



Leibniz-Zentrum für  
**Agrarlandschaftsforschung**  
(ZALF) e.V.



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**



# Untersuchungen zur Detektion vom Biber angelegter Hohlräume an der Oder Brandenburgs



*Recherche und Bewertung  
von Messverfahren*

**Leibniz-Zentrum  
für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.  
Eberswalder Str. 84  
15374 Müncheberg**

**Technische Universität Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau und  
Technische Hydromechanik (IWD)  
01062 Dresden**

Bearbeiter: Christian Lehr, Jörg Steidl

Bearbeiter: Dirk Fleischer, Torsten Heyer

**Kontakt:**

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.  
Dr.-Ing. Jörg Steidl  
Eberswalder Str. 84  
15374 Müncheberg

Tel. : +49 (0) 33432 82362

E-Mail: [jsteidl@zalf.de](mailto:jsteidl@zalf.de)

Web: [www.leibniz-zalf.de](http://www.leibniz-zalf.de)

Müncheberg, den 22.10.2019

## Zusammenfassung

Ausgehend von den Anforderungen an Detektionsverfahren vom Biber angelegter Hohlräume an der Oder Brandenburgs, die sowohl aus dem Verhalten der Tiere als auch aus den Eigenschaften der Oderdeiche abgeleitet worden sind, wird ein umfassender breit gefächertes Überblick über die Möglichkeiten verschiedenster Detektionsverfahren gegeben. Für die Recherche wurden Datenbanken internationaler wissenschaftlicher Literatur und Befragungen von Experten zu Detektionstechniken und zur praktischen Problemlösung an durch Biber-, Bisam- oder Nutriaabauten gefährdeten Deichen genutzt. Im Weiteren werden notwendige und mögliche Kombinationen von Detektionsverfahren erläutert. Das schließt auch die Verbindung von Detektionsverfahren mit Arbeiten der Unterhaltung- und Pflege am Deich und anliegenden Gewässern ein.

Um eine Entscheidungsfindung bei dem relativ komplexen Problem der Auswahl eines oder mehrerer Detektionsverfahren rational zu unterstützen, wurde eine Nutzwertanalyse der recherchierten Detektionsverfahren angefertigt. Allerdings konnte kein etabliertes Detektionsverfahren identifiziert werden, das die Anforderungen gänzlich erfüllen kann oder bereits in der Praxis für vergleichbare Fragestellungen und Verhältnisse angewandt wird. Insbesondere diese mangelnde praktische Erfahrung erschwerte die Nutzwertanalyse. Um diese Wissensdefizite reduzieren zu können, werden weiterführende Untersuchungen mit ausgewählten Detektionsverfahren empfohlen. Das betrifft zunächst die labortechnische Untersuchung der Detektionsverfahren Wärmebildkamera und Echolot an einem Versuchsdeich des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD), Technische Universität Dresden. Diese und weitere Detektionsverfahren sollten in einem anschließenden Feldversuch unter praktischen Bedingungen an einem geeigneten Deichabschnitt der Oder getestet werden. Die damit erzielten Fortschritte beim Wissensstand können später relativ einfach in die Nutzwertanalyse aufgenommen werden, um die Entscheidungsfindung zur Auswahl eines oder mehrerer Detektionsverfahren qualitativ zu verbessern.



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	I
Inhaltsverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis .....	VI
1 Aufgabenstellung .....	1
2 Vorgehensweise .....	2
2.1 Recherche .....	2
2.2 Bewertung der Detektionsverfahren .....	3
2.2.1 Nutzwertanalyse .....	3
2.2.2 Bewertungskriterien .....	5
2.2.2.1 Aufwand/Leistung .....	6
2.2.2.2 Qualität und Datenauswertung .....	7
2.2.2.3 Auflagen und Einschränkungen .....	8
2.2.3 Bestimmung der Gewichtungsfaktoren .....	8
2.2.4 Bestimmung der Zielerfüllungsfaktoren .....	10
3 Anforderungen an Detektionsverfahren .....	11
3.1 Reviere und Verhalten der Biber .....	11
3.2 Eigenschaften der Biberbauten .....	12
3.3 Sonderfall Notbauten .....	13
3.4 Hohlräume durch andere Bodenwühler .....	14
3.5 Eigenschaften der Oderdeiche .....	14
3.6 Hauptanforderungen an die Detektionsverfahren .....	15
4 Detektion von Biberbauten .....	17
4.1 Detektionsverfahren .....	17
4.1.1 Wildscouts + Spürhunde .....	17
4.1.2 Einbeziehung lokaler Bevölkerung (citizen science) .....	18
4.1.3 Wärmebild-Aufnahmen .....	19
4.1.4 Echolot .....	21
4.1.5 UAV-Photogrammetrie .....	22
4.1.6 LiDAR Scanning .....	23
4.1.7 Satellite Radar Interferometry .....	24
4.1.8 Nicht weiter verfolgte Verfahren .....	26
4.2 Bewertungstabelle Oberirdisch .....	26
5 Detektion der Biberbautenverläufe .....	28
5.1 Detektionsverfahren .....	28
5.1.1 Georadar .....	28
5.1.2 Geoelektrische Widerstandstomographie .....	30
5.1.3 Elektromagnetik .....	32
5.1.4 Luftgestützte multi-spektrale Aufnahmen .....	33
5.1.5 Mikrowellensensoren .....	35

5.1.6	Weitere Verfahren.....	36
5.2	Bewertungstabelle Unterirdisch .....	37
6	Kombination von Detektionsverfahren .....	38
7	Empfehlung zum weiteren Vorgehen .....	39
8	Literatur .....	41
Anhang A: Regelprofile.....		44
Anhang B: Protokolle Expertenbefragung .....		48
B.1	Undine Schubert, Biberbeauftragte des Landes Brandenburg.....	48
B.2	Antje Reetz, ehemalige Bibermanagerin GEDO.....	50
B.3	Gerhard Schwab, Bibermanager Bayern .....	52
B.4	Professor Müller-Petke, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik.....	53
B.5	Dr. Niklas Allroggen, Universität Potsdam.....	55
B.6	Dr. Judith Walter, Humboldt Universität Berlin.....	56
B.7	Dr. Erika Lück, Universität Potsdam .....	57
B.8	Firma Apus, Dresden .....	58
B.9	Protokoll Projekttreffen 28.08.2019.....	59
B.10	Priv. Doz. Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung .....	62
B.11	Dr. Thomas Jagdhuber, Dr.-Ing Markus Peichl, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).....	64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel Bestimmung Gewichtungsfaktor über Paarvergleiche.....	3
Abbildung 2: Beispiel Berechnung der Gesamtnutzwerte zweier Alternativen als Summe ihrer Teilnutzwerte .....	4
Abbildung 3: Regelprofil der häufigsten Deichbauweise an der Oder.....	15
Abbildung 4: Gesamtnutzwerte der Verfahren zur Detektion des oberirdischen Verlaufs der Biberbauten.....	27
Abbildung 5: Gesamtnutzwerte der Verfahren zur Detektion des unterirdischen Verlaufs der Biberbauten.....	37

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertungskriterien. ....	5
Tabelle 2: Gewichtungsfaktoren (Gf) – Oberirdische Detektion von Biberbauten. ....	9
Tabelle 3: Gewichtungsfaktoren (Gf) – Detektion der unterirdischen Biberbautenverläufe. ....	9
Tabelle 4: Biber und Biberbauten – charakteristische Daten .....	12
Tabelle 5: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Wildscouts + Hunde. ....	17
Tabelle 6: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Einbeziehung lokaler Bevölkerung (Citizen Science). ....	18
Tabelle 7: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Wärmebild.....	20
Tabelle 8: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Echolot.....	21
Tabelle 9: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) UAV-Photogrammetrie. ....	23
Tabelle 10: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) LiDAR Scanning. ....	24
Tabelle 11: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Satellite Radar Interferometry.....	25
Tabelle 12: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Georadar.....	29
Tabelle 13: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Geoelektrische Widerstandstomographie. ....	31
Tabelle 14: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Elektromagnetik. ....	33
Tabelle 15: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Luftgestützte multispektrale Aufnahmen.....	34

# 1 Aufgabenstellung

Nachfolgende Ausführungen wurden, wenn nicht anders vermerkt, der „Konzeption für den weiteren Umgang mit Biber Schäden an den Oderdeichen und Gewässern I. Ordnung von Krüger (2019) [1] direkt entnommen, da sie die Motivation und die Zielstellung des hier durchgeführten Projekts umfassend beschreiben.

An den Deichen der Oder haben in den letzten Jahren die Schädigungen durch Wühltätigkeiten von Bibern erheblich zugenommen. Dies gefährdet die Hochwasser-Standsicherheit der Deiche. Darüber hinaus stellen die Schädigungen eine Gefahr für die Mitarbeiter bei der Unterhaltung der Deiche dar. So kommt es immer wieder zu Maschineneinbrüchen in visuell oberirdisch nicht erkennbare Bibergänge. Die Reparatur der durch Biber verursachten Schäden an den Deichen bindet sowohl Mitarbeiter als auch Finanzmittel.

Biberreviere und Biberbauten gibt es nahezu flächendeckend entlang der Oder [2]. Als potenziell gefährdet gelten alle Deichabschnitte, bei denen die nächstgelegenen Gewässer maximal 20 m entfernt sind. Nach einer GIS-Auswertung des Landesamtes für Umwelt Brandenburg betrifft dies ca. 157 km Deich.

Mittlerweile gibt es mehrjährige Erfahrungen, die Deiche mit baulichen Maßnahmen gegen die Wühlaktivitäten der Biber zu sichern. Dabei hat sich eine Kombination aus Biberschutzgittern zur Böschungssicherung und Stahlspundwänden (Bohlenlänge > 4 m, Wandstärke 5 bis 6 mm) in unmittelbarer Wassernähe etabliert und bislang bewährt. Mit der aktuell bevorzugten Bauweise dieser Biber sicherungsmaßnahmen ergeben sich nach Erfahrung des Landesamtes für Umwelt Brandenburg Kosten von ca. 1,4 Mio. €/Deichkilometer. Für die gesamte Länge der bibergefährdeten Bereiche wären demnach mit Kosten von ca. 220 Mio. € zu rechnen. Nach einer ersten Einschätzung des Landesamtes für Umwelt Brandenburg würde sich bei einer angenommenen Mittelbereitstellung von 20 Mio. €/Jahr ein Realisierungszeitraum von 11 Jahren ergeben, inklusive der Notwendigkeit, zusätzliche Mitarbeiter einzustellen.

Neben dem erheblichen finanziellen und arbeitstechnischen Aufwand ist die Kunststoffummantelung der Biberschutzgitter problematisch. Durch den Einbau würden nicht unerhebliche Mengen an Kunststoff im Überschwemmungsbereich der Oder ausgebracht werden (mündliche Mitteilung des Landesamtes für Umwelt Brandenburg). Weiterhin schützt die aktuelle Maschenweite von 6 x 8 cm zwar vor Bibern, nicht jedoch vor Bisamratten, welche ebenfalls die Deiche schädigen können. Daher ist geplant, Gitter mit feinerer Maschenweite (4 x 4 cm) zu verbauen. Ein weiteres Problem ist, dass die Schutzgitter sowohl die Kontrollen als auch Reparaturen der Deiche erschweren und damit letztlich Folgekosten verursachen können. So beeinträchtigen die Schutzgitter den Einsatz von geophysikalischen Verfahren zur Untersuchung der Deiche [Kapitel 5.1.1–5.1.3].

Aktuell werden Biberbauten bzw. vom Biber verursachte Schäden an den Deichen vor allem durch Zufall, meist während der Deichunterhaltung, festgestellt (z.B. durch Maschineneinbruch, lokale Setzungen, etc.). Dies ist für die Gewährleistung der Standsicherheit der Deiche und somit für den Hochwasserschutz nicht zufriedenstellend. Gesucht wird daher eine Methode mit der es möglich ist, die vom Biber gefährdeten Deich- und Gewässerabschnitte monatlich [1], mindestens jedoch zweimal pro Jahr [mündliche Mitteilung Begehung 19.06.2019], zu kontrollieren. Idealerweise ließe sich das Verfahren in die laufende Deichunterhaltung und Gewässermonitoring integrieren.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieses Berichtes, eine Übersicht und eine Einschätzung praktikabler Methoden (Detektionsverfahren) oder Kombinationen daraus für die Ortung durch Biber angelegter Hohlräume an der Oder Brandenburgs bereitzustellen.

## 2 Vorgehensweise

In einer breit angelegten Recherche wurden Informationen zum Themenkomplex vom Biber angelegter Hohlräume in Deichen und Vorländern sowie zu möglichen Detektionsmethoden zusammengestellt. Beides erfolgte mit besonderem Fokus auf Situation und Standortverhältnisse der Oder im Bereich Brandenburgs in Form von Literaturrecherchen und Expertenbefragungen (Kapitel 2.1). Erarbeitet wurde eine Übersicht der Anforderungen an die Detektionsverfahren (Kapitel 3) sowie eine Übersicht der Detektionsverfahren (Kapitel 4+5). Die Bewertung der Detektionsverfahren erfolgte auf Basis der Literaturrecherche, Expertenbefragungen und einer Nutzwertanalyse (Kapitel 2.2). Darauf aufbauend werden Vorschläge für zu testende Verfahren im Laborversuch (Wasserbaulabor der TU Dresden) und im Feldversuch unterbreitet (Kapitel 6).

### 2.1 RECHERCHE

Die Recherche bezüglich internationaler, wissenschaftlicher Fachliteratur erfolgte überwiegend im Web of Science ([www.webofknowledge.com](http://www.webofknowledge.com)) unter Verwendung folgender Suchbegriffe:

- Beaver AND detection
- ground penetrating radar AND (beaver OR levee OR animal)
- ground penetrating radar AND (burrows OR building OR (building AND void))
- (Drone OR UAV) AND (burrow OR cave OR vault)
- (Beaver OR Muskrat OR Badger) AND (levee OR dike)
- Burrow AND (Soil moisture)
- (Burrow OR Levee) AND (Acoustic OR Seismic)
- ((electromagnetic OR EM OR FDEM OR gravimetric) AND (void OR burrow OR cavity OR vault OR cave))
- ((levee OR dike OR dyke OR dam))

Zur Berücksichtigung der spezifischen Standortverhältnisse an der Oder Brandenburgs wurden interne Dokumente des Landesamtes für Umwelt Brandenburg [1] [Anhang A: Regelprofile], Abschlussarbeiten von Hochschulen [3; 4], Informationen des Landesumweltamtes Brandenburg [5] und Berichte vorhergehender Projekte [6] mit in die Recherche einbezogen. Außerdem wurden vom Landesamt für Umwelt Brandenburg bereitgestellte Geo-Daten zum Deichverlauf bzw. zu bibergefährdeten Deichabschnitten (Deichlinie\_Ost\_19-07\_BiberHOD.shp) gesichtet.

Für biberspezifische Informationen wurde die Recherche auf technische Merkblätter [7] und „graue Literatur“ aus dem Bereich Bibermanagement in Deutschland erweitert.

Die Befragung von Experten aus der Praxis erfolgte durch mehrere Telefongespräche und im Rahmen eines Projekttreffens am 28.9.2019 an der TU Dresden. Die Kontaktdaten der befragten Experten inklusive der stichwortartigen Protokolle der Telefongespräche bzw. E-Mails und des Projekttreffens befinden sich im Anhang B: Protokolle Expertenbefragung.

## 2.2 BEWERTUNG DER DETEKTIONSVERFAHREN

### 2.2.1 NUTZWERTANALYSE

Die Detektionsverfahren wurden mit einer Nutzwertanalyse gemäß den Empfehlungen des „Handbuchs für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung“ des Bundesministeriums des Innern/Bundesverwaltungsamt ([www.orghandbuch.de](http://www.orghandbuch.de)) bewertet [8]. Damit soll die Entscheidungsfindung bei dem relativ komplexen Problem der objektiven Auswahl eines oder mehrerer Messverfahren zur Detektion vom Biber angelegter Hohlräume an der Oder Brandenburgs weitestgehend rationalisiert werden. Im Folgenden wird die Methode in kompakter Form erläutert. Für detailliertere Ausführungen wird auf [8] verwiesen.

In einem ersten Schritt werden Bewertungskriterien definiert und gewichtet. Die Gewichtungsfaktoren werden im Paarvergleich bestimmt. Auf einer Punkteskala 0-1-2 wird jedes Bewertungskriterium mit jedem anderen Bewertungskriterium paarweise verglichen und als weniger wichtig (0), gleich wichtig (1) oder wichtiger (2) eingestuft. So bekommt das Kriterium A den Wert 2, wenn es wichtiger als das Kriterium B ist und das Kriterium B bekommt den Wert 0. Wenn beide Kriterien gleich wichtig sind, bekommen beide den Wert 1. Ist das Kriterium A weniger wichtig als Kriterium B bekommt es den Wert 0 und das Kriterium B bekommt den Wert 2. Anschließend werden die Punkte der Paarvergleiche für jedes Kriterium aufsummiert. Das Verhältnis dieser Summe zur Gesamtsumme an Punkten ergibt den Gewichtungsfaktor für dieses Kriterium (Abbildung 1).

Kriterien	A	B	C	D	Summe je Kriterium	Gewichtungs-faktor Gf (%)
A		2	2	2	6	50,0
B	0		2	2	4	33,3
C	0	0		1	1	8,3
D	0	0	1		1	8,3
SUMME					12	100

Abbildung 1: Beispiel Bestimmung Gewichtungsfaktor über Paarvergleiche (Quelle [8]).

In einem zweiten Schritt werden für jedes Detektionsverfahren Zielerfüllungsfaktoren für die verschiedenen Bewertungskriterien festgelegt. Dazu wird der Grad der Zielerfüllung aller Bewertungskriterien auf einer Skala von 0 (nicht erfüllt) bis 10 (überragend erfüllt) für jedes Detektionsverfahren bewertet.

Im dritten Schritt werden für jedes Detektionsverfahren durch Multiplikation der Gewichtungsfaktoren mit den Zielerfüllungsfaktoren die Teilnutzwerte der Kriterien bestimmt. Der Gesamtnutzwert eines Detektionsverfahrens ergibt sich aus der Summe der Teilnutzwerte aller Kriterien. Abbildung 2 erläutert dies für ein fiktives Beispiel. „Alternative 1“ und „Alternative 2“ entsprechen hierbei zwei zu vergleichende Detektionsverfahren. Bei der Alternative 1 ergibt sich ein Teilnutzwert von 300 für das Kriterium A aus der Multiplikation des Gewichtungsfaktors von Kriterium A (hier 37,5) mit dem Zielerfüllungsfaktor von Kriterium A bezogen auf Alternative 1 (hier 8). Für die Alternative 2 ergäbe sich derselbe Teilnutzwert.

Für das Kriterium B hingegen ergäben sich unterschiedliche Teilnutzwerte:

Teilnutzwert für Alternative 1:  $29,2 \times 7 = 204,4$  und

Teilnutzwert für Alternative 2:  $29,2 \times 8 = 233,6$ .

	Gf (%)	Alternative 1		Alternative 2	
		Zf	TN	Zf	TN
Kriterium A	37,5	8	300	8	300
Kriterium B	29,2	7	204,4	8	233,6
Kriterium C	16,7	4	66,8	6	100,2
Kriterium D	16,7	7	116,9	6	100,2
SUMME	100		GN: 688,1		GN: 734,0

**Abbildung 2: Beispiel Berechnung der Gesamtnutzwerte (GN) zweier Alternativen als Summe ihrer Teilnutzwerte (TN). Die TN ergeben sich aus der Multiplikation der Gewichtungsfaktoren (Gf) der Kriterien mit den Zielerfüllungsfaktoren (Zf) der Kriterien bezogen auf die Alternativen (Quelle [8]).**

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse ergeben sich somit aus der Auswahl der Kriterien und den beiden durch den Anwender vorgenommenen Wichtungen (Gewichtungsfaktor und Zielerfüllungsfaktor). Die Ausweisung der jeweiligen Wichtungen in einer Tabelle ermöglicht ein transparentes und nachvollziehbares Ranking der Detektionsverfahren.

Definition und Wichtung der Bewertungskriterien wurden iterativ mit dem Auftraggeber abgestimmt. Eine Übersicht der verwendeten Bewertungskriterien findet sich in Tabelle 1 und Kapitel 2.2.2. Die Bewertung erfolgte in drei Blöcken bezüglich der Aspekte:

A: Aufwand und Leistung

Q: Qualität und Datenauswertung sowie

R: Auflagen und Einschränkungen.

Innerhalb eines Blockes wurden die Gewichtungsfaktoren zu 100 % summiert. Damit wurde für jeden der drei Blöcke ein separater Gesamtnutzwert gebildet. Der Mittelwert der Gesamtnutzwerte der drei Blöcke wurde als Gesamtnutzwert eines Detektionsverfahrens verwendet.

Die Aufteilung der Bewertungskriterien in drei Blöcke wurde vorgenommen, um den direkten paarweisen Vergleich schwer zu vergleichender Kriterien, beispielsweise den Vergleich der Wichtigkeit von logistischem Aufwand (A\_LOG) versus Eignung zur Detektion von Unterwasser-Biberspuren (Q\_AQ\_O), für die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren zu vermeiden. Dadurch gestaltete sich die Analyse einfacher und übersichtlicher. Weiterer Vorteil ist, dass für den Vergleich der Detektionsverfahren sowohl Unterschiede im finalen Gesamtnutzwert als auch hinsichtlich der drei Aspekte einfach ersichtlich sind.

Bei den zu bewertenden Detektionsverfahren wurde prinzipiell unterschieden zwischen Verfahren zur:

- 1) oberirdischen Lokalisierung von Biberbauten und Detektion von oberirdischen Biberspuren und
- 2) Detektion des unterirdischen Verlaufs von Biberbauten.

Diese wurden in 2 separaten Nutzwertanalysen bewertet.

Bewertungskriterien mit „O“ im Kürzel fanden nur bei den Verfahren zur oberirdischen Detektion Verwendung, Bewertungs-Kriterien mit „U“ im Kürzel nur bei den Verfahren zur unterirdischen Detektion.

Zukünftige Erfahrungen, veränderte Expertenschätzungen oder weitere zu berücksichtigende Aspekte können leicht in die bestehenden Tabellen implementiert werden.

Die Tabellen mit den Ergebnissen der Nutzwertanalyse sowie den dafür benötigten Kriterien, Gewichtungs- und Zielerfüllungsfaktoren wurden dem Auftraggeber in digitaler Form (xlsx-Format) übergeben.

## 2.2.2 BEWERTUNGSKRITERIEN

Die verwendeten Bewertungskriterien sind in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt. Um die Wahl der Gewichtungsfaktoren sowie die berechneten Gesamtnutzwerte möglichst nachvollziehbar zu gestalten, werden im nächsten Abschnitt die verwendeten Bewertungskriterien detailliert beschrieben und voneinander abgegrenzt.

**Tabelle 1: Bewertungskriterien.**

Kürzel	Bezeichnung – kurz	Kurzbeschreibung
<b>Aufwand/Leistung</b>		
A_FL	Flächenleistung/ Deichmeter	Deich_m2/(Arbeitskraft*Tag)
A_FINANZ	Finanziell	Anschaffungs-, Erhaltungs- und Mietkosten Messgeräte, Qualifizierungskosten, neue Mitarbeiter, Dauer-Firmenbeauftragung, etc.
A_LOG	Logistisch	Anzahl Einsätze, Planungsaufwand, zeitlicher Aufwand
A_DEV	Entwicklungskosten	Einarbeitungszeit, Installations-, Strukturierungsaufgaben, Automatisierungsoptionen, effiziente Visualisierung und Datenstruktur, insbesondere bei neuen Verfahren
A_KOMB	Kombination mit Monitoring-Zielen	Ist die Anwendung der Methode in Kombination mit anderen obligatorischen Monitoring-Zielen möglich? Lässt sich die Methode gut in die reguläre Gewässerunterhaltung einbinden?
<b>Qualität/Datenauswertung</b>		
Q_RES	Auflösung	Ist die Detailschärfe und die Informationsdichte für die Detektion von Biberbauten/Biberspuren ausreichend?
Q_VEG_O	Biberspuren – Vegetation	Fraßspuren, Wechsel, Sassen, Kanäle in der Ufervegetation, Gehölzhaufen

<b>Kürzel</b>	<b>Bezeichnung – kurz</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
Q_AQ_O	Biberspuren – unter Wasser	Auswurfkegel, Tauchpässe, Spuren an der Gewässersohle
Q_TER_O	Biberspuren – Geländeoberfläche	Lokale Absenkungen der Geländeoberfläche durch eingestürzte Hohlräume, Sassen, freiliegende Eingänge zum Bau, Kanäle in trocken gefallen Gräben
Q_DEPTH_U	Untersuchungstiefe	Reichweite der Methode in Tiefe unter GOK
Q_HOHL_U	Hohlräume	Detektion von Hohlräumen, Veränderungen von Hohlräumen
<b>Auflagen/Einschränkungen</b>		
R_SAISON	Saisonal	Eis, Vegetation, biologische Schutzzeiten
R_MET	Meteorologisch	Temperatur, Wasser- und Feuchtegehalt Erdkörper
R_SURF	Oberflächen-beschaffenheit	Höhe Vegetation, Böschungsneigung
R_PEGEL	Wasserstand	Pegel, Einsatz bei Hochwasser, Sicherheit, Grundwasserstand
R_JUR	Genehmigungen	z.B. Einsatz von Fluggerät, Grenzraum Polen
R_SE_U	Untergrund	Anfälligkeit gegenüber Störeinflüssen im Untergrund, z.B. verschiedene Bodenparameter (Dichte, Sättigungsgrad, Leitfähigkeit), andere Fremdkörper (z.B. Kampfmittel)

### 2.2.2.1 Aufwand/Leistung

#### A\_FL – Flächen- oder Streckenleistung

Je nach Verfahren wird hier die Leistung pro Person und Tag angesetzt. Für unterirdische Verfahren, die kleinräumigere Untersuchungsmethoden nutzen, wird vornehmlich die Fläche und für oberirdische Verfahren die Strecken als Leistungsparameter genutzt. Dabei sollte ein einheitlicher Regelquerschnitt des Deichkörpers zur besseren Vergleichbarkeit angesetzt werden.

