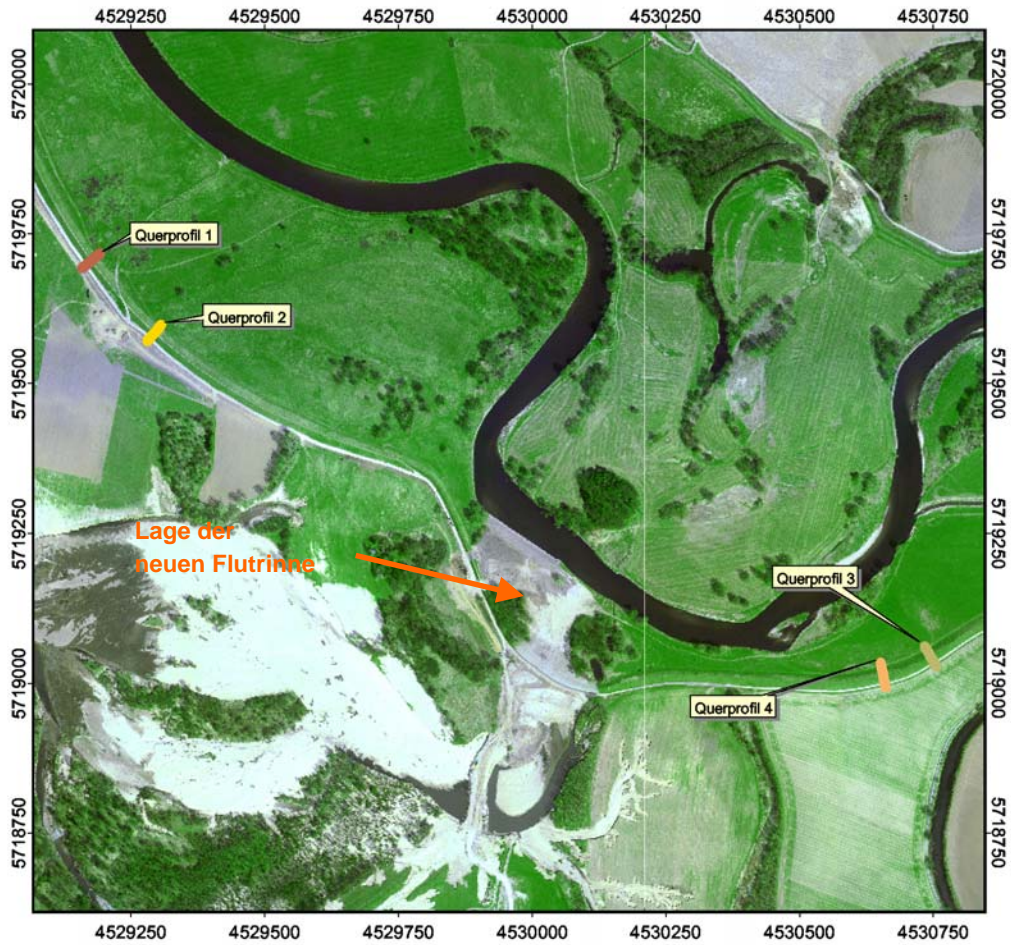


Abbildung 4-10: Lage der vermessenen Querprofile am Muldedeich



Festpunkt 002	Messung dGPS	Messpunkt angeben
Höhe [m]	143,730	143,716
Angebener Genauigkeitsbereich	1,0 cm	3,0 cm

Abbildung 4-11: Festpunkt 002 (links), gemessene und ausgewiesene Höhen laut Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (rechts)
[Foto: Elsner/Ohle, 2005]

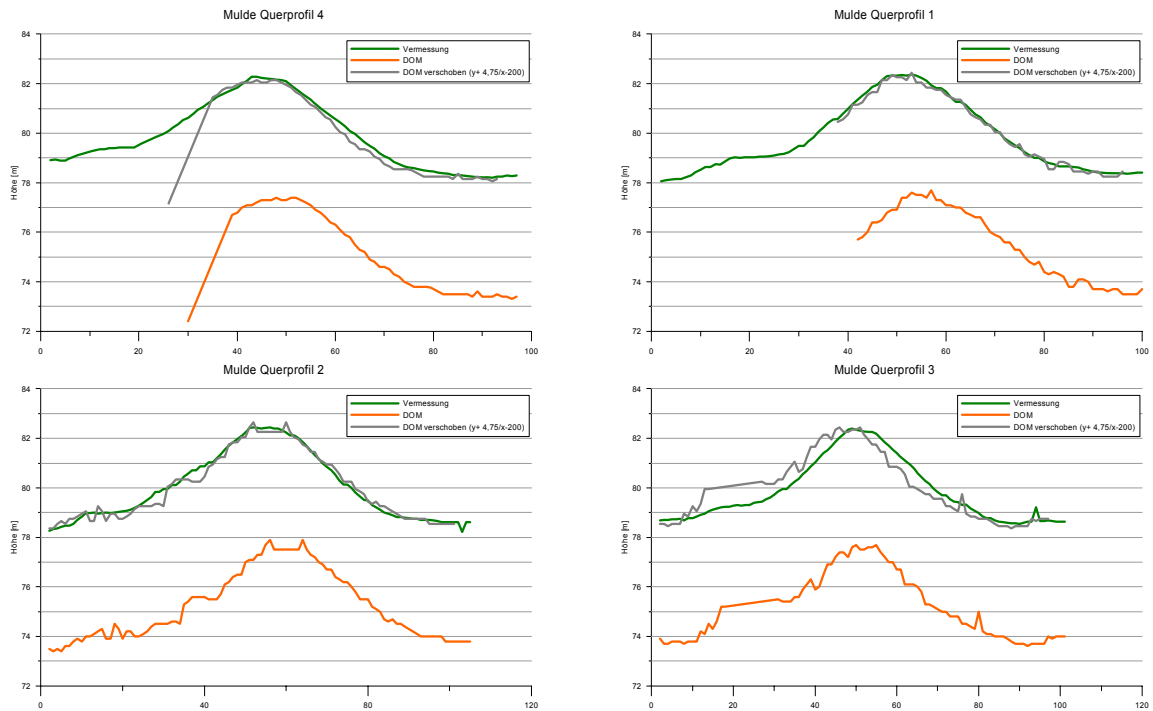


Abbildung 4-12: Höhenvergleiche der gemessenen Profilquerschnitte an der Mulde mit den Werten aus dem Digitalen Oberflächenmodell

4.4 Erkennbare Anomalien und Schäden an Deichen

4.4.1 Gleiten eines Deiches

Eine der schwerwiegendsten Schäden an Deichen ist das Gleiten, wenn sich der gesamte Deichkörper über eine bestimmte Länge verschiebt. Dieser Schaden ist in Luftbildern gut erkennbar. Treten im Verschiebungsbereich auch Risse im Deichkörper auf, so liefert das panchromatische Luftbild aufgrund der Kontrastwirkung die besten Ergebnisse. Es wird eine Rissbreite vorausgesetzt, die mit der Auflösung der Luftbilder korrespondiert.

Im Digitalen Oberflächenmodell ist die Verschiebung des Deichkörpers nachzuvollziehen, sofern eine Mehrfachbefliegung im Zuge eines Monitoring an einem Deich erfolgt. Abbildung 4-13 zeigt das Digitale Oberflächenmodell eines Deichabschnitts der Mulde im Jahr 2001 (links) und im Jahr 2003 (rechts).

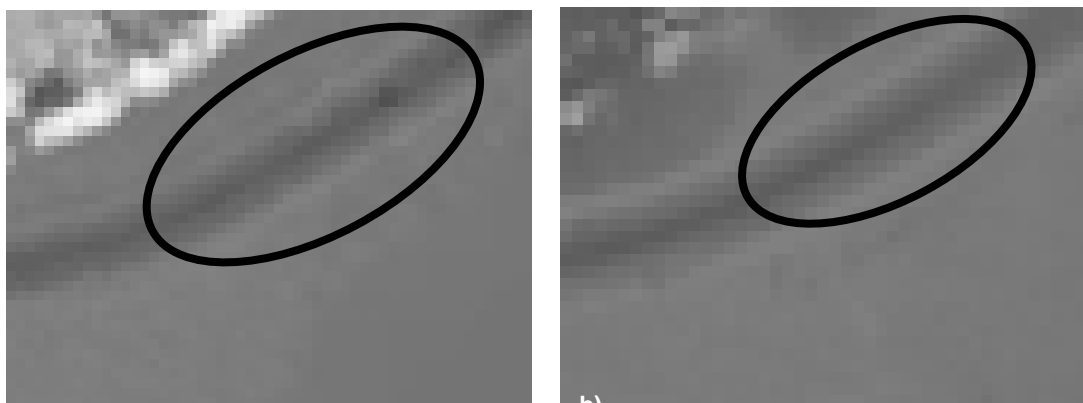


Abbildung 4-13: Digitales Oberflächenmodell DOM eines Deichabschnitts an der Mulde mit einem durch Gleiten verschobenen Deich, erhoben während Mehrfachbefliegungen im a) Jahr 2001 und b) Jahr 2003

Um eine Verschiebung bzw. ein Gleiten des Deiches zu erkennen, ist eine Differenzanalyse hilfreich. Hierzu werden die Oberflächenmodelle voneinander subtrahiert, Abbildung 4-14. Rote bis gelbe Bereiche bedeuten hierbei eine Erosion gegenüber dem Ausgangszustand und grüne Bereiche eine Aufschiebung oder Erhöhung. In diesem Fall ist eine deutliche Verschiebung (Höhenreduzierung an der Nordflanke und Erhöhung an der Südflanke) des Deichs erkennbar.

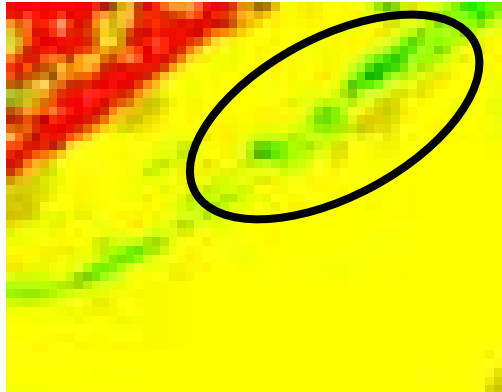


Abbildung 4-14: Differenzdarstellung im Digitalen Oberflächenmodell eines Deichabschnitts der Mulde mit einem durch Gleiten verschobenen Deich, ermittelt aus einer Mehrfachbefliegung [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]

4.4.2 Gleiten des Deichfußes

Ein Abgleiten des Deichfußes ist in den Farb-, Nahinfrarot- und panchromatischen Luftbildern ebenfalls gut erkennbar, da sich die Geometrie auf einer größeren Fläche ändert. Risse im Deichkörper sind wegen der höheren Auflösung und der Kontrastdarstellung im panchromatischen Luftbild am besten erkennbar.

Im Digitalen Oberflächenmodell sind diese Schäden gut darstellbar, da sich am Deichfuß eine Höhenänderung einstellt, Abbildung 4-15 links. Für die Erkennbarkeit im Digitalen Oberflächenmodell muss eine entsprechend große Massenbewegung, die eine Höhenveränderung im Dezimeterbereich auslöst, stattgefunden haben. Zudem muss ein Gebiet mindestens zweimal befliegen werden, um eine Differenzdarstellung (Abbildung 4-15 rechts) zu ermöglichen. Hier ist ein eindeutiges örtliches Gleiten des Binnen-deichfußes an mehreren Stellen erkennbar.

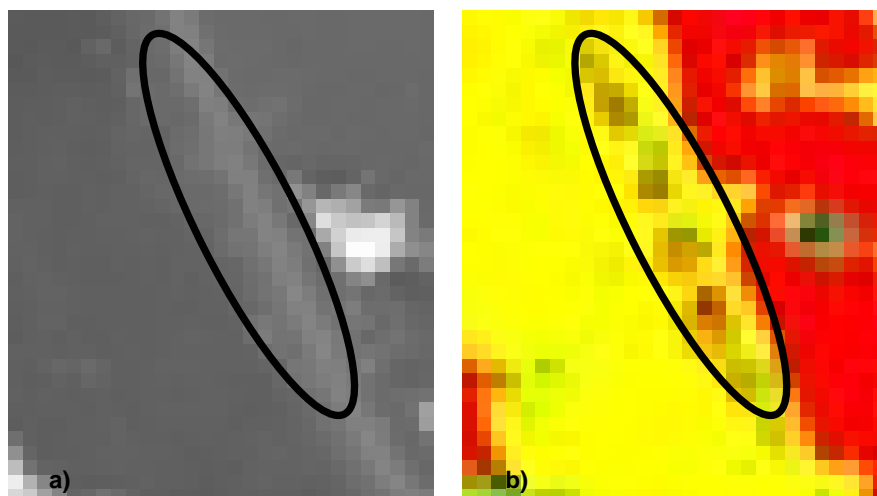


Abbildung 4-15: Identifizierung eines verformten Binnenböschungsfußes a) im DOM des Jahres 2001 und b) in der Differenzdarstellung [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]

4.4.3 Böschungsrundbruch

Bei einem Böschungsrundbruch ist die Erkennbarkeit anhand von Fernerkundungsdaten sehr hoch, da eine klaffende Erosionsstelle im Deichkörper entsteht. Im Farbbild ruft dies eine Farbveränderung hervor. Aufgrund der unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Materialien Sand/Klei und Rasen ist ein Böschungsrundbruch auch im Nahinfrarotbild gut sichtbar.

Bei einer Massenbewegung mit Höhenänderungen im Dezimeterbereich ist ein Böschungsrundbruch auch im Digitalen Oberflächenmodell zu identifizieren. Hierbei gilt, je großflächiger die Veränderungen, desto besser wird deren Erkennbarkeit ausfallen. Oft ist aber erst bei einer Mehrfachbefliegung des Deichs der Schaden eindeutig identifizierbar. In Abbildung 4-16 links ist im Referenzzustand des Deichs im Jahr 2001 kein Schaden erkennbar, während mit der Befliegung im Jahr 2003, Abbildung 4-16 rechts, ein Schaden zu erkennen ist.

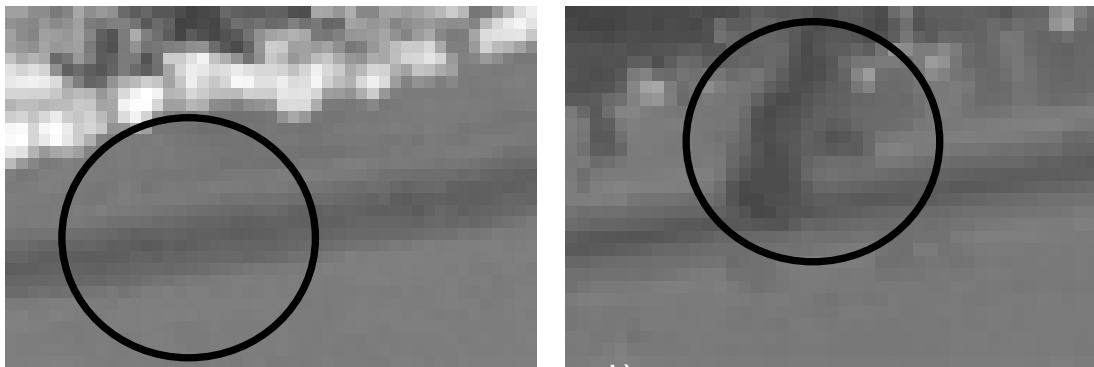


Abbildung 4-16: Digitales Oberflächenmodell DOM eines Deichabschnitts an der Mulde mit einem Böschungsrundbruch auf der Binnenseite, erhoben aus Mehrfachbefliegungen im a) Jahr 2001 und b) Jahr 2003

In der Differenzdarstellung der Zustände zwischen den Jahren 2001 und 2003 zeigen rote Farben eine Erosion gegenüber dem Ausgangszustand, Abbildung 4-17.

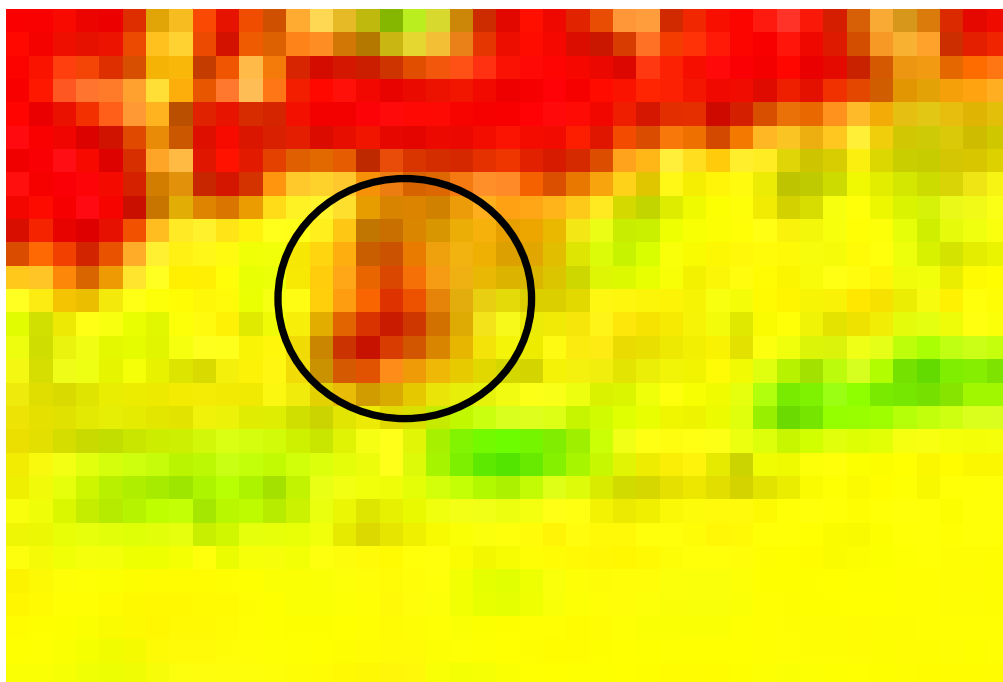


Abbildung 4-17: Differenzdarstellung im Digitalen Oberflächenmodell eines Deichabschnitts der Mulde mit einem Böschungsrundbruch auf der Binnenseite, ermittelt aus einer Mehrfachbefliegung [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]

4.4.4 Böschungsbruch mit örtlichem Standsicherheitsverlust

Bei einem örtlichen Verlust der Standsicherheit stellt sich die Identifizierung ähnlich wie beim Böschungsgrundbruch dar. Die Erkennbarkeit in den Farb-, Nahinfrarot- und panchromatischen Luftbildern ist sehr gut. Bei einem örtlichen Standsicherheitsverlust in einem kleinen Bereich kann die Identifizierung im Digitalen Oberflächenmodell aufgrund der geringen Pixelauflösung von 50 cm und bei geringen Höhenänderungen im Gelände schwierig sein. Am Elbedeich fanden sich in den untersuchten Deichabschnitten in einem Teilabschnitt terrassenförmige Strukturen an der Deichböschung, die auf einen Böschungsbruch mit örtlichem Standsicherheitsverlust hindeuteten.

Bereiche mit Abrutschungen und Böschungsbrüchen lassen sich aufgrund der gestörten Vegetation in den Luftbildern gut ausmachen. Größere Veränderungen mit mehreren Dezimetern lassen sich auch im DOM erfassen. Abbildung 4-18 d zeigt einen Deichabschnitt, an dem terrassenförmige Strukturen auf der Binnenseite der Böschung zu erkennen sind.

Abbildung 4-18 a-c zeigt einen Ausschnitt der terrassenförmigen Strukturen, die über einen längeren Abschnitt entlang des Deiches zu finden sind. Im panchromatischen Bild und im Farbbild lassen sich die Strukturen nur unzureichend erkennen. Dies liegt vor allem daran, dass die Binnenböschung an diesem Deichabschnitt im Schatten liegt und die Kontrastschärfe für die schmalen, linienförmigen Ausprägungen nicht groß genug ist. Im Nahinfrarotbild sind die linienförmigen Strukturen der offenen Grasnarbe dagegen gut zu erkennen.

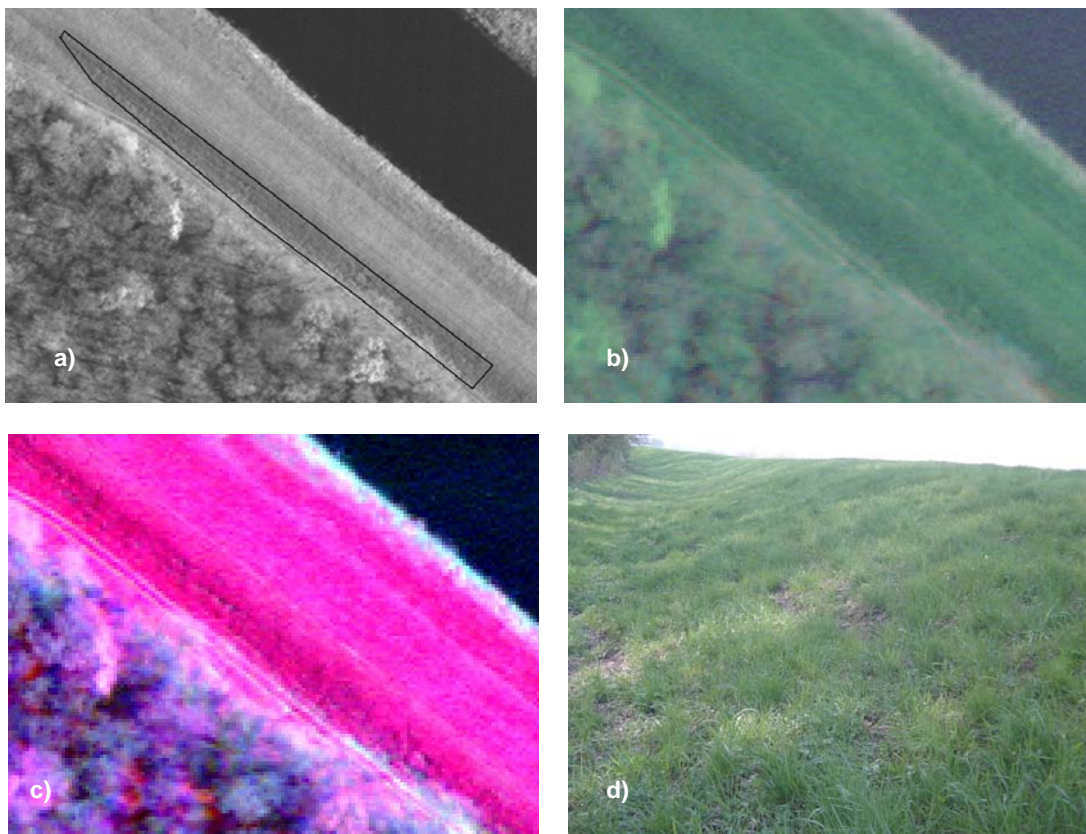


Abbildung 4-18: Identifizierung von terrassenförmigen Abrutschungen im a) panchromatischen Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild (nachbearbeitet) und d) in der Natur

4.4.5 Erosionsgrundbruch (Piping)

In den beflogenen Gebieten an Elbe und Mulde waren keine Bereiche mit einem Erosionsgrundbruch zu finden. Dieser konnte auch nicht im Labordeich simuliert werden. Daher sind die folgenden Aussagen aus Daten anderer Anomalien und Schadensbilder hergeleitet.

Die Erkennbarkeit eines Erosionsgrundbruches in den Bildflugdaten hängt von der Auflösung der Bilddaten und der Größe der Quellkalde ab. Im Beispiel Abbildung 4-19 beträgt der Durchmesser der Quellkalde 80 cm. Dies entspricht im panchromatischen Luftbild einer Fläche von $4 \times 4 = 16$ Pixel. Die Sichtbarkeit im panchromatischen Luftbild wird vor allem durch Kontrastdarstellung erzeugt, wobei ein eventueller Schatten der Quellkalde die Anzahl der Pixel erhöht, auf denen die Anomalie zu sehen sein sollte.



