



Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW - 40190 Düsseldorf

Präsidenten des Landtags
Nordrhein-Westfalen
Herrn André Kuper MdL
Platz des Landtags 1
40221 Düsseldorf

LANDTAG
NORDRHEIN-WESTFALEN
18. WAHLPERIODE

**VORLAGE
18/1107**

A17

Oliver Krischer

18.04.2023

Seite 1 von 1

Aktenzeichen 61.08.03.00
bei Antwort bitte angeben

Dr. Kreyenschulte
Telefon 0211 4566-418
Telefax 0211 4566-388
moritz.kreyenschulte
@munv.nrw.de

Umsatzsteuer
ID-Nr.: DE 306 505 705

**Übersendung des Gutachtens „Gestaltung und Planung von
klimaresilienten Pegelanlagen an Fließgewässern in Nordrhein-
Westfalen“ (zu Landtags-Vorlage 18/540)**

Sitzung des AULNV am 19.04.2023

Sehr geehrter Herr Landtagspräsident,

hiermit übersende ich Ihnen, wie in der Sitzung des Ausschusses für Umwelt, Natur- und Verbraucherschutz, Landwirtschaft, Forsten und ländliche Räume am 11.01.2023 zugesagt, zur Vorbereitung der kommenden Sitzung des Ausschusses am 19.04.2023 das Gutachten „Gestaltung und Planung von klimaresilienten Pegelanlagen an Fließgewässern in Nordrhein-Westfalen“ von Herrn Prof. Mudersbach sowie ein Begleitschreiben zum Gutachten mit der Bitte um Weiterleitung an die Mitglieder des Ausschusses.

Mit freundlichen Grüßen

Oliver Krischer

Dienstgebäude und
Lieferanschrift:
Emilie-Preyer-Platz 1
40479 Düsseldorf
Telefon 0211 4566-0
Telefax 0211 4566-388
poststelle@munv.nrw.de
www.umwelt.nrw.de

Öffentliche Verkehrsmittel:
Rheinbahn Linien U78 und U79
oder Buslinie 722 (Messe)
Haltestelle Nordstraße



**Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr
des Landes Nordrhein-Westfalen**

Sitzung des Ausschusses für Umwelt, Natur- und Verbraucherschutz,
Landwirtschaft, Forsten und ländliche Räume des Landtags
Nordrhein-Westfalen
am 19.04.2023

Schriftlicher Bericht

**Gutachten „Gestaltung und Planung von klimaresilienten
Pegelanlagen an Fließgewässern in Nordrhein-Westfalen“
von Herrn Prof. Mudersbach**

Nach dem Hochwasser im Juli 2021 wurden die Hochschule Bochum, Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik, sowie die Ingenieurberatung Prof. Dr.-Ing. Mudersbach vom LANUV beauftragt, zur Ergänzung und Überprüfung des vorhandenen „Messnetzkonzept Hydrologie“ des LANUV von 2013 Handlungsempfehlungen zur Gestaltung und Planung von klimaresilienten Pegelanlagen an Fließgewässern in Nordrhein-Westfalen zu erarbeiten. Das Gutachten ist als Anhang angefügt. Es wurde auf Grundlage des von Herrn Prof. Mudersbach verfassten Strategiepapiers „Maßnahmen zur Bewältigung der Auswirkungen des Hochwasser-Ereignisses vom 12.-19. Juli 2021 auf das Pegelwesen in Nordrhein-Westfalen“ beauftragt, das dem Landtag mit Vorlage 18/540 übermittelt wurde.

Bis zum Hochwasser-Ereignis 2021 hat das LANUV die Pegel gemäß der Vorgaben aus dem oben genannten Konzept "Messnetzkonzept Hydrologie" und nach dem Stand der Technik errichtet und betrieben. Dabei wird je nach Zweck und Bedeutung des Pegels dessen Ausstattung und Ausfallsicherheit vorgegeben.

Das Hochwasser 2021 sowie die Niedrigwasserperioden 2018, 2019, 2020 und 2022 haben eindrücklich gezeigt, dass sich die Randbedingungen, unter denen das Pegelmessnetz betrieben wird, sowie die Anforderungen an die Messungen selbst infolge des Klimawandels verändern. Das LANUV-Konzept "Hydrologische Messnetze" muss daher unter anderem vor dem Hintergrund dieser neuen Randbedingungen fortgeschrieben werden, hin zu einer klimaresilienten Gestaltung der Pegel.