#### A\_FINANZ – Finanzieller Aufwand

Das Bewertungskriterium umfasst vor allem Anschaffungs-, Erhaltungs- und Mietkosten der zum Einsatz kommenden Messgeräte, Qualifizierungskosten für Mitarbeiter und zusätzliche Personalkosten bei Neueinstellung sowie eine eventuell längerfristige Firmenbeauftragung.

#### A\_LOG – Logistischer Aufwand

Der logistische Aufwand ist jeweils an den konkreten Einsatz gebunden, dazu zählen u.a. Planungsaufwand, An- und Abfahrt, Vorbereitung, Abbau und Nachbereitung der Messeinrichtung. In Abgrenzung zur A\_FL ist hier nicht der laufende Aufwand an Arbeitskraft und Zeit während der laufenden Messung gemeint. Ein komplexer Messaufbau kann sich also durch hohe A\_FL wieder amortisieren.

#### A\_DEV – Entwicklungskosten

Diese Kosten stehen zum Anfang der Maßnahme, hier insbesondere Einarbeitungszeit des Personals, Installations- und Strukturierungsaufgaben, Automatisierungsprozesse, Entwicklung effizienter Visualisierung und Datenstruktur. Insbesondere bei innovativen Verfahren mit hohem Digitalisierungsgrad stehen diese Kosten im Vordergrund.

## **A\_KOMB – Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Zielen des Monitorings**

Anzustreben ist die Kombination von Verfahren zur Biberbau-Detektion mit obligatorischen Deichüberwachungs- und Gewässerunterhaltungsmaßnahmen. Diese werden bereits routinemäßig durchgeführt und können ggf. durch die Integration neuer Verfahren zur Biberbau-Detektion ergänzt, verbessert oder sogar ersetzt werden.

Optimal wäre hier die Weiterentwicklung zu einem ganzheitlichen Deich/Gewässer-Monitoring-System unter Berücksichtigung der zusätzlichen Anforderungen aus der Biberbau-Detektion bei geringer Gesamtkostensteigerung.

### **2.2.2.2 Qualität und Datenauswertung**

#### **Q\_RES – Auflösung**

Dieses Bewertungskriterium beschreibt, ob die Detailschärfe und die Informationsdichte der Messergebnisse ausreichen, um Bauten und Aktivitäten von Bibern detektieren zu können.

#### **Q\_VEG\_O – Erkennen von Biberspuren anhand Vegetation**

Teilweise mit dem bloßen Auge erkennbar sind Fraßspuren, plattgedrückte Wechsel oder Sassen, Transportkanäle in der Ufervegetation oder Gehölzhaufen für die Wintervorräte von Bibern. Verfahren, die biberinduzierten Vegetationseigenschaften und deren Veränderungen detektieren können, erreichen hier höhere Bewertungen.

#### **Q\_AQ\_O – Erkennen von subaquatischen Biberspuren**

Veränderungen der Gewässersohle umfassen Auswurfkegel an den Eingängen der Biberbauten und Tauchpässe. Bei steigenden Wasserständen verlieren viele Verfahren ihre Wirksamkeit, da diese nicht subaquatisch eingesetzt werden können. Diese müssen dementsprechend mit geeigneteren Verfahren kombiniert werden.

#### **Q\_TER\_O – Erkennen von Biberspuren an der terrestrischen Oberfläche**

Veränderungen der terrestrischen Oberfläche (ohne Vegetation) aufgrund von Biberaktivität umfassen Absenkungen durch nachgebende Hohlräume, Sassen, freiliegende Eingänge zum Bau oder ausgegrabene Kanäle zum Transport von Nahrung oder Flutung von Flächen. Beispielsweise würde ein hochauflösendes DGM als Ergebnis eines Detektionsverfahrens in dieser Hinsicht eine höhere Bewertung erfahren.

#### **Q\_DEPTH\_U – Untersuchungstiefe**

Einige bildgebende Verfahren zur Bodenerkundung variieren neben der Auflösung auch in der zu erreichbaren Untersuchungstiefe. Wenn ein Verfahren zwar in oberen Bodenschichten (z.B. 0,5 m) hochauflösende Bilder liefert, sich danach jedoch stark abschwächt, sind tiefer liegende Baue nicht mehr zu erkennen und werden an dieser Stelle schlechter bewertet.

An den Oderdeichen wurden Bauten bis in 7 m Tiefe unter der Deichkrone gefunden (Tabelle 4). Die meisten Bauten befinden sich jedoch innerhalb einer 1–2 m starken Schicht unterhalb der Geländeoberfläche.

### **Q\_HOHL\_U – Hohlräume**

Dieses Bewertungskriterium beschreibt, ob es mit dem Verfahren möglich ist, Luft oder Wasser gefüllte Hohlräume bzw. Veränderungen von Hohlräumen in aufeinander folgenden Messungen, zu detektieren.

### **2.2.2.3 Auflagen und Einschränkungen**

#### **R\_SAISON – Saisonale Einschränkungen**

Denkbar sind hier Einschränkungen der Detektionsverfahren durch Bodenfrost, Eis- und Schneebedeckung, Vegetation sowie biologischen Schutzzeiten (z.B. Brut- und Balzzeiten). Letzteren ist insbesondere für land- und wassergestützte Erkundungsmethoden relevant.

#### **R\_MET – Meteorologische Verhältnisse**

Unterschiedliche Randbedingungen können sich auch aus dem Wetter ergeben, dabei können Temperaturunterschiede für die Messgeräte und das Personal, wechselnde Feuchtegehalte im Erdkörper durch Niederschlag oder auch starke Windverhältnisse eine Rolle spielen.

#### **R\_SURF – Oberflächenbeschaffenheit**

Unter diesem Kriterium werden alle Faktoren, die sich aus der Oberflächenbeschaffenheit ergeben und den Messablauf beeinflussen oder stören, zusammengefasst, z.B. die Höhe der Vegetation, die Böschungsneigung, die Ebenheit der Oberfläche (Bodenwellen). Manche Verfahren erfordern an dieser Stelle vorbereitende Maßnahmen, um diese Störeinflüsse zu minimieren, oder erzielen aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

#### **R\_PEGEL – Einschränkungen aus dem Wasserstand**

Umfasst die Aspekte Grundwasserstand und Wasserstand der Oberflächengewässer, insbesondere im Hochwasserfall, wenn Aspekte der Personensicherheit und der Einstaugrad des Deiches eine wichtige Rolle spielen. Verfahren zur Bodenerkundung werden auch oft durch hohe Grundwasserstände gestört.

#### **R\_JUR – Genehmigungsrechtliche Auflagen**

Luftgestützte Verfahren sind im Grenzgebiet häufig mit erheblichen Einschränkungen verbunden und bedürfen auch die Flugsicherheit betreffend weitreichender Genehmigungen. Ebenfalls können hier umwelt- oder besitzrechtliche Genehmigungsprozesse für die jeweiligen Verfahren relevant werden.

#### **R\_SE\_U – Untergrund**

Die Ergebnisse von bodenerkundenden Detektionsverfahren können durch erhebliche Unsicherheiten bei der Bestimmung der Bodenparameter (Dichte, elektr. Leitfähigkeit, organische Anteile, Feinanteile) als auch durch Störeinflüsse (Fremdkörper, z.B. Kampfmittel, Kabel oder Rohre) beeinflusst werden.

### **2.2.3 BESTIMMUNG DER GEWICHTUNGSFAKTOREN**

Die Werte der Gewichtungsfaktoren für die gewählten Bewertungskriterien bestimmen maßgeblich die letztendlich errechneten Gesamtnutzwerte. Bei unterschiedlichen Bewertungsperspektiven sowie persönlichen Wissensständen kann es zu größeren Abweichungen kommen.

Um den Einfluss der subjektiven Einschätzung von Einzelpersonen zu dämpfen, wurden die Gewichtungsfaktoren in einem zwei-stufigen Verfahren erarbeitet. Zunächst wurden die Gewichtungsfaktoren

unabhängig von den Bearbeitern verteilt, verglichen und nach Diskussion der Abweichungen eine gemeinsame Wichtung erarbeitet. Das Ergebnis des ersten Schrittes wurde mit dem Auftraggeber abgestimmt. Die resultierenden Gewichtungsfaktoren der Verfahren zur oberirdischen und unterirdischen Detektion der Biberbauten finden sich in Tabelle 2 und Tabelle 3.

**Tabelle 2: Gewichtungsfaktoren (Gf) – Oberirdische Detektion von Biberbauten.**

Kriterien	A_FL	A_FINANZ	A_LOG	A_DEV	A_KOMB		Summe je Kriterium	Gf [%]
A_FL		1	2	2	2		7	35,0
A_FINANZ	1		1	1	1		4	20,0
A_LOG	0	1		1	1		3	15,0
A_DEV	0	1	1		0		2	10,0
A_KOMB	0	1	1	2			4	20,0
Summe							20	100,0
Kriterien	Q_RES	Q_VEG_O	Q_AQ_O	Q_TER_O				
Q_RES		2	2	2			6	50,0
Q_VEG_O	0		0	1			1	8,3
Q_AQ_O	0	2		1			3	25,0
Q_TER_O	0	1	1				2	16,7
Summe							12	100,0
Kriterien	R_SAISON	R_MET	R_SURF	R_PEGEL	R_JUR			
R_SAISON		2	1	2	1		6	30,0
R_MET	0		0	1	0		1	5,0
R_SURF	1	2		1	1		5	25,0
R_PEGEL	0	1	1		0		2	10,0
R_JUR	1	2	1	2			6	30,0
Summe							20	100,0

**Tabelle 3: Gewichtungsfaktoren (Gf) – Detektion der unterirdischen Biberbautenverläufe.**

Kriterien	A_FL	A_FINANZ	A_LOG	A_DEV	A_KOMB		Summe je Kriterium	Gf [%]
A_FL		1	2	2	2		7	35,0
A_FINANZ	1		1	1	1		4	20,0

Kriterien	A_FL	A_FINANZ	A_LOG	A_DEV	A_KOMB		Summe je Kriterium	Gf [%]
A_LOG	0	1		1	1		3	15,0
A_DEV	0	1	1		0		2	10,0
A_KOMB	0	1	1	2			4	20,0
Summe							20	0,0
Kriterien	Q_RES	Q_DEPTH_U	Q_HOHL_U					
Q_RES		1	1				2	33,3
Q_DEPTH_U	1		1				2	33,3
Q_HOHL_U	1	1					2	33,3
Summe							6	100,0
Kriterien	R_SAISON	R_MET	R_SURF	R_PEGEL	R_JUR	R_SE_U		
R_SAISON		2	1	2	1	0	6	20,0
R_MET	0		0	1	0	0	1	3,3
R_SURF	1	2		1	1	0	5	16,7
R_PEGEL	0	1	1		0	0	2	6,7
R_JUR	1	2	1	2		1	7	23,3
R_SE_U	2	2	2	2	1		9	30,0
Summe							30	100,0

## 2.2.4 BESTIMMUNG DER ZIELERFÜLLUNGSFAKTOREN

Analog zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren wurden auch die Zielerfüllungsfaktoren der Bewertungskriterien für die untersuchten Detektionsverfahren zuerst von den Bearbeitern separat vergeben, anschließend verglichen und unter Diskussion der Abweichungen ein gemeinsamer Wert festgelegt. Die resultierenden Zielerfüllungsfaktoren wurden im Anschluss mit dem Auftraggeber final abgestimmt. Die Tabellen der Zielerfüllungsfaktoren befinden sich in den jeweiligen Kapiteln der zugehörigen Detektionsverfahren bzw. in den Übersichtstabellen der Verfahren zur Detektion oberirdischer Biber Spuren [Kapitel 4] und unterirdischen Biberbautenverläufe [Kapitel 5].

## 3 Anforderungen an Detektionsverfahren

Die Anforderungen an die Detektionsverfahren ergeben sich aus (1) den typischen Eigenschaften der Reviere der Biber sowie dem Verhalten der Biber, den typischen Eigenschaften (2) der Biberbauten sowie (3) der Oder im Land Brandenburg (inkl. dort vorhandene Deiche). Weitere Anforderungen ergeben sich aus (4) einer Monitoring-Frequenz, die für die Bewertung der Standsicherheit der Deiche zu gewährleisten ist, und (5) dem Aufwand des Verfahrens.

Ansatzpunkte zur Detektion ergeben sich aus den drei erst genannten Aspekten und werden in den Kapiteln 3.1 bis 3.5 behandelt. Die wichtigsten Anforderungen sind in Kapitel 3.6 zusammengefasst.

### 3.1 REVIERE UND VERHALTEN DER BIBER

Biber benötigen in ihrem Revier ein perennierendes Gewässer, das im Winter nicht bis zum Gewässergrund durchfriert und einen Gehölzbestand aufweist, der auch im Winterhalbjahr eine ausreichende Ernährung gewährleistet [3]. Die Größe der Reviere ist im Wesentlichen vom Nahrungsangebot abhängig, und kann damit jahreszeitlich variieren [3].

Der Biber ernährt sich im Winterhalbjahr vorwiegend von Rinde und Knospen weicher Laubhölzer [3]. Im Falle von Vereisungen werden vor allem Wurzeln von Wasser- und Uferpflanzen sowie zuvor im Gewässergrund verankerte Vorräte an Ästen und Zweigen (Nahrungsfloß) verzehrt [7]. Im Sommerhalbjahr ernährt sich der Biber vor allem von krautigen Pflanzen und ufernah angebaute Feldfrüchten wie Mais, Getreide im Milchreifestadium und Rüben [7].

Biber sind hauptsächlich in einem Streifen von ca. 10–20 m Entfernung zum Gewässer, vorwiegend in der Dämmerung und nachts aktiv [3; 5; 7]. Im Winter reduzieren die Biber generell ihre Aktivität und konzentrieren diese eher auf das Revierzentrum, halten jedoch keinen Winterschlaf [3; 4; 7]. Die Tiere können auch bei geschlossener Eisdecke über mehrere Wochen im Bau bleiben, sofern eine ausreichende Luftzufuhr gewährleistet ist [7]. Die geringere Ausdehnung der Reviere, das Vorkommen von Nahrungsflößen und die bessere Zugänglichkeit der Gewässer durch die offenere Vegetation kann Kartierungen in diesem Zeitraum erleichtern [4].

Beweidungen in einem Biberrevier verringern den Jungaufwuchs von Gehölzen und können durch Verknappung des Nahrungsangebotes einschränkend auf das Vorkommen von Bibern wirken [4; 9]. Bei schweren Weidetieren wie Pferde und Rinder kommt hinzu, dass diese durch ihren Tritt in Biberbauten einbrechen können [4; 9]. Dies kann potenzielle Reviere unattraktiver machen und vergrämd wirken.

Die Flächen an der Deichaußenseite („Wasserseite“) werden allenfalls mit sehr geringen Viehdichten landwirtschaftlich genutzt. Binnenseitig des Deichs („Landseite“) wird meist intensiver Ackerbau mit für den Biber attraktiven Feldfrüchten betrieben. Dies in Kombination mit der hohen Gewässerdichte bietet sehr gute Bedingungen für den Biber und führt zu einem quasi flächendeckenden Vorkommen des Bibers entlang der Oder. Es gelten alle potenziellen Reviere als besetzt [1]. Entlang der Oderdeiche in Brandenburg erstreckt sich ein typisches Biberrevier auf einer Länge von ca. 1–1,15 km Deich [1] bzw. Fluss [2], und beherbergt geschätzte 4–5 Biber [1].

Biber zeichnen sich durch stark territoriales Verhalten aus. Sie sind sehr standorttreu und die Reviere werden aggressiv gegen andere Biber verteidigt [7].

Ob dies bedeutet, dass die Anzahl der Reviere, bzw. Biber, in Zukunft nicht weiter substantiell ansteigen wird, ist unsicher, kann aber vermutet werden [1; 2; 9].

Aufgrund der Standorttreue der Biber sind Kartierungen der Biberreviere über mehrere Jahre hinweg von praktischem Nutzen [Anhang B.2]. Da es an der Oder kaum zu Neuerschließungen von Revieren kommt, sind die Grabaktivitäten der Biber im Wesentlichen vom Wasserstand abhängig [Anhang B.2]. Jahreszeitliche Präferenzen für Grabaktivitäten sind nicht bekannt [Anhang B.1+B.2]. Möglicherweise kommt es, z.B. um die Jungtiere zu schützen, bei Hochwasserereignissen, welche an der Oder in der Regel im Frühjahr auftreten, zu verstärktem Anlegen von Notbauten [Kapitel 3.3] [9].

### 3.2 EIGENSCHAFTEN DER BIBERBAUTEN

Eine Übersicht der Eigenschaften von Biberbauten findet sich in Tabelle 4. Die Gänge der Biberbauten haben einen Durchmesser von ca. 30–40 cm, die Wohnhöhlen von ca. 1–2 m. Verbindungstunnel zum Deich können eine Länge von ca. 20 m aufweisen. Im Oderbruch wurden bereits bis zu 18 m lange Gänge im Deich gefunden. Die Bauten in den Deichen der Oder erreichen eine Tiefe von bis zu 3–4 m. Als Einbautiefe für Biberschutzelemente am Deich gilt mittlerweile eine Tiefe von mindestens 1,5 m unterhalb der Gewässersohle des nächsten unmittelbar angrenzenden Gewässers [1]. Der Eingang eines Biberbaus ist oft die tiefste Stelle, er gräbt bevorzugt in der weicheren, dem Gewässer zugewandten Böschung schräg nach oben. Dabei werden oft mehrere Wohnkammern angelegt. Bricht der Bau oberirdisch ein, wird er mit Ästen und Erde wieder zugedeckt ([10]).

Neben den unterirdischen Bauten schaffen sich Biber teilweise oberirdische Mulden zum Ausruhen (Sassen). Diese befinden sich meist unterhalb von Vegetation [7]. Neben den klassischen Biberburgen und -dämmen, können auch Kanäle angelegt werden. Dabei handelt es sich um vom Biber geschaffene Wasserrinnen in der Ufervegetation oder weichem Boden. Sie dienen als Schwimmpässe, sowie Transport- und Fluchtwege [7].

**Tabelle 4: Biber und Biberbauten – charakteristische Daten**

Quelle	[1]	[7]	Begehung der Projektpartner am 19.6.2019
Reviergröße	ca. 1 km Deichlänge	0.5–1.5 km Gewässerslänge	
Tiere pro Revier	4.375		
Hauptaktivitäts-Raum	ca. 20 m Entfernung vom Gewässer → Deiche mit Abstand = < 20 m gelten als potenziell gefährdet		
Hauptaktivitäts-Tageszeit		dämmerungs- und nachtaktiv	
<b>Unter Wasser</b>			
Eingang Bau			30–40 cm + eventuell mit vorgelagerter leichter Erhebung (Erdauswurf/ Schüttkegel) bestehend aus Aushub der Bauarbeiten
Tauchpässe/ Grundwechsel		erkennbar an fehlendem Pflanzenbewuchs, fehlendem Laub u. Feinsediment.	

Quelle	[1]	[7]	Begehung der Projektpartner am 19.6.2019
		Meist heller als umliegender Untergrund	
<b>Unterirdisch</b>			
Durchmesser Gänge	40–60 cm	30–40 cm	
Durchmesser Wohnhöhle	bis 2 m	1 m	
Reichweite in Deich hinein	bis 18 m		
Länge Verbindungstunnel		bis 20 m	
Tiefe der Bauten	bis 1.5 m unter Sohle des angrenzenden Gewässers		3–4 m
<b>Oberirdisch</b>			
Kanäle		30–60 cm breit, 30–50 cm tief, bis 100 m lang	
Wechsel		ca. 30 cm breit	30–40 cm breit
Sonstige Anzeichen für Bibervorkommen		(frische) Verbiss-Spuren, umgestürzte Bäume	lokale Absenkungen des Geländes durch eingebrochene Gänge und Höhlen
		Sassen	Geruchsspuren
		Biberdämme, Biberburg	
Sonderfall Notbauten	je nach Höhe des Wasserstands; kann nach dem Hochwasser möglicherweise relativ leicht detektiert werden, da die Eingänge dann am Deichhang frei liegen		

### 3.3 SONDERFALL NOTBAUTEN

Im Hochwasserfall kann es zu Notbauten der Biber kommen. Gemäß den Ansprüchen des Bibers den Eingang zu seinem Bau unter Wasser zu haben, die Wohnhöhle selbst jedoch im Trockenen, werden dabei dem Wasserstand folgend, ggf. mehrfach, mit hoher Geschwindigkeit neue Bauten und höher gelegene Wohnhöhlen angelegt [11] (1–2h! mündliche Mitteilung B.2). Dies stellt eine akute Bedrohung der Standsicherheit des Deiches dar.

Da die Notbauten während des Hochwassers-Ereignisses angelegt werden, können diese nicht im Vorfeld detektiert werden. Es besteht lediglich die Möglichkeit, Deichabschnitte nach ihrer Gefährdung für

Notbauten zu kategorisieren. Hauptfaktoren sind die Nähe der Biberbauten zum Deich und die Verfügbarkeit von hochwassersicheren Rückzugsmöglichkeiten im Deichvorland [2].

Da die Biber im Hochwasserfall aber durchaus schwimmend weitere Strecken zurücklegen können, um sichere Plätze für Notbauten zu finden, kann der gesamte Deichverlauf der Oder als potenziell gefährdet angenommen werden [3; 12].

Die verstärkte Bautätigkeit sowie die Notwendigkeit diese dem Wasserstand anzupassen, ermöglicht eventuell ein leichteres Beobachten der Tiere (mündliche Mitteilung Undine Schubert, Biberbeauftragte des Landes Brandenburg, Telefongespräch am 29.7.2019). Nach dem Hochwasserereignis sollten die Notbauten relativ leicht zu detektieren sein, da die Eingänge an der Deichböschung frei liegen oder es durch Ausspülung während des Hochwassers bereits zu sichtbaren Schädigungen des Deichs gekommen ist.

### 3.4 HOHLRÄUME DURCH ANDERE BODENWÜHLER

Im Idealfall sind die Verfahren auch zur Detektion von Bauten anderer Erdhöhlen bewohnender Tiere geeignet, insbesondere Bisam und Nutria. Die Gänge des Bisam haben ein Durchmesser von ca. 10–15 cm, die Höhlen eine Breite von ca. 30–50 cm und eine Höhe von ca. 20–35 cm [7]. Die Gänge sind weiter verzweigt und weisen im Deich eine Länge bis zu 15 m auf (mündliche Mitteilung bei Begehung mit dem Landesamt für Umwelt 19.06.2019). Die Gänge des Nutria beginnen über Wasser, haben ein Durchmesser von ca. 40–60 cm und eine Länge von bis zu 8 m (meist ca. 1 m) [7]. Für Nordamerika werden Durchmesser der Nutria-Wohnhöhlen von bis zu 1 m berichtet [13], in der deutschen Literatur findet sich hierzu keine Angabe.

### 3.5 EIGENSCHAFTEN DER ODERDEICHE

An der Oder gibt es Deichabschnitte in verschiedenen Bauweisen (Anhang A: Regelprofile). Abbildung 3 zeigt ein Regelprofil der bevorzugten Bauweise. Allgemein sind die Deiche auf einer gering durchlässigen Auenlehmschicht gegründet. Diese deckt die unterliegenden pleistozänen und holozänen Sande ab. Die Auenlehmschicht kann aber auch Fehlstellen aufweisen.

Die Ertüchtigung der Deiche nach dem Oderhochwasser 1997 ist für fast den gesamten Verlauf entlang der Oder abgeschlossen. Die Deiche wurden i.d.R. für einen Bemessungswasserstand von  $HW_{200}$  (Wasserstand für Hochwasserabfluss mit 200-jährlichem Wiederkehrintervall) zuzüglich eines Freibords von i.d.R. 1 m, instandgesetzt [14]. Für das anzustrebende Deichprofil der Oderdeiche (ohne das Vorhandensein lokaler Einschränkungen und Erfordernisse, Regelprofil), beträgt die Sollbreite der Deichkrone 3 m. Bei der Deichertüchtigung wurde eine Verringerung der Neigung landseitiger Böschungen von 1:2 bis 1:2.5 auf 1:3 angestrebt. Alte Deichkörper bestehen häufig aus inhomogenen Materialien aus sandig-schluffigen, sandigen und tonigen Substraten, welche meist locker bis mitteldicht gelagert und nur oberflächlich nachverdichtet sind. Diese wurden überbaut und vergrößert und somit in den ertüchtigten Deichkörper integriert.