Abbildung 4-19: Quellkalde eines Erosionsgrundbruches in der Natur
[Foto: Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, 1995]

Im Farbbild und im Nahinfrarotbild sollte die Quellkalde aufgrund der Farbveränderung gegenüber dem normalen Untergrund und den Reflexionseigenschaften besser sichtbar sein. Allerdings ist die Auflösung in Nahinfrarot- und Farbluftbildern bisher nur 40 cm. Dies bedeutet, dass das Beispiel nur durch zwei mal zwei Pixel abgebildet wird. Diese vier Pixel sind dann nur bei einem geeigneten Maßstab als heller Fleck zu erkennen, wobei ein normaler, dunklerer Untergrund Voraussetzung ist. Aus vier Pixeln lässt sich auch nicht die für Quellkalden typische kreisförmige Struktur erkennen. Mit Hilfe der Kombination von panchromatischem Luftbild sowie Nahinfrarot- und Farbluftbildern sollte aber auf eine kreisförmige Struktur und Bodenveränderungen geschlossen werden können.

Eine Identifizierung im Digitalen Oberflächenmodell ist aufgrund der schlechteren Pixelauflösung von 50 cm und der geringen Höhenänderungen im Gelände nicht möglich.

4.4.6 Setzungen

Setzungen von über 10 cm sind im Digitalen Oberflächenmodell identifizierbar, sofern dieses durch ein Monitoring regelmäßig aufbereitet und angepasst wird. Mit Hilfe von Mehrfachbefliegungen können großflächigere Veränderungen in der Höhe über eine Differenzendarstellung ermittelt werden.

Abbildung 4-20 a) bis c) zeigt ein Beispiel für eine Mehrfachbefliegung eines Deichabschnitts an der Mulde, in dem der Deich bei einem Hochwasser gebrochen war. In den Bildern erscheinen die höher gelegenen Flächen in helleren Grautönen, während die niedrigeren Bereiche dunkler dargestellt sind. Das Bild oben links, a), zeigt den Zustand des Gebietes vor dem Deichbruch (2001), das Bild rechts, b), ist kurz nach dem Deichbruch (2002) aufgenommen worden. Deutlich sind der Durchbruch und die großflächige

Vertiefung des Geländes durch die Erosion zu erkennen. Im Bild unten links, c), aufgenommen 2003, ist die wieder geschlossene Deichlinie zu erkennen.

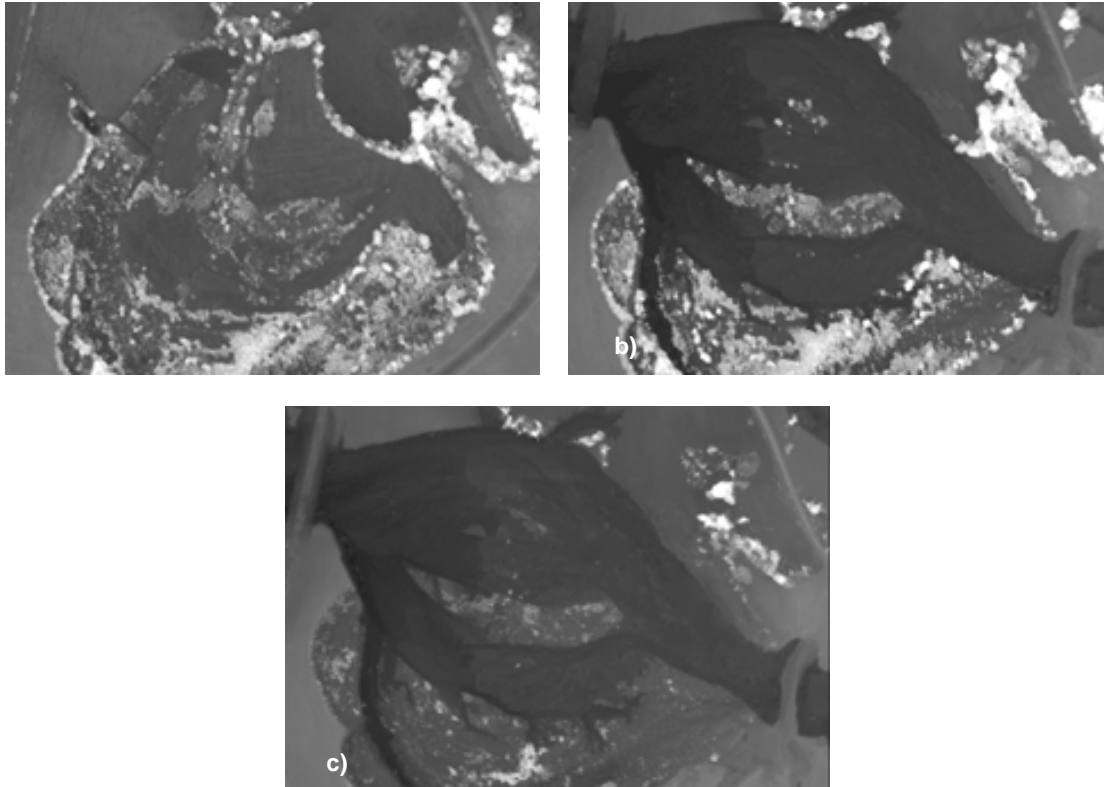


Abbildung 4-20: Digitales Oberflächenmodell eines Deichabschnitts mit Deichbruch an der Mulde, erhoben aus einer Mehrfachbefliegung, a) Zustand 2001, b) Zustand 2002 und c) Zustand 2003

Abbildung 4-21 zeigt eine Differenzendarstellung der Befliegungsdaten aus den Jahren 2001 und 2003. Rot dargestellt sind Bereiche, in denen es durch Erosionen infolge des Deichbruchs zu einer Verringerung der Geländehöhe gegenüber dem Ausgangszustand gekommen ist, die sich mit Hilfe der Differenzbildung nachvollziehen lassen.

Neben der Höhenänderung von großen Flächen und Deichen spielen örtliche Setzungen und Absenkungen vor allem im Deichkronenbereich eine wichtige Rolle, da hier eine potentielle Gefahrenstelle für einen Deichüberlauf im Hochwasserfall besteht. Auch weisen lokale Setzungen auf innere Umformungen oder Störungen im Deich hin.

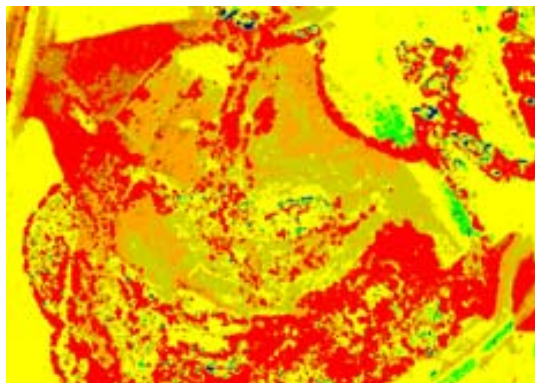


Abbildung 4-21: Differenzendarstellung des Digitalen Oberflächenmodells eines Deichabschnitts an der Mulde aus einer Mehrfachbefliegung zur Bestimmung der Setzung [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]

Abbildung 4-22 zeigt mehrere Vertiefungen, die auf einem 40 m breiten Abschnitt quer über den Deichkörper verlaufen. In den Fernerkundungsdaten lassen sich die Vertiefungen unterschiedlich gut erfassen, Abbildung 4-23. Während im unbearbeiteten panchromatischen Bild aufgrund von guten Kontrasten durch den Schattenwurf die Strukturen zu erkennen sind, sind diese im unbearbeiteten Farbbild nicht zu erkennen. Auch im Nahinfrarotbild werden die Formen erst im nachbearbeiteten Bild erkennbar. Im Digitalen Oberflächenmodell sind die Vertiefungen nicht eindeutig zu identifizieren. Die Höhenwerte verlaufen unabhängig von der Struktur der Vertiefung unregelmäßig über den Deichabschnitt. Da die Vertiefungen zwar ausgeprägt und im Gelände deutlich zu erkennen sind, ist die Erkennbarkeit im DOM wegen der zu geringen Auflösung bzw. Höhendifferenzen nicht eindeutig.



Abbildung 4-22: Vertiefungen auf einem Deich

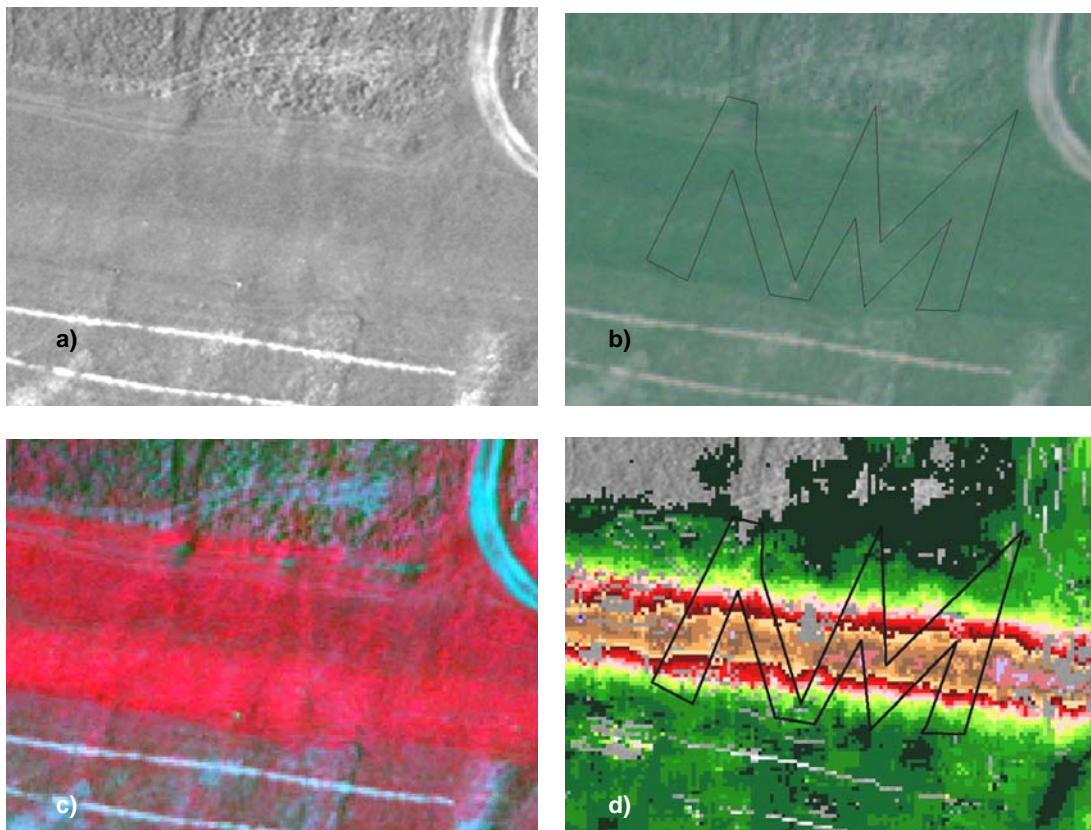


Abbildung 4-23: Identifizierung von Vertiefungen: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitales Oberflächenmodell

4.4.7 Durchsickerungen

Durchsickerungen sind anhand der luftseitigen wassergefüllten Senken in allen Fernerkundungsdaten unmittelbar zu erkennen. Da die Wasseroberflächen bei der Berechnung des Digitalen Oberflächenmodells nicht von anderen Flächen unterschieden werden können, kann das DOM hier zunächst keine eindeutige Aussage über Schädigungen im Deich geben, Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26.



Abbildung 4-24: Durchsickerungen am binnenseitigen Deichfuß

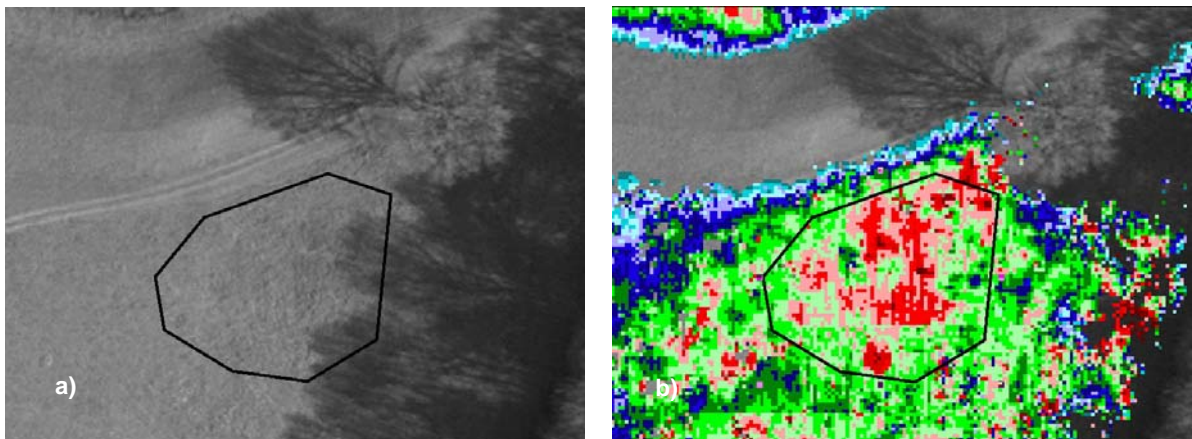


Abbildung 4-25: Großflächigen Senkenbereich am Deichfuß: a) panchromatisches Bild und b) Digitales Oberflächenmodell

Wasserflächen, die auf frühere oder aktuelle Deichschäden hindeuten, lassen sich in HRSC-AX Daten gut erkennen, Abbildung 4-26 a) bis d). Im Farbbild können Wasserflächen in Abhängigkeit von vorkommenden Schwebstoffen eine grünliche oder bräunliche Färbung aufweisen. Aufgrund der sehr geringen Reflexion von Wasser im Nahinfrarotbereich lassen sich Wasserflächen hier sehr gut abgrenzen. Für das Digitale Oberflächenmodell lassen sich im Bereich von Wasserflächen aus den panchromatischen Stereokanälen keine Werte berechnen, so dass Wasserflächen im DOM als Flächen ohne Höhenwert zu erkennen sind. Eine eindeutige Zuordnung von Wasserflächen im DOM ist nur in Verbindung mit Bildaufnahmen möglich.

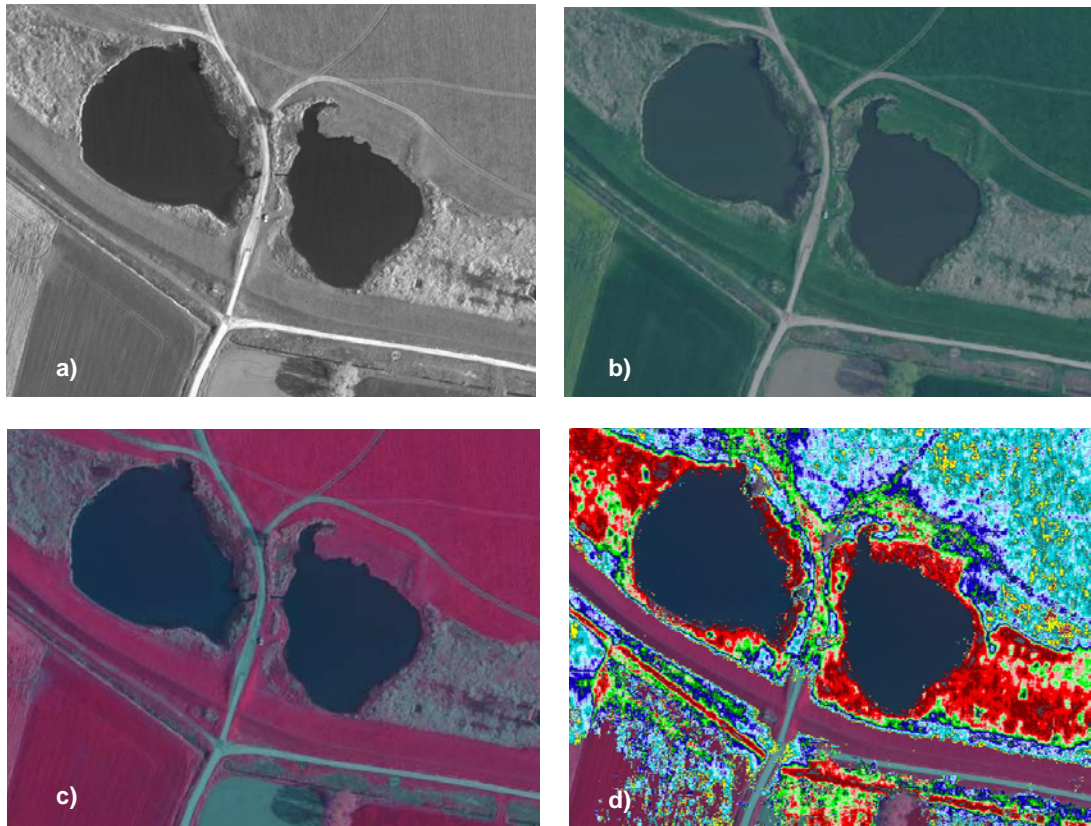


Abbildung 4-26: HRSC-AX Aufnahmen von Wasserflächen a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitales Oberflächenmodell

4.4.8 Erosion infolge Wellenschlag und Wasserüberlauf

Großflächige Erosionen an Böschungen sind in allen Fernerkundungsdaten zu identifizieren, besonders gut im Nahinfrarotbild, da durch Erosion oder Bruch der Böschung Bodenmaterial freigelegt wird.

Abbildung 4-27 a) zeigt einen durch Wellenangriff erodierten Bereich der wasserseitigen Böschung eines Deichs an der Elbe. Hier ist der Schaden im Digitalen Oberflächenmodell zu erkennen, da Ausdehnung und die Höhenänderungen der Erosion groß genug sind, um von der Auflösung des DOM erfasst zu werden. Deutlicher fällt die Darstellung des Schadens im Differenzbild, Abbildung 4-27 b), aus.

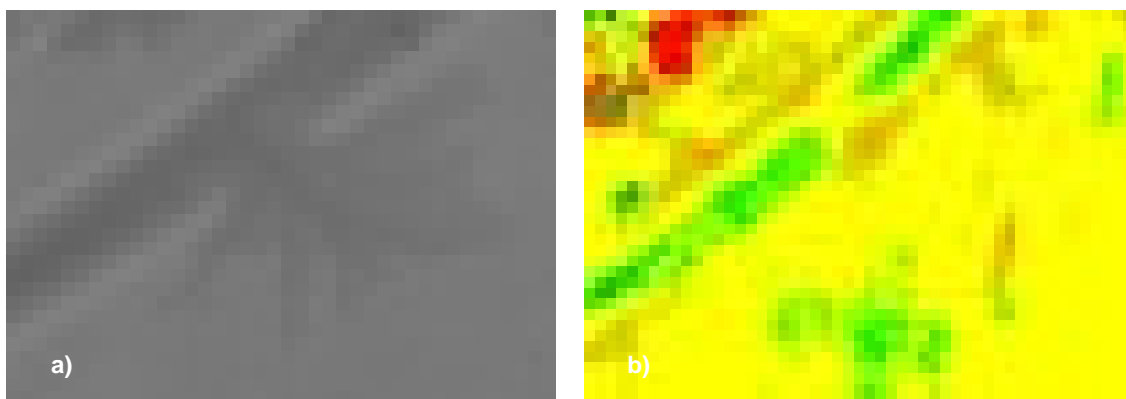


Abbildung 4-27: Identifizierung der Erosion einer Außenböschung infolge Wellenangriff a) im DOM des Jahres 2003 und b) in der Differenzdarstellung des DOM [Zustand 2003 MINUS Zustand 2001]

Die Erkennbarkeit von punktuellen Kahlstellen auf Deichen in den HRSC-AX Daten ist abhängig von ihrer Ausprägung. Abbildung 4-28 zeigt eine Kahlstelle auf dem Deich mit einem Durchmesser von ungefähr 70 cm.



Abbildung 4-28: Offene Grasnarbe mit einem Durchmesser von ca. 70 cm

Im panchromatischen Bild und im Farb- und Nahinfrarotbild lässt sich eine Kahlstelle gut erkennen. Der freiliegende Boden lässt sich von der umgebenden Rasenfläche abgrenzen. Im panchromatischen Bild und im Farbbild erscheint die Kahlstelle als hellerer Bereich. Im Nahinfrarotbild fehlt hier die für Vegetation typische rote Färbung, Abbildung 4-29 a) bis c).

4.4.9 Schäden durch mechanische oder natürliche Beanspruchung

Eine abnehmende Intensität der Rotfärbung deutet auf eine geringere Vitalität der Vegetation hin. Rasenflächen, die nicht komplett geschlossen sind, d. h. bei denen der Boden durchscheint, erscheinen im Nahinfrarotbild ebenfalls mit einer geringeren Farbgebung in Rot. Hier überlagert sich aufgrund der Auflösung die grüngräuliche Farbe, die offenen Boden signalisiert. Erst Kahlstellen mit einer Größe von mehr als 0,5 m Durchmesser lassen sich eindeutig als Kahlstelle erfassen.

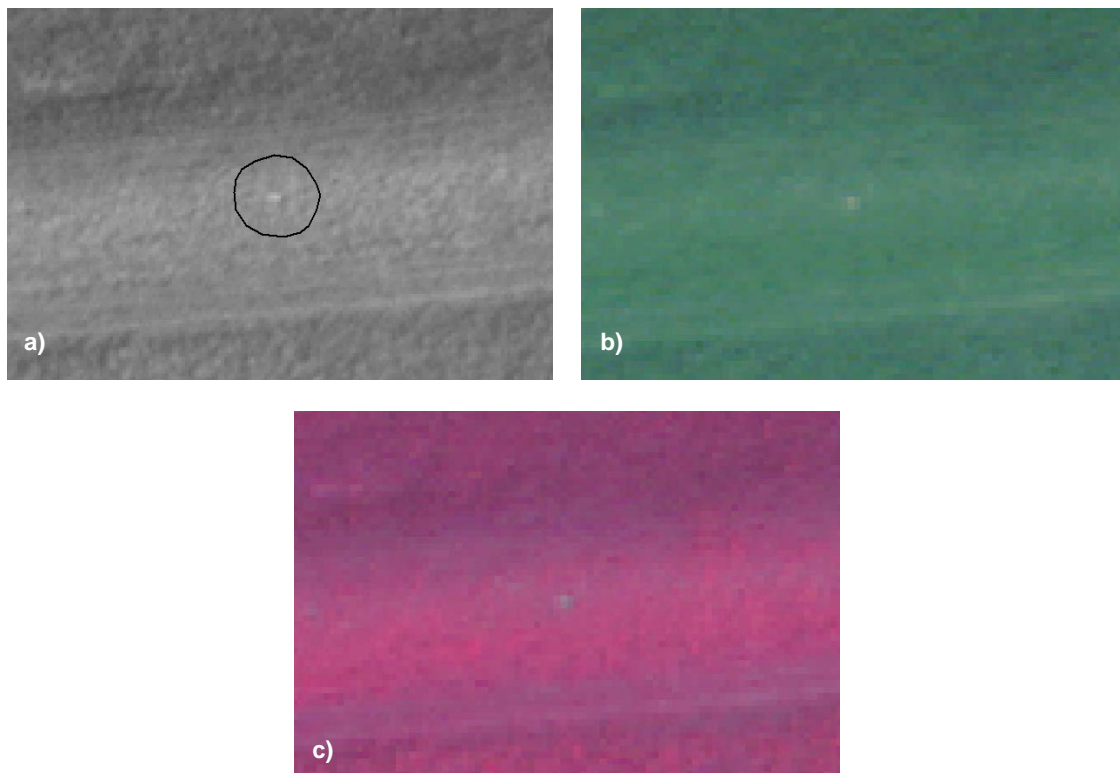


Abbildung 4-29: Erkennung von punktuellen Kahlstellen: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild und c) Nahinfrarotbild

Pfade oder Fahrspuren sind in Abbildung 4-30 gut erkennbar.



Abbildung 4-30: Gestörte Grasnarbe durch Befahren eines unbefestigten Weges

Fahrspuren können wegen ihrer auffälligen Parallelstruktur in allen Bilddaten der HRSC-AX Kamera ebenfalls identifiziert werden. Während befestigte Wege durch ihren starken Kontrast zu ihrer Umgebung gut erkannt werden können, ist die Erkennbarkeit von unbefestigten Wegen schwieriger. Je mehr die Fahrspur ausgefahren ist, desto besser ist ihre Erkennbarkeit in den Daten. Besonders Fahrspuren über eine Wiese sind erst dann sehr gut zu erkennen, wenn durch das häufige Befahren die Grasnarbe gestört ist oder sich Vertiefungen gebildet haben. Die gestörten Bereiche fallen sehr gut im Farb- und Nahinfrarotbild auf Abbildung 4-32. Das Erkennen von Fahrspuren im DOM ist oft nicht eindeutig möglich, nur bei tiefen, breiten Fahrspuren können sie im DOM erfasst werden.