Klimaresiliente Pegel sind zum einen hochwasserresiliente Pegel. Sie sollen also auch im Hochwasserfall möglichst störungsfrei funktionieren. Allerdings können die Pegel niemals auf alle möglichen Ereignisse und Eventualitäten ausgelegt werden. Es verbleibt stets ein Restrisiko und somit die Möglichkeit von Ausfall und Schäden. Wichtig ist, den Betrieb der Anlagen im Hochwasserfall möglichst lange aufrecht und die Schadensanfälligkeit so gering wie möglich zu halten. Priorität liegt hierbei auf der Eignung der Anlagen zur Hochwasserwarnung und auf der Zuverlässigkeit der Datenerfassung und –übertragung im Ereignisfall.

Klimaresiliente Pegel sollen sich zum anderen für Messungen in Niedrigwasserperioden eignen. Für die Gewässerbewirtschaftung müssen die deutlich niedrigeren Wasserstände

in diesen Perioden ebenfalls gemessen werden können. Hierfür sind zum Beispiel Pegellatten nach unten zu verlängern, Sensoren zu verlegen und Abflussmessstellen baulich anzupassen (z. B. Niedrigwasserinne).

Die wesentlichen Empfehlungen des Gutachters für die zukünftige klimaresiliente Gestaltung der Pegel sind vor allem in Kapitel 5 des Gutachtens (siehe Anhang) zu finden und beziehen sich primär auf die Hochwasserresilienz: Zum Schutz vor Zerstörung bei einem Hochwasser ist es sinnvoll, für Hochwasser-Meldepegel ein Bemessungsereignis BHQ größer als das bisher angesetzte HQ100 zu wählen. Ist es technisch und wirtschaftlich umsetzbar, so wird die Wahl des Maximums von HQ_{Extrem} und höchstem bisher am Pegel gemessenen Hochwasser HHQ als Bemessungsereignis empfohlen. Diese Vorgehensweise orientiert sich an dem Verfahren, welches Sachsen nach dem Hochwasser 2002 eingeführt hat.

Des Weiteren werden folgende drei Ausbaustufen für die Pegel vorgeschlagen (siehe Tabelle 1) und die Pegel werden nach ihrer Funktion in vier Kategorien unterteilt (siehe Tabelle 2):

Tabelle 1: Ausbaustufen der Pegel.

| Ausbaustufe | Bemessungshochwasser (BHQ) | Ausstattung zu Messung Wasserstand W | Ausstattung zur Messung Fließgeschwindigkeit v | Sonstiges |
|-------------|---|---|--|--|
| 1 | HQ_{100} | redundante W-Messung (2 Wasserstandsgeber, davon ggf. ein berührungsloser Wasserstandsgeber) | ggf. Erfassung der Oberflächengeschwindigkeit (z.B. Radar) | Messtechnik Auslegung auf BHQ + 0,5 m |
| 2 | $\max\{HQ_{Extrem}, HHQ\}$ Anmerkung: mind. HQ_{100} , wenn aus technischen Gründen kein Ausbau bis $\max\{HQ_{Extrem}, HHQ\}$ möglich ist | redundante W-Messung (3 Wasserstandsgeber, davon möglichst ein berührungsloser Geber), Erfassung von Niedrigwasser | Radar, Horizontal ADCP oder vergleichbar | Messtechnik Auslegung auf BHQ + 1,0 m ausfallsichere Datenspeicherung und Datenübertragung |
| 3 | $\max\{HQ_{Extrem}, HHQ\}$ Anmerkung: mind. HQ_{500} , wenn aus technischen Gründen kein Ausbau bis $\max\{HQ_{Extrem}, HHQ\}$ möglich ist | redundante W-Messung (3 Wasserstandsgeber) Der 3. Wasserstandsgeber sollte möglichst ein berührungsloser Geber mit autarker Stromversorgung und DFÜ sein. Ergänzend sollte ein autarkes optisches Messverfahren vorhanden sein. | Radar, Horizontal ADCP oder vergleichbar | Messtechnik Auslegung auf BHQ + 1,0 m ausfallsichere Datenspeicherung und echtzeitnahe Datenübertragung |

Tabelle 2: Unterteilung der Pegel in vier Kategorien gemäß ihrer Funktion.