Sofern die wasserseitige Böschung der Deiche eine Neigung von maximal 1:3 aufwies, konnte diese häufig unverändert bleiben (Abbildung 3). Andernfalls war eine Abflachung notwendig. Es erfolgte lediglich eine Aufschüttung mit Kiessand auf der Deichinnenseite, eine Erhöhung der Deiche und eine Abdichtung der Krone mit bindigem Material oberhalb des alten Deichkörpers.

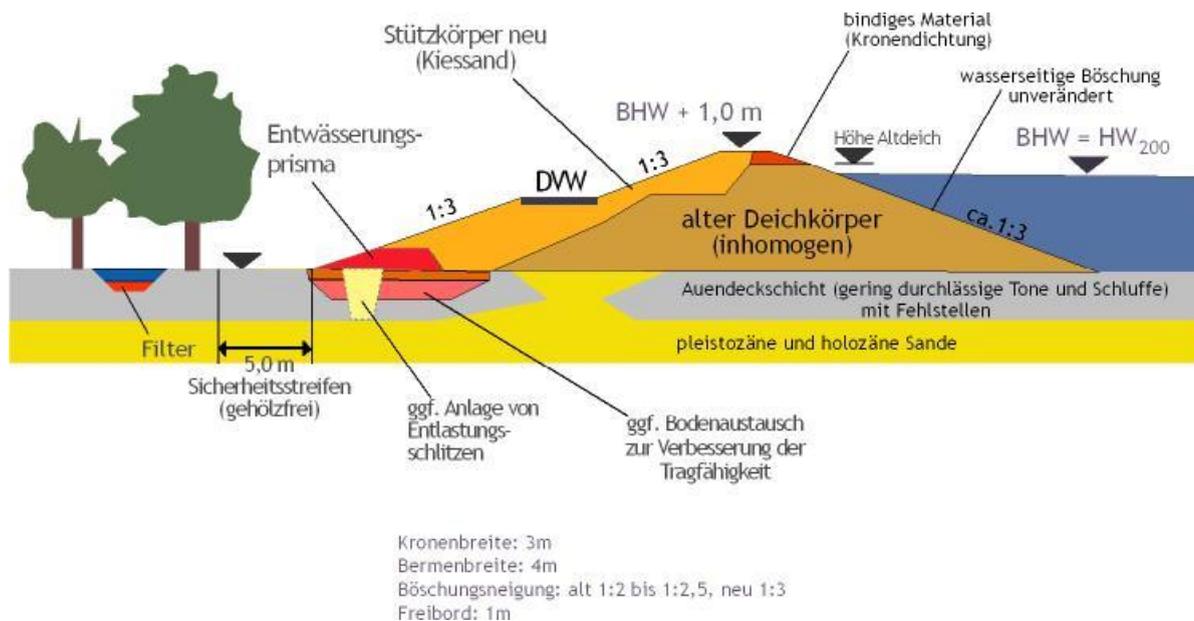


Abbildung 3: Regelprofil der häufigsten Deichbauweise an der Oder (Quelle LfU Brandenburg).

Bei den anderen Bauweisen gibt es meist zur Deichaußenseite hin eine Dichtungsschicht bestehend aus Lehmen und Tonen, welche lageweise in Schichten von max. 0,3 m Dicke verbaut wurde (Anhang A: Regelprofile). Diese wird teilweise von Verstärkungen der Deichaußenseite in Form von Vorschüttungen überlagert. Die Vorschüttungen bestehen aus bindigem und nicht-bindigem Substrat, teilweise Altdeichmaterial. Die Schichtdicke beträgt meist 1–2 m, teilweise bis zu 5 m. Stützkörper, bestehend aus Sand-Kies-Gemischen, sind v.a. an der Deichinnenseite verbaut.

In der Regel ist ein beidseitig gehölzfreier Deichschutzstreifen von 5 m Breite vorhanden (gesetzl. Grundlage BbgWG §96).

Aktuell gelten 157 km Oderdeich als bibergefährdet. Idealerweise sollten die Deiche 1 mal pro Monat auf neue Biberbauten kontrolliert werden [1], mindestens jedoch 2 mal pro Jahr [mündliche Mitteilung Begehung 19.06.2019].

Eine weitere Besonderheit an den Oderdeichen ist die starke Belastung der Region durch Munition aus dem 2. Weltkrieg [15]. Im Zuge der Bauarbeiten wurden nach dem Oderhochwasser 1997 erneuerte Deiche jedoch tiefgründig von Munition beräumt [15]. Eine stärkere Munitionsbelastung dürfte nur noch an unsanierten Deichen auftreten.

### 3.6 HAUPTANFORDERUNGEN AN DIE DETEKTIONSVERFAHREN

Aus den Rechercheergebnissen wurden folgende grundlegende Anforderungen an Verfahren zur Detektion vom Biber angelegter Hohlräume oder deren Kombination an der Oder abgeleitet:

- unterirdische Hohlräume, die mit Luft oder Wasser gefüllt sein können und einen Durchmesser ab 25 cm (bei Bisam ab 10 cm) aufweisen, müssen lokalisiert werden können,
- ausreichende Auflösung zur Hohlraumerkundung bis zu einer Tiefe von 4–5 m, wobei sich die meisten Hohlräume vermutlich in den ersten 1–2 Metern Tiefe unter GOK befinden,

- Lokalisierung der Hohlräume auch bei gemischten Substraten mit lehmigen und tonigen Anteilen oder eingelagerten stark tonigen Schichten möglich,
- Möglichkeit der Lokalisierung von Hohlräumen auch unter bereits vorhandenen, oberflächlich verlegten Biberschutzgittern,
- Möglichkeit der Hohlraumsuche entlang der Oderdeiche über eine Strecke von ca. 160 km mehrmals im Jahr, vorzugsweise monatlich.

## 4 Detektion von Biberbauten

### 4.1 DETEKTIONSVERFAHREN

#### 4.1.1 WILDSKOUTS + SPÜRHUNDE

##### Beschreibung

In seiner „Konzeption für den weiteren Umgang mit Biberschäden an den Oderdeichen und Gewässern I. Ordnung“ [1] unterbreitet Krüger vom Landesamt für Umwelt Brandenburg die Idee, die Zuständigkeit der Bisamfänger auf alle bodenwühlenden Tiere, auch Biber, auszuweiten. Passend zu ihrem neuen umfangreicheren Aufgabengebiet schlägt Krüger die neue Bezeichnung „Wildscouts“ vor. Um den neuen Anforderungen gerecht zu werden, sollen die Reviere der Wildscouts gegenüber denen der Bisamfänger soweit verkleinert werden, dass jede Strecke einmal pro Monat abgelaufen werden kann (ca. 50.000–80.000 ha). Mit diesen Vorgaben wären für den Bereich der Oder in Brandenburg drei neue Stellen für Wildscouts zu schaffen. Weiterhin sieht das Konzept vor, die Wildscouts mit auf das Aufspüren von Biber- und Bisambauten abgerichteten Hunden auszustatten. Dabei erscheint es erforderlich, die Hunde mit Schutzwesten auszustatten, da Biber mit ihren starken, kräftigen Zähnen lebensgefährliche Verletzungen verursachen können. Zur zentralen Administration bzw. Koordination der Wildscouts müsste eine weitere Stelle eingerichtet oder das Aufgabengebiet der Biberbeauftragten entsprechend erweitert werden. Wildscouts sollten auch an Gewässern II. Ordnung kontrollieren und fangen, um eine flächendeckende Kontrolle zu gewährleisten. Dies betrifft vor allem die Kontrolle und Bekämpfung von Bisam und Nutria.

##### Rechercheergebnis

Das Verfahren wird generell positiv bis sehr positiv von den Experten/Praktikern eingeschätzt [Anhang B.1, B.2, B.3]. Es gibt anekdotische positive Erfahrungen mit Hunden. Bislang sind allerdings keine systematischen Untersuchungen oder Versuche mit Hunden bekannt.

Haupteinschränkung ist vermutlich die Detektion von Hohlräumen mit unter Wasser liegendem Zugang sowie verlassene Bauten, welche aufgrund fehlenden Geruchs von den Hunden nicht gefunden werden können [Anhang B.3].

**Tabelle 5: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Wildscouts + Hunde.**

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	mit dem skizzierten Vorgehen wäre es möglich, die gesamte Deichstrecke kontinuierlich zu überwachen	9
A_FINANZ	dauerhafte Einstellung/Finanzierung der Wildscouts	6
A_LOG	sehr gering	8
A_DEV	Anlernen der Wildscouts, v.a. aber Ausbildung der Hunde, Jagdrecht berücksichtigen	7
A_KOMB	sehr gut kombinierbar mit Monitoring für andere Bodenwühler und Gewässer-/Deichunterhaltung	8
Q_RES	vermutlich werden v.a. aktiv genutzte Bauten mit an der Luft frei liegenden Eingängen gefunden	7
Q_VEG_O	sehr gut bei dichtem Bewuchs einsetzbar, Veränderungen der Vegetation durch Wildscouts erkennbar	9
Q_AQ_O	eher gering, Hunde können weniger riechen, Wildscouts müssten sehr genau suchen	4

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
Q_TER_O	sehr hoch	9
R_SAISON	weniger Spuren im Winter, außer bei Schnee	8
R_MET	nur bei Unwettern nicht	9
R_SURF	kaum	10
R_PEGEL	bis zu Wasserständen praktikierbar, bei denen Begehbarkeit von Deichen gewährleistet ist.	8
R_JUR	keine bekannt	10

### Fazit

Dieses Verfahren kann zur Detektion von Biber, Bisam und Nutria angewendet werden. Das kontinuierliche Monitoring ist mit personellen Aufwendungen verbunden. Haupteinschränkung dürfte vermutlich die Detektion von Hohlräumen mit unter Wasser liegendem Zugang sowie die Lokalisierung verlassener Bauten sein. Experten aus der Praxis schätzen das Verfahren generell positiv bis sehr positiv ein. Systematische Untersuchungen oder Versuche mit Hunden sind bislang nicht bekannt.

## 4.1.2 EINBEZIEHUNG LOKALER BEVÖLKERUNG (CITIZEN SCIENCE)

### Beschreibung

Aus dem Bereich „Citizen Science“ ist die Beteiligung von Bürgern an fachlichen Untersuchungen bekannt. Sie melden Beobachtungen, führen Messungen durch oder werten Daten aus. Zur Detektion von Biberbauten können Beobachtungen von Anwohnern oder Besuchern des Flussgebiets der Oder (z.B. Touristen auf dem Oderradweg) erfasst und bewertet werden. Für die Publikation des Verfahrens in der Öffentlichkeit und die Erfassung dieser Beobachtungen wäre z.B. eine Online-Plattform und/oder Smartphone-App geeignet, worüber ein Beobachter seine Meldungen mitteilen kann.

Die Idee könnte über die lokalen Medien (TV, Radio, Presse), Vereine (z.B. Hundevereine), Jäger, Förster, Umwelt- und Tourismusverbände etc. bekannt gemacht werden. Weiterhin wäre es möglich, Info-Tafeln mit QR-Code aufzustellen, welche direkt zu der Online-Karte und ggf. weiteren Hintergrundinformationen verlinkt. Bestätigte Funde von Biberbauten in Deichen könnten ggf. mit „Boni“, „Biberscout-Zertifikaten“ o.ä. belohnt werden.

### Rechercheergebnis

Bislang gibt es keine praktische Erfahrung zu dieser Idee. Es existieren relativ umfangreiche und flächendeckende Kartierungen der Biberreviere. Aufgrund der Standorttreue der Biber sind starke Verschiebungen oder Erweiterungen der Reviere kaum zu erwarten. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die konkrete Verortung bislang unbekannter Biberbauten direkt am Gewässer oder Deich. Jedoch ist weder zeitlich noch räumlich eine Regelmäßigkeit eines derartigen Monitorings gegeben.

**Tabelle 6: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Einbeziehung lokaler Bevölkerung (Citizen Science).**

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	es ist weder zeitlich noch räumlich eine Regelmäßigkeit gegeben, dafür können viele sensibilisierte Beteiligte viel sehen	3
A_FINANZ	die laufenden Kosten sind vermutlich sehr gering	8
A_LOG	vermutlich gering, je nach Anzahl und Qualität der Meldungen, stellt sich erst in der Praxis heraus	4

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_DEV	Aufbau einer Online-Plattform, Bewerbung, Info-Tafeln mit QR-Code, rechtliche Fragen	5
A_KOMB	sehr gut kombinierbar mit Monitoring für andere Bodenwühler und Gewässer-/Deichunterhaltung	8
Q_RES	vermutlich werden v.a. aktiv genutzte Bauten mit an der Luft frei liegenden Eingängen gefunden	6
Q_VEG_O	sehr hoch	8
Q_AQ_O	Spaziergänger werden nicht wasserseitig suchen, motivierte Hobbyscouts eventuell eher	4
Q_TER_O	hoch, aber fällt nicht jedem auf	8
R_SAISON	Beobachter im Winter weniger unterwegs, weniger Spuren im Winter	7
R_MET	Beobachter bei schlechtem Wetter weniger unterwegs	7
R_SURF	dichte Vegetation	7
R_PEGEL	bis zu Wasserständen praktikierbar, bei denen Begehbarkeit von Deichen gewährleistet ist, neue Notbauten vermutlich nicht erkennbar	8
R_JUR	keine bekannt, evtl. Datenschutz bei App-Entwicklung berücksichtigen	10

## Fazit

Dieses Verfahren erfordert die Entwicklung und Implementierung einer leicht verfügbaren und gut handhabbaren Kommunikationsplattform (Online-Portal, Smartphone-App o.ä.) über die Bürger-Beobachtungen gemeldet werden können. Diese Meldungen müssen auf Seriosität geprüft werden, bevor daraus Maßnahmen abgeleitet werden können. Eine Besonderheit der Methode ist das direkte Einbeziehen der Bevölkerung in den Komplex Biber und Gewässer- bzw. Deichmonitoring. Das kann positive Effekte mit sich bringen. Da das Verfahren allenfalls Einzelfunde liefern kann, kann es höchstens als Erweiterung bereits angewandeter Verfahren eingesetzt werden. Dabei können die Unsicherheiten der Ergebnisse, Unabwägbarkeiten bei der Durchführung (z.B. häufiges Betreten der Deiche) und die Aufwendungen für die Prüfung der gemeldeten Funde dem zu erwartenden Ergebnis gegenübergestellt werden.

## 4.1.3 WÄRMEBILD-AUFNAHMEN

### Beschreibung

Mittels Wärmebildkameras, die auf einem Boot oder an Drohnen montiert werden, lassen sich Differenzen in der reflektierten Wärmestrahlung (Infra-Rote-Wellenlänge = 0,7–1000 µm) visualisieren, die von einer Oberfläche emittiert werden.

Der Emissionsgrad ist materialabhängig und muss kalibriert werden. Empfohlen wird eine maximale Entfernung von einigen Metern, sonst treten Verfälschungen durch die Eigenstrahlung der Luft auf [16].

## Rechercheergebnis

Mittels Infrarot-Technologie lassen sich hochauflösende Visualisierungen der thermalen Eigenschaften des oberflächennahen Erdkörpers treffen. Da Hohlräume (mit und ohne Wasser) oft eine andere Wärmeleitfähigkeit als ihre Umgebung aufweisen und es damit zu Wärmebrücken im positiven und negativen kommen kann, können diese bei ausreichend geringer Tiefe im Boden identifiziert werden. Das Verfahren findet, insbesondere in der Archäologie, bereits Anwendung [17]. Dabei wird die relativ konstante Temperaturverteilung im Erdinneren im Vergleich zur Oberflächentemperatur des Deichkörpers ausgenutzt. Die Anwendung von Infrarot-Kameras ist erfolgversprechend auf offenen Flächen, wenn das Gras kurz ist und Vegetation (Büsche, Bäume) die direkte Sicht nicht verdeckt bzw. mit eigener Wärmestrahlung das Signal stört [Anhang B.9]. Prinzipiell können Veränderungen der Wasseroberflächentemperatur bei Höhlen oder Quellen nahe der Wasseroberfläche erkennbar sein. Dadurch ließen sich ggf. sogar unter Wasser liegende Eingänge zu Biberbauten detektieren.

Das Verfahren erfordert sowohl die Kalibrierung auf den Emissionswert des Materials als auch deutliche Temperaturkontraste. Eventuell wäre es möglich, den Kontrast der thermalen Eigenschaften der Umgebung zu über den Biberwegen liegendem Substrat oder dem Eingang zum Biberbau durch gezielte Manipulation zu verstärken. Dies könnte z.B. durch künstliche Erhöhung der Bodenfeuchte oder durch Bewässerung der Untersuchungsfläche erreicht werden, was jedoch großflächig kaum praktikabel erscheint. Als optimaler Zeitraum zum Einsatz des Verfahrens wird die Zeit bei Sonnenaufgang empfohlen [Anhang B.9].

**Tabelle 7: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Wärmebild.**

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	um ausreichende Auflösung zu gewährleisten, müssen die Drohnen relativ nah an der Oberfläche fliegen, die Flugzeiten sind möglicherweise auf die Morgenstunden beschränkt	7
A_FINANZ	Bedienerpersonal (zusätzliches Personal), Messgeräte	5
A_LOG	mäßig, Planung regelmäßiger Messeinsätze, jedoch UAV	7
A_DEV	Ausbildung Personal, Anschaffung Technik	7
A_KOMB	eventuell auch andere Hohlräume erkennbar, gute Möglichkeiten für die Kombination mit Deichüberwachungs- und Gewässerunterhaltungsmaßnahmen	5
Q_RES	Auflösung im Zentimeterbereich	9
Q_VEG_O	Biberspuren in der Vegetation nicht gut erkennbar, jedoch auch nicht im Fokus, evtl. erkennbar: vegetationsfreie Biberwechsel	5
Q_AQ_O	unklar, ob Bibereingänge unter Wasser über Temperaturunterschiede erkennbar sind (vermutlich nur sehr nah an der Oberfläche liegende Eingänge)	5
Q_TER_O	Oberflächen-Photometrie, evtl. Einfluss der oberflächlichen Veränderungen durch den Biber auf die Oberflächentemperatur	7
R_SAISON	Temperaturunterschiede von Biberbauten zur Umgebung vermutlich am deutlichsten im Sommer/Winter	7
R_MET	Temperaturunterschiede müssen hinreichend groß sein, vermutlich an frühe Morgenstunden gebunden (kurz vor Sonnenaufgang), großer Einfluss (Feuchtegehalte, Sonneneinstrahlung, etc.)	5
R_SURF	Einschränkung durch Bäume, funktioniert nur bei niedriger Vegetation	5

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
R_PEGEL	mit Drohne auch bei hohen Wasserständen einsetzbar	8
R_JUR	evtl. Einschränkungen wegen Grenznähe oder Nationalpark? aktuell unbekannte Auswirkungen bzgl. des Umweltschutzes (Drohne)	6

### Fazit

Wärmebild-Aufnahmen können am besten in Kombination mit anderen Verfahren, z.B. als erster Screening-Schritt zur Identifizierung von Flächen/Abschnitten auffälliger Grabungsaktivitäten für die Detail-Analyse, eingesetzt werden. Sie sind stark abhängig von der Tageszeit und anderen meteorologischen Einflüssen.

## 4.1.4 ECHOLOT

### Beschreibung

Die Echolot oder Sonar-Technik wird vom Boot aus eingesetzt. Durch hochfrequente Schallwellen, die im Fächer (Multibeam)- oder Einzelstrahl kegelförmig von einem Sonargerät ins Wasser ausgesandt werden, kann durch die Reflexion ein zweidimensionales Bild der Oberfläche erzeugt werden. Die erzeugten Bilder werden mit Aufnahmen aus einer anderen Position verglichen und können somit zu einem digitalen Höhenmodell unter Wasser liegender Bereiche (Bathymetrie) beitragen. Dabei muss der störende Einfluss von Wellenbewegungen ausgeglichen werden. Die Positionsbestimmung erfolgt in der Regel über einen externen GNSS-Empfänger des Globalen Navigations satellitensystems, der auf dem Boot, an einer Drohne oder anderem Gerät befestigt wird. Das Verfahren ist auch im trüben Wasser einsetzbar [Anhang B.9] [18].

### Rechercheergebnis

Bei größeren leistungsstarken Geräten ist die Auflösung mindestens im cm-Bereich, diese benötigen aber zum Teil größere Boote mit mehr Tiefgang. Im Prinzip gibt es viele Gemeinsamkeiten zur Lasertechnologie; Durchdringung von lockerer Vegetation ist möglich, wenn das einhergehende Bildrauschen gefiltert werden kann. Es gibt Berichte aus den Niederlanden, wo vom Bisam und Biber verursachte Hohlräume an Kanälen mittels Echolot detektiert werden konnten [19]. Die Erfolgswahrscheinlichkeit ist stark abhängig vom Reflexionswinkel, von Vegetation und Oberflächenbeschaffenheit. Bei hohem Wasserstand könnten beim Vergleich mit dem originalen digitalen Höhenmodell Volumenveränderungen, wie Auswurfkegel, Kanäle und Eingänge der Baue, mittels geeigneter Auswertungsmethoden identifiziert werden [Anhang B.9, HTG Kongress 2019].

Tabelle 8: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Echolot.

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	langsamere Befahrung und Messung für Datendichte, Boot muss immer in die jeweilige Wasserfläche umgesetzt werden	5
A_FINANZ	Bedienerpersonal (zusätzliches Personal), Messgeräte	5
A_LOG	mäßig, Planung regelmäßiger Messeinsätze	6
A_DEV	Ausbildung Personal, Kalibrierung und Validierung auf Oderdeichen, Technik aber vorhanden, Ausbildung Personal, Technik, Tests	7
A_KOMB	Deichveränderung unter Wasser erkennbar, auch Böschungsrutschung und andere Schäden	8

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
Q_RES	Auflösung im Zentimeterbereich bei langsamer Geschwindigkeit	8
Q_VEG_O	nicht im Fokus	3
Q_AQ_O	vegetationsfreie Unterwasser-Eingänge zu den Biberbauten vermutlich gut erkennbar, Auswurfkegel	9
Q_TER_O	beschränkt auf Unterwasser-Einsatz	0
R_SAISON	gering, bis auf Eisbedeckung im Winter	9
R_MET	kaum Einfluss, außer durch zu hohen Wellengang	9
R_SURF	Oberfläche sollte stetig sein, Komplikationen bei Vegetation	5
R_PEGEL	auch bei hohen Wasserständen einsetzbar	10
R_JUR	keine bekannt, eventuell Grenzschutzbestimmungen, Wasserverkehrssicherheit	9

### Fazit

Das Verfahren eignet sich zur Erstellung eines digitalen Höhenmodells unter Wasser liegender Oberflächen auch im trüben Wasser. Es ist jedoch fraglich, ob mit kleineren Sonargeräten ausreichende Datendichten erzeugt werden können, um bibertypische Strukturen zu erkennen. Dabei ist insbesondere die Vegetation als größter Störfaktor zu vermuten. Im Gegensatz zur Messtechnik wird bei den Auswerte- und Interpretationsverfahren ein größeres Entwicklungspotenzial gesehen. Bei hohen Wasserständen können Veränderungen der Oberfläche der Deiche unterhalb der Wasserlinie erkannt werden. Eventuell sind die Eingänge von während des Hochwassers angelegten Notbauten von Booten aus mittels Sonar detektierbar.

## 4.1.5 UAV-PHOTOGRAMMETRIE

### Beschreibung

In den letzten Jahren gab es große Fortschritte bei der Erstellung 3D-Geländemodellen unter Verwendung der Structure-From-Motion-Methode. Dabei können aus einem von verschiedenen Positionen mit handelsüblichen Kameras erzeugten Bildersatz der Oberfläche einer Geländestruktur durch Spezial-Software (z.B. Meshroom, Metashape, ReCAP, Cloudcompare) originalfarbige 3D-Modelle in cm-genaue Auflösung erstellt werden [16].

### Rechercheergebnis

Das Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden (IWD) hat bereits umfassende Erfahrungen in der Anwendung dieser Methode sammeln können (3D-Modellierung von Injektionskörpern, Oberflächenveränderung an Tagebau-Restseen). Der mögliche Anwendungsbereich wird jedoch durch vorhandene Vegetation stark beeinflusst. Über den Vergleich von Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten lassen sich Volumendifferenzen bzw. Änderungen in der Geländeoberfläche lokalisieren. Referenzpunkte, z.B. Kilometersteine an Deichen, zur korrekten Ausrichtung und Überlagerung der jeweiligen Oberflächenmodelle sind sinnvoll.

Tabelle 9: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) UAV-Photogrammetrie.