Abbildung 4-31: Mit Schotter befestigter Weg im panchromatischen Bild

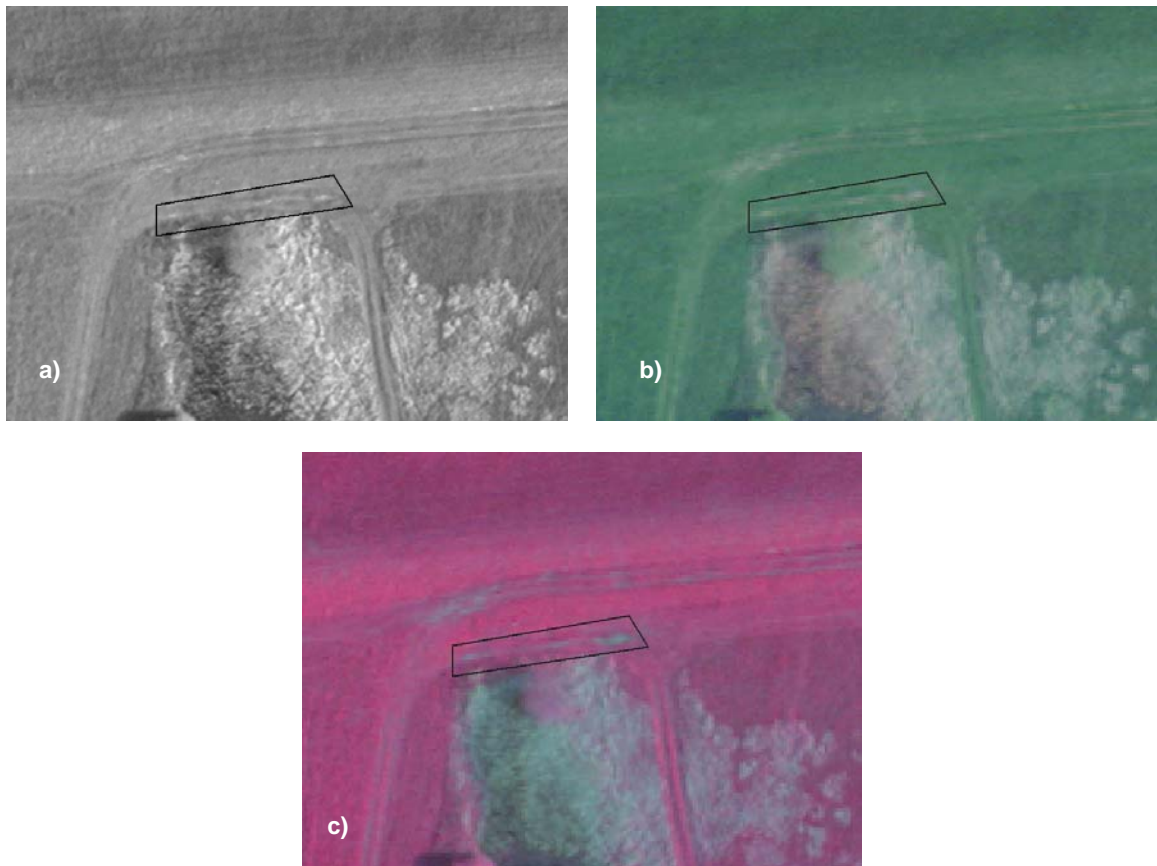


Abbildung 4-32: Identifizierung von unbefestigten Fahrspuren mit der HRSC-AX Kamera: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild und c) Nahinfrarotbild

4.4.10 Höhenveränderungen

Die Identifizierung von Höhendifferenzen in den Fernerkundungsdaten ist für die Analyse und Vorhersagbarkeit von Deichschäden durch Umlagerungsprozesse von großer Bedeutung. Höhendifferenzen im Gelände mit einer einheitlich geschlossenen Grasnarbe lassen sich in den Bilddaten der HRSC-AX Kamera kaum differenzieren. Erst mit zunehmender Höhe lassen sich erhöhte Strukturen durch Schattenwurf in den Bildern ausmachen. Abbildung 4-33 zeigt eine großflächige Geländeerhebung an der Deichaußenböschung, die aufgrund ihrer Lage und Höhe in den Bilddaten eine Schattenausbildung hat, Abbildung 4-34 a) bis d).

Für die sichere Erkennung im Digitalen Oberflächenmodell müssen sich die Strukturen mehrere Dezimeter von der Umgebung abheben und eine Ausdehnung von mehr als 2 m haben, damit sie im DOM mit mehreren Pixeln erfasst sind. Die dargestellte Geländeerhöhung ist groß genug, um im DOM erkannt zu werden. In der Abbildung des DOM ist der Deichkörper mit einer Höhenabstufung von 1 dm farblich differenziert.

Als problematisch bei der Erfassung von kleineren Strukturen aus dem DOM erwiesen sich durch die Prozessierung entstandene Fehlwerte. So konnten Anomalien, die nur aus dem DOM ermittelt wurden und auf Senken bzw. Erhöhungen auf dem Deich hinwiesen, häufig in der Natur nicht gefunden werden.



Abbildung 4-33: Großflächige Geländeerhöhung auf der Deichböschung

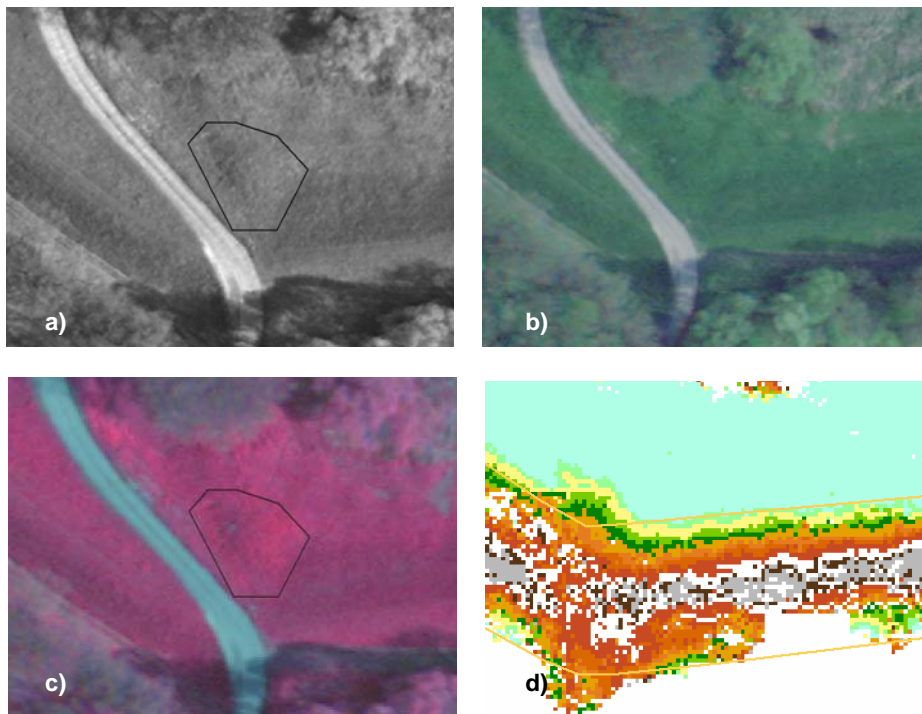


Abbildung 4-34: Identifizierung von Erhöhungen: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitales Oberflächenmodell

Eine bessere Erkennbarkeit in den Bilddaten kann häufig über die Nachbearbeitung der Bilddaten in Hinblick auf Schattenwurf, Helligkeit und Kontrast erreicht werden. Ein Beispiel für die verbesserte Darstellung ist in Abbildung 4-35 gezeigt. Dargestellt ist eine linienförmige Erhöhung, die rechtwinklig vom Deichfuß ins Binnenland verläuft. Die Höhe dieser Erhebung beträgt ungefähr 50 cm. Während die linienförmige Struktur im unbearbeiteten Bild kaum zu erkennen ist, wird die Sichtbarkeit durch veränderte Kontrast-, Farb-, und Helligkeitswerte stark verbessert.

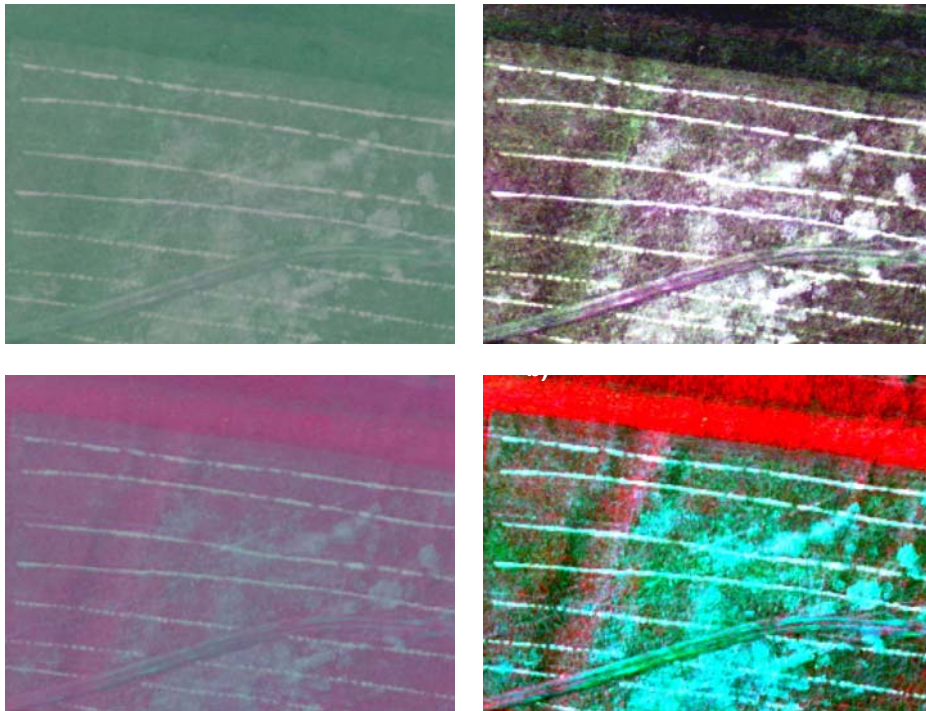


Abbildung 4-35: Verbesserung der Erkennbarkeit einer Erhöhung im panchromatischem Bild (oben) und im Nahinfrarotbild (unten) – links unbearbeitet und rechts bearbeitet

Falls die Auflösung im panchromatischen Luftbild mit 20 cm ausreicht, ist es möglich, kleine Fehlstellen z. B. durch den Kontrast zwischen der frischen Erde und dem Schatten von Maulwurfshügeln zu erkennen. Dies findet bei Maulwurfshügeln und Wühltriebfall aber nur im Bereich von ein bis zwei Pixeln statt. Maulwurfshügel und Wühltriebfall müssen daher gehäuft auftreten, damit durch das Muster der Hügel eine Möglichkeit zum Erkennen gegeben ist. Einzelne Maulwurfshügel oder Wühltriebbauteile sind in den Daten nicht identifizierbar, da sie im panchromatischen Luftbild nur ein bis zwei Pixel groß sind. Eine Darstellung im Digitalen Oberflächenmodell ist bei einer horizontalen Auflösung von 50 cm und einer vertikalen Auflösung von 10 cm ebenfalls nicht möglich.

4.4.11 Schädigung der Grasnarbe durch Wildbewuchs

Durch den Wildwuchs von Pflanzen auf dem Deich kann es zu einer Verkräutung der Grasnarbe kommen. Die Verdrängung des Rasens führt zu einer Störung der geschlossenen Grasnarbe. Großblättrige Pflanzen fördern eine Beschattung des darunter liegenden Rasens, was eine Verminderung des Wachstums zur Folge haben kann. Die Ausbreitung von Wildkräutern kann größere Kahlstellen auf dem Deich verursachen.

Ein Abgrenzen von unterschiedlichen Vegetationseinheiten ist mit Hilfe der Fernerkundungsdaten möglich. Dabei unterscheiden Vegetationseinheiten nicht unbedingt verschiedene Pflanzeneinheiten, sondern eher verschiedene Ausprägungen, d.h. die visuelle Ausprägung in den Fernerkundungsdaten einer Pflanzenart ist auch abhängig von der Vitalität und Wachstumsphase der Pflanze. Je nachdem, ob die Pflanze gerade austreibt, blüht oder Pflanzenteile abgestorben sind, wird die Pflanze anders in den Fernerkundungsdaten erscheinen.

Generell lassen sich Pflanzen jedoch gut von offenem Boden unterscheiden. Während die visuelle Erkennung von vitalen Pflanzen sehr gut zu erkennen ist, im Farbbild durch die grünliche Färbung und im Nahinfrarotbild durch die rötliche Färbung, ist die Erfassung von Pflanzen mit hohem Anteil an abgestorbenen Blättern sowohl im Farb- als auch im Nahinfrarotbild schwieriger. Die farbliche Ausprägung abgestorbener Pflanzenteile kann in den Fernerkundungsdaten der von offenem Boden ähneln. In Abbildung 4-36 ist eine größere Grasfläche neben der Deichlinie mit hohem, trockenem Gras zu erkennen, die zum Zeit-

punkt der Geländebegehung zur Schafbeweidung genutzt wurde. Ein Vergleich dieser Wiese mit einem größeren Baustellenbereich, der eine vegetationslose Bodenoberfläche aufweist, zeigt die Schwierigkeit bei der visuellen Farberkennung, Abbildung 4-37. Deutlich ist zu erkennen, dass dem trockenen Gras die grünliche Färbung im Farbbild und die rötliche Färbung im Nahinfrarotbild fehlen. Nur anhand der Struktur lässt sich die Vegetationseinheit als solche erkennen, sie unterscheidet sich deutlich von der des kurzen Rasens auf dem Deich.



Abbildung 4-36: Hohes, trockenes Gras (HRSC-AX Kamera)

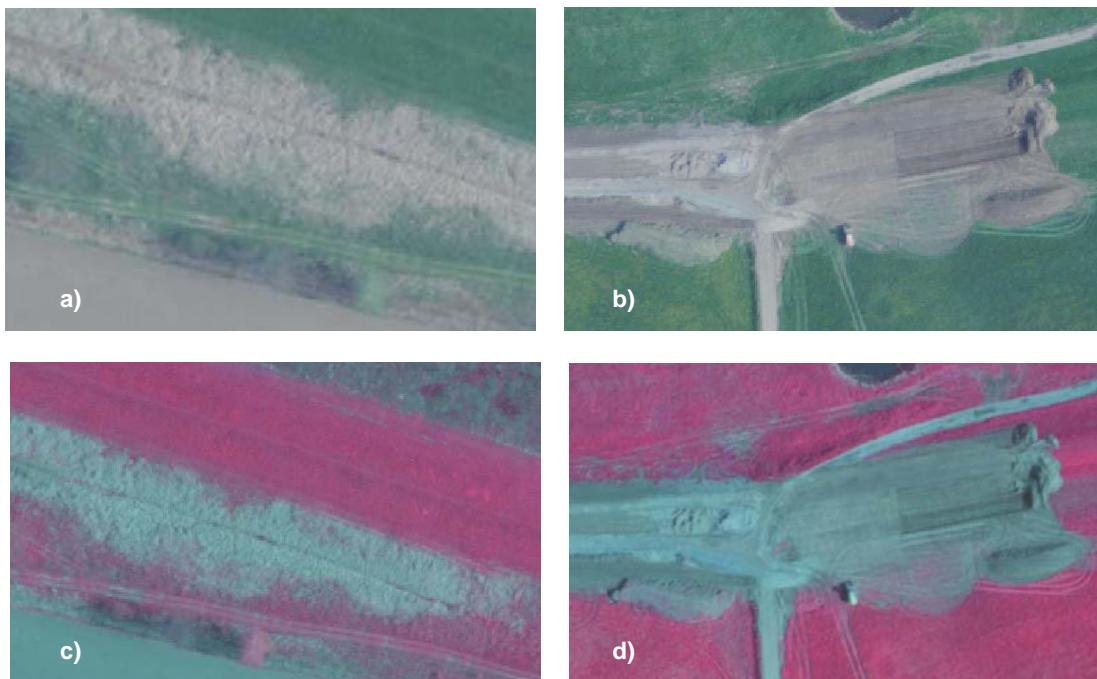


Abbildung 4-37: Hohes, vertrocknetes Gras (links) und offener Boden einer Baustelle (rechts) - oben im Farbbild und unten im Nahinfrarotbild

Je nach Wachstumsphase und Vitalität können Pflanzen einer Art in den Fernerkundungsdaten unterschiedliche Ausprägungen haben. Ein Beispiel hierfür ist die in Abbildung 4-38 markierte Fläche auf der der Rasen einen deutlich kräftigeren Wuchs aufweist als in der direkten Umgebung.

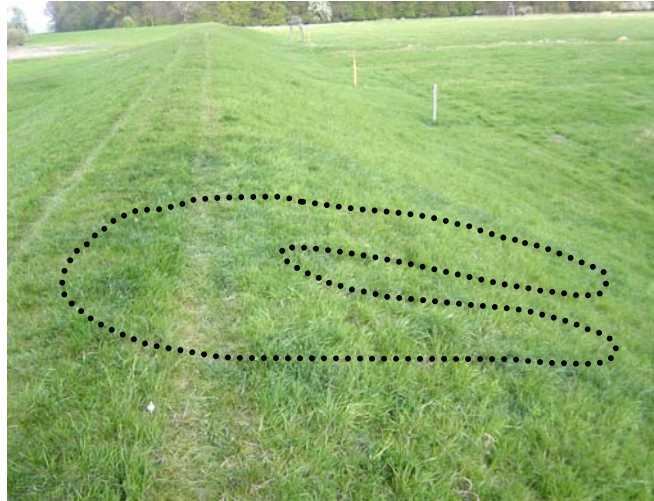


Abbildung 4-38: Rasenfläche am Deich mit kräftigerem Wachstum

Die höhere Vitalität, die wahrscheinlich mit lokalen Bodeneigenschaften zu erklären ist, ist in den Fernerkundungsdaten gut zu erkennen, Abbildung 4-39. Während im panchromatischen Bild die feinen Unterschiede zwischen den Rasenflächen nicht auffallen, sind sie im bearbeiteten Farb- bzw. Nahinfrarotbild durch eine intensivere Färbung deutlich zu erkennen.

Die Tatsache, dass auch Pflanzen einer Art unterschiedlich in den Fernerkundungsdaten ausgeprägt sein können, erschwert die Aussagefähigkeit über auffällige Erscheinungsformen auf und am Deich. Es kann sich dabei um unterschiedliche Pflanzenarten oder um eine Pflanzenart mit unterschiedlichen Vitalitäts- und Wachstumsstufen handeln.

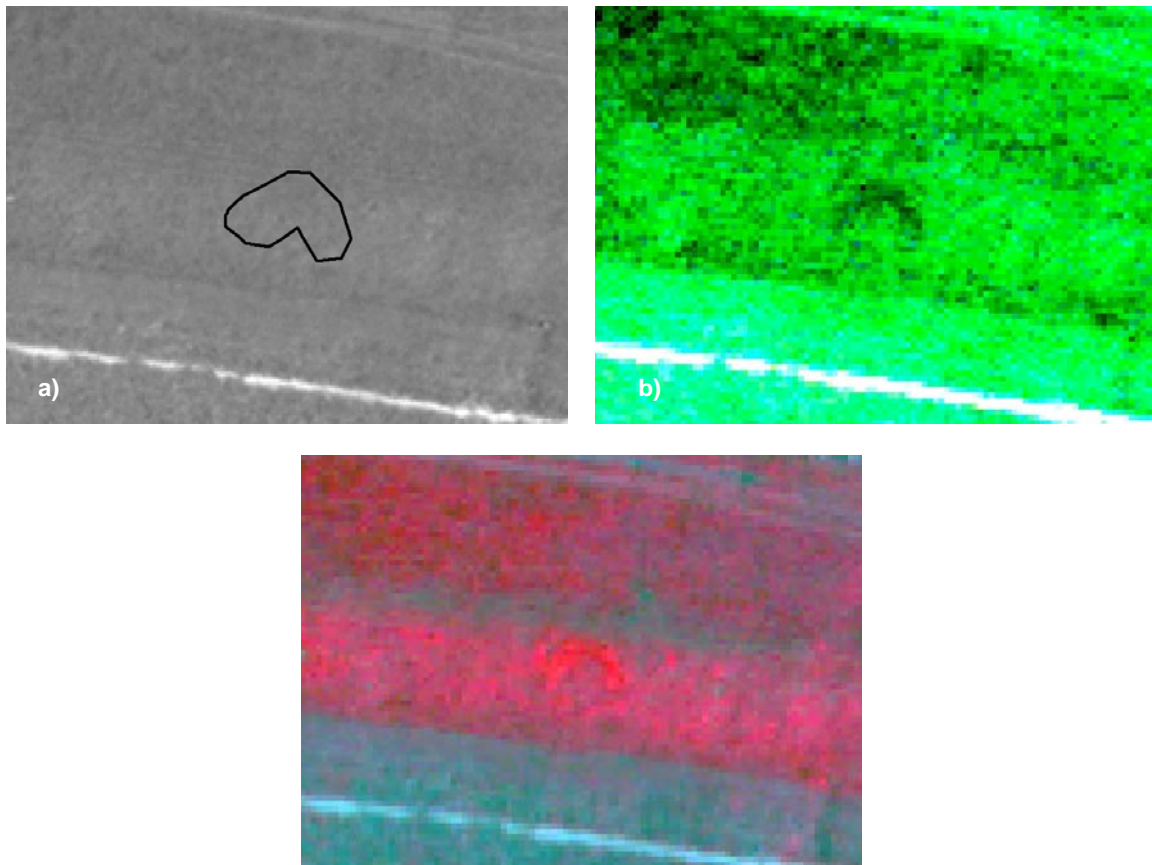


Abbildung 4-39: Identifizierung von unterschiedlichen Vitalitäten einer Pflanzenart a) panchromatisches Bild, b) Farbbild (bearbeitet) und c) Nahinfrarotbild (bearbeitet)

4.4.12 Schädigung der Grasnarbe durch Treibsel oder Wildtierpfade

Eine Kahlstelle durch Treibsel oder liegen gebliebenes Treibsel selbst ist aufgrund der Auflösung im panchromatischen Luftbild leicht erkennbar. Auch wenn der Treibselstreifen nur ein bis zwei Dezimeter breit ist, ist er aufgrund seiner länglichen Struktur im Luftbild erkennbar. Bei entsprechend größeren Ablagerungen ist das Treibsel auch im Farb- und im Nahinfrarotbild erkennbar.

Die Erkennbarkeit wird durch eine Farbveränderung der betroffenen Stelle ermöglicht. Im Digitalen Oberflächenmodell ist Treibsel oder die daraus resultierende Kahlstelle aufgrund der fehlenden Höhenauflösung nicht erkennbar.

Quer über den Deich verlaufende von Menschen oder (Wild-) Tieren verursachte Pfade können zu einer Schwächung des Deiches führen. Der in Abbildung 4-40 gezeigte Wildtierpfad lässt sich in den Fernerkundungsdaten wieder finden. Der Pfad beginnt am Waldrand und zieht sich über den Deich in das Vorland. Da der Pfad trotz des langen Zeitraumes zwischen Aufnahme der Luftbilder und Begehung des Deiches noch zu finden war, zeigt, dass er regelmäßig genutzt wird.