| Kategorie | Funktion/ Bezeichnung | Ausbaustufe |
|-----------|---|--------------|
| A | Hochwassermeldepegel | 3 |
| B | Gewässerkundliche Pegel | 2 oder höher |
| C | Kontroll- und Steuerfunktion | 1 oder höher |
| D | Sondermessfunktion oder örtlich begrenzte Bedeutung | 1 oder höher |

Der Gutachter hat zudem drei Betriebszustände definiert:

Betriebszustand L (Extrembetrieb Niedrigwasser):

Abfluss $Q \leq$ Mittleres Niedrigwasser MNQ

Betriebszustand N (Normalbetrieb):

Mittleres Niedrigwasser MNQ < Abfluss Q < Bemessungshochwasser BHQ

Betriebszustand H (Extrembetrieb Hochwasser):

Abfluss $Q \geq$ Bemessungshochwasser BHQ

Für jeden Pegel sollte eine optimierte Auslegung der Messtechnik sowie der Gestaltung der Infrastruktur anhand der Pegelkategorie und der einzelnen Betriebszustände erfolgen. Die Datenerfassung sollte für den Betriebszustand N optimiert werden. In den extremen Betriebszuständen L und H sollte der Pegel ebenfalls noch Daten aufzeichnen, allerdings können laut Gutachter höhere Unsicherheiten in Kauf genommen werden.

Der Gutachter weist darauf hin, dass eine Gestaltung und der Betrieb von klimaresilienten Pegelanlagen nur mit erheblichen finanziellen Mitteln und Personal umsetzbar ist. Je größer die Ansprüche an die Datenqualität sind, umso mehr wird an Ausstattung und an finanziellen und personellen Ressourcen notwendig sein.

Das LANUV-Konzept "Hydrologische Messnetze" wird auf Grundlage der Empfehlungen des Gutachters sowie auf Grundlage der Erfahrungen aus dem Bau und Betrieb des Pegelmessnetzes fortgeschrieben.

Gutachten

Gestaltung und Planung von klimaresilienten Pegelanlagen an Fließgewässern in Nordrhein-Westfalen

Auftraggeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Auftrag vom: 27.04.2022

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach
Anika Hotzel, M.Sc.
Jonas Schwarting, B.Sc.
Sven Quiehl, B.Sc.

Version: 1.3

Datum: 28.03.2023

BO Hochschule Bochum
Lehrgebiet Wasserbau
und Hydromechanik (LWH)

ICM Ingenieurberatung
Prof. Dr.-Ing. Mudersbach

| Dokumentenhistorie | | | |
|--------------------|--|--|------------|
| Version | Bearbeiter | Änderung | Datum |
| 1.0 | Mudersbach Hotzel Schwarting Quiehl | Erstellung Entwurf | 16.08.2022 |
| 1.1 | Quiehl Hotzel | Anpassung Text | 31.08.2022 |
| 1.2 | Mudersbach | Anpassung nach Rückmeldung und Absprache mit LANUV NRW | 27.03.2023 |
| 1.3 | Mudersbach | Anpassungen nach Rücksprache mit LANUV NRW | 28.03.2023 |

Verfasser:

Christoph Mudersbach
Anika Hotzel
Jonas Schwarting
Sven Quiehl

Hochschule Bochum
Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik

Am Hochschulcampus 1
44801 Bochum
Telefon: (0234) 3210249
E-Mail: christoph.mudersbach@hs-bochum.de

ICM Ingenieurberatung
Prof. Dr.-Ing. Mudersbach

Schelderberg 16a
57072 Siegen
Telefon: (0271) 313 429 68
E-Mail: cm@mudersbach-ing.de
www.mudersbach-ing.de