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	schnelles Verfahren, eventuell geeignet zum Screenen des gesamten Deiches innerhalb weniger Tage	9
A_FINANZ	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen, günstige und robuste Technik, preiswerte Software, erfahrenes Personal notwendig	6
A_LOG	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	8
A_DEV	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	8
A_KOMB	hohes Potenzial, da visuelle Erfassung für Abgleich mit Ergebnissen anderer Verfahren förderlich	8
Q_RES	ausreichend (cm-Bereich)	9
Q_VEG_O	Erkennung von Vegetationsspuren/-stress, Verbisspuren eventuell nur eingeschränkt	7
Q_AQ_O	nein	0
Q_TER_O	eingestürzte Baue, Setzungen, Sassen, Transportkanäle und Pfade	7
R_SAISON	keine bekannt	10
R_MET	Einschränkungen durch Wind, Niederschlag (Drohnenflug)	7
R_SURF	Bäume und Sträucher können Sicht auf Geländeoberfläche behindern	7
R_PEGEL	Begehbarkeit des Deiches muss gegeben sein	6
R_JUR	eventuell Flugbeschränkungen wegen Grenznähe oder Nationalpark	6

### Fazit

Die UAV-Photometrie kann insbesondere für schnelle kostengünstige 3D-Oberflächenmodelle genutzt werden. Hier wird die Chance vor allem im Erkennen von Unterschieden (Einbrüche, Sassen, Vorratslager, Verbiss- und Schleifspuren) zur vorhergehenden Befliegung gesehen, um Aktivitäten der Biber zeitlich und räumlich einzugrenzen. Durch digitale Auswertemethoden lassen sich Veränderungen erkennen, die in klassischen Luftbildaufnahmen weniger auffallen.

Mittels einer zusätzlichen Aufrüstung der Drohnen mit Multispektral-Kameras lassen sich evtl. gestresste Pflanzen lokalisieren, die Hinweise auf darunter liegende Hohlräume geben können (Kapitel 5.1.4).

## 4.1.6 LIDAR SCANNING

### Beschreibung

LiDAR (Light Detection And Ranging) ist ein optisches Verfahren, welches dem Prinzip des Radars oder Echolots ähnelt, jedoch mit Laserimpulsen arbeitet, die an einer Oberfläche reflektiert werden. Über die Auswertung der Laufzeit der Lichtreflektion vom Sender zum Empfänger lässt sich die räumliche Lage von Oberflächenpunkten lokalisieren. Durch Überschneidung von verschiedenen Aufnahmepositionen kann aus der originalen 2D-Aufnahme ein 3D-Oberflächenmodell erstellt werden.

Durch Filterungsverfahren (z.B. Schwellwertverfahren mit waveforms) lässt sich zum Teil auch locker gewachsene Vegetation herausfiltern oder vermessen. Somit ist es möglich, ein lokales, digitales Höhenmodell zu erstellen.

Airborne-Laserscanner können je nach eingesetzter Technik und Laserart hohe Auflösungen (cm- bis dm-Bereich) mittels verschiedener Laserarten erreichen (z.B. grüner Laser für Durchdringung der Wasseroberfläche). Die korrekte Georeferenzierung der Aufnahmen ist in der Regel in der Messtechnik bereits integriert.

### Rechercheergebnis

Die LiDAR-Technologie mit einer Drohne als Tragsystem anzuwenden, ist prinzipiell möglich. Jedoch sind die Systeme mit der erforderlichen Auflösung zur Detektion der Biberbaue aktuell noch sehr kostenintensiv. Die Befliegung durch Flugzeuge mit leistungsstärkeren Systemen ist auf Dauer mit einem sehr hohen logistischen und finanziellen Aufwand verbunden. Die Auswertung der Daten ist relativ aufwändig.

**Tabelle 10: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) LiDAR Scanning.**

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	schnelles Verfahren, eventuell geeignet zum Scannen des gesamten Deiches innerhalb weniger Tage	8
A_FINANZ	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	5
A_LOG	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	7
A_DEV	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen.	7
A_KOMB	aktuelles digitales Höhenmodell	4
Q_RES	ausreichend für Oberflächenveränderung im dm-Bereich	7
Q_VEG_O	einzelne Pflanzen eher nicht erkennbar, jedoch größere Pfade, Sassen und Vorratshaufen	6
Q_AQ_O	vermutlich geringe Eindringtiefe wegen trübem Wasser, jedoch Möglichkeit des grünen Lasers	4
Q_TER_O	eingestürzte Baue, Setzungen, Sassen, Transportkanäle und Pfade	6
R_SAISON	im Winter durch geringere Vegetation besser einsetzbar	7
R_MET	Einschränkungen durch Wind, Niederschlag	7
R_SURF	Bäume und Sträucher können Sicht auf Geländeoberfläche behindern, Auflösung abhängig vom Aufnahmewinkel	7
R_PEGEL	Begehbarkeit des Deiches muss gegeben sein	6
R_JUR	eventuell Flugbeschränkungen wegen Grenznähe oder Nationalpark?	6

### Fazit

Auch mittels LiDAR-Scanning lassen sich schnell hochauflösende Modelle der Oberfläche erstellen. Die zur Biberbau-Detektion benötigten leistungsfähigen Systeme sind jedoch für den Drohneneinsatz aktuell noch sehr kostenintensiv. Bei weiterer Entwicklung der Technik hin zu günstigeren Geräten lassen sich in Zukunft durch die Anwendung grüner Laser auch subaquatische Oberflächenmodelle bis zu einer Tiefe von >1,50 m erstellen [18], worin ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens gesehen wird. Zur Auswertung und regelmäßiger Befliegung werden wahrscheinlich externe Firmen beauftragt werden müssen.

## 4.1.7 SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY

### Beschreibung

Zur Überwachung von räumlichen Veränderungen von Deichoberflächen wird aktuell in den Niederlanden eine flächendeckende satellitengestützte Oberflächenerfassung mittels Radarinterferometrie (InSAR) erprobt [20; 21]. Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend. Voraussetzungen für die zielführende Anwendbarkeit des Verfahrens sind eine sehr geringe Vegetationshöhe (Oberflächenbedeckung, Bodentyp beeinflusst Kohärenz), eine günstige Ausrichtung des Deiches zum Aufnahmewinkel (Sensitivität), eine ausreichende Anzahl verfügbarer Radarbilder für das aufzuzeichnende Deformationssignal und erkennbare Bezugspunkte. In der Vertikalen sind Genauigkeiten im cm-Bereich erzielbar. Das Verfahren ist durch die mögliche, freie Nutzung der vom Sentinel-Satelliten der ESA (European Space Agency) erfassten Daten relativ kostengünstig. Die großen Datenmengen müssen jedoch durch qualifiziertes Personal aufbereitet und ausgewertet werden.

### Rechercheergebnis

Die erreichbare Auflösung des Verfahrens liegt in vertikaler Richtung im cm-Bereich, in der horizontalen jedoch im m-Bereich. Somit wäre zu prüfen, ob Veränderungen durch Biberbauten groß genug sind, um mit der gegebenen Lagegenauigkeit sichtbar gemacht werden zu können.

**Tabelle 11: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Satellite Radar Interferometry.**

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	Überfliegung erfolgt alle 1–2 Tage	10
A_FINANZ	qualifiziertes Personal erforderlich, (initial) aufwändige Auswertung	5
A_LOG	sehr gering, da Satellit bereits in Betrieb, regelmäßiges Mähen	8
A_DEV	Ausbildung Personal, Kalibrierung und Validierung auf Oderdeichen	4
A_KOMB	Integration in Frühwarnsystem, viele andere Prozesse durch Oberflächenveränderung erkennbar	9
Q_RES	horizontale Auflösung im Meterbereich, vertikale im cm-Bereich	4
Q_VEG_O	Wechsel und Transportkanäle evtl. erkennbar (horizontale Auflösung), zu testen, ob gut abgrenzbar	4
Q_AQ_O	ungeeignet wegen geringer Eindringtiefe des Radars ins Wasser, sowie der begrenzten räumlichen Auflösung	0
Q_TER_O	vermutlich erkennbar, ist zu testen	8
R_SAISON	gering	10
R_MET	kaum Einfluss	8
R_SURF	Schwachpunkt, da bis jetzt nur auf vegetationsfreien Flächen gute Auflösung, Orientierung des Deiches ebenfalls relevant	5
R_PEGEL	sicherheitstechnisch auch bei hohen Wasserständen einsetzbar	9
R_JUR	keine bekannt, evtl. Nutzungsregularien Satellitendienste	10

### Fazit

Das Potenzial von InSAR wird vor allem als Bestandteil eines integrativen flächendeckenden Frühwarnsystems für das Versagen von Deichstrukturen gesehen, das sich über Zeiträume von >1–2 Tagen ankündigt (Intervall des Überfliegens).

Es wäre zu testen, ob biberinduzierte Veränderungen der Oberfläche durch die Messdaten erfasst bzw. lokalisiert werden können. Um das Verfahren anwenden zu können, muss die Oberflächenvegetation vergleichsweise eine geringe Höhe aufweisen. Eine Auswertung kann sich somit in der Vegetationsperiode nur auf relativ frisch gemähte Bereiche beschränken. Darüber hinaus erfordert die Auswertung der Satellitendaten umfangreiches Expertenwissen. Die Vorteile liegen insbesondere in den zeitlich engen systematischen Messfrequenzen, in sehr geringer logistischer Vorbereitung und den geringen Kosten. Momentan ist das Verfahren jedoch nur ausreichend anwendbar auf festen, nicht bewachsenen Oberflächen (Straßen, Befestigungen, etc.). Das Herausfiltern von Vegetation aus den erfassten Daten ist Gegenstand aktueller Forschungen.

#### 4.1.8 NICHT WEITER VERFOLGTE VERFAHREN

Weitere Detektionsmöglichkeiten, wie z.B. die Idee, Biber durch Kamerafallen oder über durch Fressköder ausgebrachte Isotope zu lokalisieren, existieren; wurden im Rahmen dieses Projekts aber nicht weiterverfolgt, da die Fragestellung der vorliegenden Studie nicht darauf abzielt, die Aktivität bzw. Bewegungen einzelner Biber im Revier zu verfolgen. Zudem ist die räumliche Verteilung der Reviere weitestgehend bekannt [1; 2; 3; 4; 9]. Was Kamerafallen betrifft, gibt es zudem negative Erfahrungen mit Diebstahl [9].

#### 4.2 BEWERTUNGSTABELLE OBERIRDISCH

Die Grafik in der Abbildung 4 stellt die Ergebnisse der Nutzwertanalyse übersichtlich dar. An dieser Stelle können auch Schwächen des Verfahrens bei der zunächst subjektiven Wahl der Zielerfüllungsfaktoren erkannt und im direkten Vergleich der Verfahren nachgebessert werden. Von den Verfahren zur Lokalisierung von Biberbauten und oberirdischen Biberspuren wurde der Einsatz von Wildscouts, unterstützt durch Spürhunde, zunächst am besten bewertet. Im Vergleich zu den anderen Verfahren sind hier am wenigsten Auflagen/Einschränkungen bekannt. Gleichzeitig ist das Aufwand/Leistungsverhältnis des Verfahrens zusammen mit UAV-Photogrammetrie und Satellite Radar Interferometry am besten. Hinzu kommt, dass eine hohe und vor allem zuverlässige Datenqualität erwartet wird. Bei der Satellite Radar Interferometry gibt es bislang wenig praktische Erfahrung. Sollte sich das Verfahren als praktikabel erweisen, hat es das Potenzial, eine deutlich höhere Bewertung zu bekommen. Die Verfahren Wärmebild, Echolot und LiDAR Scanning lassen sich voraussichtlich auf einem Boot kombinieren und ergänzend einsetzen [Kapitel 6].

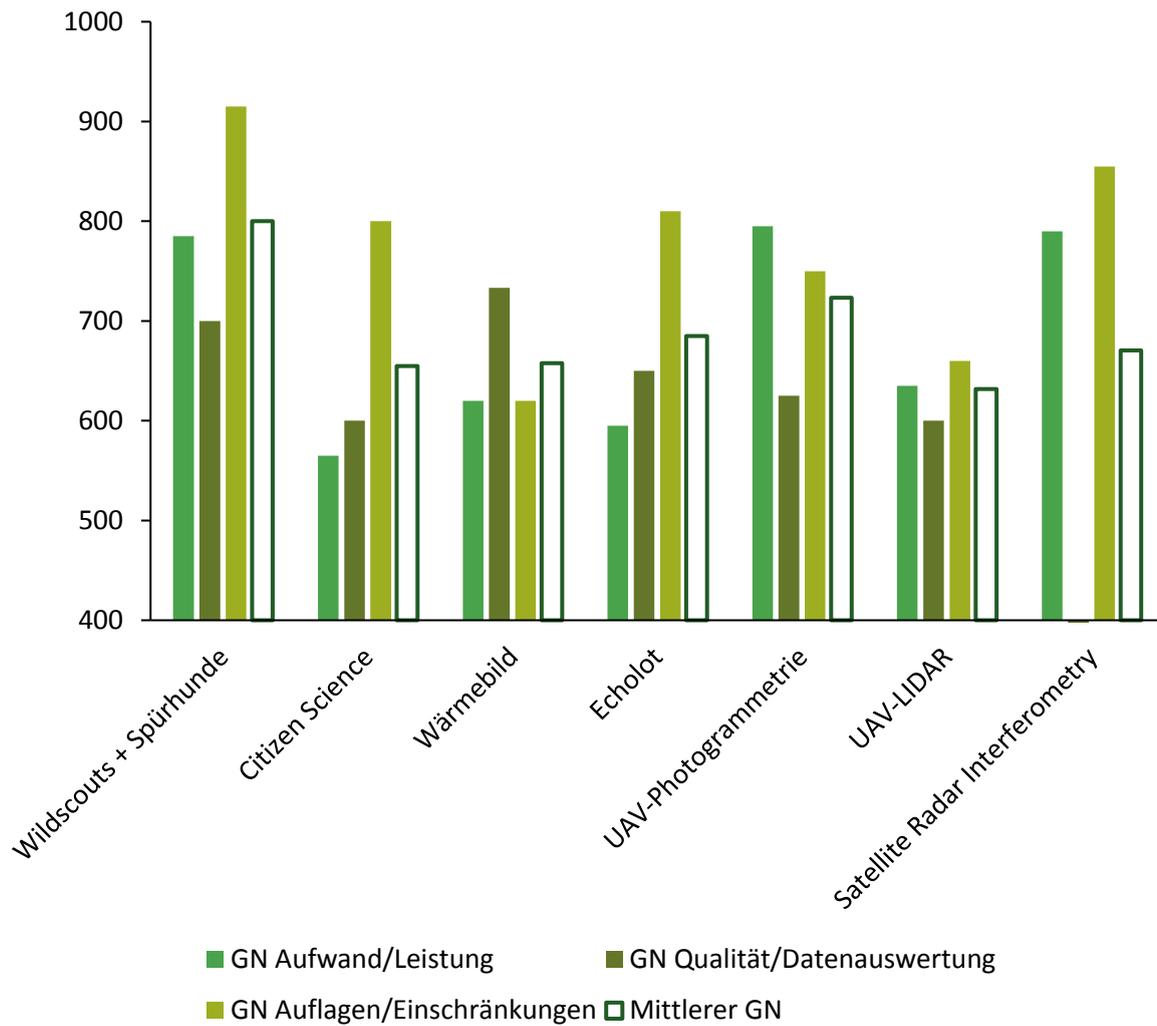


Abbildung 4: Gesamtnutzwerte der Verfahren zur Lokalisierung von Biberbauten und der Detektion von oberirdischen Biberspuren.

# 5 Detektion der Biberbautenverläufe

## 5.1 DETEKTIONSVERFAHREN

Es sind aktuell keine geophysikalischen Verfahren bekannt, die mittels Befliegung durch Drohne und Flugzeug die hier geforderte Auflösung erreichen können [Anhang B.5, B.6, B.7, B.9]. Erfolgreiche Detektionen von Hohlräumen mit den hier gegebenen Randbedingungen sind in Theorie und Praxis nur für kürzere Gewässer- und Deichstrecken (< 5 km) bekannt. Hinsichtlich des Deichmonitorings wurde ein entsprechendes Monitoring mit rein geophysikalischen Methoden für längere Deichstrecken aus finanzieller Sicht bislang nicht als sinnvoll erachtet, so dass eine mechanische Bibersicherung von Deichen bislang die Vorzugslösung darstellt [Anhang B.3, B.9].

Als weitere Option für die Erkundung der unterirdischen Verläufe wurde neben dem klassischen geophysikalischen Verfahren der Einsatz von Multispektral-Kameras aus der Luft berücksichtigt.

### 5.1.1 GEORADAR

#### Beschreibung

Bei der Georadar Methode werden hochfrequente elektromagnetische Impulse von einer Sender-Antenne in den Erdboden abgegeben. Mit einer zweiten Antenne wird die Reflektion der Signale gemessen. Im Untergrund werden die Signale an den Übergängen von Materialien mit unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen in unterschiedlicher Weise reflektiert. Die Laufzeit der Signale steht im Bezug zur Lagetiefe der reflektierenden Objekte. Die Eindringtiefe der Messung wird bestimmt durch die elektrische Leitfähigkeit der Materialien im Untergrund bzw. der damit zusammenhängenden Dämpfung des Signals sowie der Frequenz der Antennen. Letztere bestimmt auch die Auflösung der Messung [22; 23].

#### Rechercheergebnis

Von den geophysikalischen Verfahren findet sich für Georadar die meiste Literatur bezüglich der gesuchten Anwendung. Dies stimmt auch mit der Befragung der Experten überein. Mehrere Experten und Praktiker äußerten, dass das Georadar für die gesuchte Anwendung das geeignetste der geophysikalischen Verfahren sei [Anhang B.4, B.5, B.9]. Sie gilt unter den geophysikalischen Methoden auch eindeutig als diejenige mit der höchsten Flächen-/Streckenleistung [24] [Anhang B.4, B.5, B.9]. Es finden sich einige Positiv-Beispiele von der erfolgreichen Detektion von Hohlräumen im Untergrund für die vorliegende Fragestellung in ausreichender Auflösung in der Literatur [16; 24; 25; 26]. Bei trockenem Substrat ist die Eindringtiefe des Georadar im Vergleich zu den geoelektrischen und elektromagnetischen Verfahren größer [11; 16]. Georadar ist zur Detektion luftgefüllter Hohlräume sehr gut geeignet [24].

Allerdings wurde auch auf die prinzipiellen Einschränkungen durch bindige Substrate, hohe Grundwasserstände und Bibergitter (Metall) verwiesen. Diese Limitierungen werden auch in der Fachliteratur erwähnt und wurden u.a. auch durch einen Georadar-Test an einem Deichabschnitt bei Kienitz im Jahre 2009 bestätigt [6]. „Auf einer Fläche von 20 mal 10 Meter wurden an der Deichaußenseite 11 Längsprofile (mit dem Deich) und 21 Querprofile (senkrecht zum Deich) vermessen“ [6]. Die lehmige Abdeckung schränkte die Eindringtiefe des Georadars auf 1–1,5 m ein. Ähnliche Eindringtiefen von 1–2 m für bindige Substrate werden auch in der Literatur angegeben [16; 24; 27].

Es gibt auch die Einschätzung, dass Georadar für die Detektion von Hohlräumen der Größenordnung von Tierbauten in Deichen wegen der häufig bindigen Substrate nicht einsetzbar bzw. hinreichend zuverlässig sei [27]. Über erfolglose Versuche einer Hohlraum-Detektion an Deichböschungen wird

berichtet [16]. Grundsätzlich gilt das Georadar jedoch als gut geeignet für Detailuntersuchungen und die Identifizierung von Einzelobjekten im Untergrund [22; 23].

Die Eignung des Verfahrens zur regelmäßigen Überwachung längerer Deichabschnitte wurde bislang unterschiedlich bewertet. Generell werden die Ergebnisse und Einschränkungen der 2009 Test-Studie am Oderdeich [6] von den Experten als realistisch eingeschätzt [Anhang B.4, B.9]. Als wesentlichste technische Neuerung gilt die Verwendung von Georadar-Arrays, die mehrere Antennen gleichzeitig verwenden, so dass die Flächenleistung der Vermessung drastisch erhöht werden kann [Anhang B.4, B.5]. Es wurde die Möglichkeit beschrieben, mit auf Fahrzeugen montierten Georadar-Arrays innerhalb weniger Tage bis Wochen den gesamten Deich abzufahren [Anhang B.4, B.5]. Diese Möglichkeit wurde von anderen Experten aufgrund der Unebenheiten des Deiches als nicht praktikabel eingeschätzt [Anhang B.9]. Diese Diskrepanz ergibt sich vermutlich daraus, dass es bei idealen, d.h. gut befahrbaren Verhältnissen, prinzipiell möglich wäre, mit Georadar größere Strecken zu vermessen. Für die Oderdeiche ist diese Voraussetzung aber nicht gegeben.

Konkret reichten die Angaben bezüglich der erreichbaren Vermessungsleistung bei den nicht-fahrzeuggestützten Verfahren von 3 km für ein vertikal ebenen Schnitt (Profil) pro Tag [Anhang B.5] bis 1–2 km je Profil und Stunde [11]. Angaben von 5–15 km/h [14] beziehen sich eher auf relativ glattes gut befahrbare Gelände, wie bspw. Straßen [Anhang B.10].

Georadar erlaubt einerseits eine erste direkte Auswertung der Bilder im Feld, was es ermöglicht, die Messungen anzupassen, so dass z.B. „Verdachtsflächen“ nachfolgend dichter vermessen werden könnten [24]. Andererseits ist die Auswertung sehr aufwändig und erfordert Expertenwissen [22; 24] [Anhang B.6].

Für das nicht-fahrzeuggestützte Verfahren wurde der zeitliche und finanzielle Aufwand als generell deutlich zu hoch für ein regelmäßiges Monitoring längerer Deich-Abschnitte eingeschätzt [Anhang B.5]. Dies deckt sich mit der Einschätzung des Gewässer- und Deichverbandes Oderbruch (GEDO) [1] auf Basis der Ergebnisse des Georadar-Tests an einem Deichabschnitt bei Kienitz im Jahre 2009 [6] sowie mit den Einschätzungen in der Literatur bezüglich der Anwendung für Detailuntersuchungen [14].

**Tabelle 12: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Georadar.**

<b>Kriterien</b>	<b>Einschätzung/Begründung</b>	<b>Zf</b>
A_FL	schnellstes geophysikalisches Verfahren, geeignet zum Screenen von Verdachtsflächen, nicht geeignet zum kontinuierlichen Deich-Monitoring	7
A_FINANZ	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen, teure Auswertung und Equipment	5
A_LOG	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	6
A_DEV	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	8
A_KOMB	Unterstützung der Einschätzung der allg. Standsicherheit	6
Q_RES	ausreichend	8
Q_DEPTH_U	voraussichtlich 1–2 m eher 1,5 m wegen bindigen Substraten	3
Q_HOHL_U	sehr gut geeignet für luftgefüllte Hohlräume	8
R_SAISON	keine grundsätzlichen Einschränkungen bekannt	8
R_MET	funktioniert am besten bei trockenem Substrat	6

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
R_SURF	unebenes Gelände behindert grundlegend die Anwendung Böschungsneigung erschwert die Anwendung, Gras muss kurz gemäht sein	4
R_PEGEL	bei hohen GW-Ständen nicht sinnvoll einsetzbar	4
R_JUR	keine bekannt.	10
R_SE_U	Problem mit bindigen Substraten und Metallkörpern, d.h. auch Bibergittern	5

### Fazit

Da die Ergebnisse und Einschränkungen der 2009 Test-Studie von den Experten als realistisch eingeschätzt wurden [Anhang B.4, B.9], kann sie als realistische Orientierung für die Anwendung von Georadar an der Oder dienen. Eine evtl. neu zu testende Option wäre, ob mit auf Fahrzeugen montierten Georadar-Arrays die Streckenleistung signifikant erhöht werden könnte. Eventuell könnte eine weitere, besser praktikable Option sein, die Deichvorländer in der Nähe des Deichfußes zu befahren, um evtl. vorhandene Verbindungsrohre zu detektieren (mit der Annahme, dass sich die meisten Röhren innerhalb einer 1–2 m starken Schicht unter Geländeoberfläche befinden). Ausgehend von detektierten Röhren könnten nachfolgend Detailuntersuchungen am Deichkörper erfolgen, z.B. durch Probeinjektion (lässt sich Material in einen vermuteten Hohlraum verpressen, ist es mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Treffer), Sondierungen oder Schürfe. Prinzipielles Interesse, an einem Test von fahrbaren Georadar-Arrays mitzuwirken, wurde sowohl vom Herrn Dr. Allroggen vom Institut für Geowissenschaften der Universität Potsdam [Anhang B.5] als auch von Herrn Professor Müller-Petke des Leibniz-Institutes für Angewandte Geophysik [Anhang B.4] bekundet.

## 5.1.2 GEOELEKTRISCHE WIDERSTANDSTOMOGRAPHIE

### Beschreibung

Bei der geoelektrischen Widerstandstomographie (Electrical Resistivity Tomography) wird die Verteilung des elektrischen Widerstandes im Untergrund gemessen. Hierzu wird Strom mit zwei Elektroden in den Untergrund eingespeist und mit zwei weiteren Elektroden abgenommen. Eine Einzelmessung ermittelt einen integralen „scheinbaren elektrischen Widerstand“ für ein gegebenes Volumen. Mit Hilfe von spezieller Software („inversion“) wird der spezifische elektrische Widerstand des Untergrundes aus dem scheinbaren elektrischen Widerstand vieler Einzelmessungen in unterschiedlichen Eindringtiefen und räumlichen Konfigurationen der Elektroden abgeleitet. Dies ergibt 2D-Schnitte. Mit speziellen Messkonfigurationen und spezieller Software können auch 3D-Ansichten des Untergrundes unmittelbar erstellt werden [11]. Die topografischen Verhältnisse des Untersuchungsgebiets bzw. des Deiches sind in der Planung und Auswertung der Messungen zu berücksichtigen. Die Eindringtiefe des Verfahrens wird maßgeblich durch den Elektrodenabstand bestimmt [22; 23].