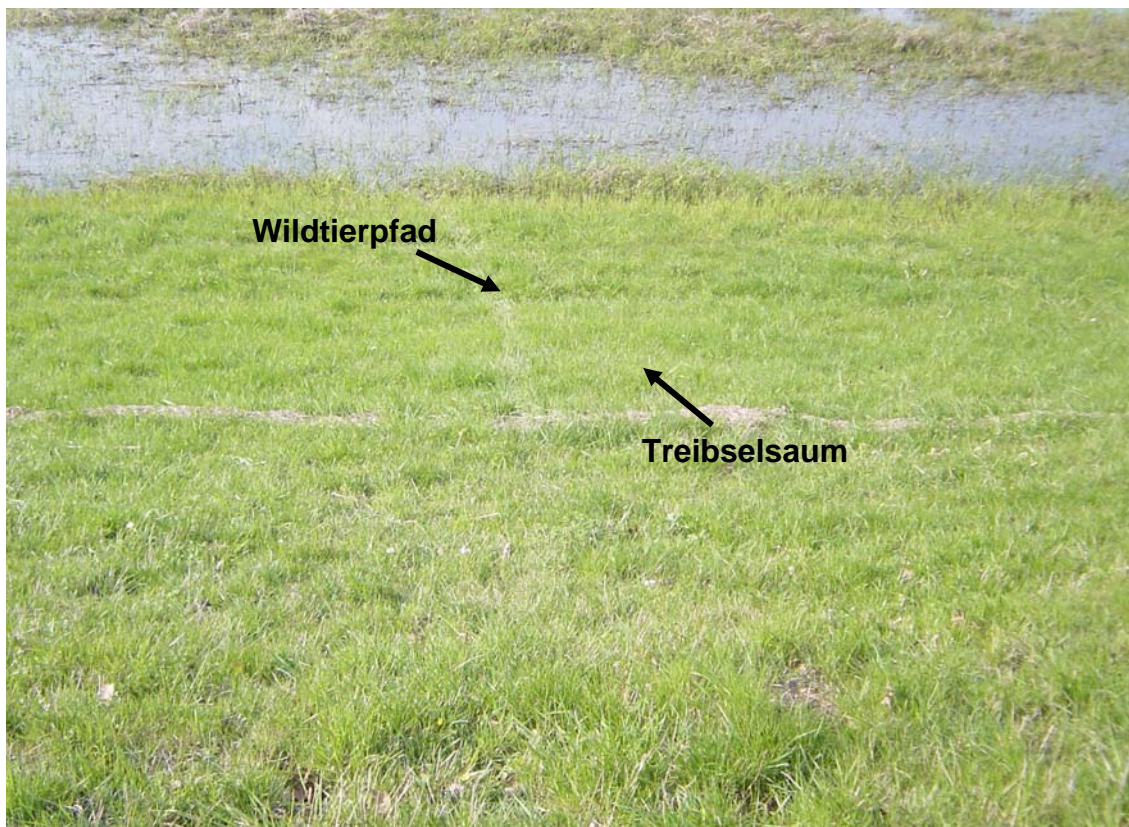


Abbildung 4-40: Wildtierpfad (vertikal) und Treibselsaum (horizontal)

Der schmale Pfad ist in den Fernerkundungsdaten schwach durch die linienförmige Struktur zu erkennen. Im panchromatischen Bild reicht der Kontrast, um den Pfad zu erfassen. Da die Vegetation auf dem Pfad kaum geschädigt und sich damit nicht vom umgebenden Bewuchs unterscheidet, ist der Pfad kaum im unbearbeiteten Farb- und Nahinfrarotbild zu erkennen. Nach einer Bearbeitung der Bilder hebt sich aber auch hier der Pfad von der Umgebung ab, Abbildung 4-41.

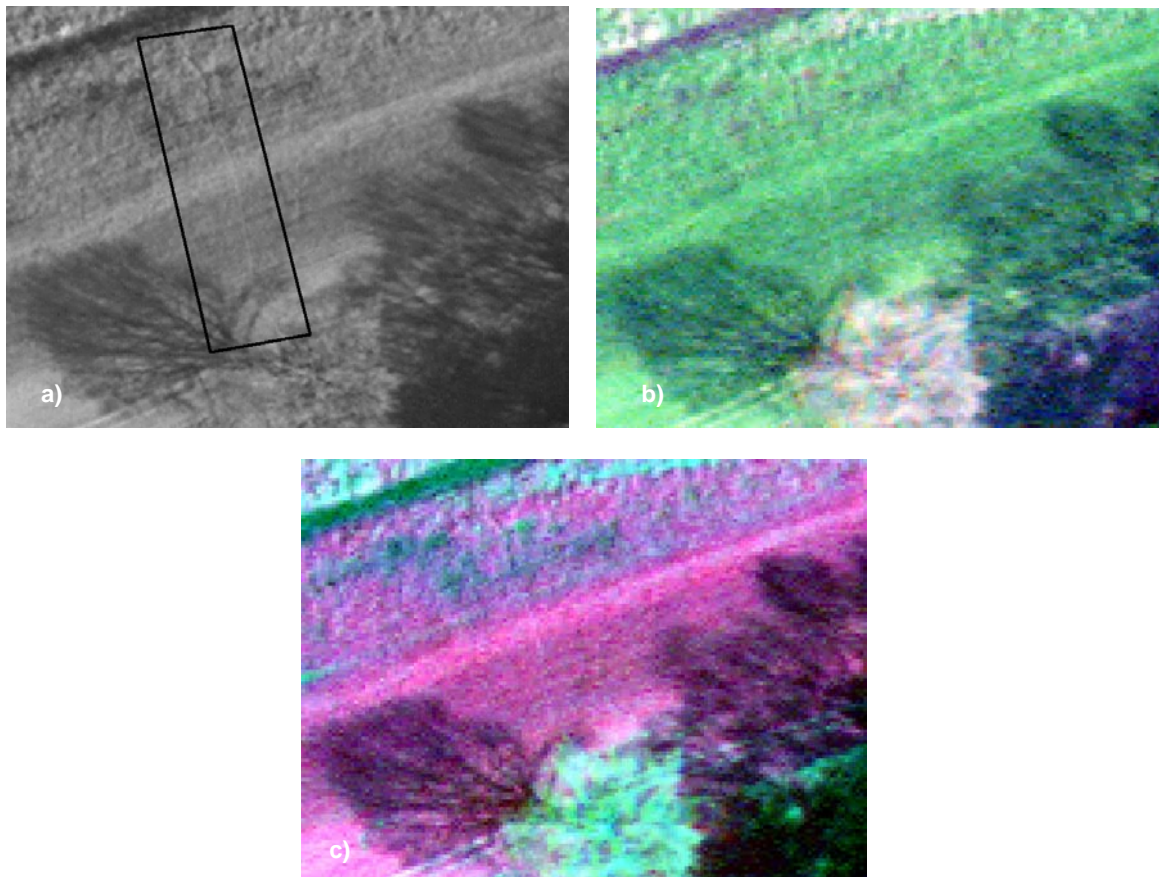


Abbildung 4-41: Wildtierpfad und Treibselsaum: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild (bearbeitet) und c) Nahinfrarotbild (bearbeitet)

4.4.13 Durchwurzelung und durch Schatten und Laub von Bäumen erzeugte Kahlstellen

Bäume, die zu nah an oder auf einem Deichkörper wachsen, können für die Deichsicherheit eine Schwachstelle darstellen. Entlang von Wurzeln können sich in einer Hochwassersituation Strömungskanäle bilden, durch die ein Durchströmen des Deiches gefördert und Material ausgetragen werden kann. Das Blattwerk von Bäumen am Deich schattet diesen ab, wodurch das Wachstum der Grasnarbe gestört wird, Abbildung 4-42. Dies kann zu größeren offenen Bereichen in der Grasnarbe führen. Auch das im Herbst fallende Laub kann zu einem Absterben des Rasens führen, wenn es zu dicht und lange die Grasfläche bedeckt.



Abbildung 4-42: Gestörte Grasnarbe auf dem Deichkörper infolge Abschattung durch einen Baum

Bäume lassen sich in den Fernerkundungsdaten der HRSC-AX Kamera sehr gut identifizieren und lokalisieren, Abbildung 4-43 a) bis d). Durch ihre Größe und Ausprägung lassen sie sich sowohl im panchromatischen als auch im Farb- oder Nahinfrarotbild gut erfassen. Im Vergleich zur Grasdecke auf dem Deich ist das Reflexionsvermögen des Baumes niedriger, so dass sich der Umriss der Baumkrone gut im Nahinfrarotbild erkennen lässt. Auch im Digitalen Oberflächenmodell sind Bäume in der Regel aufgrund ihrer Höhe gut von der Umgebung zu differenzieren. Hier steigen die Höhenwerte stark an, da das Oberflächenmodell die Höhe der Bäume mit einbezieht. Eine genaue Lagebeschreibung der Bäume kann im DOM jedoch häufig nicht erfolgen, da es im Bereich von Bäumen bzw. im Schatten der Bäume oft zu Problemen bei der Berechnung der Geländeoberflächenhöhen kommt, so dass hier gehäuft Werte fehlen.

In den Luftbildern ist Baumbewuchs gut erkennbar. Die darunter liegende Kahlstelle ist dagegen wegen der Überdeckung des Baumes nicht erkennbar, kann kausal aber vermutet werden.

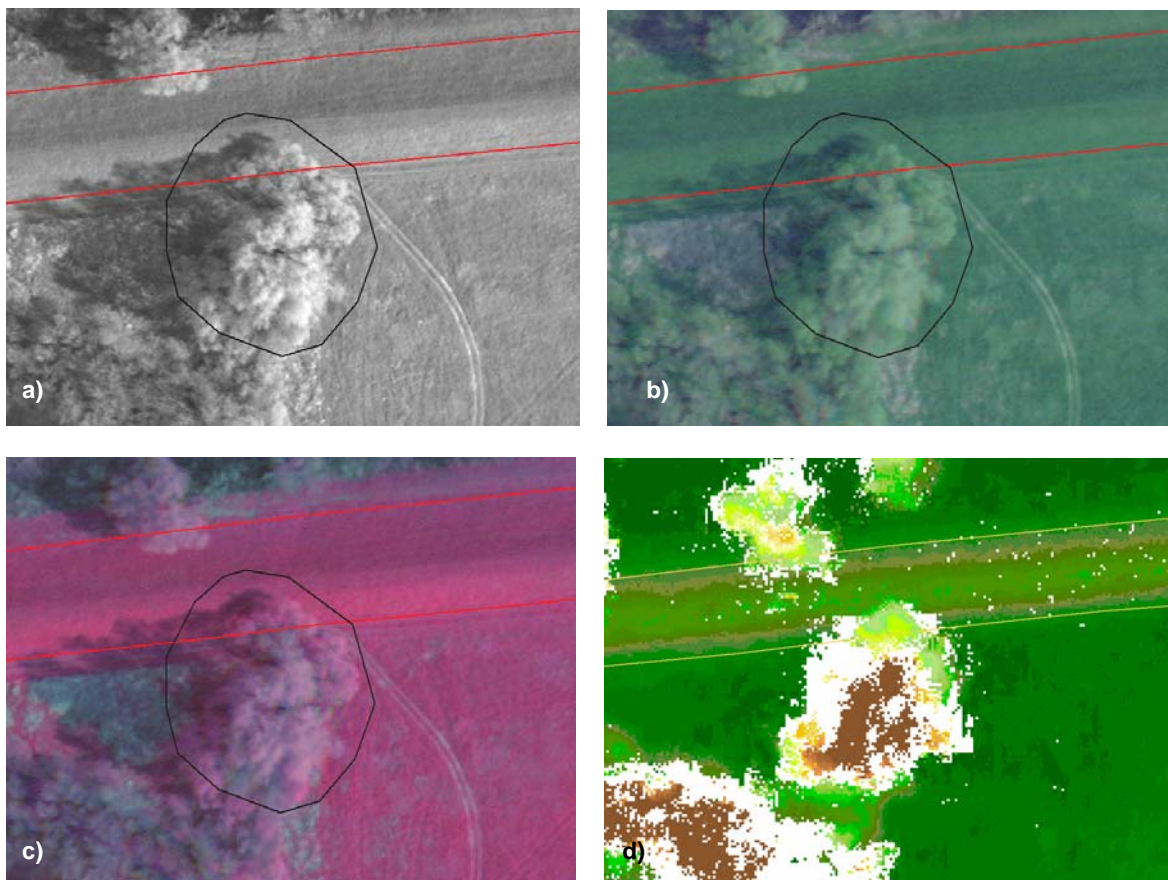


Abbildung 4-43: Identifizierung von Bäumen: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitales Oberflächenmodell

4.4.14 Bauwerke am Deich (Treppen, Gebäude, etc.)

Die Identifizierung eines Gebäudes am Deich ist sowohl in den Luftbildern als auch im Digitalen Oberflächenmodell sehr gut. Ein Schaden oder eine Erosion im Bereich eines Gebäude ist aber nicht immer erkennbar, da die Schadstelle vom Gebäude überschattet oder abgedeckt werden kann. Trichterförmige Erosionen sind sowohl im Digitalen Oberflächenmodell als auch in den Luftbildern erkennbar. Zusätzlich ist ein Materialaustrag in den Luftbildern sichtbar.

Bauwerke, wie z.B. die in Abbildung 4-44 a) bis d) dargestellte Betonfundamentplatte eines ehemaligen Mastes, lassen sich gut in den Fernerkundungsdaten erfassen. Beton- und Steinbauwerke haben meist eine typische hellgraue Farbe, die sich kontrastreich von einer Vegetationsfläche absetzt. Im höher auf-

gelösten panchromatischen Bild ist auch der Schattenwurf des Objektes scharf zu erkennen. Die Höhe des Objektes lässt sich aus den Bildern dagegen trotz Schattenwurf nur schlecht abschätzen.

Hier können Informationen aus dem Digitalen Oberflächenmodell helfen. Im dargestellten DOM-Ausschnitt ist die Höhe im Bereich des betrachteten Objektes mit der feinsten Höhenauflösung (1 dm-Schritten) farblich variiert (die gelbe Linie markiert den Verlauf des Deichfußes, der höhere Deich ist in Dunkelgrün gehalten).

Aufgrund der geringen Ausdehnung des Objektes von 2,5 x 2,5 m wird die Betonplatte nur mit 4 - 5 Zellen je Richtung im DOM erfasst. Zudem erschwert die geringe Höhe des Objekts das Auffinden im DOM, jedoch ist es bei bekannter Lage im DOM gut zu finden. Nach dem DOM hat die Betonplatte eine Höhe von 0,3 bis 0,6 m, die gemessene Objekthöhe im Gelände liegt bei 0,5 m. Die Betonplatte liegt mit seiner Ausdehnung und Höhe im unteren Grenzbereich der Erkennbarkeit im DOM, d. h. mit zunehmender Größe lassen sich Objekte sicherer erfassen und zuordnen.

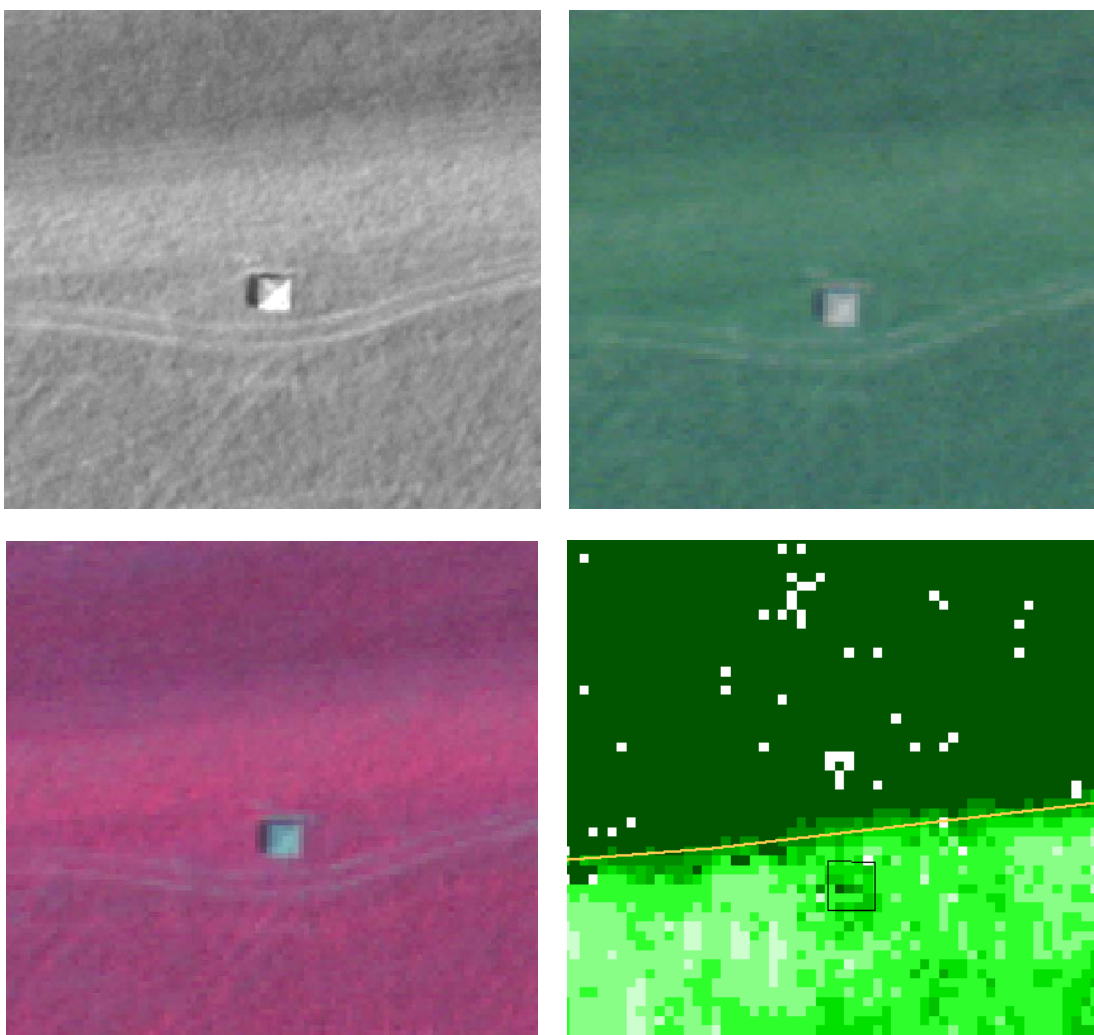


Abbildung 4-44: Identifizierung von Bauwerken - Mastfundament: a) panchromatisches Bild, b) Farbbild, c) Nahinfrarotbild und d) Digitalen Oberflächenmodell

Abbildung 4-45 zeigt die in den Fernerkundungsdaten sichtbare Betonfundamentplatte als Foto in der Natur.



Abbildung 4-45: Foto Betonfundament

4.5 Schlussfolgerungen

Wie die Verifizierung der in den Fernerkundungsdaten erfassten Anomalien zeigte, lassen sich größere Anomalien lagegenau detektieren. Bei punktuellen Auffälligkeiten muss deren Ausdehnung mindestens 50 cm betragen. Bei linienförmigen Strukturen reicht eine Breite von ca. 20 cm, um in den Fernerkundungsdaten wiedergegeben zu werden. Die heute mögliche räumliche Auflösung der Bilddaten, die im panchromatischen Bild 20 cm, im Farb- und Nahinfrarotbild 40 cm und im Digitalen Oberflächenmodell 50 cm beträgt, reicht damit nicht aus, um kleinere Anomalien (Maulwurfshügel, Zaunpfähle, u. ä.) zu erkennen.

Um eine optimale Auswertung der Fernerkundungsdaten zu gewährleisten, müssen Befliegung, Auswertung und Begehungen in der Natur in einem engen Zeitrahmen erfolgen.

Im panchromatischen Luftbild lassen sich Kontraste gut erkennen. Aufgrund der hohen Auflösung sind Details deutlich zu erkennen. Lokale Merkmale, die sich durch helle und dunkle Bereiche, wie zum Beispiel Schatten, unterscheiden, lassen sich gut erkennen. Da im panchromatischen Luftbild nur Helligkeitswerte wiedergegeben werden, lassen sich Farbunterschiede mit gleicher Helligkeit kaum erkennen.

Im Farbbild lassen sich Farbunterschiede gut erkennen. Die Kontrastschärfe leidet jedoch unter der geringeren Auflösung, so dass sich kleinräumige Objekte nur schwer abgrenzen lassen. Größere flächenhafte Unterschiede lassen sich im Farbbild oft besser erkennen als im panchromatischen Luftbild.

Das Nahinfrarotbild gibt Vegetation gut wieder. Vegetationslose Flächen und damit potentiell durch Erosion gefährdete Bereiche erscheinen ohne Rotfärbung. Durch die geringe Auflösung des Bildes verliert der Kontrast jedoch auch hier an Schärfe.

Das verwendete Digitale Oberflächenmodell bietet sich für die großräumige Geländeerfassung an. Anders als ein Digitales Geländemodell gibt das Oberflächenmodell jedoch nicht die genaue Geländehöhe wieder, sondern die Oberfläche in die die Höhe von Pflanzen und Gebäuden mit eingeht. Für die Höhenbestimmung eines Deichs kann ein DOM herangezogen werden, wenn der Deichabschnitt nicht von hochwüchsigen Pflanzen (Büsche, hohes Gras) bedeckt ist.

Es ist darauf zu achten, dass die Überfliegung zu einer Zeit stattfindet, in der das Gras auf dem Deich nicht hoch steht, das heißt kurz nach dem Mähen oder außerhalb der Wachstumsperiode. Im Bereich von Gewässern, im Schatten von Bäumen aber auch auf Flächen mit parallel verlaufenden Ackerfurchen kommt es gehäuft zu Fehlinterpretationen der Oberflächenhöhe. Im DOM fehlen an solchen Stellen die Höhenzuweisungen.

5 Untersuchungen an einem Labordeich

5.1 Aufbau des Labordeichs und Meßeinrichtung

Zum Testen der Einsatzfähigkeit unterschiedlicher Fernerkundungssensoren unter variablen meteorologischen Randbedingungen, zu deren Kalibrierung sowie zur kontrollierten Darstellung der Bodenfeuchte durch Sickerwasser und anderer Schäden wurde ein Drei-Zonen-Deich am Franzius-Institut der Universität Hannover in der Außenstelle Marienwerder geplant und gebaut (s. Beitrag von Christoph Paesler in diesem Heft).

5.2 Versuchsdurchführung

Der Versuchsdeich lässt die Simulation und Darstellung von Durchsickerungen des Deichs bei unterschiedlicher Materialzusammensetzung, Bepflanzung, Belastungsdauer und Witterung zu. Hierdurch ist die Analyse der Visualisierbarkeit bestimmter deichtypischer Schadensmerkmale, wie z.B. Sickerwasser-
austritte an der Binnenböschung, möglich. Diese werden durch Veränderungen der oberflächennahen Bodenfeuchtigkeit nachgewiesen. Ziel der Versuche war es, den Deich an definierten Stellen durchfeuchten zu lassen, sowie unterschiedliche Vegetationen und Vegetationszustände zu untersuchen.

Ein Einstau erfolgte, bis eine vollständige Durchsickerung des Deichs erreicht war. Hierfür waren in der wasserseitigen Böschung definierte Durchlassstellen im Deich: je drei Öffnungen, 1,0 m über der Sohle, 1,5 m über der Sohle 2,0 m über der Sohle. Eine Öffnung konnte auch während eines Einstaus geöffnet und geschlossen werden, um auch Schädigungen und plötzliche Durchsickerungen simulieren zu können. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 zeigen Öffnungen auf der wasserseitigen Deichböschung. Zwei Öffnungen im horizontalen Einstaubereich dienten zur Entwässerung der Außenböschung nach Beendigung der Versuche.

Die Untersuchungen erfolgten zu unterschiedlichen Tageszeiten und meteorologischen Randbedingungen, um die erfolgsversprechendsten Einsatzzeiten bzw. die natürlichen Randbedingungen für den Einsatz der Fernerkundungssensoren zu ermitteln. Zum Vergleich der physikalischen Messungen am Deich mit Daten der Fernerkundungssensoren diente die oberflächennahe Temperatur und die oberflächennahe Bodenfeuchtigkeit.

Für die Auswertung der Versuche wurden daher die am Deich gemessenen oberflächennahen Bodentemperaturen direkt mit den kalibrierten Werten der Thermal-Kamera verglichen und für die Analyse von gemessenen Bodenfeuchtigkeiten berechnete Feuchtigkeitswerte aus den Fernerkundungsdaten herangezogen. Die Ermittlung der Bodenfeuchtigkeiten diente dazu, Sickerwasseraustritte mit Hilfe der Sensordaten zu identifizieren.



Abbildung 5-1: Foto der Öffnungen auf der wasserseitigen Böschung des Deiches

werden vernachlässigt. Jedoch gibt es im Modell durch die als gemeinsam (für bedeckten und unbedeckten Boden) angenommene Bodentemperatur und -feuchte eine gegenseitige Beeinflussung von bedecktem und unbedecktem Bodenanteil.

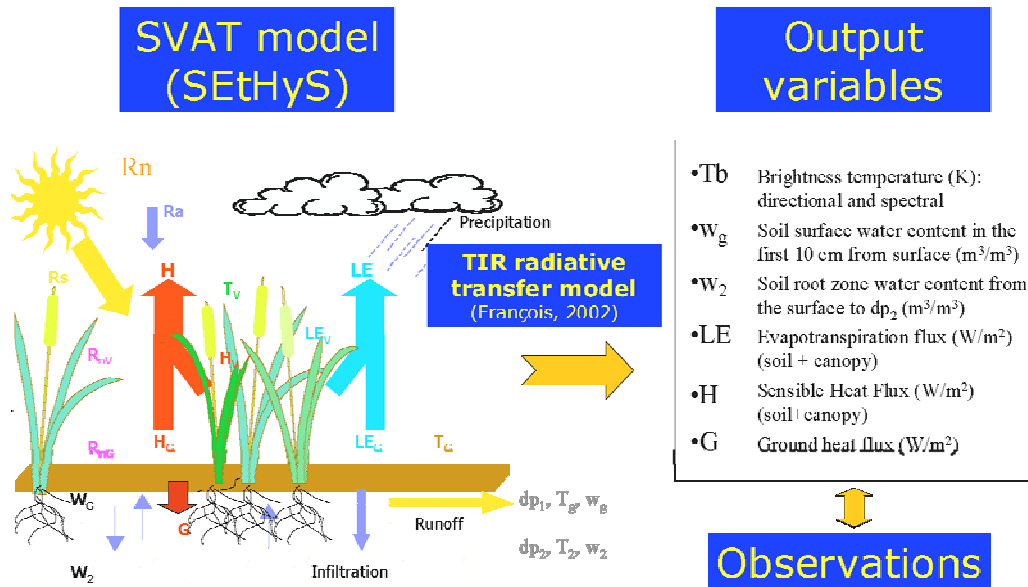


Abbildung 5-3: Prinzip der Funktionsweise und Randbedingungen beim SVAT-Modell (Thonfeld, 2000)

Für die Berechnung des Wassertransports im Boden wird im SVAT Modell folgende Gleichung verwendet

$$-\frac{\partial V}{\partial z}(z) + Q(z) = PO \cdot \frac{\partial s(z)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(PO \cdot D(s) \frac{\partial s(z)}{\partial z} + K_f(s) \right) + Q(z) \quad \text{Gleichung 5-1}$$

$V(z)$ bezeichnet hierbei den Wasserfluss [$m^3/(m^2s)$], $Q(z)$ den Wasserabfluss zu den Wurzeln [$m^3/(m^2sm)$] mit m^3 Wasser pro m^2 Grundfläche pro m Schichtdicke pro s], PO bezeichnet den von der Bodenart abhängigen Anteil von Poren pro Bodenvolumen [ca. $0.5 m^3/m^3$], $D(s)$ kennzeichnet die hydraulische Diffusivität [m^2/s], s den Bodenwassergehalt bezogen auf das Porenvolumen [m^3/m^3] und K_f bezeichnet die hydraulische Leitfähigkeit [m/s].

Die für die Berechnungen benötigten Randbedingungen lauten

$$V(0) = \frac{L_g}{L_v \cdot \rho_w} \quad \text{und} \quad \frac{\partial s}{\partial z}(z_a) = 0 \quad \text{Gleichung 5-2}$$

Hierbei ist L_g der latente Wärmefluss im Boden [J/kg], L_v ist die Verdampfungswärme [J/kg] und ρ_w bezeichnet die Dichte des Wassers.

Aus der Kontinuität des Wassertransports folgen unmittelbar die ersten beiden Äquivalenzen der o.g. Gleichungen. Für den Wasserfluss wird folgender Gradientenansatz gewählt:

$$V = -K_f \nabla(\Psi + z) \quad \text{Gleichung 5-3}$$

Hierbei beschreibt Ψ das Matrixpotential des Wassers in der Tiefe z . Berücksichtigt werden hier für Ψ nur die Kapillarkräfte, mit denen das Wasser von der Bodenkrume festgehalten wird und der Term z welcher

die Gravitationskraft im Potentialansatz darstellt. Mit der o.g. Gleichung und unter Definition der horizontalen Homogenität mit

$$D(s) = \frac{K_f(s)}{PO} \cdot \frac{\partial \Psi(s)}{\partial s}$$

Gleichung 5-4

wird die dritte Äquivalenz zur Berechnung der Bodenfeuchte erhalten:

**Fehler! Es ist nicht möglich, durch die Bearbeitung von Feldfunktionen Objekte zu erstellen.
Gleichung 5-5**

Um eine Bodenfeuchtermittlung mit Hilfe des SVAT Modells vorzunehmen sind folgende Vereinfachungen getroffen wurden:

- keine Berücksichtigung von Phasenübergängen
- Vernachlässigung von osmotischen und pneumatischen Druckpotentialen
- Vernachlässigung von Gradienten der Bodentemperatur
- Vereinfachte Berücksichtigung des Wasserdampftransports

Die Darstellungen der Berechnungen des SVAT Modells sind hier nur verkürzt wiedergegeben. Eine ausführliche Beschreibung zur Bestimmung der Bodenfeuchte der obersten Schicht unter unvollständiger Vegetation mittels Multisensordaten findet sich in Thonfeld (2000).

5.4 Ergebnisse der Laborversuche

Im Folgenden werden einige signifikante Ergebnisse aus dem umfangreichen Versuchsprogramm wiedergegeben.

5.4.1 Versuchsreihe 1 - 09.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - keine künstliche Schädigung

Die erste Versuchsreihe wurde vom 09.08.2004 bis 12.08.2004 durchgeführt. Es wurde hierbei keine künstliche Schädigung in die Deichaußenböschung eingebaut. Die äußeren Bedingungen waren optimal, d.h. heiteres Wetter mit einem hohen Sonnenstand ohne Niederschlag.

Abbildung 5-4 zeigt eine Thermalinfrarot(TIR)-Aufnahme des Deichs während der Versuchsreihe 1. Auf der rechten Seite ist die wasserseitige Böschung zu sehen, im Hintergrund eine Seitenwand mit dem Umlauf.

In Abbildung 5-5 sind Versuchsergebnisse der ersten Versuchsreihe für Messquerschnitt 2 dargestellt. Neben den meteorologischen Randbedingungen sind Messergebnisse aus dem Labordeich zum Vergleich mit den Ergebnissen der Messung mit Thermalinfrarot-Sensor und aus dem SVAT Modell wiedergegeben.

Aufgrund der optimalen Randbedingungen sowie einer geringen Durchsickerung, hervorgerufen durch Umläufigkeiten im Bereich des Anschlusses der wasserseitigen Böschung mit der PEHD-Dichtungsbahn am Rand, sind sehr gute Übereinstimmungen von Messdaten mit den Sensordaten zu erkennen.

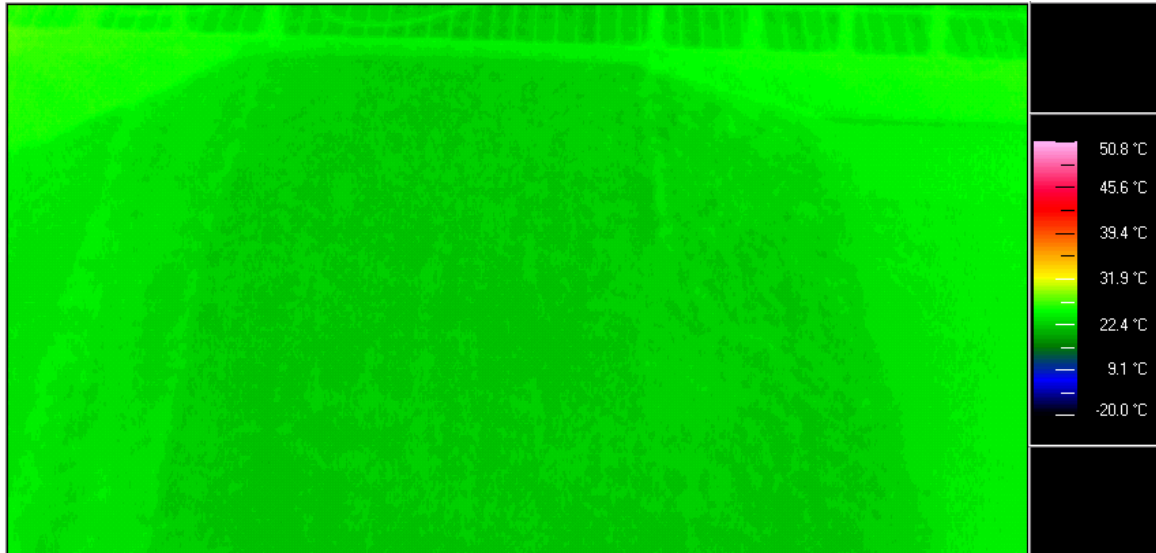


Abbildung 5-4: Thermal Infrarot (TIR) Aufnahme des Deichversuchs während der Versuchsreihe 1 - 09.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - keine künstliche Schädigung

Anhand der Messung in der Dränungleitung, sowie der Messung mit den Wasseruhren ist zu erkennen, dass keine Durchsickerung bis zum binnenseitigen Deichfuß festzustellen ist. Die Messungen zeigen auch, dass eine Berechnung der oberflächlichen Bodenfeuchte mit Hilfe eines SVAT Modells aus Fernerkundungsdaten unter optimalen Bedingungen möglich ist.

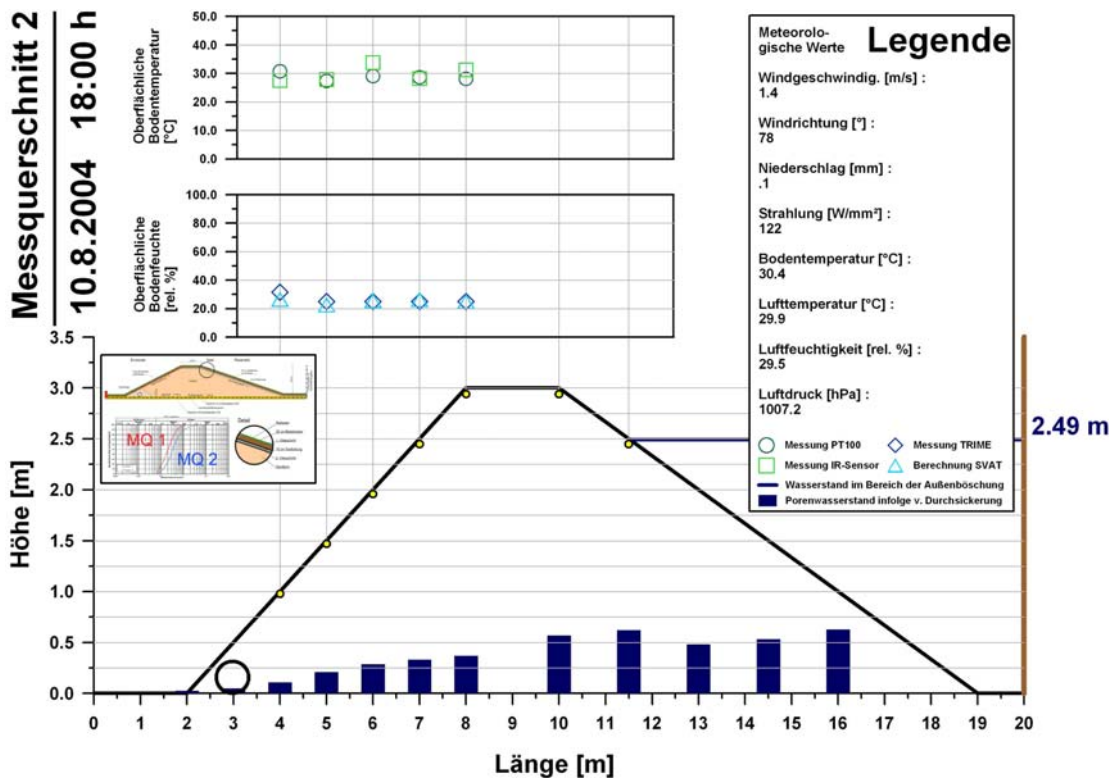


Abbildung 5-5: Messergebnisse der Versuchsreihe 1 - 09.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - MQ 2 - 24 h nach Beginn des Einstaus - keine künstliche Schädigung

Abbildung 5-6 zeigt die Ansicht des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 1 am 13.08.2004.



**Abbildung 5-6: Ansicht des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 1 - 09.08.2004
- optimale äußere Bedingungen - keine künstliche Schädigung**

5.4.2 Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung

In gleicher Weise wie im vorherigen Kapitel beschrieben, werden in Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-10 die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 2 vom 23.08.2004 bis 27.08.2004 dargestellt.

In diesem Fall wurde ein geringer künstlicher Schaden in den Deich simuliert. Insgesamt ist die Durchsickerungsrate durch den kleinen Schaden während dieser zweiten Versuchsreihe als sehr gering anzusehen, so dass keine komplette Durchsickerung des Deichs erreicht werden konnte. Die erhöhten Bodenfeuchtigkeitswerte im Bereich der Messposition 10 nach 36 h Versuchsdauer deuten jedoch auf eine höhere Durchsickerung gegenüber der ersten Versuchsreihe.

Auch in diesem Fall herrschen optimale äußere Bedingungen. Auch bei der Versuchsreihe 2 sind sehr gute Übereinstimmungen zwischen den gemessenen Laborwerten und den gemessenen und berechneten Fernerkundungsdaten erkennbar.

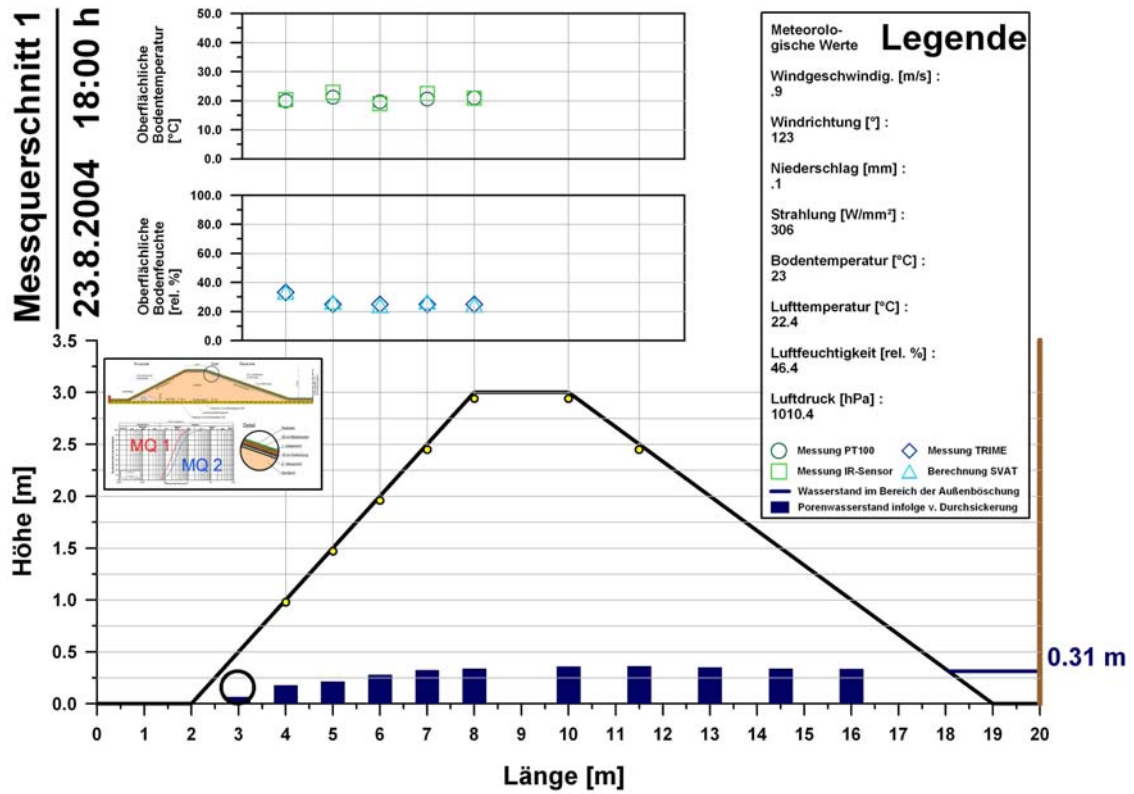


Abbildung 5-7: Messergebnisse der Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung - MQ 1 - zu Beginn des Einstaus

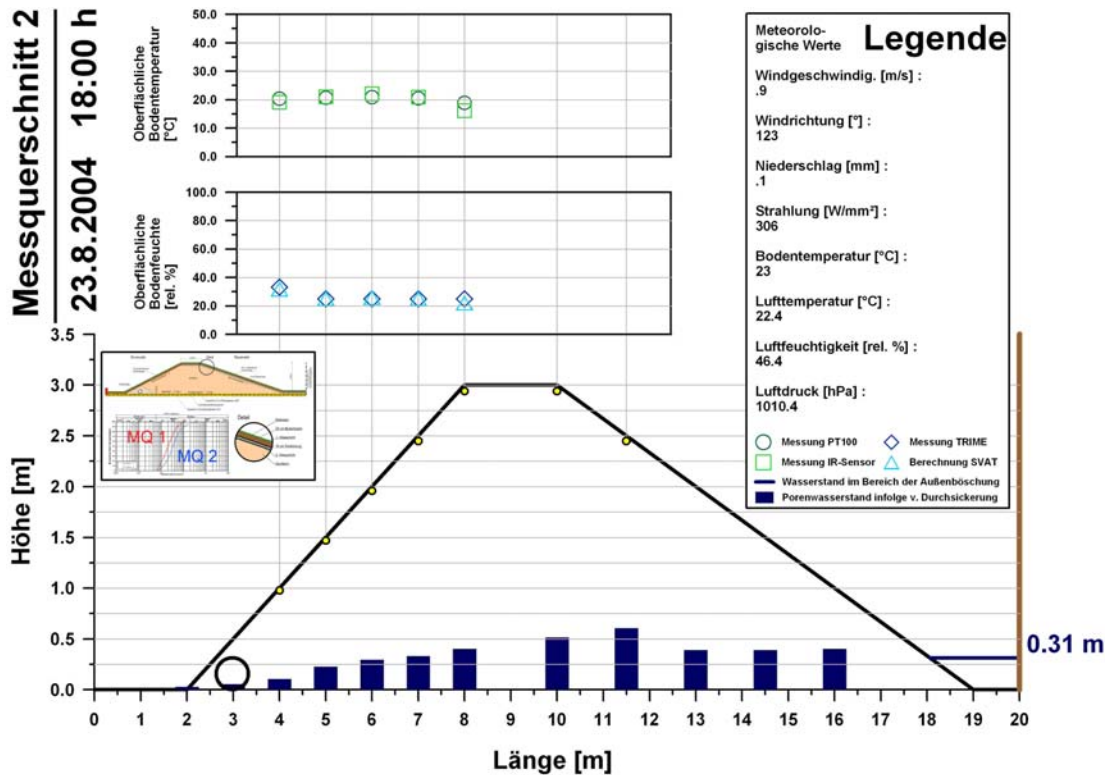


Abbildung 5-8: Messergebnisse der Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung - MQ 2 - zu Beginn des Einstaus

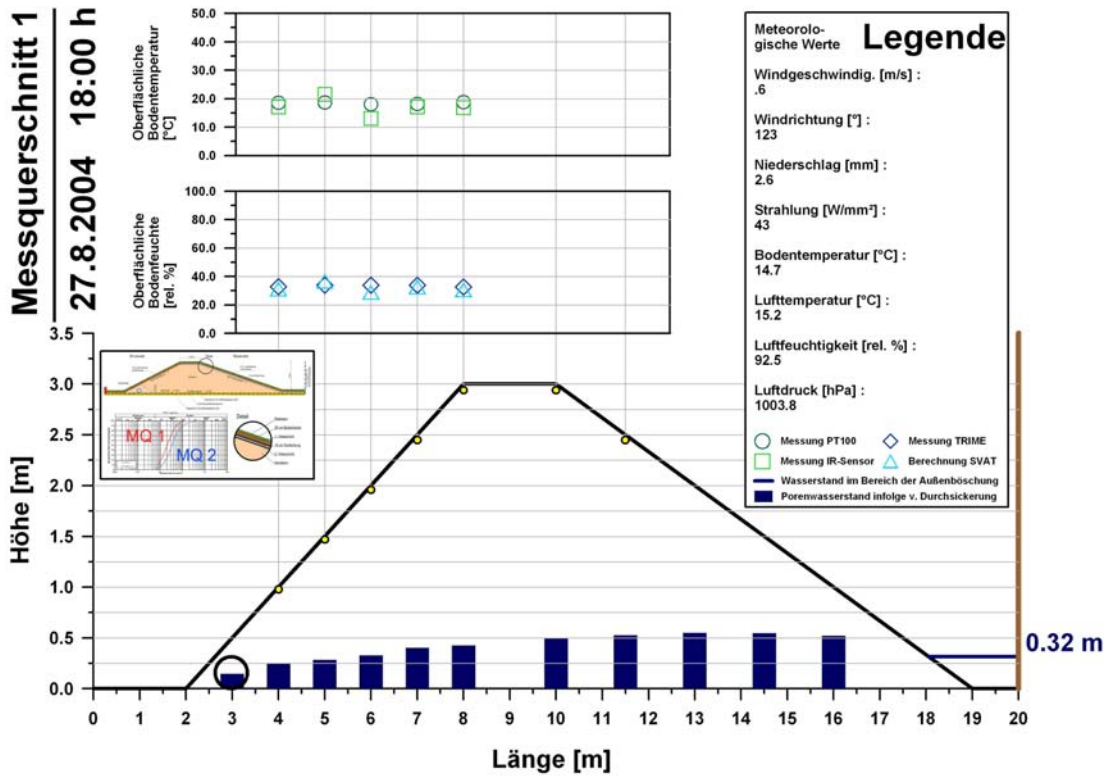


Abbildung 5-9: Messergebnisse der Versuchsreihe 2 - 27.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung - MQ 1 - nach Beendigung des Versuchs

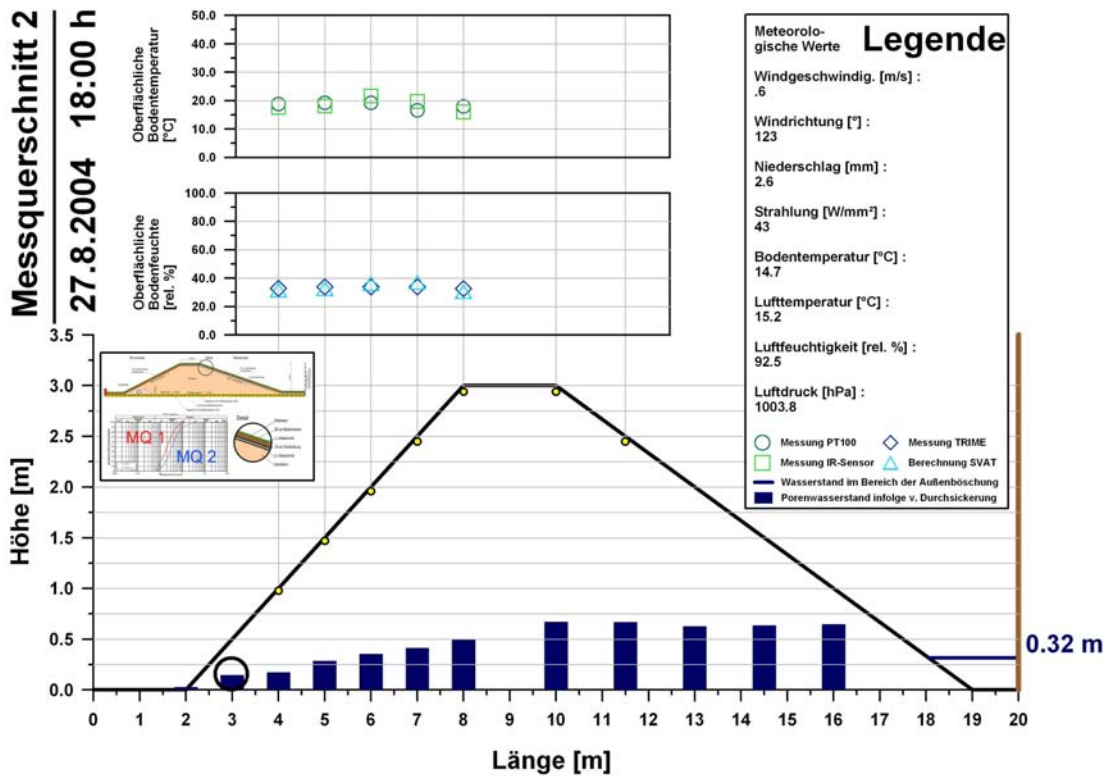


Abbildung 5-10: Messergebnisse der Versuchsreihe 2 - 27.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung - MQ 2 - nach Beendigung des Versuchs

Abbildung 5-11 zeigt eine Thermalinfrarot-Aufnahme des Deichs während der zweiten Versuchsreihe mit dem gleichen Ausschnitt, wie er auch in der ersten Versuchsphase gewählt wurde.