### Rechercheergebnis

Die geoelektrische Widerstandstomographie ist eines der Standardverfahren im Deich-Monitoring [22; 23]. In einer Vergleichsstudie verschiedener geophysikalischer Verfahren wird von einer Untersuchungstiefe von 5–6 m berichtet [11]. Allerdings kann das Verfahren nur ortsfest angewendet werden. Der Aufbau des Messfeldes ist relativ aufwändig. Als Richtgröße kann für den Elektrodenabstand des Messnetzes die Hälfte der Größe der zu detektierenden Hohlräume angesetzt werden, bei 30–40 cm also ein Abstand von 10–20 cm [Anhang B.5]. Für Aufbau und Messung müssen mehrere Stunden veranschlagt werden [11].

Geschätzt wird eine Flächenleistung von 300 m Deich pro Tag [Anhang B.9]. Daher ist die Methode ungeeignet, um längere Deichabschnitte regelmäßig zu überprüfen [11]. Das Verfahren eignet sich vor

allem zur Identifikation von größeren Bereichen gleicher elektrischer Leitfähigkeit, kann aber bei entsprechend engem Elektrodenabstand auch zu Detailuntersuchungen genutzt werden [16; 22; 23].

Jahreszeitliche Einschränkungen zum Einsatz des Verfahrens sind nicht bekannt. Im Vergleich zum Georadar funktioniert das Verfahren schlechter bei trockenem Untergrund [11]. Dies gilt hauptsächlich für oberflächennahe trockene Verhältnisse, bei denen der Übergangswiderstand für die Einspeisung/Messung des Stroms an den Elektroden vergleichsweise hoch ist [Anhang B.9]. Problematisch beim Erkennen von Hohlräumen sind Störeinflüsse durch andere, wenig leitfähige Einschlüsse im Erdkörper [11]. Das Potenzielllinienfeld muss sich gut aufbauen können, größere nicht leitfähige Bereiche (grobporige, trockene Bodenschichten) führen zu schwer interpretierbaren Ergebnissen [11].

Am Versuchsdeich der TU Dresden wurde ein erster Versuch durchgeführt. Dieser führte jedoch vermutlich aufgrund der großen störenden Randeffekte des schmalen Versuchsaufbaus zu keinem befriedigenden Ergebnis.

**Tabelle 13: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Geoelektrische Widerstandstomographie.**

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	langsamstes betrachtetes geophysikalisches Verfahren, geeignet für Detailuntersuchung von Verdachtsflächen, nicht geeignet zum kontinuierlichen Deich-Monitoring	2
A_FINANZ	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen, teure Auswertung und Equipment	5
A_LOG	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen.	6
A_DEV	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	8
A_KOMB	Unterstützung der Einschätzung der allg. Standsicherheit	6
Q_RES	bei hinreichend dichtem Elektrodenabstand und guter Abdeckung der Geometrie ausreichende Auflösung.	6
Q_DEPTH_U	voraussichtlich ausreichend (5–6 m).	8
Q_HOHL_U	vermutlich weniger sensitiv als Georadar für luftgefüllte Hohlräume	5
R_SAISON	keine grundsätzlichen Einschränkungen bekannt (im Sommer Deiche aber etwas zu trocken)	7
R_MET	funktioniert am besten bei nicht trockenem Substrat, Handling der Elektroden bei frostigen Temperaturen unangenehm	6
R_SURF	Topographie des Deiches muss berücksichtigt werden, Kontakt zum Untergrund muss gegeben sein, für das Setzen der Elektroden muss das Gras hinreichend kurz gemäht sein	7
R_PEGEL	bei hohen Pegel-Ständen unter Wasser nicht sinnvoll einsetzbar	6
R_JUR	keine bekannt	10
R_SE_U	Problem mit bindigen Substraten und Metallkörpern, d.h. auch Bibergittern, vermutlich weniger sensitiv für Metallgitter als Georadar	6

#### Fazit

Die geoelektrische Widerstandstomographie ist eines der Standard-Verfahren des Deich-Monitorings. Bei hinreichend engem Messnetz sollten Hohlräume der gesuchten Größenordnung detektiert werden können.

Die Notwendigkeit, das Messnetz relativ dicht aufzubauen, zusammen mit dem stationären Aufbau des Messnetzes, macht das Verfahren jedoch ungeeignet, um längere Deichabschnitte regelmäßig auf

Biberbauten zu überprüfen. Für Detailuntersuchungen an kürzeren Deichabschnitten wäre zu testen, ob das Verfahren gegenüber dem schnelleren Georadar deutlich bessere Ergebnisse liefert oder evtl. auch in der Lage ist, tiefer liegende Hohlräume, die außerhalb der Reichweite des Georadars liegen, zu detektieren. Dies gilt insbesondere für die Kontrolle von Deichabschnitten mit Biberschutzgitter.

### 5.1.3 ELEKTROMAGNETIK

#### Beschreibung

Bei den elektromagnetischen Verfahren werden elektromagnetische Felder gemessen, die durch die spezifischen elektrischen Widerstände bzw. die elektrischen Leitfähigkeiten, der Materialien im Untergrund beeinflusst werden. Gemessen werden in der Regel die durch Induktion erzeugten sogenannten Sekundärfelder an der Oberfläche. Als Quellen werden entweder bereits vorhandene natürliche oder technische Felder wie Radiowellen („passive Verfahren“) oder vor Ort erzeugte Felder („aktive Verfahren“) genutzt. Eindringtiefe und Auflösung der Messung werden bestimmt durch die vorherrschenden spezifischen Widerstände im Untergrund, die Messfrequenz und die räumliche Anordnung von Quelle und Empfänger. Wie bei der geoelektrischen Widerstandstomographie integrieren die Einzelmessungen über ein gegebenes Volumen. Die Kombination vieler Einzelmessungen mittels Inversionssoftware ergibt dann ein differenziertes Bild der räumlichen Verteilung des elektrischen Widerstands im Untergrund. Durch Variation der Messfrequenzen und der räumlichen Anordnung von Quelle und Empfänger lassen sich vertikale und horizontale Schnitte im Untergrund erstellen. Im Gegensatz zu den geoelektrischen Verfahren müssen die Sonden keinen direkten Kontakt zum Untergrund haben [22; 23].

#### Rechercheergebnis

Elektromagnetische Messungen (Frequency Domain Electro-Magnetic (FDEM) [11], Electromagnetic profile (EM) [20], etc.) werden zum Detektieren von Verdachtsflächen/-Orten für strukturelle Defekte im Deich wie Röhren oder Hohlräume genutzt [20]. Allerdings gelingt dies vor allem dann, wenn diese mit elektrisch gut leitendem Material gefüllt sind (d.h. toniges Material oder Wasser), da die Methode sensitiv auf deutliche Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit reagiert [20] [Anhang B.9]. Im Vergleich zu anderen geoelektrischen Verfahren werden die Ergebnisse noch stärker von Metallen und der Topographie des untersuchten Objektes beeinflusst [22; 23]. Letzterer lässt sich nur eingeschränkt korrigieren [22; 23]. Die Ergebnisse werden meist nur flächenhaft ausgewertet [22; 23] [Anhang B.9]. Wie die meisten geoelektrischen Verfahren eignet sich das Verfahren zur Identifikation von Bereichen gleicher elektrischer Leitfähigkeit [22; 23]. Inhomogenitäten im Untergrund werden gut detektiert, die genauen Dimensionen der Inhomogenitäten und deren Tiefe lässt sich im Vergleich zu geoelektrischen Verfahren schlechter bestimmen und die Ergebnisse sind schwerer interpretierbar [22; 23; 28] [Anhang B.9]. In einer Besprechung wurde geäußert, dass sich positive Erfahrungen für die hier interessierende Größenordnung von durch Biber angelegten Hohlräumen mit der Methode meist auf theoretische Arbeiten oder Einzelstudien beschränken und keine positiven Erfahrungen aus der Praxis bekannt seien [Anhang B.9].

Da für die Messung kein direkter Kontakt zum Untergrund notwendig ist, kann ein deutlich höherer Messfortschritt als bei der geoelektrischen Widerstandstomographie realisiert werden [22; 23]. Elektromagnetische Verfahren werden daher meist für flächendeckendes Screening angewendet [22; 23]. Für nicht-fahrzeuggestützte Messungen werden Streckenleistungen von 1–2 km Profil/h [11], und kontinuierliche Messungen in Schrittgeschwindigkeit (4–5 km/h) von 3–4 Scans angegeben [20]. Wie beim Georadar müssten pro km Deich mehrere Profile aufgenommen werden. Mittlerweile gibt es auch fahrzeuggestützte Messgeräte, welche bei günstigen lokalen Verhältnissen nochmals deutlich höhere Streckenleistungen ermöglichen [Anhang B.5]. Erfahrungen an Deichen sind allerdings nicht bekannt.

Es werden Untersuchungstiefen von 20–30 m bei Substraten mit starkem Widerstand und von 10–20 m bei gut leitenden Substraten berichtet [20]. Eine andere Studie berichtet, dass unterhalb einer Tiefe von 6 m die Ergebnisse nicht mehr sinnvoll auswertbar waren [11].

**Tabelle 14: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Elektromagnetik.**

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	schneller als Geoelektrik, eventuell geeignet, um Verdachtsflächen zu identifizieren, nicht geeignet zum kontinuierlichen Deich-Monitoring	4
A_FINANZ	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen, teure Auswertung und Equipment	5
A_LOG	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	6
A_DEV	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	8
A_KOMB	Unterstützung der Einschätzung der allg. Standsicherheit	4
Q_RES	vermutlich am ungenauesten von den geophysikalischen Verfahren	4
Q_DEPTH_U	voraussichtlich ausreichend	3
Q_HOHL_U	vermutlich weniger sensitiv als Georadar und Geoelektrik	4
R_SAISON	keine grundsätzlichen Einschränkungen bekannt	8
R_MET	funktioniert am besten bei nicht trockenem Substrat	5
R_SURF	unebenes Gelände behindert grundlegend die Anwendung, Topographie muss sehr genau berücksichtigt werden, kein Kontakt zum Untergrund notwendig	4
R_PEGEL	bei hohen GW-Ständen nicht sinnvoll einsetzbar	4
R_JUR	keine bekannt	10
R_SE_U	Problem mit bindigen Substraten und Metallkörpern, d.h. auch Bibergittern, vermutlich sensitiver für Metallgitter als Georadar	3

#### Fazit

Elektromagnetische Verfahren sind für die Deicherkundung weniger etabliert als Georadar und geoelektrische Widerstandstomographie. Ein Hauptnachteil der Methode ist die im Vergleich zu den anderen geophysikalischen Verfahren geringere Auflösung. Ein Hauptvorteil der Methode gegenüber der geoelektrischen Widerstandstomographie ist, dass für die Messung kein direkter Kontakt zum Untergrund bestehen muss und damit ein schneller Messfortschritt realisiert werden kann. Dies in Kombination mit Fahrzeug-gestützten Messungen könnte für die Identifizierung von Verdachtsflächen entlang längerer Deich-Abschnitte interessant sein. Vermutlich sind aber aktuell die Einschränkungen durch Geländeunebenheiten noch stärker als für das Georadar, da die Technik sowohl noch nicht so ausgereift ist als auch sehr hohe Anforderungen an die Berücksichtigung der Topographie stellt.

### 5.1.4 LUFTGESTÜTZTE MULTI-SPEKTRALE AUFNAHMEN

#### Beschreibung

Luftgestützte multi-spektrale Aufnahmen können genutzt werden, um Indizes zu ermitteln, die Pflanzenentwicklungen und Bodenwassergehalte beschreiben können (siehe auch Kapitel [4.1.5]). Die Firma Apus [29] nutzt z.B. solche Verfahren, um Systeme unterirdischer Rohrdrainagen in landwirtschaftlichen Flächen zu kartieren. Die unterschiedliche Wasserversorgung in der unmittelbaren Nähe der Dränrohre gegenüber weiter entfernten Bereichen führt zu systematischen Unterschieden im Wasser-

stress der Pflanzen und damit in der Pflanzenentwicklung. Mittels Kameras an Drohnen oder Kleinflugzeugen werden Ortho-Luftbilder und/oder multispektrale Aufnahmen erzeugt und hinsichtlich der räumlichen Muster ausgewertet. Aus den Multispektralaufnahmen wird hierzu direkt der infrarote Bereich genutzt oder Vegetationsindizes wie der NDVI ("**normalized difference vegetation index**") abgeleitet.

### Rechercheergebnis

Die Recherche beschränkte sich für dieses Verfahren zur Auswertung multi-spektraler Aufnahmen auf eine telefonische Anfrage bei der Firma Apus [Anhang B.8]. Bisläng ist dort keine Anwendung des Verfahrens zur Detektion von Hohlräumen in Deichen bekannt. Es wird jedoch prinzipiell für möglich gehalten, dass sich die Bibergänge und -höhlen ähnlich wie unterirdische Dränungen auf die Vegetation auswirken. Die potenziellen Effekte könnten am deutlichsten im Frühjahr zu Beginn der Vegetationsperiode oder bei Trockenstress erkennbar sein. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass zur Detektion der Effekte aus Infrarot-Bildern bzw. aus Multispektral-Aufnahmen abgeleiteten Pflanzenindizes wie NDVI, besser geeignet sind als „normale“ Ortho-Fotos. Für den Fall, dass das Verfahren an den Deichen der Oder getestet werden soll, besteht von Seiten der Firma Apus prinzipielles Interesse, an dem Versuch teilzunehmen.

**Tabelle 15: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Luftgestützte multispektrale Aufnahmen.**

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	schnelles Verfahren, eventuell geeignet zum Screenen des gesamten Deiches	9
A_FINANZ	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	6
A_LOG	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	8
A_DEV	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	7
A_KOMB	hohes Potenzial, da gutes bildgebendes Verfahren für Vergleich mit anderen Verfahren	8
Q_RES	Auflösung an der Oberfläche ausreichend	8
Q_DEPTH_U	mindestens in der Größenordnung der effektiven Durchwurzelungstiefe (< 1.5 m)	2
Q_HOHL_U	theoretisch ja, aber muss getestet werden	6
R_SAISON	am besten sichtbar sind die Effekte vermutlich im Frühjahr zu Beginn der Vegetationsperiode oder bei Trockenstress	5
R_MET	Einschränkungen durch Wind, Niederschlag (Kleinflugzeug)	8
R_SURF	Bäume können Sicht behindern, sonst keine Einschränkungen bekannt	7
R_PEGEL	keine bekannt	6
R_JUR	eventuell Flugbeschränkungen wegen Grenznähe, Nationalpark, Naturschutz	6
R_SE_U	Bodenart kann Einfluss haben	8

### Fazit

Dieses Verfahren scheint zur Detektion von Biber geschaffener Hohlräume vielversprechend zu sein, auch wenn es noch keine praktische Erfahrung gibt. Außerdem lässt sich eine deutlich größere Flächen- oder Streckenleistung als bei den geophysikalischen Verfahren erwarten. Dies spiegelt sich auch in der Bewertungstabelle wieder.

Allerdings wäre das Verfahren zeitlich auf die Perioden eingeschränkt, in denen Unterschiede der Wasserversorgung der Pflanzen durch die Dränwirkung der vom Biber geschaffenen Hohlräume deutlich

zum Tragen kommen. Das können der Beginn der Vegetationsperiode und Phasen mit deutlichem Trockenstress im Sommer sein, mit für die Pflanzenentwicklung hinreichend großen zeitlichen Abständen zu den vorhergehenden Mahden. Damit wäre das Verfahren zwar nicht zum kontinuierlichen oder monatlichen Monitoring, aber möglicherweise für jährlich zwei Momentaufnahmen großer Teile der Deiche oder des gesamten Deiches geeignet. Die Befunde könnten vom Biber geschaffene Hohlräume hinreichend genau oder mindestens für weitere Detailuntersuchungen identifizieren. Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen empfehlen wir eine Test-Befliegung zu einem theoretisch günstigen Termin durchzuführen, um das Potenzial der Methode besser abschätzen zu können. Ein möglicher Ansprechpartner hierfür wäre die Firma Apus.

## 5.1.5 MIKROWELLENSENSORIK

### Beschreibung

Unter dem Begriff Mikrowellensensorik werden aktive und passive Sensortechnik zur Mikrowellenmessung zusammengefasst, d.h. elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von 300 MHz (1 m) bis 300 GHz (1 mm) [30]. Passive Verfahren (Radiometer) empfangen die Signale und messen die natürliche thermische elektromagnetische Strahlung über dem absoluten Nullpunkt von 0 K [31] [Anhang B.11].

Aktive Verfahren (Radar) messen die Reflektion der gesendeten elektromagnetischen Strahlung [Anhang B.11]. Synthetic Aperture Radar (SAR) wird für speziell hochauflösende Messungen verwendet.

Die Mikrowellensensorik reagiert sensitiv auf den Wassergehalt. Luftgefüllte Hohlräume grenzen sich gegenüber dem Wassergehalt der umliegenden Materialien deutlich ab. Außerdem reagiert freies Wasser normalerweise anders auf elektromagnetische Wellen, als das in der Bodenmatrix gebundene Wasser. Daher wären auch für wassergefüllte Hohlräume Signalunterschiede aufgrund der Dichtediscontinuitäten zu erwarten. Dies wurde bislang aber noch nicht gemessen und müsste getestet werden [Anhang B.11].

### Rechercheergebnis

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) werden aktive und passive Sensortechnik kombiniert. Das Verfahren wurde bereits erfolgreich eingesetzt, um Bereiche starker Durchnässung an Deichen zu identifizieren. Die Eindringtiefe am Deich ist vermutlich auf den obersten Meter begrenzt, eventuell auch die obersten 2 m. Dies wäre zu testen [Anhang B.11].

Die Messtechnik kann stationär, fahrbar (auf Unimog, Breite ca. 8 m) oder per Drohne verwendet werden. Potenziell wäre die Technologie damit geeignet, längere Strecken der Deiche zu überwachen [Anhang B.11]. Messungen mit der Drohne sind bislang aber noch im Entwicklungsstadium. Weiterhin sind die Dämpfungen der Signale stark von der Bodenfeuchte abhängig.

Aufgrund der bindigen Böden und der Nähe der Biberbauten zum Grundwasserspiegel, ist daher mit einer relativ starken Dämpfung der Signale zu rechnen. Dementsprechend muss mit relativ großen Wellenlängen gemessen werden. In erster Näherung wurde vom DLR ein Frequenzbereich von 100 MHz–1GHz empfohlen. Daher sind die Abmessungen der Messtechnik für die benötigte Eindringtiefe höchstwahrscheinlich zu groß, um diese mit Drohnen zu betreiben [mündl. Mitteilung DLR/Anhang B.11]. Ein Einsatz mit Fahrzeugen ist möglich. Messungen unter Wasser sind nicht möglich. Mikrowellen reagieren sehr stark auf Metallkörper. Messungen unter Bibergrittern sind nicht erfolgversprechend [Anhang B.11].

Tabelle 16: Zielerfüllungsfaktoren (Zf) Mikrowellensensorik.

Kriterien	Einschätzung/Begründung	Zf
A_FL	voraussichtlich ähnlich wie Georadar	7
A_FINANZ	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen, teure Auswertung und Equipment	5
A_LOG	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	6
A_DEV	voraussichtlich dauerhafte Auftragsvergabe an Fachfirmen	6
A_KOMB	Unterstützung der Einschätzung der allg. Standsicherheit	4
Q_RES	ausreichend	8
Q_DEPTH_U	voraussichtlich 1–2 m wegen bindigen Substraten und nahe anstehendem Grundwasser, dies ist zu testen	3
Q_HOHL_U	sehr gut geeignet für luftgefüllte Hohlräume, eventuell auch für wassergefüllte Hohlräume	8
R_SAISON	keine grundsätzlichen Einschränkungen bekannt	8
R_MET	keine grundsätzlichen Einschränkungen bekannt	8
R_SURF	unebenes Gelände behindert grundlegend die Anwendung Böschungsneigung, erschwert die Anwendung, Gras muss kurz gemäht sein	4
R_PEGEL	bei hohen GW-Ständen nicht sinnvoll einsetzbar	4
R_JUR	keine bekannt	10
R_SE_U	stark eingeschränkt beim Vorkommen von Metallkörpern, d.h. auch Bibergittern.	5

#### Fazit

Das Verfahren scheint zur Detektion vom Biber geschaffener Hohlräume vielversprechend zu sein, auch wenn es noch keine praktische Erfahrung gibt. Es ist zu erwarten, dass die Detektion von luftgefüllten Hohlräumen in den ersten 1–2 m möglich ist. Eventuell gilt dies auch für wassergefüllte Hohlräume. Es gibt keine jahreszeitlichen Einschränkungen. Der Einsatz der Mikrowellensensorik mit Fahrzeugen scheint gut möglich, der Einsatz mit Drohnen nach aktuellem Stand nicht praktikabel.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen empfehlen wir, das Verfahren zu testen. Ein möglicher Ansprechpartner hierfür wäre das DLR.

### 5.1.6 WEITERE VERFAHREN

Folgende Verfahren wurden nicht weitergehend verfolgt, da sie nicht erfolgversprechend erschienen oder aufgrund ihres Forschungsstandes nicht bewertet werden konnten:

- Die Gravimetrie wurde von den Praktikern der GGL für die Fragestellung als nicht praktikabel bewertet [Anhang B.9].
- Bodenmechanische Sondierungen sind deutlich aufwändiger als die hier vorgestellten geophysikalischen Verfahren, liefern lediglich Punktinformationen und wurden daher als, für das Monitoring der gesamten Deichlänge, nicht realistisch einsetzbar eingeschätzt.
- Für seismische/akustische Verfahren wurden einem ersten Screening nach keine Studien gefunden, welche Anwendungen, ähnlich der Detektion der Biberbauten, im Deich oder andere Anwendungen in der dafür erforderlichen räumlichen Auflösung beschreiben. Außerdem gelten sie zur Zeit als noch aufwändiger als die anderen geophysikalischen Verfahren [15].

- Erste multispektrale LIDAR Geräte sind auf dem Markt erschienen [30], für die aber noch keine praktischen Erfahrungen im interessierenden Einsatzbereich vorliegen. Darüber hinaus gibt es vielversprechende Entwicklungen durch die Kombination von Multispektralkameras mit verschiedenen anderen Sensoren, wie hyperspektrale oder thermale Sensoren [31]. Diese Entwicklungen könnten erst in den nächsten Jahren zu praktikablen technischen Möglichkeiten für die vorliegende Fragestellung führen.

## 5.2 BEWERTUNGSTABELLE UNTERIRDISCH

Von den Verfahren zur Detektion der unterirdischen Verläufe wurden die luftgestützten multispektralen Aufnahmen am besten bewertet. Dies liegt im Wesentlichen an der sehr positiven Bewertung der Flächenleistung in der Kategorie „Aufwand/Leistung“ im Vergleich zu den drei geophysikalischen Verfahren (luftgestützt versus fahrzeuggestützt, bzw. personengeführt oder gar stationär). Die geophysikalischen Verfahren liegen in der Bewertung relativ gleichauf. Georadar schneidet aber am besten ab.

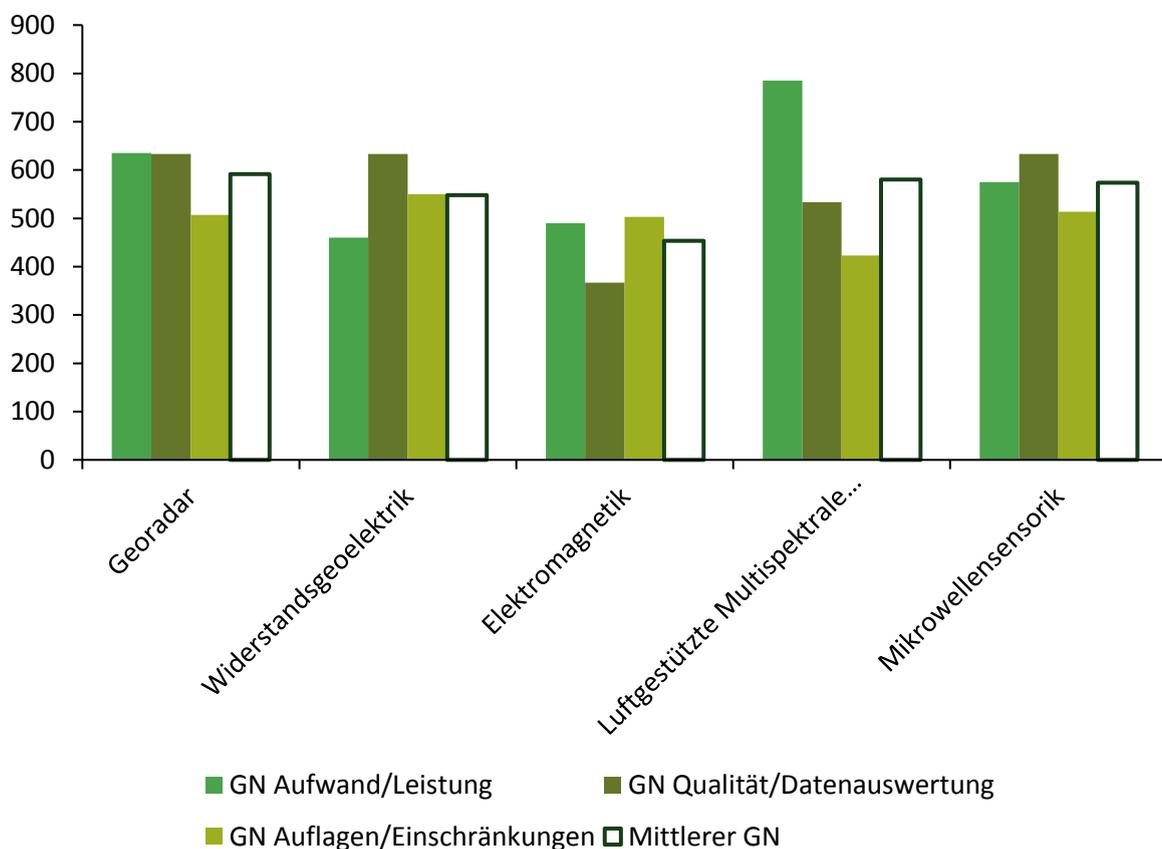


Abbildung 5: Gesamtnutzwerte der Verfahren zur Detektion des unterirdischen Verlaufs der Biberbauten.