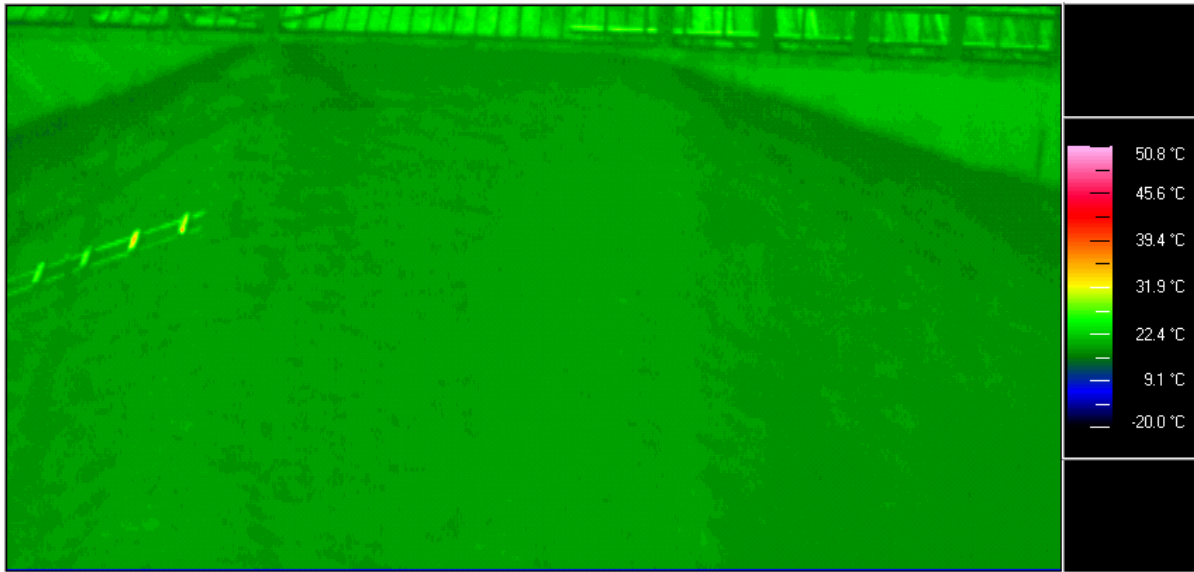


Abbildung 5-11: Thermalinfrarot (TIR)-Aufnahme des Deichs während der Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung

Abbildung 5-12 zeigt die Ansicht der binnenseitigen Böschung des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 2 am 28.08.2004.



Abbildung 5-12: Ansicht der Luftseite des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 2 - 23.08.2004 - optimale äußere Bedingungen - geringe künstliche Schädigung

5.4.3 Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - Komplette Durchsickerung - Optimale äußere Bedingungen

Um eine erhöhte Durchsickerung und eine möglichst komplette Durchsickerung des Deichs mit einem Sickerwasseraustritt auf der binnenseitigen Böschung zu simulieren, sind bei der dritten Versuchsreihe vom 27.09.2004 bis 09.10.2004 mehrere nicht steuerbare Öffnungen in die wasserseitige Böschung des Deichs eingebaut worden (Abbildung 5-13 rechts). Zudem wurde die Standzeit des Wassers auf die wasserseitige Deichaußenböschung verlängert.



Abbildung 5-13: Steuerbare (links) und weitere nicht steuerbare Öffnungen in der wasserseitigen Böschung des Deichs (rechts) während des Einstaus bzw. während des Einbaus

Dies führte zu einer vollständigen Durchsickerung des Deiches, wie auch an den erhöhten Porenwasserständen im Deichinneren nach etwa 15 h Belastung erkennbar ist. Auch während dieses Versuchs herrschten optimale Randbedingungen. Mit den Mess- und Fernerkundungsdaten sind wiederum gute Übereinstimmungen und auch die Detektion von Sickerwasser ist erkennbar, Abbildung 5-14, äußerst linker Rand.

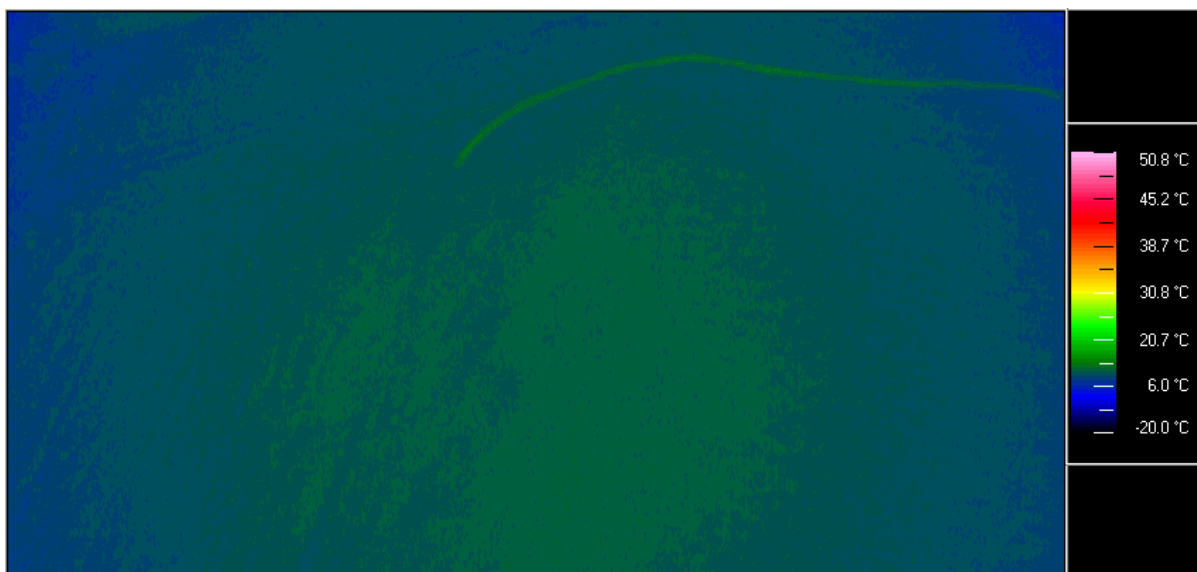


Abbildung 5-14: TIR Aufnahme des Deichs während der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung

Abbildung 5-15 bis Abbildung 5-19 geben die Versuchsergebnisse der dritten Versuchsreihe wieder.

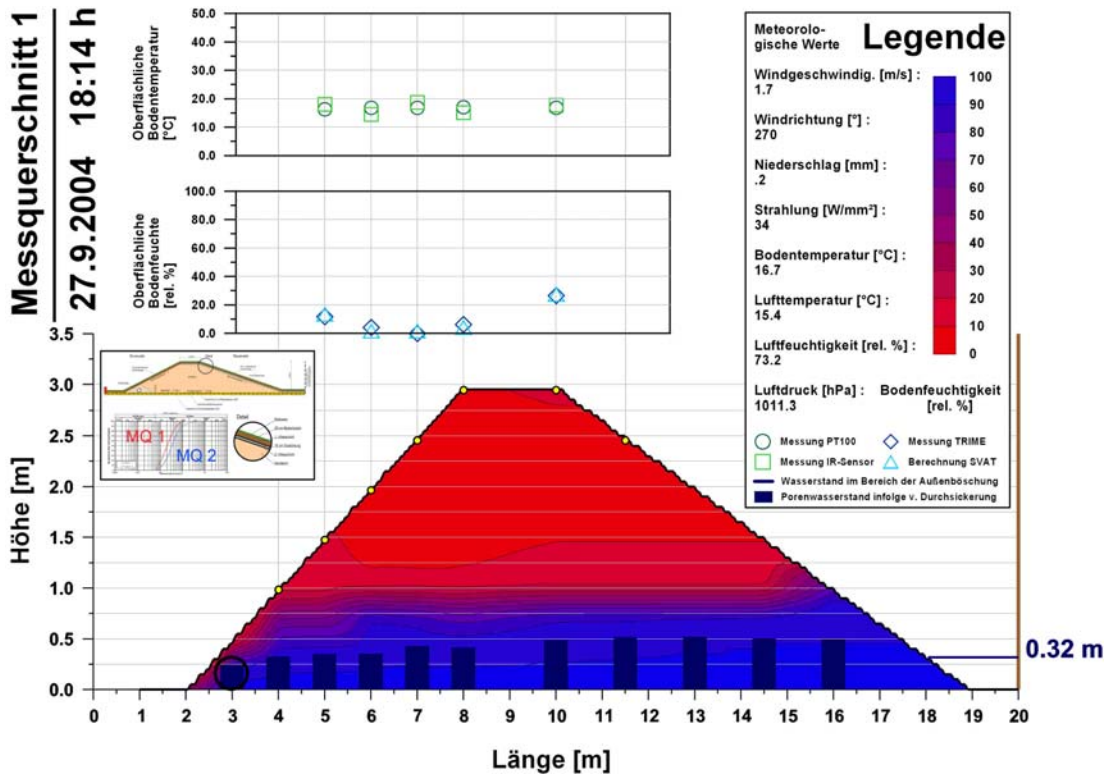


Abbildung 5-15: Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 1 - zu Beginn des Einstaus

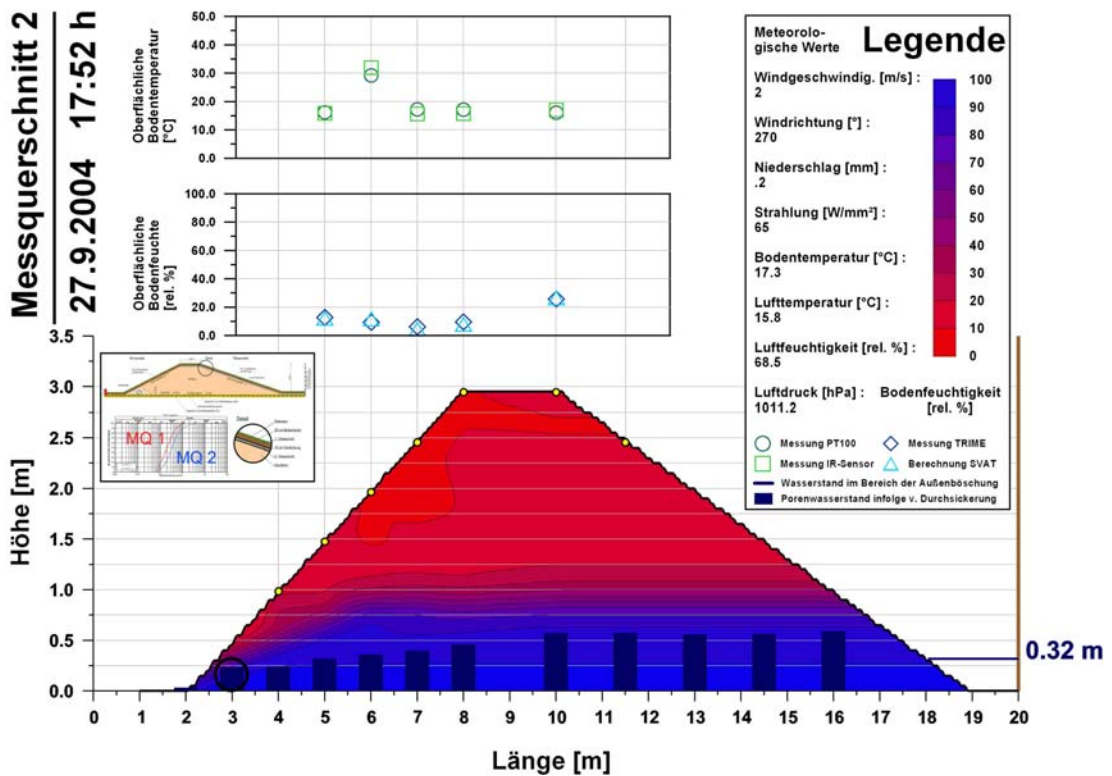


Abbildung 5-16: Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 2 - zu Beginn des Einstaus

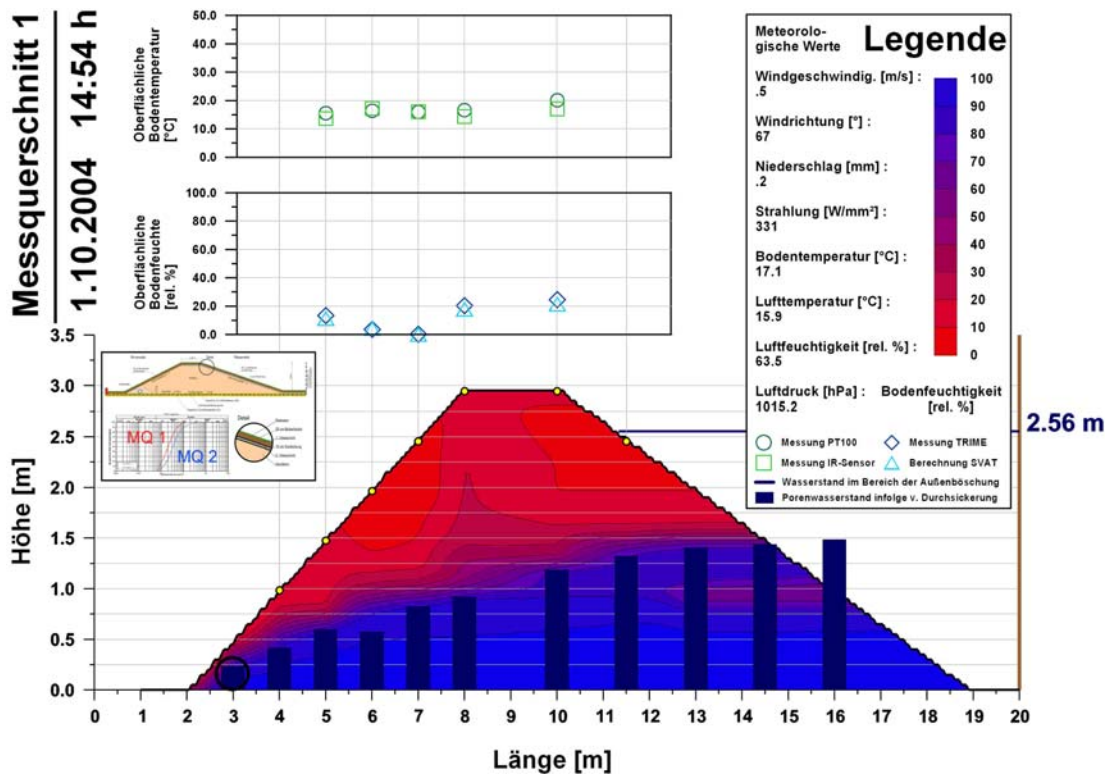


Abbildung 5-17: Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 1 - 68 h nach Beginn des Einstaus

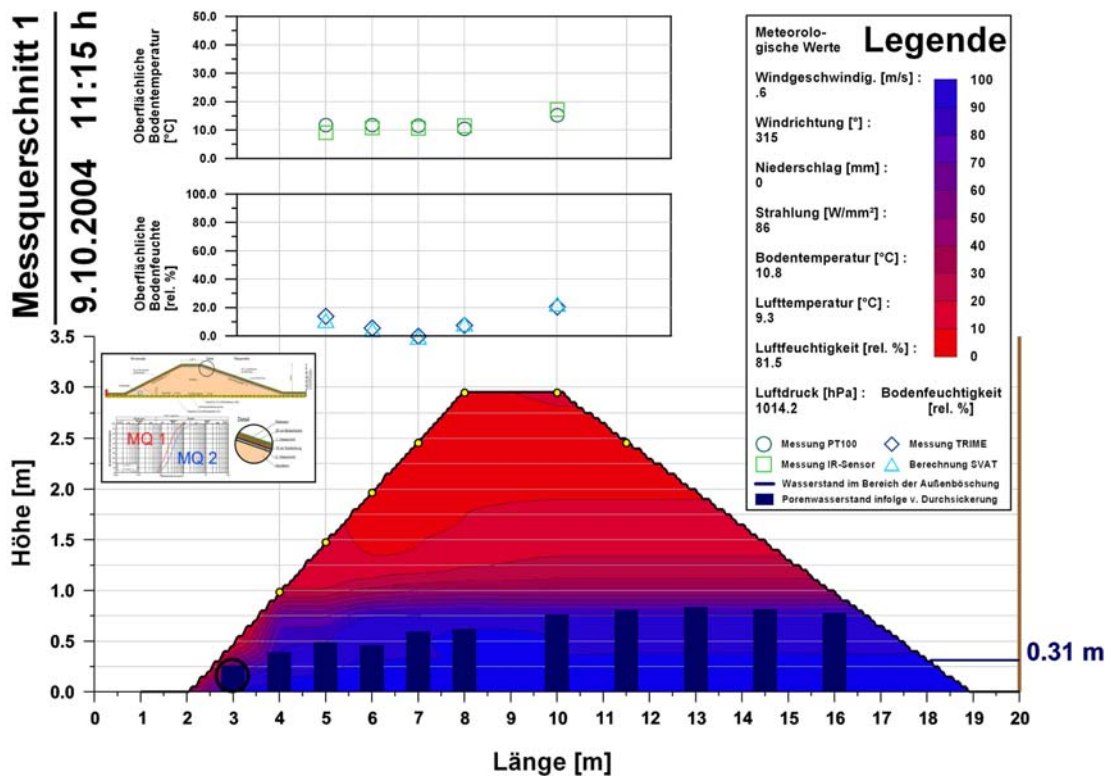


Abbildung 5-18: Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 1 - nach Beendigung des Versuchs

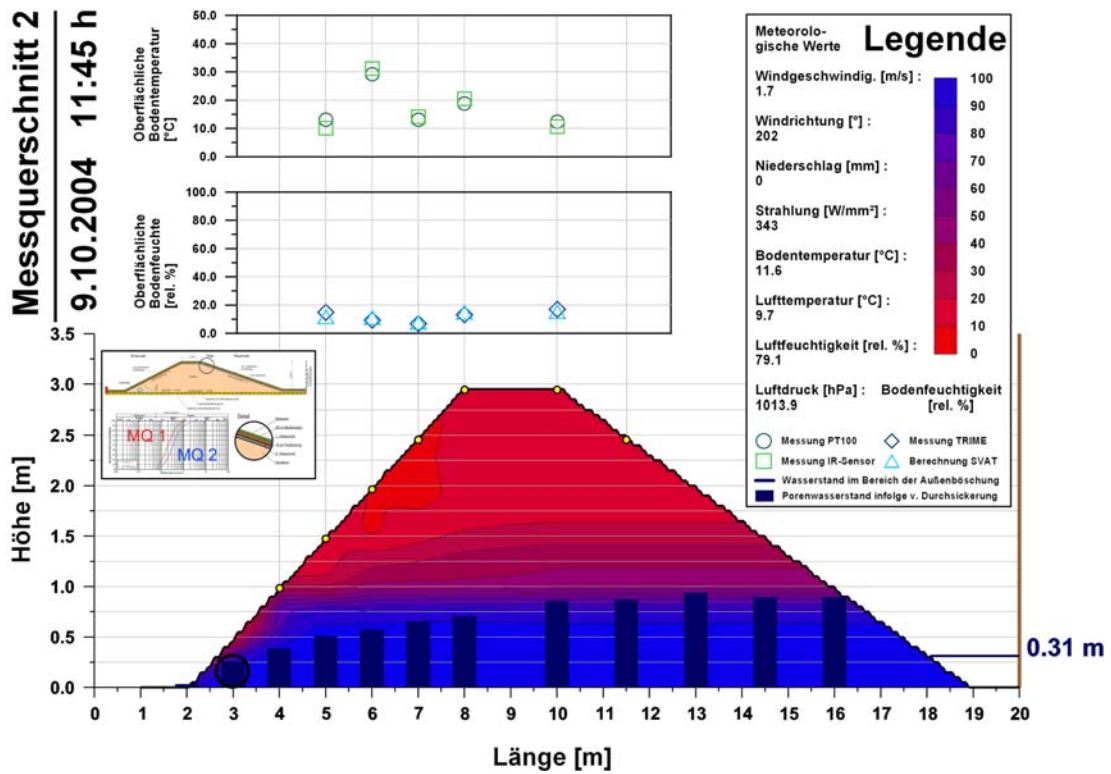


Abbildung 5-19: Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 2 - nach Beendigung des Versuchs

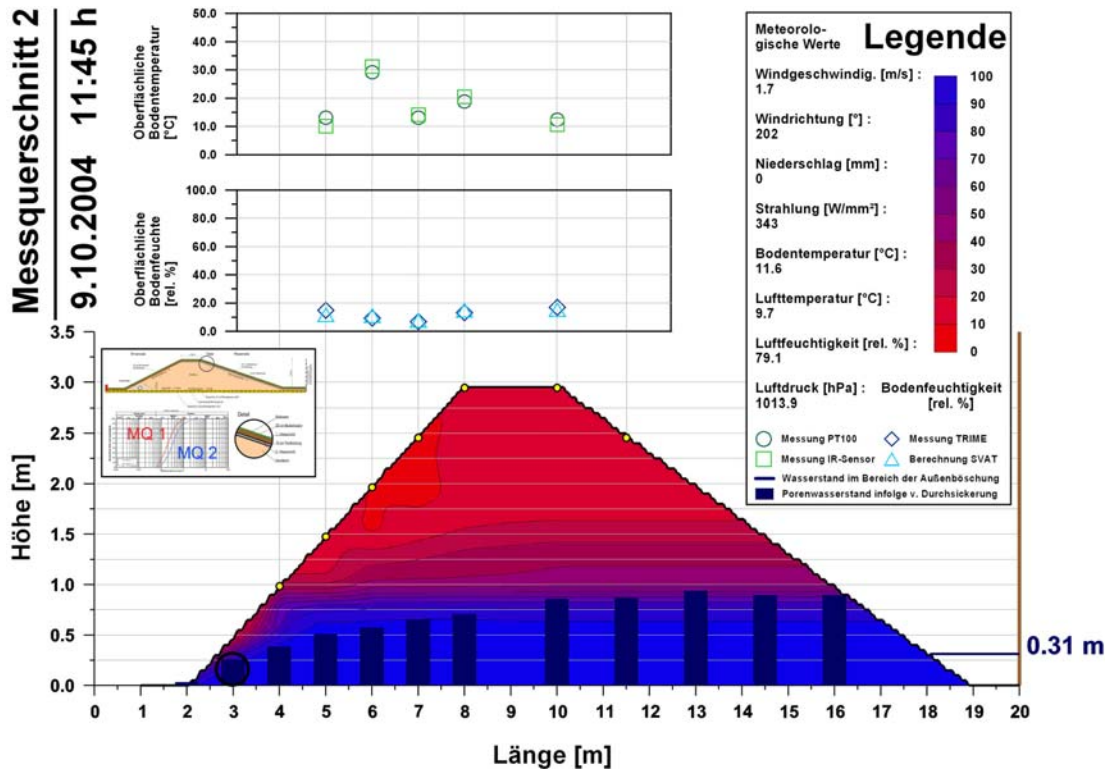


Abbildung 5-20: Messergebnisse der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - Optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung - MQ 2 - nach Beendigung des Versuchs

Abbildung 5-21 zeigt die Ansicht der luftseitigen Böschung des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 3 am 10.10.2004.



Abbildung 5-21: Ansicht des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 3 - 27.09.2004 - optimale äußere Bedingungen - komplette Durchsickerung

5.4.4 Versuchsreihe 04. - 09.09.2005 - Komplette Durchsickerung - Niederschlag

Die vorherigen Versuchsreihen wurden unter optimalen äußeren Bedingungen durchgeführt. In der vierten Versuchsreihe sind weniger optimale meteorologische Randbedingungen durch Erzeugung eines hohen Niederschlages (12,9 mm) für eine thermographische Untersuchung berücksichtigt, Abbildung 5-22 bis Abbildung 5-27.

Wie in Versuchsreihe 3 wurde hier eine komplette Durchsickerung des Deichs mit Sickerwasseraustritt im Bereich der luftseitigen Böschung simuliert. In den Ergebnisdarstellungen ist erkennbar, dass der hohe Niederschlag während der Versuche zu einer stärkeren Durchfeuchtung der Deichoberfläche führte. Obwohl die Messungen der oberflächennahen Bodentemperatur und der Daten der Thermalinfrarot-Kamera noch gute Übereinstimmungen aufzeigen, führt der erhöhte Niederschlag zu unterschiedlichen Berechnungsergebnissen der oberflächlichen Bodenfeuchte. Im Modell ist die Ermittlung der Bodenfeuchte aufgrund von Sickerwasser nicht mehr von der Durchfeuchtung in Folge von Oberflächenwasser zu trennen. Hierdurch kommt es zu erheblichen Streuungen zwischen Messungen der Bodenfeuchte und Berechnungen mit dem Soil Vegetation Atmosphere Transfer Modell.

Es ist festzustellen, dass bei nicht optimalen äußeren Bedingungen, wie Niederschlag, die Detektion von Sickerwasserstellen an Deichen und die Ermittlung von Bodenfeuchte aus Fernerkundungsdaten mit Hilfe von Thermalinfrarot-Sensoren nur mit großen Streuungen erfolgt.

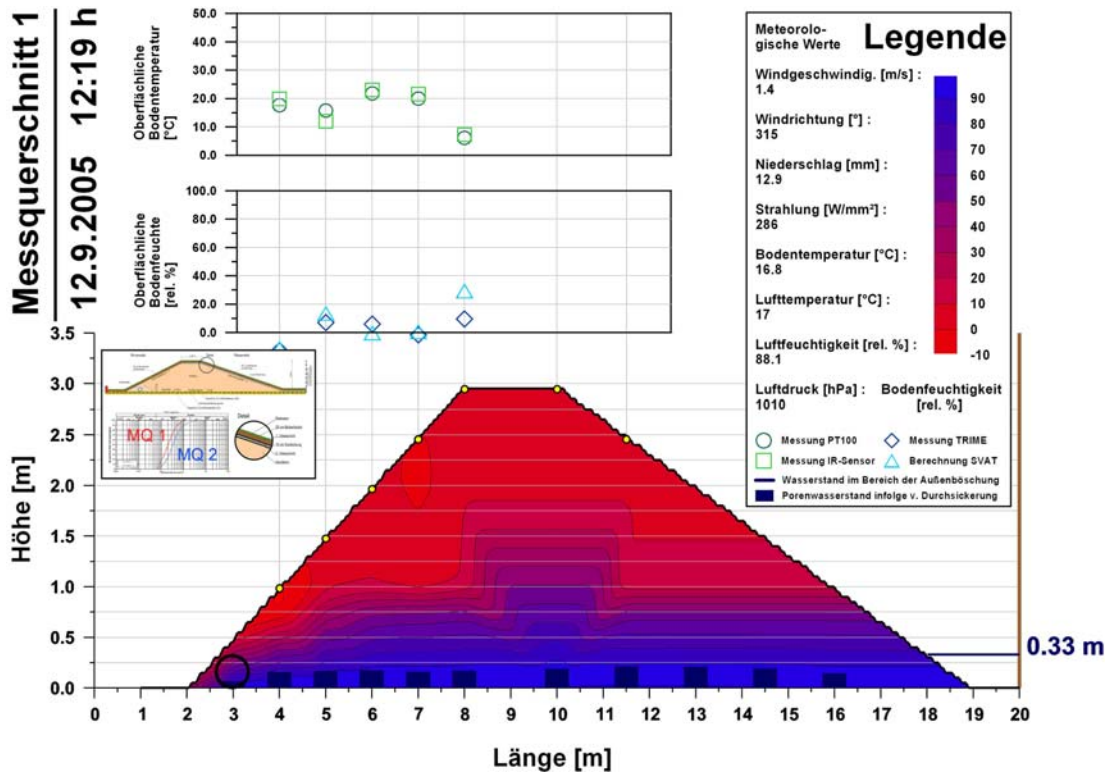


Abbildung 5-22: Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 1 - zu Beginn des Einstaus

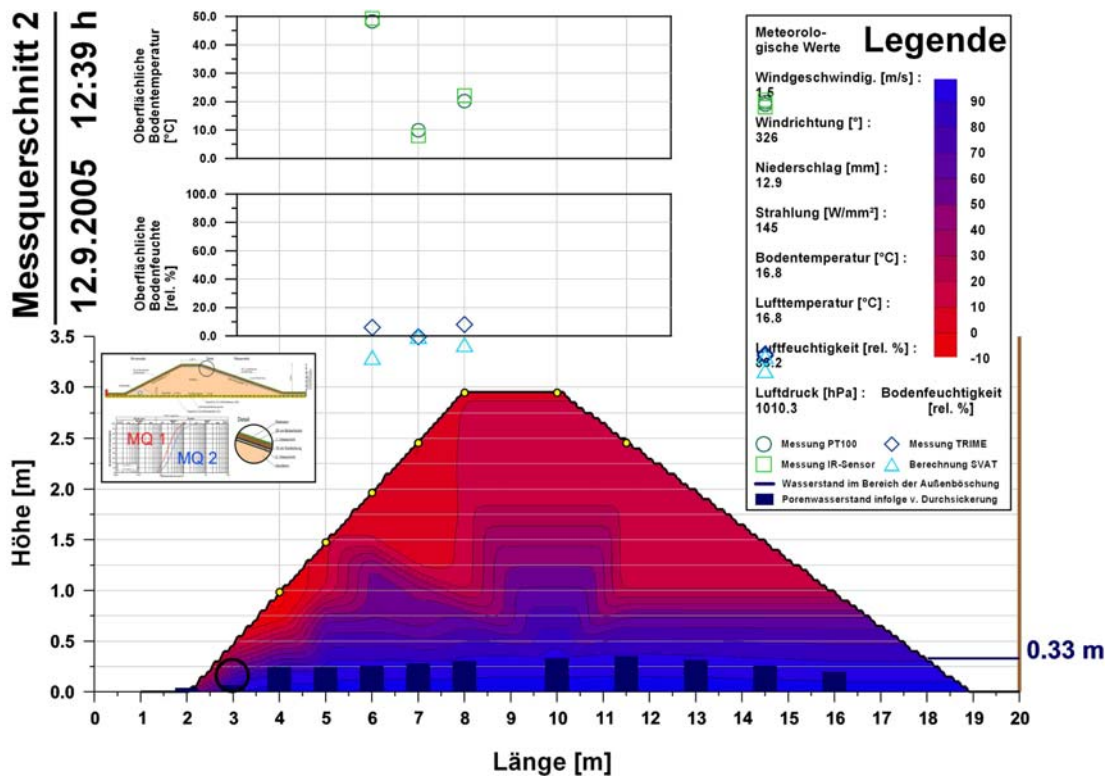


Abbildung 5-23: Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 2 - zu Beginn des Einstaus

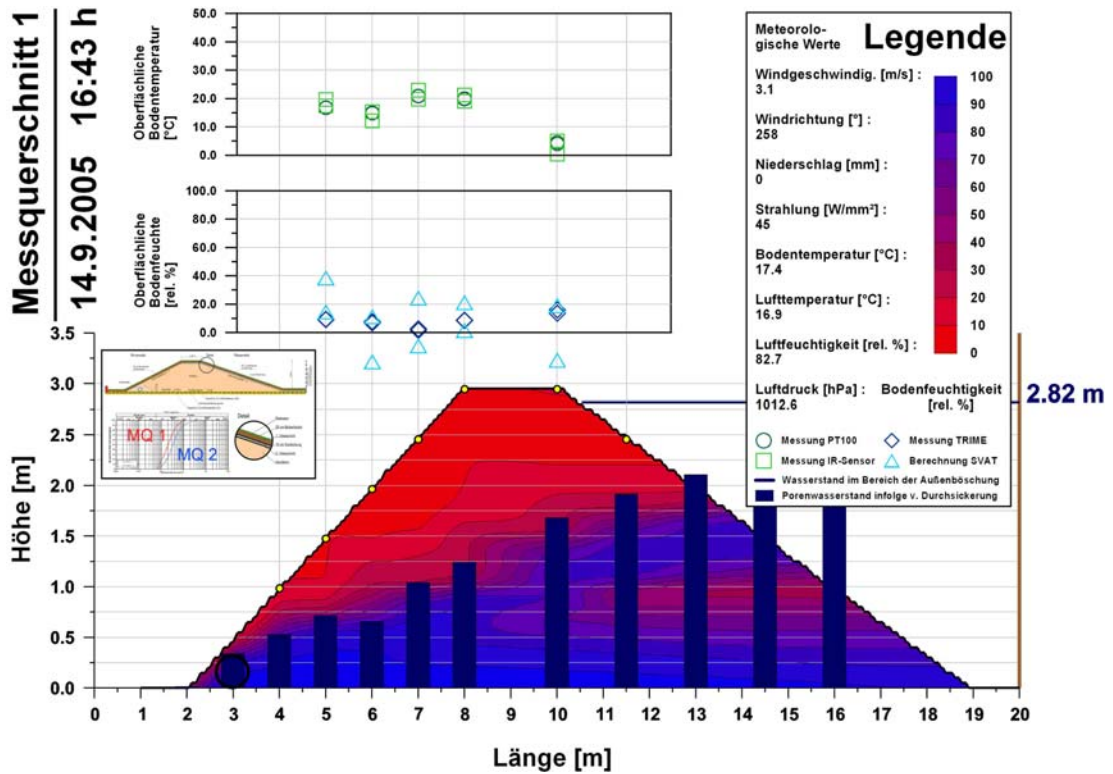


Abbildung 5-24: Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 1 - 28 h nach Beginn des Einstaus

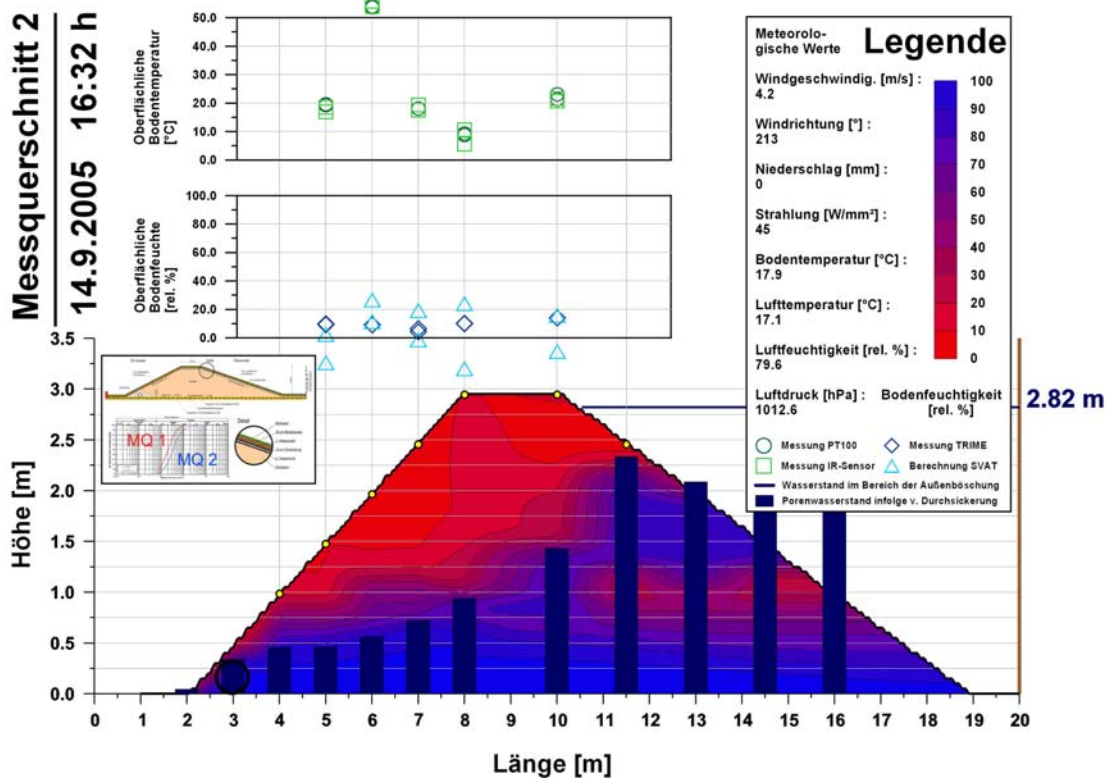


Abbildung 5-25: Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 2 - 28 h nach Beginn des Einstaus

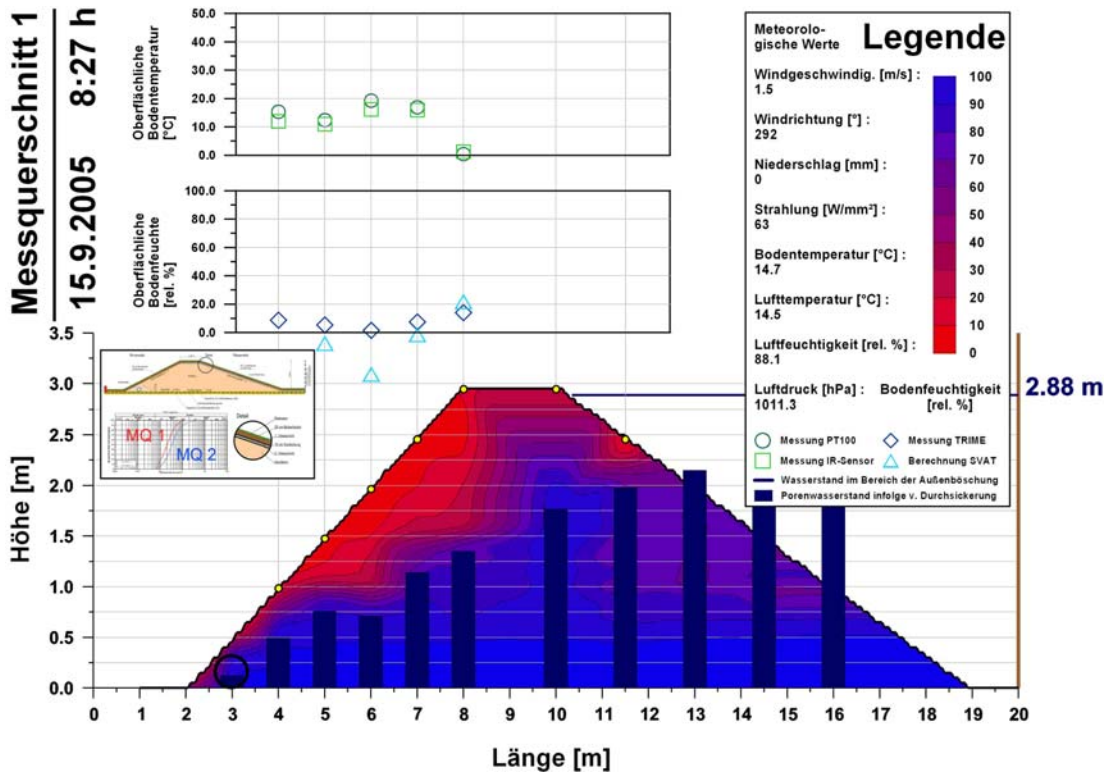


Abbildung 5-26: Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 1 - nach Beendigung des Versuches

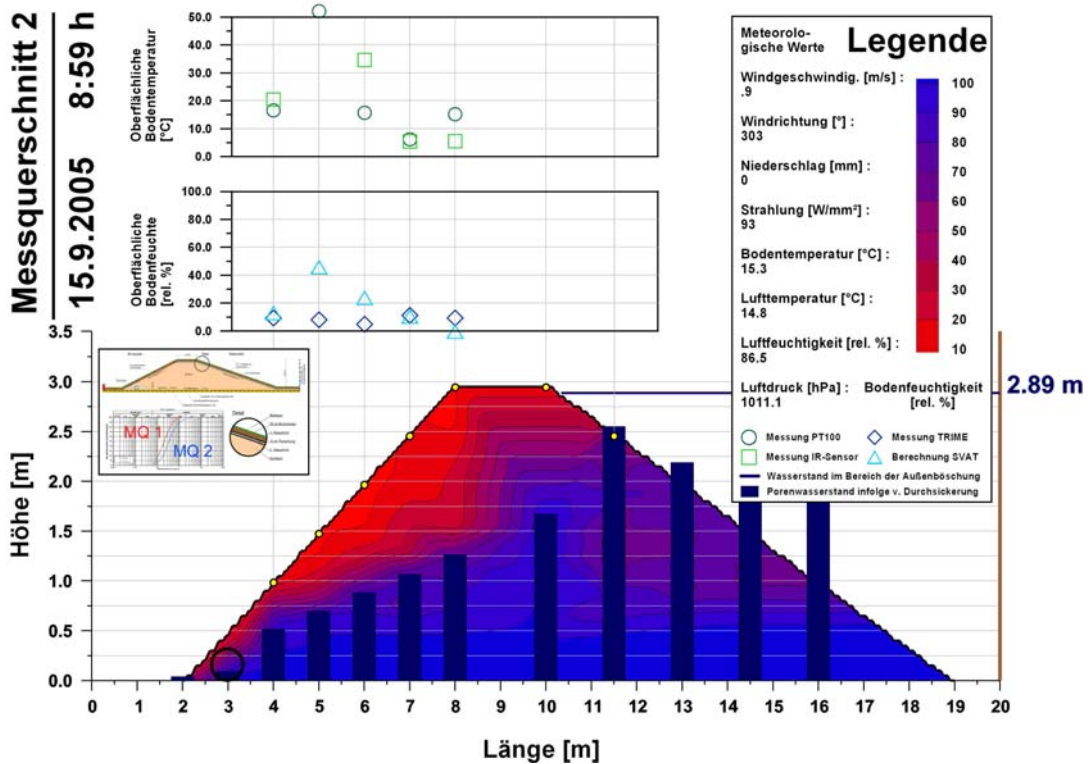


Abbildung 5-27: Messergebnisse der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung - MQ 2 - nach Beendigung des Versuches

Abbildung 5-28 zeigt die Thermalinfrarot-Aufnahme der luftseitigen Böschung des Deichs während der Versuchsphase 4. Eindeutig sind in der unteren Mitte des Bildes der Streifen unbedeckten Bodens, wel-

cher ein anderes Abstrahlverhalten aufweist, und die Durchsickerungen im Bereich des binnenseitigen Deichfußes (links im Bild) erkennbar.

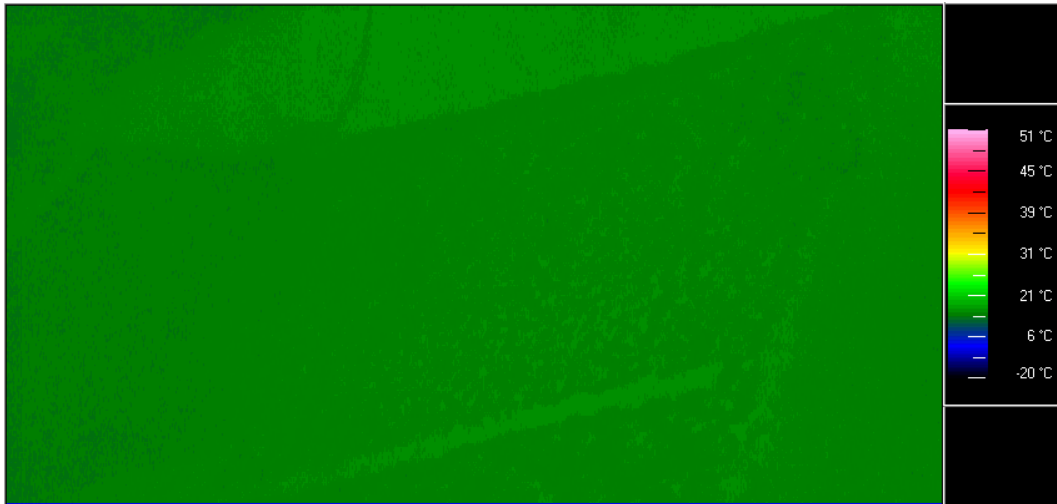


Abbildung 5-28: Thermalinfrarot(TIR)-Aufnahme des Deichs während der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag -komplette Durchsickerung

Abbildung 5-29 zeigt die Situation nach Beendigung der vierten Versuchsreihe am 14.0.2006.



Abbildung 5-29: Ansicht des Deichs nach Beendigung der Versuchsreihe 4 - 09.09.2005 - Niederschlag - komplette Durchsickerung

5.5 Bewertung

Die Untersuchungen am Labordeich mit der NIKON LAIRD-3AS Kamera im mittleren Infrarot zeigten, dass bei optimalen meteorologischen Randbedingungen - d.h. einer hohen Sonneneinstrahlung durch senkrechten Sonnenstand ohne Bewölkung, geringe Windgeschwindigkeiten und damit geringer Abkühlung, sowie einer längeren Trockenperiode vor den Messungen - gute Übereinstimmungen zwischen Labordaten und abgeleiteten Fernerkundungsdaten erzielt wurden.

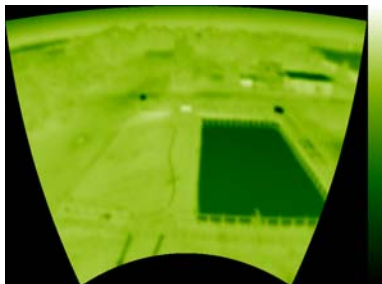
Mi 14.09.05 09:12



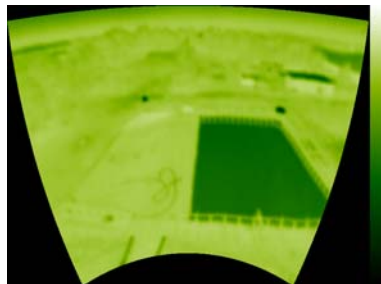
Mi 14.09.05 15:20



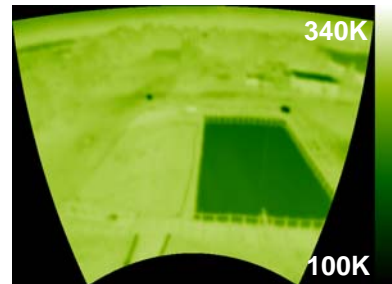
90 GHz - Mi 14.09.05 09:53



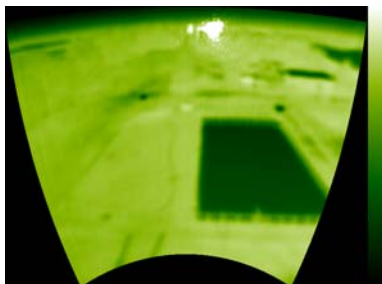
90 GHz - Mi 14.09.05 11:20



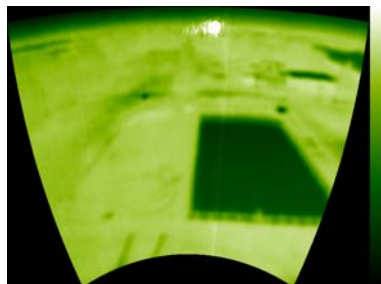
90 GHz - Mi 14.09.05 12:11



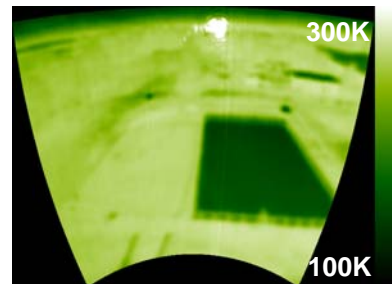
37 GHz - Mi 14.09.05 09:41



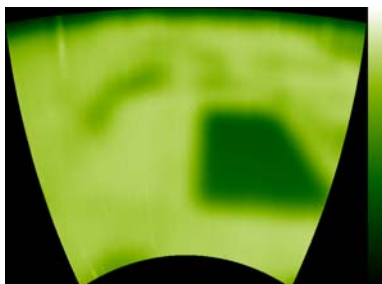
37 GHz - Mi 14.09.05 11:09



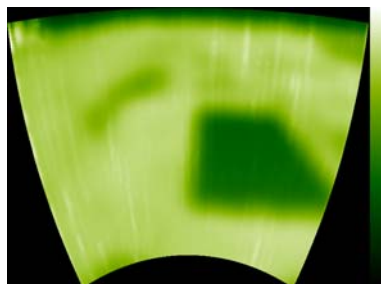
37 GHz - Mi 14.09.05 12:24



9,6 GHz - Mi 14.09.05 10:05



9,6 GHz - Mi 14.09.05 10:50



9,6 GHz - Mi 14.09.05 12:33

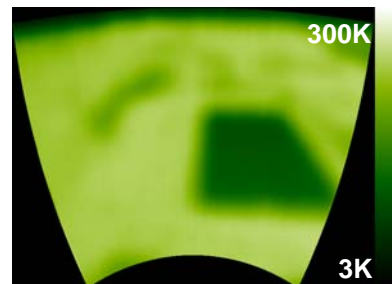


Abbildung 5-30: Aufnahmen mit einem Mikrowellensensor (DLR Oberpfaffenhofen, 2005)

Keine oder nur noch gelegentliche Übereinstimmungen konnten bei veränderten klimatischen Randbedingungen festgestellt werden. Dies waren Nebel- und Taubildung, dem Belastungsereignis vorhergegangene Niederschlagsereignisse sowie geringe Strahlungsflüsse bei niedrigem Sonnenstand, Bewölkung oder bei Nacht.