## 6 Kombination von Detektionsverfahren

Einige Detektionsverfahren müssen zwingend mit anderen Detektionsverfahren kombiniert werden, um vom Biber angelegte Hohlräume mit ausreichender Sicherheit finden zu können. Das sind die Detektionsverfahren

- UAV-Photogrammetrie (Kap. 4.1.5),
- LiDAR Scanning (Kap. 4.1.6) und
- Satelliten Radar Interferometrie (Kap. 4.1.7),

die zwar großräumige Ergebnisse liefern, aber keine hinreichend genaue Bewertung erlauben. Die einzelnen Befunde müssen dann mit geeigneten geophysikalischen Detektionsverfahren, wie

- Georadar (Kap. 5.1.1)
- Geoelektrische Widerstandstomographie (Kap. 5.1.2),
- Elektromagnetik (Kap. 5.1.3),
- Mikrowellen (Kap. 5.1.5) oder auch mit
- Wildscouts (Kap. 4.1.1) oder
- Wärmebild (Kap. 4.1.3)

lokal zerstörungsfrei geprüft und bewertet werden.

Außerdem ist es möglich, die Messgeräte verschiedener Detektionsverfahren auf einem Trägersystem (Boot, Drohne, Flugzeug, usw.) gleichzeitig zu verwenden. Die Nachteile oder Einschränkungen einzelner Verfahren können so möglicherweise ausgeglichen und damit die Erfolgsaussicht eines Detektionsversuches verbessert werden.

So könnte bspw. ein Boot mit Echolot und Kameras für Wärmebild und Photogrammetrie ausgestattet werden. Dies erlaubt das gleichzeitige Monitoring der Eingänge zu den Biberbauten unter Wasser sowie den oberirdischen Eingängen und ggf. nahe an der Geländeoberfläche liegenden Hohlräumen.

Eine weitere Option wäre die Kombination von Georadar und mobilen elektromagnetischen Messungen. Letztere sind bei bindigen Substraten besser einsetzbar, so dass insbesondere bei bindigen Substraten ein komplementärer Einsatz vielversprechend erscheint [Anhang B.5].

Ein empfehlenswerter Ansatz ist die Kombination von Detektionsverfahren zur Hohlraumerkundung mit Arbeiten der Unterhaltung- und Pflege am Deich und Gewässer. So könnten Messgeräte verschiedener Detektionsverfahren auf einem Werkzeugträgersystem, das von einem Fahrzeug bewegt wird, oder dem Fahrzeug selbst angebracht werden. Ein Georadarsystem könnte z.B. am Mähwerkzeug oder der Zugmaschine selbst so angebracht werden, dass es dem Mähvorgang in ausreichendem Abstand folgen und den Fahrer über mögliche Befunde informieren kann. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen können auch in die allgemeine Risikoabschätzung zur Deichstabilität einfließen, da viele Erkundungsverfahren auch Rückschlüsse auf den allgemeinen Sicherheitszustand der Deiche zulassen (z.B. Oberflächenveränderungen und Sättigungsgrade).

## 7 Empfehlung zum weiteren Vorgehen

Durch die Recherche konnte kein etabliertes Verfahren identifiziert werden, welches alle Hauptanforderungen [Kapitel 3.6] erfüllt oder bereits in der Praxis für vergleichbare Fragestellungen und Verhältnisse angewandt wird. Insbesondere diese mangelnde Erfahrung aus der Praxis erschwerte bei einigen Detektionsverfahren die Bewertung in der Nutzwertanalyse. Ausgehend von dem zusammengetragenen Wissensstand, insbesondere dem Austausch mit den Experten aus der Praxis, empfehlen wir, für eine Auswahl der vorgestellten Detektionsverfahren Tests durchzuführen, um deren Möglichkeiten und letztlich deren Nutzwert für die konkreten praktischen Randbedingungen an der Oder besser abschätzen zu können.

Vor diesem Hintergrund wurden zwei Detektionsverfahren ausgewählt, deren Eignung zur Detektion von Biberbauten über bzw. unter Wasser unmittelbar an die Recherche anschließend am Versuchsdeich der TU Dresden getestet werden sollen. Das sind die Detektionsverfahren

- 1) Wärmebildkamera [Kapitel 4.1.3] und
- 2) Echolot [Kapitel 4.1.4].

Diese Verfahren lassen sich einander ergänzend kombinieren [Kapitel 6] und haben das höchste Potenzial, kurzfristig labortechnisch belastbare Aussagen zu ihrer Leistungsfähigkeit innerhalb eines flächendeckenden Monitorings von Biberschäden an den Deichen zu erhalten. Der Versuchsdeich wird hierzu mit einem künstlich geschaffenen Hohlraum der typischen Abmessungen eines Bibertunnels aufgebaut. Der konkrete Versuchsaufbau wird mit dem Auftraggeber abgestimmt.

Im Weiteren wird vorgeschlagen, an der Oder im Bereich Brandenburgs eine Versuchsstrecke auszuwählen bzw. einzurichten, an der bereits erhöhte Biberaktivität beobachtet worden ist und von Bibern angelegte Baue bereits vorhandenen sind. Diese Versuchsstrecke sollte das Testen der beiden im IWD der TU Dresden labortechnisch voruntersuchten Detektionsverfahren beinhalten sowie weiterer Verfahren, die zielführend erscheinen, jedoch noch Kenntnisdefizite bezüglich ihrer praktischen Anwendbarkeit für den konkreten Fall aufweisen. Zusammengefasst sind die für Feldversuche empfohlenen Detektionsverfahren:

- 1) Wärmebildkamera [Kapitel 4.1.3],
- 2) Echolot [Kapitel 4.1.4],
- 3) luftgestützte multispektrale Aufnahmen [Kapitel 5.1.4],
- 4) Wildscouts [Kapitel 4.1.1],
- 5) fahrzeuggestütztes Georadar-Array [Kapitel 5.1.1] in Kombination mit mobilen elektromagnetischen Verfahren [Kapitel 6],
- 6) satellitengestützte Oberflächenerfassung mittels Radarinterferometrie [Kapitel 4.1.7],
- 7) Mikrowellensensorik [Kapitel 5.1.5].

Die Resultate aus den Versuchen können vom Auftraggeber leicht in die übergebene Nutzwertanalyse-Tabelle eingearbeitet werden. Darüber hinaus können dadurch die hier erarbeiteten Rechercheergebnisse überprüft und ergänzt werden.

Dem nachgeordnet halten wir es für empfehlenswert, die Entwicklung im Bereich des mobilen Georadars [Kapitel 5.1.1], der mobilen elektromagnetische Verfahren (insbesondere kapazitive Geoelektrik

(„capacitive resistivity technique“), bspw. mit Messgerät OhmMapper) [Kapitel 5.1.3] sowie von luftgestützten multispektralen Verfahren [Kapitel 5.1.4] und Satellite Radar Interferometry [Kapitel 4.1.7] mit Bezug auf den hier im Fokus stehenden Anwendungsfall weiter zu verfolgen. Ergänzende Verfahren zur Eingrenzung des betroffenen Untersuchungsgebiets sowohl in der Fläche als auch im Dammquerschnitt können zur Aufwandsminimierung zielführend sein.

## 8 Literatur

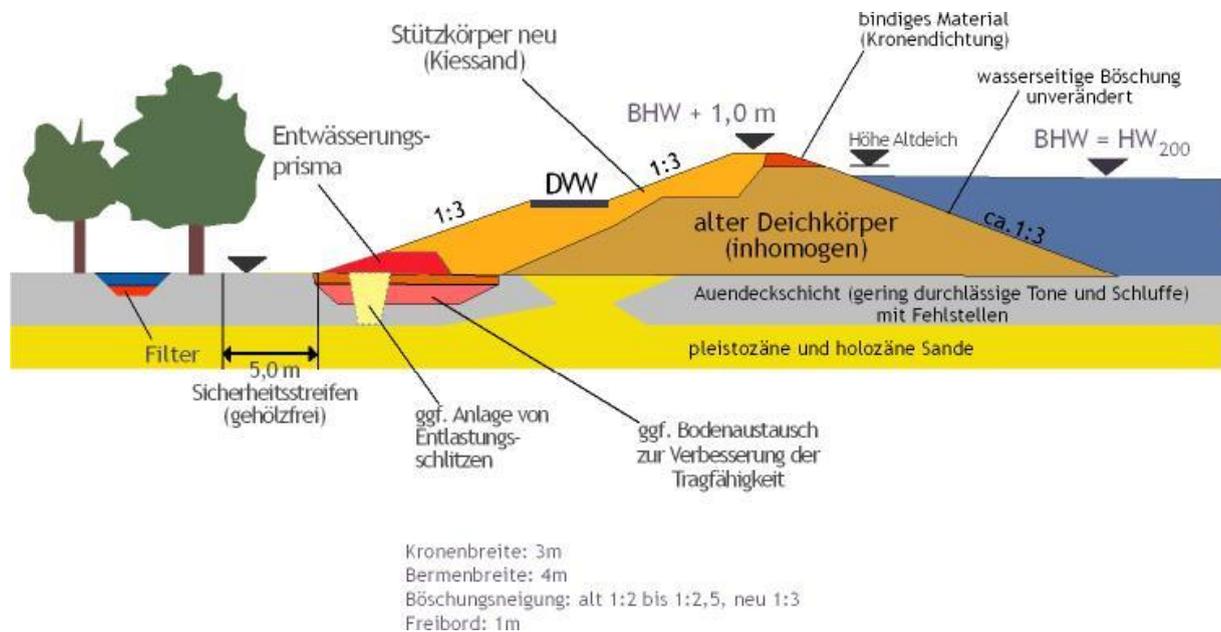
- [1] Krüger, F., 2019: Konzeption für den weiteren Umgang mit Biber Schäden an den Oderdeichen und Gewässern I. Ordnung.
- [2] Glatzle, I., Jentschke, I., 2014: GIS-gestützte Analysen zur Konfliktsituation zwischen Hochwasser- und Biber Schutz an der Oder. Vermessung (2014), H. 2, S. 34–44.
- [3] Jentschke, I., 2013: Im Spannungsfeld zwischen Hochwasser- und Biber Schutz: Analyse dokumentierter Biber-Schadstellen am Oderdeich. Masterarbeit. Universität Potsdam.
- [4] Jentschke, I., Glatzle, I., 2012: Biber-Monitoring im Oderbruch im Landkreis Märkisch-Oderland: Kartierung des Haupt-Oderdeiches von Deichkilometer 0,0 bis 77,3 im Zeitraum vom 18. Nov 2011 bis 20. Jan 2012.
- [5] LUA Brandenburg, 2008: Mit dem Biber leben.
- [6] Miethe, J., 2009: Georadar am Oderdeich zur Untersuchung eines Biberbaus bei Kienitz, Senftenberg.
- [7] DWA, 2017: Bisam, Biber, Nutria – Teil 1: Erkennungsmerkmale und Lebensweisen. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V, 2017. Aufl., 2017.
- [8] BMI, 2016: Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung, 24.7.2019, <https://www.orghandbuch.de/>, 2016.
- [9] Glatzle, I., 2014: Im Spannungsfeld zwischen Hochwasser- und Biber Schutz: Verbreitung und Konfliktpotential des Eurasischen Bibers (*Castor fiber* L., 1758) an der Oder. Masterarbeit. Universität Potsdam.
- [10] Hahmann, T., Möbes, S., Regiment, J., Trömel, H.-P., 2004: Biberbaue im Oderdeich. Naturschutz und Landespflege in Brandenburg (2004), H. 13, S. 2–26.
- [11] Nitsche, K.-A., 1993: Verhalten von Bibern (*Castor fiber albicus* MATSCHIE, 1907) bei extremen Umweltsituationen. Mitteilung Zoologische Gesellschaft, Baunau (1993), H. 5, S. 361–375.
- [12] Reetz, A., 2008: Der Biber (*Castor fiber albicus* MATSCHIE, 1907) im Oderbruch – Gegenwart und Zukunft: Vergleichende Analyse zu 1997 in Hinblick auf Trends, Konflikte und Lösungen. Diplomarbeit. Fachhochschule Eberswalde.
- [13] Baroch, J., Hafner, M., Brown, T. L., Mach, J. J., Poché, R. M., 2002: Nutria (*Myocaster coypus*) in Louisiana. Other Publications in Wildlife Management (2002), H. 46, S. 1–155.
- [14] LfU Brandenburg: MLUL – LfU – Gewässerschutz und Wasserwirtschaft – Hochwasserschutz – Deichbau in Brandenburg, letzter Zugriff: 16.9.2019, <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.625878.de>.

- [15] *LfU Brandenburg*: MLUL – LfU Gewässerschutz und Wasserwirtschaft – Hochwasserschutz – Deichbau in Brandenburg – Besonderheiten, letzter Zugriff: 16.9.2019, <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.626109.de>.
- [16] *Borgatti, L., Forte, E., Mocnik, A., Zambrini, R., Cervi, F., Martinucci, D., Pellegrini, F., Pillon, S., Prizzon, A., Zamariolo, A.*, 2017: Detection and characterization of animal burrows within river embankments by means of coupled remote sensing and geophysical techniques: Lessons from River Panaro (northern Italy). *Engineering Geology* 226 (2017), S. 277–289.
- [17] *Agudo, P., Pajas, J., Pérez-Cabello, F., Redón, J., Lebrón, B.*, 2018: The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Cropmarks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery. *Drones* 2 (2018), H. 3, S. 29.
- [18] *Mader, D., Richter, K., Westfeld, P., Weiß, R., Maas, H.-G.*, 2019: Detektion und Extraktion von Gewässersohlenpunkten aus Laserbathymetriedaten unter Nutzung von Full-Waveform Stacking. Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich – Publikationen der DGPF 28 (2019).
- [19] *Rothengatter, M.*, 2018: Overzicht onderzoeken om beverholen op te sporen.
- [20] *Özer, I. E., Rikkert, S. J. H., van Leijen, F. J., Jonkman, S. N., Hanssen, R. F.*, 2019: Sub-seasonal Levee Deformation Observed Using Satellite Radar Interferometry to Enhance Flood Protection. *Scientific reports* 9 (2019), H. 1, S. 2646.
- [21] *Özer, I. E., van Leijen, F. J., Jonkman, S. N., Hanssen, R. F.*, 2018: Applicability of satellite radar imaging to monitor the conditions of levees. *Journal of Flood Risk Management* 14 (2018), H. 4, e12509.
- [22] *Weller, A., Lewis, R., Niederleithinger, E.*, 2008: Geophysikalische Verfahren zur Strukturerkundung und Schwachstellenanalyse von Flusssdeichen – ein Handbuch. Forschungsbericht, Nr. 281, Berlin.
- [23] *Niederleithinger, E., Weller, A., Lewis, R., Stötzner, R.*, 2008: Evaluation of geophysical techniques to investigate river embankments. In.: 4th International Symposium on Flood Defence, 2008.
- [24] *Di Prinzio, M., Bittelli, M., Castellarin, A., Pisa, P. R.*, 2010: Application of GPR to the monitoring of river embankments. *Journal of Applied Geophysics* 71 (2010), 2–3, S. 53–61.
- [25] *Chlaib, H. K., Mahdi, H., Al-Shukri, H., Su, M. M., Catakli, A., Abd, N.*, 2014: Using ground penetrating radar in levee assessment to detect small scale animal burrows. *Journal of Applied Geophysics* 103 (2014), S. 121–131.
- [26] *Ni, S.-H., Chen, C.-K., Lin, H.-M.*, 2002: Application of Ground Penetrating Radar on the Void-Detection in Levee: Proceedings of the 12th 2002 intl. offshore and polar engineering conf, kiyakushu, japan. [Place of publication not identified]: Intl Society Of Offshore, 2002.

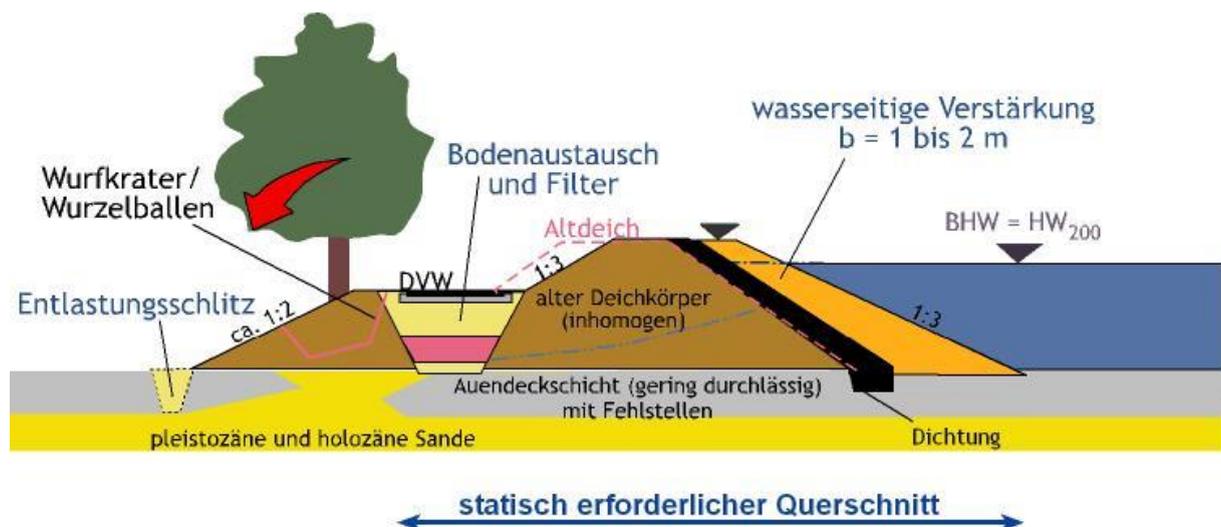
- [27] *Perri, M. T., Boaga, J., Bersan, S., Cassiani, G., Cola, S., Deiana, R., Simonini, P., Patti, S.*, 2014: River embankment characterization: The joint use of geophysical and geotechnical techniques. *Journal of Applied Geophysics* 110 (2014), S. 5–22.
- [28] *Sentenac, P., Benes, V., Keenan, H.*, 2018: Reservoir assessment using non-invasive geophysical techniques. *Environmental Earth Sciences* 77 (2018), H. 7, S. 1.
- [29] *APUS*: webpage Firma APUS – Dränagedetektion, letzter Zugriff: 16.9.2019, <https://www.apus-systems.com/melioration/draenagedetektion/>.
- [30] *Teledyneoptech*: Webpage der Firma Teledyne Optech, letzter Zugriff: 12.9.2019, <https://www.teledyneoptech.com/en/products/airborne-survey/titan/>.
- [31] *precisionhawk*: Webpage der Firma precisionhawk, letzter Zugriff: 12.9.2019, <https://www.precisionhawk.com/blog/media/topic/sensors-101-basics-lidar-thermal-hyperspectral-multispectral-technology>.

## Anhang A: Regelprofile

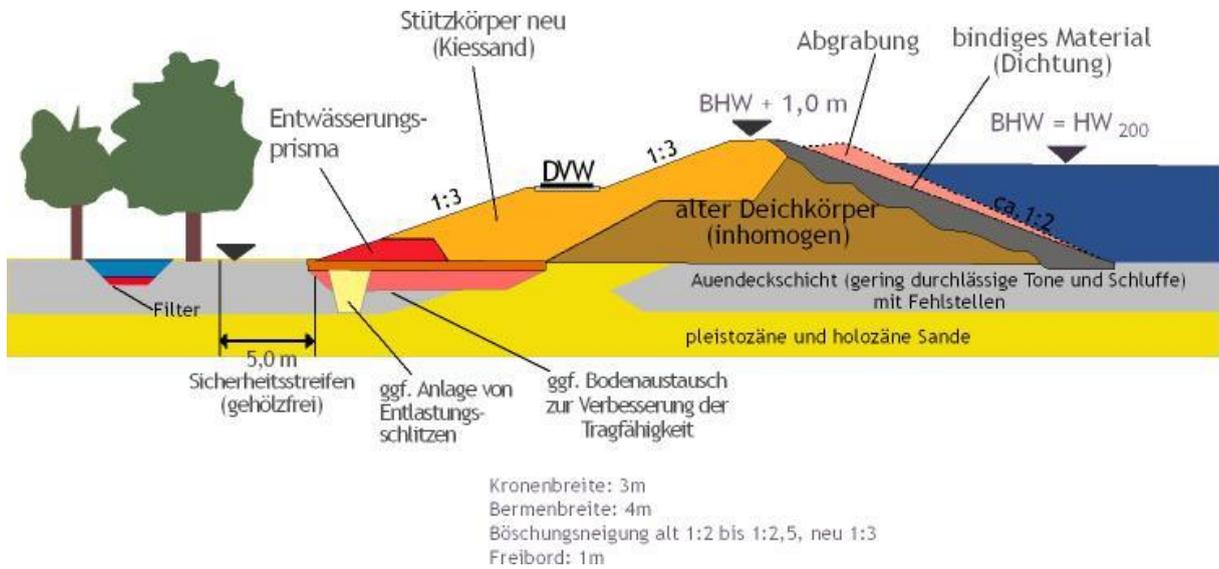
Übersicht der vorkommenden Deich-Bauweisen entlang der Oder im Bereich Brandenburg (Quelle: LfU Brandenburg, per E-Mail von Frau Kerstin Riehl am 26.08.2019 übersendet).



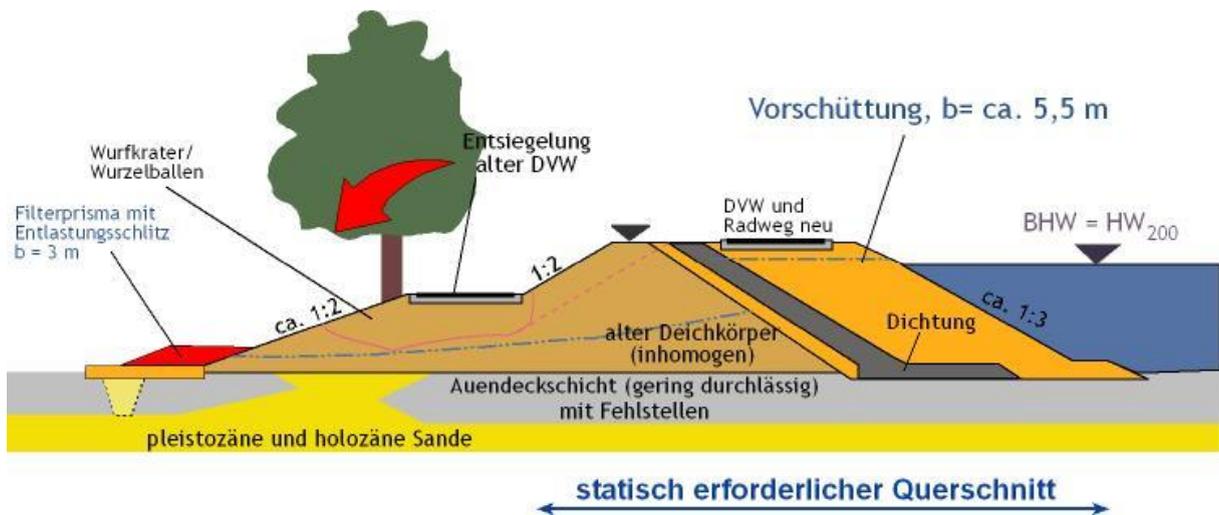
**Regelprofil 1:** Haupt Oderdeich (HOD) Oderbruch und Ziltendorfer Niederung (gültig bis auf nachfolgende Ausnahmen).



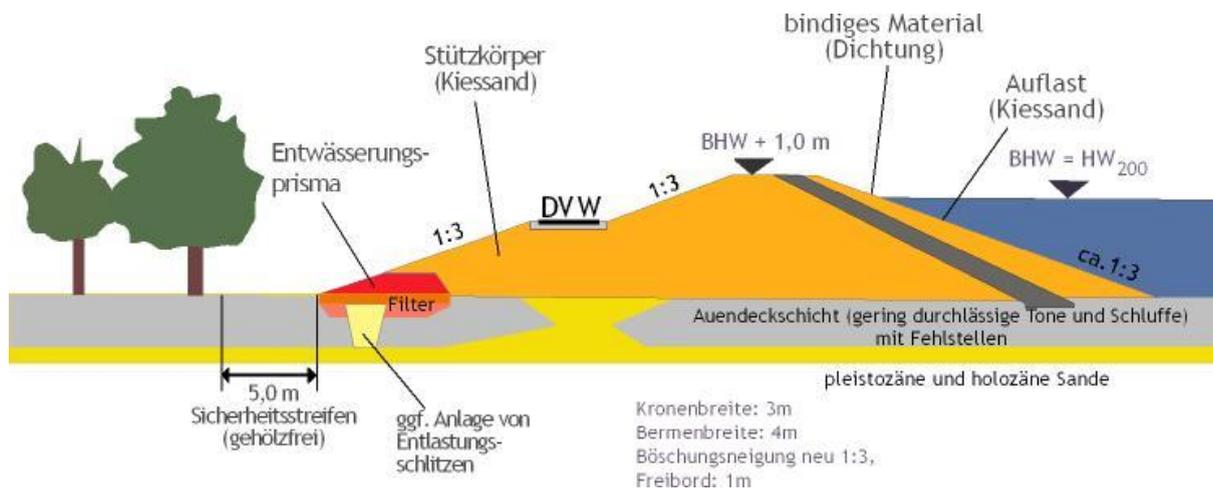
**Regelprofil 2:** HOD Oderbruch km 19,75–20,5.



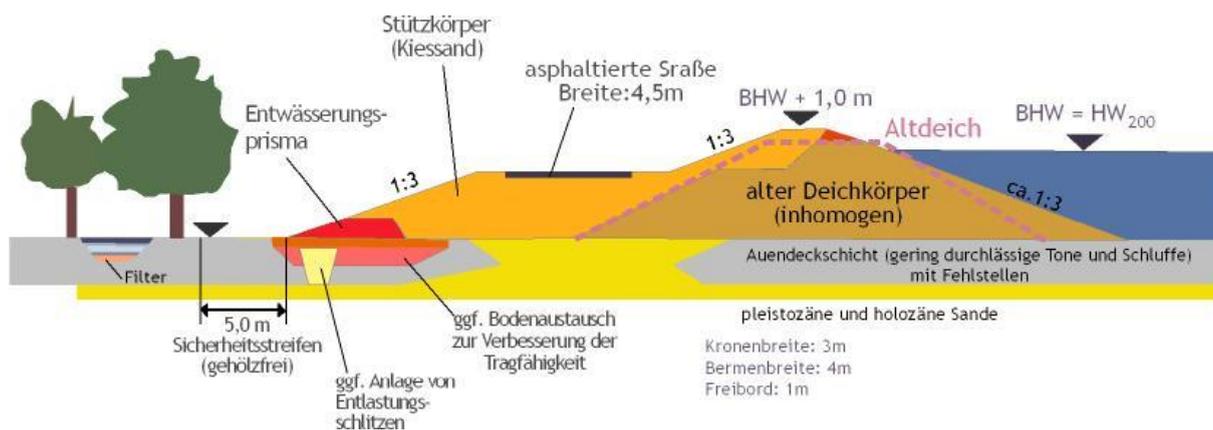
**Regelprofil 3:** HOD Oderbruch km 68,5–69,0; Winterdeich Polder B km 100,8–104,5; Winterdeich Polder 10 km 106,9–109,8 (nur in Ausnahmen und auf kurzen Strecken).



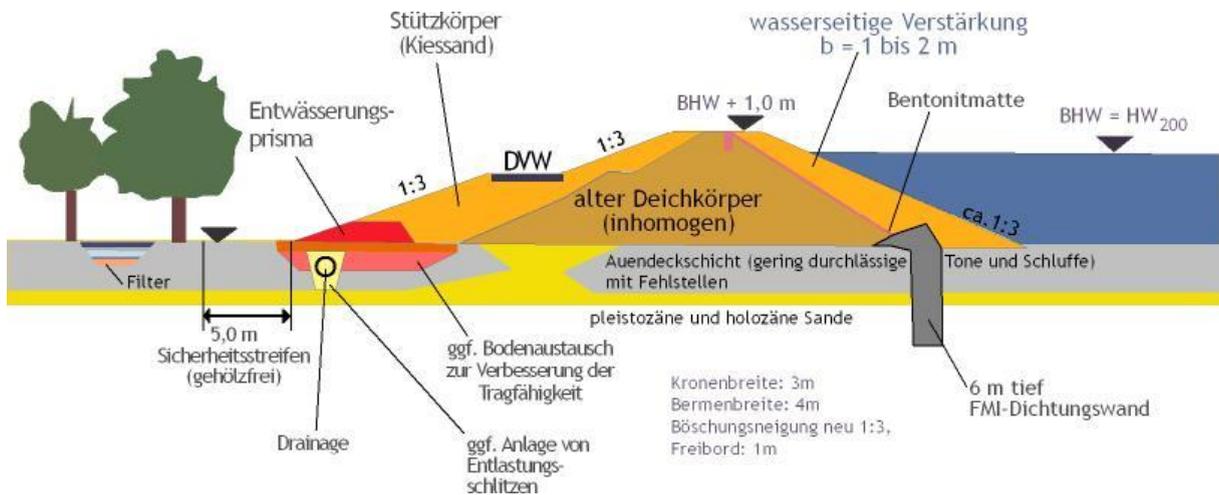
**Regelprofil 4:** HOD Oderbruch km 9,3–13,4.



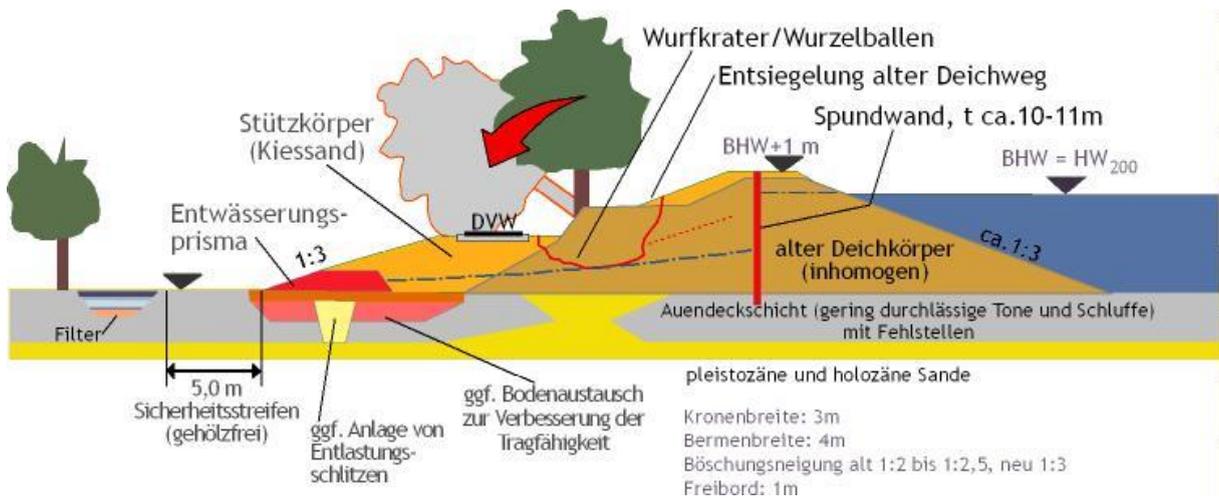
**Regelprofil 5:** HOD Oderbruch km 21,3–23,2; km 30,0–34,1/Ziltendorfer Niederung HOD km 18,5–?/Neuzeller Niederung HOD km 5,5–8,5/Deiche Polder 5/6 alle Deiche.



**Regelprofil 6:** HOD Oderbruch km 23,5–29,5; km 71,0–73,2; km 75,0–77,2.



**Regelprofil 7:** HOD Oderbruch (Zollbrücke) km 58,5–58,9.



**Regelprofil 8:** HOD Oderbruch km 6,25–6,75.

# Anhang B: Protokolle Expertenbefragung

## B.1 Undine Schubert, Biberbeauftragte des Landes Brandenburg

Undine Schubert, Biberbeauftragte des Landes Brandenburg  
Ministerium für ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL),  
Postanschrift: Postfach 601150, 14410 Potsdam  
[undine.schubert@mlul.brandenburg.de](mailto:undine.schubert@mlul.brandenburg.de)  
Telefon: (0)331 866-7808 → koordiniert auch ehrenamtliche Biber-Berater

Telefongespräch am 29.7.2019

Fragen/zu besprechende Punkte:

- 1) Gibt es (flächendeckende) Kartierung von Biber-Revieren?
  - Nein. In MOL gibt es einige wenige ehrenamtlichen Kartierungen und Kartierungen des GEDO, welche aber vermutlich nicht so gut geeignet sind.
- 2) Gibt es Erfahrung mit:
  - Kartierungen durch ehrenamtliche Biber-Berater; Markierungen/Eintragungen in online-Karte → citizen science Idee.
    - Nein. Es gibt auch keine brandenburgweite online Karte.
  - mit Hunden, die Biber, bzw. ihre Bauten aufzuspüren.
    - Erfahrungen mit Hunden sind unbekannt. Es gibt die eine anekdotische Erfahrung, welche im Konzept von Herrn Krüger beschrieben ist.
- 3) Jäger, Hundevereine, o.a. hierzu
  - Unbekannt. Vielleicht eher Förster als Jäger, wegen Schädigungen am Wald. Jäger werden nur gerufen, um Biber in bekannten Revieren zu entnehmen.
- 4) Andere Erfahrungen (ggf. Kontaktdaten) von Biber-Beratern,
  - Frau Reetz, eventuell Nachfolger am GEDO
  - 1–2 ehrenamtliche Biber-Berater in MOL, zuständige Person zur Koordination: Herr Fischer.
  - Kontaktpersonen für Elbe und Bayern (Hr. Schwab) werden nachgeliefert.
- 5) Sind Haupt-Aktivitäts-Jahreszeiten des Bibers in Brandenburg bekannt?
  - Kann zeitlich eingegrenzt werden, wann vorwiegend neue Bauten angelegt werden? Bspw. wenn junge Biber den Bau verlassen, um neue Reviere zu finden. („Juni–November = Wander- und Mastzeit“ siehe S. 7 [5]).
    - Nein, da die Biber nicht nur Wohnungsbaue graben, sondern auch Fluchtgänge, usw. Grabeaktivitäten eigentlich das ganze Jahr.

- 6) Notbauten: Sind Grabaktivitäten der Tiere dann gut erkennbar, weil diese bspw. Auch tagsüber graben o.ä?
  - Grabaktivitäten vermutlich nein, weil Eingänge zum Bau trotzdem unter Wasser. Die Tiere selbst können aber vielleicht leichter beobachtet werden, weil sie auch tagsüber den Bau verlassen müssen und eventuell auf der Suche nach sicheren Standorten sind.
  
- 7) Werden Wildrettungshügel angenommen?
  - An der Oder unbekannt. An der Elbe gibt es zwei positiv-Beispiele.
  
- 8) Erfahrungen auf polnischer Seite
  - Unbekannt. Kontaktdaten werden nachgeliefert.

## B.2 Antje Reetz, ehemalige Bibermanagerin GEDO

Antje Reetz, ehemalige Bibermanagerin des Gewässer- und Deichverbandes Oder (GEDO)  
Naturschutzbehörde Barnim  
Paul-Wunderlich-Haus, Am Markt 1, 16225 Eberswalde  
[naturschutzbehoerde@kvbarnim.de](mailto:naturschutzbehoerde@kvbarnim.de)  
Telefon: (0)3334 214 15 3

Telefongespräch am 19.8.2019

Fragen/zu besprechende Punkte:

- 1) Gibt es (flächendeckende) Kartierung von Biber-Reviere(n)?
  - Ja, zwei Masterarbeiten der Uni Potsdam von 2014 mit relativ flächendeckender Kartierung der Biber-Reviere entlang des Oderdeiches. → [3], [2], [4].
  - Die Reviere sind relativ stabil, da im Wesentlichen alle freien Reviere/Optionen besetzt sind. → d.h. die Masterarbeiten können nach wie vor als verlässliche Quelle für die Kartierung der Reviere genutzt werden.
  
- 2) Gibt es Erfahrung mit:
  - mit Hunden, die Biber bzw. ihre Bauten aufzuspüren.
    - Herr Schwab, Biber-Experte aus Bayern hat gute Erfahrungen mit seinem Dackel.
    - Anekdotisch an der Oder. Frau Reetz war dabei als gerade eine Höhle verschlossen wurde, ein Spaziergänger kam vorbei und der Hund hat direkt die nächste Höhle entdeckt, obgleich die Fläche vorher kontrolliert worden war.
    - Frau Reetz geht davon aus, dass die Idee von Herrn Krüger der Wildscouts + ausgebildete Hunde großes Potenzial hat, um turnusmäßig die relevanten Deichabschnitte zu begutachten. Hunde sind ihrer Ansicht nach gut geeignet, um die Wohnhöhlen zu finden → starker Eigengeruch der Biber.
  
- 3) Sind Haupt-Aktivitäts-Jahreszeiten des Bibers in Brandenburg bekannt?
  - Kann zeitlich eingegrenzt werden, wann vorwiegend neue Bauten angelegt werden? Bspw. wenn junge Biber den Bau verlassen, um neue Reviere zu finden. („Juni–November = Wander- und Mastzeit“ siehe S. 7 [5]).
    - Nein, da die Biber nicht nur Wohnungsbaue graben, sondern auch Fluchtgänge, usw. Grabeaktivitäten eigentlich das ganze Jahr.
    - Die Grabeaktivitäten der Biber sind im Wesentlichen abhängig von den Wasserstandsfluktuationen.
  
- 4) Notbauten:
  - Frau Reetz: Notbautenaktivität vermutlich jahreszeitabhängig. Im Frühjahr/Sommer aktiveres Notbauen, um die Jungtiere zu schützen. Anlegen eines Notbaues innerhalb von 1–2 Stunden!!
  - Für Notbauten v.a. relevant Alternativen anzubieten. D.h. Altdeiche, Wildrettungshügel, bestehende hochliegende Biberburgen künstlich weiter erhöhen (Verweis auf Masterarbeiten Uni Potsdam).

- Masterarbeiten Uni Potsdam: Kartierung von Biberbauten mit Eingängen in mehreren Höhen, welche je nach Wasserstand genutzt werden.
- Idee einer mobilen Rettungsinsel, wurde mit Herrn Rudolf vom LfU Bad Freienwalde entwickelt, aber nicht umgesetzt.
- Empfehlung für Literatur: [11]

5) Sonstige Anmerkungen Frau Reetz:

- Technische Verfahren wie Geodadar und Geoelektrik könnten durch die Biberschutzmaten eingeschränkt sein.
- Verweis auf die Vermessungs-Befliegung von Herrn Diering beim Wasserschutzamt Fürstenwalde als vielversprechende Option zur konkreteren Lokalisierung oder zumindest lokalen Eingrenzung von Biberbauten.

### B.3 Gerhard Schwab, Bibermanager Bayern

Gerhard Schwab, Bibermanager Bayern  
Deggendorfer Str. 27, 94553 Mariaposching  
[GerhardSchwab@online.de](mailto:GerhardSchwab@online.de)  
Telefon: (0)172 6826653

E-Mail vom 26.8.2019

Hallo Herr Lehr,

...

Das Hohlraumfinden im Deich finden ist nicht ganz einfach. Wir hatten es auch mit Bodenradar probiert, war aber wenig erfolgreich. Wir hatten hier einen Abschnitt des Dammes an einem GÜnzkraftwerk, bei dem wir durch Wasserabsenken die Röhren vorab suchen konnten, und daher wussten, wo welche waren. Das Bodenradar zeigte zwar Anomalien im Bereich von Röhren (soweit ich mich erinnere aber nicht bei allen, vor allem kürzere wurden nicht erkannt), aber auch eine ganze Reihe weiterer Unklarheiten und Veränderungen in der Bodenstruktur. Die hätten im Ernstfall alle aufgegraben und untersucht werden müssen. Das Fazit des Kraftwerksbetreibers: ist billiger und einfacher, gleich den ganzen Damm zu sichern. Zumal das Bodenradar ja nur eine Momentaufnahme ist: eine Röhre, die ein Biber eine Woche NACH der Untersuchung und dem Verfüllen der Röhren neu gräbt, ist dann ganz einfach wieder eine Röhre – und kann erst beim nächsten Durchgang gefunden werden.

Mit Hunden habe ich noch keine langen Versuche unternommen, mein Dackel hat jedoch Biberröhren angezeigt, allerdings nur, wenn sie nach oben bereits offen war, also Geruch austreten konnte. Bei Bauen könnte es also funktionieren, da diese in der Regel ja eine Luftöffnung haben. Bei rein unterirdischen Röhren, z.B. Fluchtröhren glaube ich eher nicht dran. Aber ein Versuch ist's vielleicht wert, wobei das Problem "Momentaufnahme" natürlich bleibt.

Die Regel in Bayern ist, dass Hochwasserdeiche gesichert werden, da Biber nur eine Tierart sind, die die Deiche durch Graben gefährden. Fängt klein mit Bisam an (die kleinen Mäuse vergessen wir mal), und geht dann über Kaninchen und Nutria zu Fuchs und Dachs. So war das größte Röhrensystem im Deich der Kleinen Donau (dort hat das WWA Ingolstadt die ersten Deichsicherungen unternommen) ein Dachsbau, und ein Mitarbeiter kommentierte, nachdem er Nutriaschäden in Deichen bei einer Weiterbildung in NRW gesehen hatte: "seit ich gesehen habe, was Nutria am Deich anrichten, hab' ich vor Biber keine Angst mehr."

Beste Grüße  
Gerhard Schwab

## B.4 Professor Müller-Petke, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik

Professor Müller-Petke, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik

Stilleweg 2, 30655 Hannover

[Mike.Mueller-Petke@leibniz-liag.de](mailto:Mike.Mueller-Petke@leibniz-liag.de)

Telefon: (0)511 643-3253

<https://www.leibniz-liag.de/institut/sektionen/geoelektrik-elektromagnetik/sektion-2-mitarbeiterinnen-und-mitarbeiter.html>

Einschätzung Herr Müller-Petke (E-Mail vom 26.08.2019):

„Eigentlich das einzige Verfahren was in Frage kommt ist das GeoRadar um 30 cm Hohlräume/Gänge zu detektieren. Hier spielen allerdings die hohen elektrischen Leitfähigkeiten von Ton/Lehm eine negative Rolle. Realistisch bis ca. 3m.“

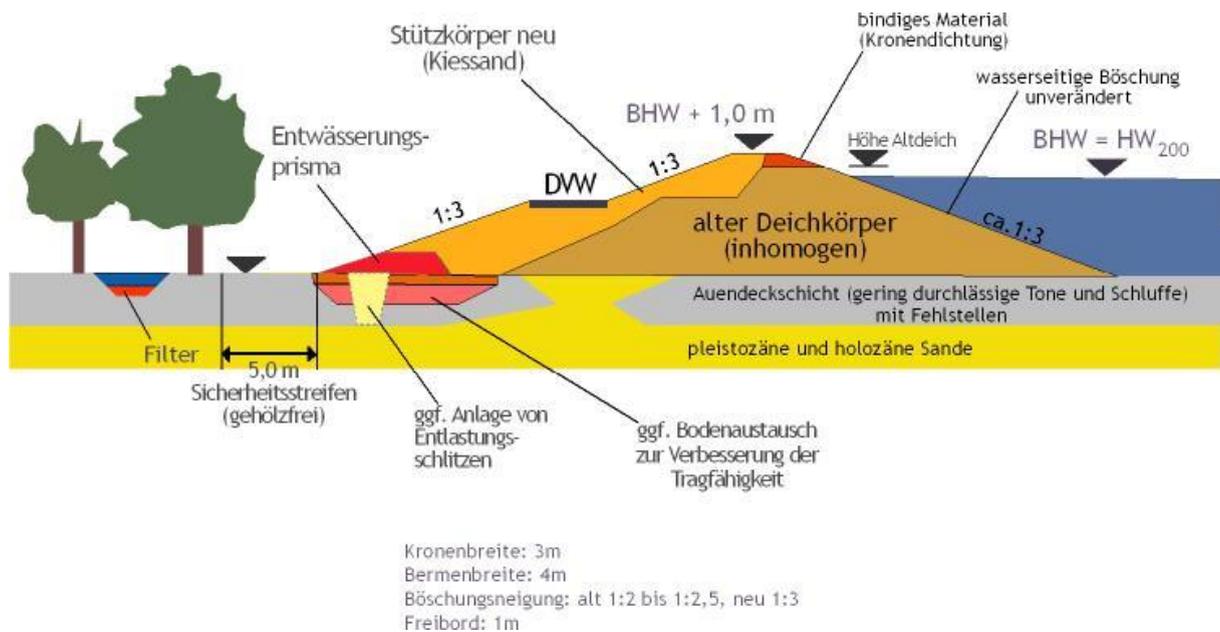
Telefongespräch am 26.08.2019:

- Als technische Neuerung gegenüber dem Test von 2009 (siehe Projektbericht „Georadar am Oderdeich zur Untersuchung eines Biberbaues bei Kienitz“, 2009) könnte eventuell. interessant sein, eine Georadar-Variation zu testen, bei der statt einer Antenne ein Antennen-Array genutzt wird. Dies ermöglicht es schneller, größere Flächen in mehreren Tiefen/Auflösungen zu messen. Die entstehenden Datenmengen sind allerdings so groß, dass spezielle Verfahren (Machine Learning) zur Verarbeitung benötigt werden.
- Falls diese Option in dem Projekt getestet werden soll, bestünde prinzipielles Interesse seitens Herr Prof Müller-Petke's und seiner Arbeitsgruppe.

Diese Einschätzung erfolgte vor dem Hintergrund einer per E-Mail zugesendeten Anforderungsliste (Zusammenfassung der Anfrage in zwei E-Mails vom 22. und 26.08.2019):

Wichtigste Anforderungen an die Messmethode(n):

- Eine Auflösung, welche es erlaubt mit Luft oder Wasser gefüllte Höhlen und Gräben des Durchmesser 30 cm zu erfassen. Idealerweise auch kleiner bis 15 cm.
- Eine Untersuchungstiefe bis ca. 5 m. Die meisten Hohlräume befinden sich vermutlich in den ersten drei Metern, vermutlich sogar die ersten 1–2 m.
- Anwendbarkeit auch bei gemischten Substraten mit lehmigen und tonigen Anteilen oder eingelagerten stark tonigen Schichten.
- Ideal wäre ein oder mehrere Verfahren zu finden, welche es ermöglichen, den Oderdeich auf einer Länge von ca. 160 km mehrmals im Jahr auf Bibergänge und -höhlen zu überprüfen, bspw. durch Befliegungen.
- Es gab einen Test mit GPR mit dem es möglich war, Biberbauten zu entdecken. Die maximale Eindringtiefe war allerdings 1.5 m, wegen der lehmigen Abdeckung des Deiches und dem lehmigen Sand des Deichkörpers. D.h. unter diesen Umständen würden vermutlich nicht alle Hohlräume entdeckt werden. Zudem wurde das Verfahren als zu (zeit)aufwändig empfunden, um es als reguläres Monitoring-Tool für die 160 km zu nutzen.
- Hier das Regelprofil der häufigsten Deich-Bauweise. Inhomogenes Substrat bedeutet ein Sand-Lehmgemisch.



**Regelprofil 1:** gilt fast überall – HOD Oderbruch und Ziltendorfer Niederung – bis auf die nachstehend genannten Ausnahmen (aus der E-Mail von Frau Riehl ([kerstin.riehl@lfu.brandenburg.de](mailto:kerstin.riehl@lfu.brandenburg.de)) vom 26.08.2019)

Dieses Profil war vermutlich auch bei dem Georadar-Test von 2009 vorliegend:

⇒ Untersucher Abschnitt laut Projektbericht „Georadar am Oderdeich zur Untersuchung eines Biberbaues bei Kienitz“, 2009):

Feldkoordinate xO/y6 33461363 O 5837167 N

Feldkoordinate x20/y6 33461359 O 5837186 N

Vergleich mit 19-07\_Deich-km\_Oder-Neiße.shp → Deichkilometer 40.8 → d.h. nicht in einem Bereich mit anderen Regelprofilen.