Aus den Untersuchungen ergibt sich daher für die Aufklärung von Schwachstellen an Deichen unter ungünstigen Wetterbedingungen, wie sie in der Regel bei Hochwasserereignissen herrschen, nur eine eingeschränkte Einsatzmöglichkeit von Thermalinfrarot-Sensoren. Dieser Nachteil wurde während des Projekts erkannt, so dass zusätzlich zu den ursprünglich geplanten Fernerkundungssensoren ein Mikrowellen-Radiometer der DLR Oberpfaffenhofen auf die grundsätzliche Tauglichkeit getestet wurde.

Der Vorteil eines Mikrowellensensors liegt vor allem im Einsatz unter unterschiedlichen meteorologischen Randbedingungen (Allwettertauglichkeit). So können in Abhängigkeit der Messfrequenz und des Wellenbands Wolken, Nebel und teilweise sogar Regen in der Atmosphäre durchdrungen werden. Dies haben die ersten Untersuchungen am Labordeich bestätigt, Abbildung 5-30. So konnten bei den Versuchen auch unter ungünstigen Bedingungen (Niederschlag, Nacht) Feuchtigkeitsbereiche und Sickerwasseraustritte detektiert werden, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), 2005.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die Kombination von Geographischen Informationssystemen, Labor- und Naturuntersuchungen, sowie die Befliegung mit unterschiedlichen multispektralen Fernerkundungssensoren ist es möglich, Schäden sowie potentielle Schwach- und Bruchstellen an Deichen in ihrer Position und Höhenlage zu lokalisieren. Bei den Untersuchungen im Labor mit Thermalinfrarot-Sensoren wurden natürliche, physikalische und meteorologische Grenzen aufgezeigt, in denen eine zweifelsfreie Erkennung von Schwachstellen möglich ist. Dabei zeigte sich, dass unter ungünstigen Witterungsbedingungen, wie sie häufig auch während Hochwasserereignissen anzutreffen sind, aus den Thermalinfrarot-Daten keine für ein Deichmonitoring verwendbaren Aussagen zu gewinnen sind.

Erste Tests mit einem Mikrowellen-Radiometer der DLR Oberpfaffenhofen ergaben, dass auch bei ungünstigen Bedingungen Durchsickerungen am Deichfuß erkannt werden können. In Zukunft gilt es, die mit dem Thermalinfrarot-Sensor durchgeführten Untersuchungen auf den Mikrowellen-Sensor auszuweiten, um auch hier die für einen operationellen Flugbetrieb benötigten Parameter zu ermitteln. Für eine optimale Schwach- und Bruchstellenanalyse an Deichen ist ein kombinierter Einsatz von Thermal- und Mikrowellen-Sensoren zusammen mit einer verbesserten multispektralen HRSC-AX Kamera zu empfehlen.

Für die HRSC-AX Kamera zeigte sich bei der Verifizierung der in den Fernerkundungsdaten erfassten Anomalien in der Natur, dass größere Anomalien (> 50 cm) lagegenau bestimmt werden können, während zur Erfassung kleinerer Anomalien (Maulwurfshügel, Wühltierlöcher, u.ä.) die räumliche Auflösung dieser Kamera, aber auch die der Thermal- und Mikrowellensensoren, erhöht werden müsste. Des Weiteren zeigte die Analyse der Daten, dass eine zielorientierte Auswertung der Daten nur möglich ist, sofern Befliegungen und Begehungen der Untersuchungsgebiete in einem engen Zeitrahmen erfolgen.

Weiterhin wird ein an die Fragestellung angepasstes und ständig aktualisiertes GIS benötigt, welches für eine einheitliche und schnelle Erfassung, Auswertung und Katalogisierung der Fernerkundungsdaten sorgt. Hierfür bietet sich das im Rahmen des Projektes aufgebaute GIS „DeSiMo“ an, welches für zukünftige und weiterführende Analysen eine Grundlage bilden kann. Für den operationellen Einsatz eines solchen Systems besteht weiterer Entwicklungsbedarf, sowohl für die Entwicklung einer schnellen, breitbandigen Verarbeitung und Übertragung von Bildern und Daten aus dem Flugzeug in Echtzeit, als auch bei einer automatisierten Mustererkennung von Anomalien in den Fernerkundungsdaten. Es erfordert zudem entsprechend qualifizierte Mitarbeiter.

Mit Hilfe der Fernerkundungsdaten können jedoch schon heute Deichzustände im Rahmen eines ganzheitlichen Deichmonitorings erfasst und potentielle Schwachstellen ausgewiesen werden. Diese können als Referenz dienen, um Gefährdungen des Deichs während eines Hochwasserereignisses aufzuzeigen.

7 Schrifttum

ACHMUS, M. (2005)

Geotechnische Betrachtungen und Beobachtungen zu Deichen und Deichversagen
Workshop Deichmonitoring: Schäden, Schadenserkenkung und Sanierung, Hannover, 2005 (unveröffentlicht)

ALBERTZ, J. (1991)

Grundlagen der Interpretation von Luft- und Sattelitenbildern
ISBN 3-534-07838-1, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1991

ARMBRUSTER-VENETI, H. (2003)

Infrarotthermographie-Traum oder Alptraum
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2003

BAILEY, M.E. UND HALLS, H.C. (2000)

Use of remote sensing data to locate groundwater trapped by dykes in precambrian basement terrains
ADRO, Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 26, Heft 2, ISSN 0703-8992, Canadian Aeronautics and Space Institute, Ottawa, 2000

BARBIER, C., CLOSSON, D., DERAUW, D., HANSEN, H., KARAKI, N.A. UND OZER, A. (2003)

Space-borne radar interferometric mapping of precursory deformations of a dyke collapse, Dead Sea area, Jordan
International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, Heft 4, ISSN 0143-1161, Taylor & Francis, 2003

BARJENBRUCH, U.B., HUNSÄNGER, TH. UND TRIESCHMANN, O. (2001)

A multiple remote sensor system for the aerial surveillance of the north sea and baltic sea
German Federal Institute of Hydrology, Koblenz, 2001 (unveröffentlicht)

BECKER, R. UND BRAUNS, J. (2002)

Feuchtemessung - ein vielfältiges Problem mit großen Perspektiven
Monitoring von Dämmen und Deichen mittels TDR, Kupfer, K. & Trinks, E., 11. Feuchtetag 02.09.2002, Weimar, 2002

BISWAS, S., DESAI, V.R. UND SUDHAKAR, S. (2002)

Remote sensing and geographic information system based approach for watershed conservation
Journal of surveying engineering, Vol. 128, Heft 3, ISBN 0733-9453/2002/3-108-124, ASCE, 2002

BÖDEKER, J.M. (2002)

Beurteilung des Einsatzes von Mikro-, Infrarot- und Ultraviolett-Spektralwellen zur Prognose hochwasserbedingten Auftretens von Qualmwasser am Beispiel des Elbhochwassers 2002,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 2002 (unveröffentlicht)

BÖHM, C., KÜHNEN, A., NIEDERHUBER, M. UND REIMER, W. (1999)

Detection and monitoring of environmental hazards and rehabilitation activities of former gdr uranium and lignite mining areas by remotely sensed data
Applied geologic remote sensing, Proceedings of the Thirteenth International Conference, Vol. 2, Vancouver, 1999

BROCKMANN, H. (2000)

Einsatz flugzeuggestützter Fernerkundungstechniken zur Bearbeitung hydrologischer Fragestellungen
Wasserwirtschaft, Heft 90, 2000

BRÖBKAMP, K. H. (1976)

Seedeichbau Theorie und Praxis
Vereinigung der Nassbaggerunternehmen e.V., Hamburg, 1976

BROSE, F. UND KÜHN, F. (1998)

Die Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Deichzustandseinschätzung
Brandenburgische Geowissensch. Beiträge, Heft 1, ISSN 0947-1995, Kleinmachnow, 1998

BUSCH, K.-F., LUCKNER, L. UND TIEMER, K. (1993)

Das Lehrbuch der Hydrogeologie
Herausgeber Georg Matthes, Band 3, Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1993

CARDARELLI, U., FOLVING, S., JEMMA, F., KANELLOPOULOS, I. UND WILKINSON, G.G. (1993)

Coastal basin area monitoring using multi-sensor imagery and GIS data
International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 4, IEEE, Tokyo, 1993

CHANG, S. Y.-S., PENG, C.Y., LIU, A. K. (1997)

Wavelet analysis of satellite images for coastal watch
Journal of oceanic engineering, Vol. 22, Heft 1, ISSN 0364-9059/97, IEEE, 1997

CHEN, L.-J. UND LEU, C.-H. (1993)

GIS-based spatially-distributed overland flow modelling
International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 4, IEEE, Tokyo, 1993

CAIXING, Y. (1989)

Analysis of coastal erosion and inundation using remotely sensed data
China Ocean Engineering, Vol. 3, Heft 2, China Ocean Press, 1989

CARDER, K.L., DAVIS, C.O., LEE, Z.P. (2002)

Using hyperspectral imaging to characterize the coastal environment
Aerospace conference proceedings, Vol. 3, ISBN 1521 0-7803-7231-X, IEEE, Montana, 2002

COX, R., EASTWOOD, J.A., FULLER, R.M., THOMSON, A.G., WADSWORTH, R.A. UND YATES, M.G. (1998)

Airborne remote sensing of intertidal biotopes: BIOTA I
Marine pollution bulletin, Vol. 37, Heft 3-7, ISSN 0025-326X, Elsevier Science Publishers B.V., 1998

DORNSTÄDTER, J. (2000)

Temperaturmessung im Wasserbau: Dammspektion und Bauwerksüberwachung
Karlsruhe, 2000

DAVIDENKOFF, R. (1970)

Unterläufigkeit von Stauwerken
Werner Verlag, Düsseldorf 1970

EAK (1993)

EAK 1993, Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutzbauwerke
Die Küste, Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, Heft 53, Westholsteinische Verlagsanstalt Boynes & Co., Heide, 1993

EBNER, H. UND OHLHOF, T. (1998)

Photogrammetric processing of HRSC (high resolution stereo camera) and WAOSS (Wide-angle optoelectronic stereo scanner) imagery
1998

ENGLAND, A.W. UND KIM, E.J. (1995)

Radiobrightness thermal inertia sensing of soil and canopy moistures for grasland areas
Conference proceedings second tropical symposium on combined optical-microwave earth and atmosphere sensing, IEEE, Atlanta, 1995

ESSEN, H.-H., GURGEL, K.-W. UND KINGSLEY, S.P. (1999)

High-frequency radars : physical limitations and recent developments
Coastal Engineering, Vol. 37, Elsevier Science Publishers B.V., 1999

FINCH, J. W. (1997)

Monitoring small dams in-semi arid regions using remote sensing and GIS
Journal of hydrology, Vol. 195, Heft 1, ISSN 0022-1694, Elsevier Science Publishers B.V., 1997

FENG, W. , PRINET, V. UND SONGDE, M. (2003)

Dike detection using active contour model
International Geoscience and Remote Sensing Symposium, ISBN 0-7803-7929-2/03, IEEE, Toulouse, 2003

FOWLER, C., LI, R., SCHMIDT, N.J., TUELL, G. UND ZHOU, G. (2002)

Photogrammetric processing of high-resolution airborne and satellite linear array stereo images for mapping applications
International Journal of Remote Sensing, Vol. 23, Heft 20, ISSN 0143-1161, Taylor & Francis, 2002

FRANCOIS, C. (2002)

The potential of directional radiometric temperatures for monitoring soil and leaf temperature and soil moisture status
Remote Sensing of Environment, Vol. 80, Heft 1, ISSN 0034-4257, Elsevier Science Publishers B.V., 2002

FRASIER, J.S. UND MCINTOSH, E.R. (1996)

Observed wavenumber-frequency properties of microwave backscatter from the ocean surface at near-grazing angles
Journal of geophysical research, ISSN 0227/96/96JC-01685, American Geophysical Union, 1996

FRIEDRICH, K., FRÜHAUF, M., GLÄSSER, C., KÜHLING, W. UND SCHMIDT, K.-H. (2000)

Mustererkennung zur Analyse ökologischer Prozesse am Beispiel von Temperaturdaten
Institut für Geographie im Fachbereich Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, Heft 22, Halle, 2000

FRIZADO, J.P., KIMLICKO, M.E. UND VINCENT, R.K. (1997)

High-resolution digital elevation model application to the delineation of flood extent on the scioto river near Columbus, Ohio
Applied Geologic Remote Sensing, Proceedings of the Twelfth International Conference, Vol. 1, Colorado, 1997

GRIESBACH, R. UND WEICHEL, H. (1998)

Beiträge der Fernerkundung zur Lösung von Umweltproblemen in der Oderregion
Brandenburgische Geowissensch. Beiträge, Heft 1, ISSN 0947-1995, Kleinmachnow, 1998

HERRMANN, R. A. UND JENSEN, J. (2003)

Sicherung von Dämmen und Deichen, Handbuch für Theorie und Praxis
Universität Siegen, Universitätsverlag Siegen – Universität, ISBN 3-936533-09-1, 2003

HERMSDORF, N. (1998)

Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg
Brandenburgische Geowissensch. Beiträge, Heft 1, ISSN 0947-1995, Kleinmachnow, 1998

HILDMANN, C. (2000)

Mustererkennung zur Analyse ökologischer Prozesse am Beispiel von Temperaturdaten
Hallesches Jahrbuch der Geowissenschaften, Heft 22, Halle (Saale), 2000

HOERIG, B., KUEHN, F. UND TREMBICH, G. (1997)

Multisensor remote sensing to evaluate hazards caused by mining
Applied geologic remote sensing, Proceedings of the Twelfth International Conference, Vol. 1, Colorado, 1997

HOERIG, B., KUEHN, F., UND TREMBICH, G. (1998)

Remote Sensing for Evaluating Hazards Caused by Underground Mining
Zeitschrift für angewandte Geologie, Vol. 44, Heft 3, 1998

HOOGBOOM, P. (1995)

Use of radar remote sensing in coastal zone management
Coastal Zone, Billy L. Edge, ASCE, 1995

HONGMEI, Z., MEN, L. UND XINGWEI, Y. (1993)

The combined application of the geographical information system and the remote sensing
International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 4, IEEE, Tokyo, 1993

IBERT, P.J., LUNA, R. UND MILLER, R.L. (1999)

Spectral characterization of soils and organic matter in engineering
Applied geologic remote sensing, Proceedings of the Thirteenth Conference, Vol. 2, Vancouver, 1999

IHDE, J. UND LINDSTROT, W. (1995)

Datumstransformation zwischen den Bezugssystemen ETRF/WGS, DHDN und System 42
Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 4, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1995

IRISH, J.L. UND WHITE, T.E. (1998)

Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry,
Coastal Engineering, Vol. 35, Elsevier Science Publishers B.V., 1998

KAPPAS, M. (1994)

Fernerkundung nah gebracht, Leitfaden für Geowissenschaftler
Ferdinand Dümmler Verlag, Bonn, ISBN 3-427-78711-7, 1994

KAUFMANN, H. (1999)

Umwelt und Katastrophenvorsorge, Erdanwendungen der Weltraumtechnik - Geoinformation vom Satelliten zum Verbraucher
DGLR-BMBF Tagungsband, Bonn, 1999

KEINER, TH., KUPFER, K. SCHÄFER, TH UND TRINKS, E. (2002)

Feuchtemessung - ein vielfältiges Problem mit großen Perspektiven
Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Detektion von Feuchteprofilen mittels TDR-Messleitung, 11. Feuchtetag, 2002

KELLETT, R.L. RIVARD, B. SAINT-JEAN, R., SINGHROY, V. (1994)

Characterization of faulting and dyke intrusion in the Benny Deformation Zone, north range of Sudbury, from airborne magnetics and sar
Canadian journal of remote sensing, Vol. 20, Heft 3, 1994

KEREKES, J. P., STAELIN, D.H. (1995)

Combined microwave and optical atmospheric remote sensing techniques: A review
Conference proceedings second tropical symposium on combined optical-microwave earth and atmosphere sensing, Vol., IEEE, Atlanta, 1995

KLIMAN, D.H., MASELLI, S., SPARROLD, S.H. (1997)

Interpretation on surface materials: Remote sensing models and procedures
Applied geologic remote sensing, Proceedings of the Twelfth International Conference, Vol. 1, Colorado, 1997

KNOLL, P., HERBST, R. UND PREUSS, J. (1998)

Methodische Fortschritte zur Untersuchung des Aufbaus und des Zustandes vorhandener Deichbauten
Brandenburgische Geowissensch. Beiträge, Heft 1, ISSN 0947-1995, Kleinmachnow, 1998

KRONBERG, P. (1984)

Photogeologie, eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der geologischen Auswertung von Luftbildern

Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, ISBN 3-432-94161-7, 1984

KRONBERG, P. (1985)

Fernerkundung der Erde, Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie

Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, ISBN 3-432-94601-5, 1985

KÜHN, F. UND BROSE, F. (1998)

Die Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Deicheinschätzung

Brandenburgische Geowissensch. Beiträge, Heft 1, ISSN 0947-1995, Kleinmachnow, 1998

KÜHNEN, A. UND NIEDERHUBER, M. (1999)

Products for monitoring and planning recultivation of former mining areas in eastern Germany, based on airborne and satellite remote sensing data

Applied geologic remote sensing, Proceedings of the Thirteenth International Conference, Vol. 2, Vancouver, 1999

LIEBENSTEIN, H., SCHRÖDER, U. (2001)

Computergestützte Klassifizierung von Biotoptypen auf Grundlage hochauflösender multispektraler Scannerdaten

Bundestministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 2001

LOWMAN, P. D. (1994)

Radar Geology of the Canadian shield: A 10-year review

Canadian journal of remote sensing, Vol. 20, Heft 3, 1994

MÜLLER-KIRCHENBAUER, H. UND HANSENS, U. (1981)

Neuere Erkenntnisse zum Ablauf des Erosionsgrundbruches

Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Heft Nr. 36, TH Aachen, 1981

NIESCHE, H. UND KRÜGER, F. (1998)

Das Oder-Hochwasser 1997 – Verlauf, Deichschäden und Deichverteidigung, erschienen in Brandenburgische Geowissensch. Beiträge, Heft 1, ISSN 0947-1995, Kleinmachnow, 1998

PAVERD VAN DE, M. (2000)

Short Course on Dikes and Bank Protection

Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Delft, Netherlands

Seminar on Dike improvement, Changsha, 2000 (unveröffentlicht)

PUDIMAT, H. (2005)

Erfahrungen und Probleme bei Bau und Verteidigung von Küstendeichen: Schäden, Schadensbilder und Ursachen

Workshop Deichmonitoring: Schäden, Schadenserkennung und Sanierung; Hannover 2005 (unveröffentlicht)

QARI, M. UND YOUSEF, H.T. (1991)

Application of Landsat TM data to geological studies, Al-Khabet area, Southern Arabian shield

Photogrammetric engineering & Remote sensing, Vol. 57, Heft 4, American society for photogrammetry and remote sensing, 1991

RECHTERN, J. (1998)

Konstruktion und Bemessung von Hochwasserschutzdeichen

Brandenburgische Geowissensch. Beiträge, Heft 1, ISSN 0947-1995, Kleinmachnow, 1998

RICHWIEN, W. (1995)

Kritische bodenmechanische Zustände von Deichböden - Nachweiskonzepte und Versagensformen
Tagungsband HTG-Kongress: Häfen, Wasserstraßen, Küstenschutz, Hannover, 1995

RUNCIMAN, H.M. (1999)

Thermal imaging
CRC Press, 1999

SCHIERECK, G.J. (2001)

Introduction to bed, bank and shore protection
Delft University Press, Delft, 2001

SCHWARTZ, P.R. (1995)

New directions in coastal and ocean remote sensing
Conference proceedings of the second tropical symposium on combined optical-microwave earth and atmosphere sensing, Vol. 7, IEEE, Atlanta, 1995

SCHWIDEFSKY, K. UND ACKERMANN, F. (1976)

Photogrammetrie – Grundlagen, Verfahren, Anwendungen
Teubner Verlag Stuttgart, 7. Auflage, ISBN 3-519-13401-2, 1976

SEEBER, G. (1989)

Satellitengeodäsie
De Gruyter, Berlin, New York, ISBN 3-11-0110082-7, 1989

SMOLTZYK, U. (1987)

Grundbautaschenbuch,
Dritte Auflage, Teil 1 bis 3, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1987

TERZAGHI, K. UND PECK, R. B. (1961)

Die Bodenmechanik in der Baupraxis
Springer Verlag Berlin, Göttingen Heidelberg, 1961

THOMSON, A. G., EASTWOOD, J. A., YATES, M. G., FULLER, R. M., WADSWORTH, R. A. UND COX, R. (1998)

Airborne Remote Sensing of Intertidal Biotopes: BIOTA I
Marine Pollution Bulletin, Heft 37, ISSN 0025-326X, 1998

THONFELD, A. (2000)

Bestimmung der Bodenfeuchte der obersten Schicht unter unvollständiger Vegetation mittels Multisensordaten
Dissertation am im Fachbereich 10 - Verkehrswesen und angewandte Mechanik der Technischen Universität Berlin, Berlin, 2000

TÜRKE, H. (1999)

Statik im Erdbau
Verlag Ernst & Sohn Berlin, 3. Auflage ISBN 3-433-01791-3, 1999

VINCENT, R. K. (1999)

Expanding horizons for geological applications of multispectral and hyperspectral remote sensing data
Applied geologic remote sensing
Proceedings of the Thirteenth International Conference, Vol. 1, Vancouver, 1999

VRIJING, J. K. (1994)

Probabilistic design of water-retaining structures, Delft Hydraulic Laboratory, Niederlande, 1994

WARNER, W.S. (1997)

Evaluating digital photogrammetry for watershed and erosion modelling
Applied geologic remote sensing, Proceedings of the Twelfth International Conference, Vol. 1, Colorado, 1997

WEICHEL, W. UND GRIESBACH, R. (1998)

Beiträge der Fernerkundung zur Lösung von Umweltproblemen in der Oderregion
Brandenburgische Geowissensch. Beiträge, Heft 1, ISSN 0947-1995, Kleinmachnow, 1998

YAMADA, Y. (2003)

Relation between ground features and mathematical morphology using JERS-1/SAR data during flooding time in paddy areas
International Geoscience and Remote Sensing Symposium, ISSN 0-7803-7929-2/03, IEEE, Toulouse, 2006

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR) (2005)

Bericht "Radiometrische Messungen im Millimeterwellen-Bereich von einer künstlichen Deichanlage bei unterschiedlichen Durchnässungszuständen - "Deichmessung" im Schlussbericht Nr. 675 III "Entwicklung und Verifizierung von Einsatzvarianten zur Aufklärung von Schwachstellen an Deichen mit luftgestützten multisensoralen Fernerkundungstechnologien zur Verbesserung des Hochwasserschutzes" des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, 2006