## B.5 Dr. Niklas Allroggen, Universität Potsdam

Dr. Niklas Allroggen, Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam

Karl-Liebknecht-Str. 24–25, 14476 Potsdam-Golm

[niklas.allroggen@geo.uni-potsdam.de](mailto:niklas.allroggen@geo.uni-potsdam.de)

Telefon: (0)331 977 5837

[http://www.geo.uni-potsdam.de/mitarbeiterdetails/show/416/Niklas\\_Allroggen.html](http://www.geo.uni-potsdam.de/mitarbeiterdetails/show/416/Niklas_Allroggen.html)

Telefongespräch am 27.08.2019:

- Georadar ist prinzipiell die Methode der Wahl, um regelmäßig größere Abschnitte zu screenen.
- Allerdings eingeschränkt durch Lehmschichten/bindiges Substrat/metallische Körper.
- Empfehlung Georadar zur Vorerkundung einzusetzen, für Detail-Untersuchungen eventuell dann lokal bspw. Elektromagnetische/Gleichstrom-Verfahren um bspw. Informationen unterhalb des bindigen Substrates zu erlangen.
- Um die relevanten Strukturen aufzulösen, sollte das Untersuchungsgitter eine Auflösung in der Größenordnung der halben-Struktur-Größe haben. Also bei 30–40 cm Hohlräumen ein Abstand der Linien des Untersuchungsgitters von 15–20 cm.
- Für Elektromagnetik gibt es mittlerweile auch Technik, welche mobil genutzt werden kann. Diese liegt auch am Institut vor, ist aber im Vergleich zum Georadar noch im Entwicklungsstadium. Herr Allroggen sind keine konkreten Anwendungen von mobilen elektromagnetischen Methoden zur Detektion von Hohlräumen bekannt.
- Herr Allroggen hat Erfahrung mit Anwendung von Georadar zum Screenen bei der Deutschen Bahn. Daher seine Einschätzung, dass es möglich sein sollte, innerhalb weniger Tage bis ca. 1 Woche die kompletten 157 km abzufahren. Durch wiederholte Messungen wäre es dann möglich Veränderungen im Deich-Inneren zu identifizieren.
- Von seiner Erfahrung mit der Deutschen Bahn her, würde er vorsichtig schätzen, dass es dabei um Kosten von ca. 500 €/km für Aufzeichnung, Auswertung und Bericht geht.
- Als technische Neuerung gegenüber dem Test von 2009 [6] könnte eventuell interessant sein, eine Georadar-Variation zu testen, bei der statt einer Antenne ein Antennen-Array genutzt wird. Dies ermöglicht es schneller, größere Flächen in mehreren Tiefen/Auflösungen zu messen. Die entstehenden Datenmengen sind allerdings so groß, dass spezielle Verfahren (Machine Learning) zur Verarbeitung benötigt werden (siehe auch Protokoll des Gesprächs mit Herrn Prof Müller-Petke).
- Falls diese Option in dem Projekt getestet werden soll, bestünde prinzipielles Interesse seitens Herrn Niklas Allroggens. Er kann sich vorstellen, dass Befahren mit einem Georadar-Array im Rahmen einer Masterarbeit zu testen. Die Arbeitsgruppe verfügt über ein 4-Kanal-Array mit 20 cm Abstand. Damit können vier Profile gleichzeitig aufgenommen werden.
- Eventuell könnte dies auch im Vergleich zu den elektromagnetischen Verfahren geschehen.

## B.6 Dr. Judith Walter, Humboldt Universität Berlin

Dr. Judith Walter, Humboldt-Universität Berlin, Lebenswissenschaftliche Fakultät  
Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften  
FG Bodenkunde und Standortlehre  
[judith.walter.1@agr.ar.hu-berlin.de](mailto:judith.walter.1@agr.ar.hu-berlin.de)  
Telefon: (0)30 2093-46484

[https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/dntw/bodenkstandort/mitarbeiter/doktoranden/leben\\_walter](https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/dntw/bodenkstandort/mitarbeiter/doktoranden/leben_walter)

Telefongespräch am 26.08.2019:

- Keine Verfahren zur Untersuchung der ersten Meter Erdoberfläche bekannt, welche mit Drohnen oder UAV's verwendet werden könnten.
- Georadar sollte prinzipiell geeignet sein mit den bekannten Einschränkungen bezüglich Lehmschichten /-Einlagerungen.
- Verweis darauf, dass Georadar-Auswertung sehr spezifisches Fachwissen benötigt. Dies sollte unbedingt von Spezialisten vorgenommen werden. Unterschiedliche Expertise kann leicht zu unterschiedlich weitreichendem Erfolg/unterschiedlichen Ergebnissen der Untersuchungen führen.
- Es gibt mobile Ausfertigungen von Georadar bzw. Geoelektrik Systemen, welche in mehreren Tiefen gleichzeitig messen können um größere Flächen in kürzerer Zeit zu untersuchen.
- Ansprechpartner: Frau Dr. Erika Lück, Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, [elueck@geo.uni-potsdam.de](mailto:elueck@geo.uni-potsdam.de), Telefon: (0)331 977 5781

## B.7 Dr. Erika Lück, Universität Potsdam

Dr. Erika Lück, Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam  
Karl-Liebknecht-Str. 24–25, 14476 Potsdam-Golm  
[elueck@geo.uni-potsdam.de](mailto:elueck@geo.uni-potsdam.de)  
Telefon: (0)331 977 5781

E-Mail vom 30.08.2019:

Hallo, Herr Lehr

Das ist ja eine komplizierte Aufgabe, vor der sie da stehen und mit Hilfe der Geophysik vermutlich kaum machbar:

Mit zunehmender Erkundungstiefe nimmt das Auflösungsvermögen aller Verfahren ab, in 5 m Tiefe ein 15 cm großes Objekt aufzulösen ist schwierig.

Denkbare Methoden wären das Georadar und elektrische Verfahren. Die Methode des Georadars funktioniert nicht in allen Regionen. Mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit der Böden nimmt die Absorption zu und damit die Tiefenreichweite ab. Deshalb ist das Georadar nicht für alle Böden geeignet. Die erwähnten Metallnetze an der Erdoberfläche stören sowohl die Erkundung mit einem Georadar als auch elektrische Verfahren. Es ist nicht zu erwarten, dass Sie in Gebieten mit Metallnetzen an der Oberfläche Bibergänge in der Tiefe orten können.

Viel Erfolg, aber vermutlich kaum zu schaffen.

Mit freundlichen Grüßen  
Erika Lück

Diese Einschätzung erfolgte vor dem Hintergrund einer per E-Mail zugesendeten Anforderungsliste (vom 27.08.2019):

Wichtigste Anforderungen an die Messmethode(n):

- Eine Auflösung, welche es erlaubt mit Luft oder Wasser gefüllte Höhlen und Gräben des Durchmesser 30 cm zu erfassen. Idealerweise auch kleiner bis 15 cm (Bisam).
- Eine Untersuchungstiefe bis ca. 5 m. Die meisten Hohlräume befinden sich vermutlich in den ersten 1–2 Metern.
- Anwendbarkeit auch bei gemischten Substraten mit lehmigen und tonigen Anteilen oder eingelagerten stark tonigen Schichten.
- Anwendbarkeit bei Metallnetzen an der Oberfläche (Teilweise wurden Schutzgitter gegen den Biber oberflächennah verbaut.)
- Ideal wäre ein oder mehrere Verfahren zu finden, welche es ermöglichen den Oderdeich auf einer Länge von ca. 160 km mehrmals im Jahr auf Bibergänge und -höhlen zu überprüfen, bspw. durch Befliegungen.

Haben Sie Empfehlungen, welche Methoden hierfür geeignet sein könnten?

Bspw. mobile Geoelektrik Verfahren, welche parallel in mehreren Tiefen/Auflösungen messen können.

## B.8 Firma Apus, Dresden

Firma Apus Systems

Am Eiswurmlager 5, 01189 Dresden

<https://www.apus-systems.com/>, [info@apus-systems.com](mailto:info@apus-systems.com)

Telefon: (0)351 2138 910

Telefongespräch mit Herrn Mario Hehne, am 19.09.2019

-----

Hintergrund:

Idee von Herrn Steidl:

Eventuell gibt es bei durch die Bibergänge/Bauten Dränage ähnliche Auswirkungen auf die Vegetation. Das Portfolio der Firma APUS Systems umfasst die Detektion von landwirtschaftlichen Dränagen mit Drohnen oder Kleinflugzeugen:

<https://www.apus-systems.com/melioration/draenagedetektion/>

-----

Der Mitarbeiter der Firma Apus meinte, es gäbe seines Wissens nach keine praktische Erfahrung zur Detektion von Biberbauten o.ä.. Allerdings könne er sich prinzipiell vorstellen, dass sich die Bibergänge/-höhlen auf die Vegetation auswirken. Vor dem Hintergrund der Erfahrungen mit landwirtschaftlichen Dränagen wäre vorstellbar:

- Erstellung von Ortho-Luftbildern und Suche nach „linienartigen Strukturen“.
- Möglicherweise besser geeignet:
  - o Detektion von Unterschieden im Pflanzenstress aus Infrarot Bildern oder aus Spektralbildern zur Ableitung von Vegetationsindizes, bspw. NDVI.
- Am besten sichtbar sind die Effekte vermutlich im Frühjahr zu Beginn der Vegetationsperiode oder bei Trockenstress.

Die Firma Apus ist prinzipiell interessiert, neue Anwendungen zu testen und neue Anwendungsgebiete zu erschließen.

- ⇒ Eventuell Option im nächsten Jahr eine Test-Befliegung zu einem nach Absprache mit Apus theoretisch günstigen Termin durchführen.

## B.9 Protokoll Projekttreffen 28.08.2019

Teilnehmer:

TU Dresden: Dirk Fleischer, Torsten Heyer

ZALF: Jörg Steidl, Christian Lehr

Experten Geophysik (GGL Leipzig): Thomas Hohlfeld, Ulrich Serfling

Experten Photogrammetrie (TU Dresden Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Professur Photogrammetrie): Danilo Schneider, David Mader

-----  
Besprochene Verfahren:

- Geophysikalisch: Georadar, 2d-Widerstandstomografie (ERT), Frequenzbereichs-Elektromagnetik (FDEM)
- Oberflächenmonitoring: UAV-Photogrammetrie, UAV-Multispektral-Photometrie, UWV-Sonar/Echolot, Infrarot/Wärmebild, Satellite Radar Interferometry

Kommentare der Experten zu den Methoden:  
-----

Geophysik:

Allgemeine Einschätzung:

- Vorgestellte Methoden-Auswahl der Geophysik deckt die wichtigsten Verfahren ab.
- Um 157 km mehrmals im Jahr flächendeckend zu untersuchen, ist keine der Methoden oder andere bekannte geophysikalische Methoden geeignet. Sowohl aus Sicht des zeitlichen Aufwandes, v.a. aber auch aus Sicht des finanziellen und personellen Aufwandes. Bei dieser Größe des zu untersuchenden Gebietes würde sich im Vergleich dazu schnell die Bibersicherung mit Gittermatten, etc. amortisieren.
- Geophysikalische Methoden kommen jedoch für ausgewählte Gebiete in Frage.
- Diese können abschnittsweise hochaufgelöste Detaildarstellungen liefern, aus denen wiederum Ableitungen für andere Abschnitte getroffen werden können.
- Keine geophysikalische Methode bekannt, welche aus der Luft mit der erforderlichen Auflösung eingesetzt werden könnte.
- Empfohlene Literatur: „Geophysikalische Verfahren zur Strukturerkundung und Schwachstellenanalyse von Flussdeichen – ein Handbuch“ (Andreas Weller, Ronald Lewis, Ernst Niederleithinger, 2008) [22].

Georadar

- Georadar ist die Methode der Wahl bzw. die beste auf dem Markt etablierte für die gesuchte Anwendung.
- Geschätzte Geschwindigkeit: 3 km Profil/Tag, Möglichkeit erst mit zwei parallel zum Deich verlaufenden Profilen nach Gängen zu screenen und dann an Verdachtsstellen den genauen Verlauf der Gänge mit weiteren Profilen zu erkunden.
- D.h. wenn für ein erstes Screening nach Biber-Gängen zwei Profile parallel zum Deich geführt würden, wären dies für das Screening ca. 1.5 km/Tag.
- Tiefe: 2–2,5m

- Die Unebenheiten des Deiches und des Vorlandes verhindern ein schnelles Befahren mit Georadar-Varianten, welche mit Fahrzeugen genutzt werden können, bspw. auch Georadar-Arrays. Die Unebenheiten des Untergrundes wirken sich jedoch erst dann negativ auf die Zuordnung der Messergebnisse des Georadars aus, wenn die Radarantenne beim Überfahren der Unebenheiten den Bodenkontakt verliert.
- Wichtige Voraussetzung: Regelmäßiges Kürzen der Vegetation durch Flussmeisterei, vielleicht sogar Glätten der Oberfläche (z.B. nach dem Rechenprinzip, vgl. Gartenwerkzeug).

#### ERT:

- Eher geeignet für Detail-Erkundung als kombiniertes Verfahren.
- Auflösung allerdings eher im Bereich 20–50 cm.
- Geschätzte Geschwindigkeit: 300 m/Tag.
- Oberflächennahe Trockenheit ist Hindernis, da Geoelektrik einen Ansatz braucht damit der Strom in den Boden eindringen kann.
- Tiefe: ~3 m
- Kann im Gegensatz zum GPR gut mit stark tonigen Sedimentschichten und Grundwasserleitern umgehen.

#### FDEM:

- Taucht immer wieder als vielversprechendes Verfahren auch für Detail-Untersuchungen in theoretischen oder Forschungs-Studien auf, allerdings gibt es keine bekannten positiven Erfahrungen aus der Praxis.
- Die erforderliche Auflösung ist definitiv nicht gegeben, eher zur großflächigen Detektion von gut leitenden Anomalien geeignet.

#### Gravimetrie:

- Erforderliche Auflösung in Tiefe nicht gegeben
- Erforderliches 1 x 1 m Raster unpraktikabel
- Hoher Aufwand, bzw. Probleme mit korrektem Einbeziehen der Topographie

-----  
 Photogrammetrie:

#### Allgemeine Einschätzung:

- Um Deich über die gesamte Länge zu untersuchen, ebenfalls kein Verfahren bekannt (zumindest nicht im Untergrund).
- Kleinere Drohnen können nur kurze Zeit in der Luft bleiben.

#### UAV-Photogrammetrie:

- Volumendifferenzen für Photogrammetrie, sowie der Vermaschung der extrahierten Geländeoberflächenpunkte und die Erstellung des 3D-Modells, haben sehr hohe Rechenzeiten die berücksichtigt werden sollten.
- Auflösung im cm-Bereich schon sehr gut.
- Herstellung von Referenzpunkten (Passpunkten) sinnvoll.

#### Multispektral Photometrie:

- Eventuell am ehesten vom Boot aus, Drohnen fliegen nur 20–30 Minuten. Tipp nach Firma „Precision Hawk“ (einem neuen großen Kopter) zu schauen [31].
- Eventuell möglich/vielversprechend: Befliegung mit Kleinflugzeug und Multispektral-Kamera zur Detektion von Effekten der Biberbauten auf Vegetation (→ Ansprechpartner aus der Praxis: Firma Apus).

#### Echolot:

- Scannen der Böschung vom Wasser aus mit Mini-Boot:
  - o Unter Wasser Fächerecholot oder Zick-Zack-Fahren mit Single-Point Echolot → funktioniert nur ohne Vegetation vor der Böschung.
  - o Über Wasser: Fisheye Kamera + Laserscan.
  - o Auswurf-Fächer Biberbau → Laserscan.
  - o Differenzen aufeinanderfolgender Vermessungen.
- Holländische Erfahrungen vom Wasser aus: Detektion von Bisambauten mit Sonar/Echolot. Bei trübem Gewässer alternativlos, da der Laserscan bei trübem Wasser nicht funktioniert.
- Anwendung eines Schwellwertverfahrens zur Signaltrennung bei Vegetation.

#### Infrarot-Kamera/Wärmebild:

- o Freiliegende Eingänge können vermutlich aufgrund von Temperatur-Differenzen identifiziert werden. Unklar wie weit hinein in den Boden durch Biberbauten verursachte Temperaturunterschiede mit der Methode nachweisbar sind. Dies hängt vermutlich auch von der spezifischen Wärmeleitfähigkeit des Bodens ab.
- o Eventuell zeitliche Einschränkung. Funktioniert vermutlich am besten ½ Stunde vor Sonnenaufgang. Optimale Zeiträume müssen im Feldversuch ermittelt werden.
- o Auflösung von bspw. 16x16 cm sollte möglich sein um Eingänge darzustellen → Diese wären dann ca. vier Pixel und größer (in Abhängigkeit der Sensorwahl/-konfiguration).
- Vorschlag am Versuchsdeich der TU Dresden zu testen, unter welchen Bedingungen (Temperaturunterschiede) Wärmebild-/Infrarotaufnahmen genutzt werden können, um den Eingang und evtl. den unterirdischen Verlauf eines Hohlraumes der Größenordnung eines Biberganges zu detektieren.

## B.10 Priv. Doz. Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Priv. Doz. Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),  
Leiter Fachbereich 8.2 „Zerstörungsfreie Prüfmethode für das Bauwesen“

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

[ernst.niederleithinger@bam.de](mailto:ernst.niederleithinger@bam.de)

Telefon: (0)30 8104-1440.

<https://www.bam.de/Navigation/DE/Ueber-die-BAM/Organisation/Organigramm/Praesident/Abteilung-8/fachbereich-82/fachbereich82.html>

Telefongespräch und E-Mail-Kontakt am 23.09.2019.

Einschätzung und Informationen von Herrn Niederleithinger (E-Mail vom 23.09.2019):

- Seit dem Übersichtsartikel von Weller et al. (2008) „Geophysikalische Verfahren zur Strukturierung und Schwachstellenanalyse von Flussdeichen – ein Handbuch“ [22] haben sich die dort beschriebenen geophysikalischen Methoden zwar weiterentwickelt, jedoch vor allem hinsichtlich der Messgeschwindigkeit in der praktischen Anwendung.
- Bspw. für Georadar ist für die beschriebenen Anforderungen nach wie vor mit denselben Einschränkungen durch bindige Substrate zu rechnen.
- Geoelektrische Widerstandstomographie und elektromagnetische Verfahren sind keine praktikable Alternative, da die Auflösung mit zunehmender Tiefe stark abnimmt. Diese Verfahren eignen sich eher zur generellen Charakterisierung des Deichaufbaus. D.h. welche Bereiche bestehen aus homogenen Substraten, wo gibt es Inhomogenitäten, Wechsel von Substratschichten, etc.
- Eine Detektion von Hohlräumen des Durchmessers 30 cm in 4 m Tiefe ist in einer für die praktische Anwendung relevanten Qualität und Zuverlässigkeit mit keiner bekannten Methode realisierbar.
  - o „Es gibt einige Beispiele, in denen behauptet wird, auch Tierbauten in mehreren Metern Tiefe detektiert zu haben – aber ich bin da eher skeptisch (es sei denn es handelt sich um sehr große Bauten unter günstigen Randbedingungen).“ (E-Mail vom 23.09.2019).
- Für die Detektion von Hohlräumen der gesuchten Größenordnung innerhalb der obersten 1–2 m könnte eine Befahrung mit Georadar zielführend sein. Bei einem Deich ist es empfehlenswert, das Georadar in Schrittgeschwindigkeit zu verwenden. Schnellere aus der Literatur bekannte Geschwindigkeiten beziehen sich meist auf Straßen, bzw. gut befahrbare Flächen. Bspw. ist die Untersuchung von Straßen ein Hauptanwendungsgebiet für Georadar-Arrays.
- Für nahe an der Oberfläche gelegene Hohlräume können auch thermographische Aufnahmen ein vielversprechender Ansatz sein. Hierzu gibt es ein erstes erfolgreiches Beispiel in der Literatur (Borgatti et al., 2017). Thermographische Aufnahmen können auch luftgestützt erzeugt werden.
- Empfehlung zur weiteren Literatur-Recherche:
  - o Folien der Habilitations-Vorlesung von Professor Niederleithinger
    - Evtl. weiteres Verfahren Kapazitive Geoelektrik („Ohm-Mapper“)
  - o Borgatti et al. (2017), Sherrod et al. (2019)

- Professor Niederleithinger findet das Thema interessant, regt jedoch an, sich mit der Universität Potsdam in Verbindung zu setzen, da es sich um ein Brandenburger Projekt handelt.
- Empfehlung Ansprechpartner in Brandenburg: Professor Dr. Jens Tronicke, Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Leiter der Arbeitsgruppe Angewandte Geophysik, [jens@geo.uni-potsdam.de](mailto:jens@geo.uni-potsdam.de), Telefon: (0)331 977 5815. <http://www.geo.uni-potsdam.de/angewandte-geophysik-1608.html>.
- (Dr. Niklas Allroggen [Anhang B.5] und Dr. Erika Lück [Anhang B.7] sind Mitarbeiter in dieser Arbeitsgruppe.)

-----

Diese Einschätzung erfolgte vor dem Hintergrund einer per E-Mail zugesendeten Anforderungsliste.

„.... Die Haupt-Anforderungen an die Methoden sind:

- Eine Auflösung, welche es erlaubt mit Luft oder Wasser gefüllte Höhlen und Gräben des Durchmessers 30 cm zu erfassen. Idealerweise auch kleiner bis 15 cm (Bisam).
- Eine Untersuchungstiefe bis ca. 4–5 m. Die meisten Hohlräume befinden sich vermutlich in den ersten 1–2 Metern.
- Anwendbarkeit auch bei gemischten Substraten mit lehmigen und tonigen Anteilen oder eingelagerten stark tonigen Schichten, unebener Geländeoberfläche, geneigter Böschung, Grasbewuchs, Bäumen, Schilfgürteln.
- Optional: Anwendbarkeit bei Metallnetzen an der Oberfläche (Teilweise wurden Schutzgitter gegen den Biber oberflächennah verbaut.)

Im Anhang finden Sie das Regelprofil der häufigsten Deich-Bauweise. Inhomogenes Substrat bedeutet ein Sand-Lehmgemisch. Der Deich kann von beiden Seiten vom Biber angegraben werden. Die wasserseitige Böschung und das Deichvorland sind aber die gefährdetsten und am wichtigsten zu untersuchenden Bereiche.

Ideal wäre ein oder mehrere Verfahren zu finden, welche es ermöglichen den Oderdeich auf einer Länge von ca. 160 km mehrmals im Jahr auf Bibergänge und -höhlen zu überprüfen, bspw. durch Befliegungen oder Befahrungen. ....“

## B.11 Dr. Thomas Jagdhuber, Dr.-Ing Markus Peichl, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme (HR), Abteilung Aufklärung und Sicherheit (AKS), 82234 Oberpfaffenhofen, [www.dlr.de/HR](http://www.dlr.de/HR)

- Dr. Thomas Jagdhuber, Tel.: (0)8153 28-2329, Fax: (0)8153 28-1449, [Thomas.Jagdhuber@dlr.de](mailto:Thomas.Jagdhuber@dlr.de)
- Dr.-Ing. Markus Peichl, Leiter der Fachgruppe Mikrowellensensorik, [Markus.Peichl@dlr.de](mailto:Markus.Peichl@dlr.de), Tel.: +49 8153 28-2390, Fax: +49 8153 28-1135

Einschätzung und Informationen von Herrn Jagdhuber und Herrn Peichl (E-Mail vom 23.09.2019 und im Telefonat vom 30.09.2019):

- In der Fachgruppe Mikrowellensensorik am HR-Institut des DLR werden Mikrowellen erfolgreich für verschiedene Anwendungen genutzt, bei denen Strukturen / Objekte im Untergrund detektiert werden können (bspw. Antipersonenminen).
- Das DLR verwendet dazu:
  - aktive (Sender und Empfänger) Sensortechnik • Radar (oder SAR = hoch aufgelöste Variante),
  - passive (nur Empfänger) Sensortechnik • Radiometer,
  - bzw. die Kombination beider Verfahren.
- In den bisher verwendeten Frequenzbereichen (> 500 MHz) ist die Eindringtiefe am Deich vermutlich auf die obersten Dezimeter begrenzt. Bei einer Ausweitung nach unten auf z.B. > 100 MHz könnte die Eindringtiefe aber eventuell auch bis 2 m reichen. Dies wäre zu testen.
- Hohlräume der Größe 15-30 cm scheinen mit den angewandten Radarverfahren detektierbar zu sein. Die Mikrowellensensorik reagiert sensitiv auf Permittivitätsunterschiede, die z.B. durch Unterschiede im Mischsubstrat Boden-Wasser-Luft gegeben sind, d.h. damit auch auf den Wassergehalt des Bodens bzw. Dichteunterschiede (Boden zu Hohlraum). Das ist in der Regel so gegeben, da sich die luftgefüllten Hohlräume gegenüber dem umliegenden Material deutlich hinsichtlich des Wassergehaltes abgrenzen.
- Flüssiges Wasser im Ensemble reagiert normalerweise anders auf elektromagnetische Wellen, als das in der Bodenmatrix gebundene Wasser. Daher wären auch für wassergefüllte Hohlräume Signalunterschiede auf Grund der unterschiedlichen Vorkommensform des Wassers zu erwarten. Dies wurde bislang aber noch nicht gemessen und müsste getestet werden.
- Detektion unter Wasser ist nicht möglich, da die Dämpfung im Wasser immens groß ist. An der Wasseroberfläche tritt eine teilweise Reflexion auf, der eindringende Teil der Welle wird praktisch weggedämpft.
- Mikrowellen reagieren sehr sensitiv auf Metallkörper. Es ist mit deutlichen Einschränkungen / Störungen durch verbaute Biber-Schutzgitter zu rechnen.
- Die Messtechnik kann prinzipiell stationär, fahrbar (auf Unimog, Breite ca. 8 m) oder per Drohne verwendet werden. Potentiell wäre die Technologie damit geeignet längere Strecken der Deiche zu überwachen.
- Ein Poster über Radiometerarbeiten zur Detektion von Durchnässung an einem Versuchsdeich wurde zugesandt. Weiteres Anschauungsmaterial ist vorhanden. Es besteht auch die Möglichkeit die verwendeten Technologien vor Ort (am Naturdeich) demonstriert zu bekommen.
- Auf Grund von zu erwartenden Randeffekte, bedingt durch den Modellaufbau und der Halenumgebung, wird von Untersuchungen am Modelldeich der TU Dresden Abstand genommen.

- Felduntersuchungen zur praktikablen Detektierbarkeit von Hohlräumen mit diesem Verfahren sind möglich. Sie könnten in 2020 am Oderdeich durchgeführt werden. Notwendig ist, dass im betreffenden Deichabschnitt bekannte Hohlräume vorlägen und direkt observiert werden.