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Anforderungen an Pegelanlagen (Stand der Technik) | 2 |
| 2.1 | Allgemeines | 3 |
| 2.2 | Standortwahl und Einrichtung | 3 |
| 2.2.1 | Wasserstandsmessstellen | 3 |
| 2.2.2 | Durchflussmessstellen | 4 |
| 2.2.3 | Messstrecke und Messquerschnitt | 4 |
| 2.2.4 | Ausstattung | 5 |
| 2.3 | Messtechnik | 5 |
| 2.4 | Datenübertragung | 6 |
| 3 | Defizitanalyse aus Erfahrungen des Hochwasserereignissen vom 14./15. Juli 2021 | 6 |
| 4 | Erfahrung aus dem Wiederaufbau des Pegelnetzes in Sachsen | 9 |
| 4.1 | Allgemeines | 9 |
| 4.2 | Anforderungen an das künftige Pegelmessnetz | 9 |
| 4.2.1 | Hochwasserschutz | 9 |
| 4.2.2 | Pegelkonzeption | 10 |
| 4.2.3 | Bauliche und technische Anforderungen zur Gewährleistung der Datenverfügbarkeit | 10 |
| 4.3 | Gewählte technische und organisatorische Lösungen | 11 |
| 4.3.1 | Pegelneubau und Ertüchtigung vorhandener Pegel | 11 |
| 4.3.2 | Datenverfügbarkeit und Datenfernübertragung | 12 |
| 4.3.3 | Durchflussmessungen bei Hochwasser mittels ADCP | 13 |
| 5 | Planung und Gestaltung von klimaresilienten Pegelanlagen | 13 |
| 5.1 | Allgemeines | 13 |
| 5.2 | Pegelkonzeption | 13 |
| 5.3 | Anforderungen an Datenerfassung und Datenübertragung bei unterschiedlichen Betriebszuständen | 18 |

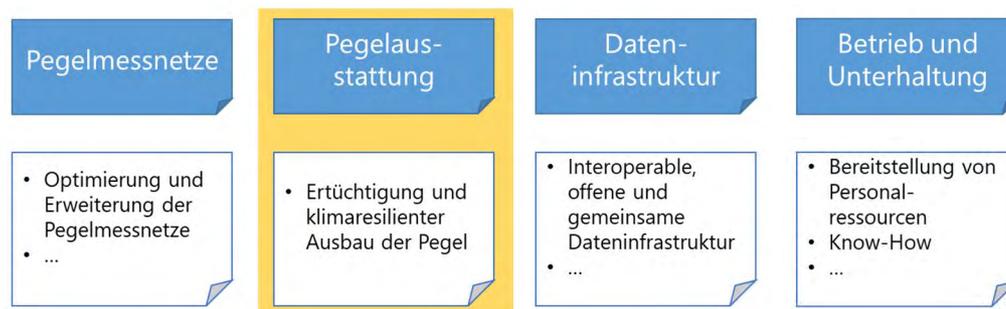
| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.1 | Pegelbetrieb im Normalbetrieb (Zustand N, MNQ bis BHQ) | 18 |
| 5.3.2 | Pegelbetrieb bei extremem Niedrigwasser (Zustand L, < MNQ) | 18 |
| 5.3.3 | Pegelbetrieb bei extremem Hochwasser (Zustand H, > BHQ) | 18 |
| 5.4 | Bauliche und technische Anforderungen | 18 |
| 5.4.1 | Messstrecke und Messquerschnitt | 19 |
| 5.4.2 | Standortwahl | 19 |
| 5.4.3 | Pegelhaus | 20 |
| 5.4.4 | Messstege und Seilkrananlagen | 20 |
| 5.4.5 | Unterhaltung der Anlage | 21 |
| 5.5 | Messtechnik und Datenerfassung | 21 |
| 5.5.1 | Kontinuierliche Erfassung des Wasserstands | 21 |
| 5.5.2 | Kontinuierliche Erfassung der Fließgeschwindigkeit | 22 |
| 5.5.3 | Erfassung des Messquerschnitts | 23 |
| 5.5.4 | Sicherstellung der Stromversorgung | 24 |
| 5.5.5 | Lokale Datenspeicherung | 24 |
| 5.5.6 | Datenfernübertragung | 24 |
| 5.5.7 | Sonstiges | 25 |
| 6 | Fazit und Zusammenfassung | 27 |

1 Einleitung

Ein umfangreicher Kenntnisstand zu Wasserständen, Durchflüssen und topographischen Gegebenheiten ist unabdinglich für die wasserwirtschaftliche Praxis. Auch für die öffentliche (Versorgungs-)Sicherheit sind diese Informationen von sehr großer Bedeutung. Sie bilden die Grundlage für beispielsweise Hochwasservorhersagesysteme und die Überwachung der Dürresituation. Vor dem Hintergrund des schnell voranschreitenden Klimawandels und dessen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft, die Gewässer und somit auch auf das Pegelmessnetz, werden in diesem Gutachten Lösungsansätze für die klimaresiliente Gestaltung von Pegelanlagen präsentiert. Es sollen Anforderungen entwickelt werden, die über das bekannte Regelwerk hinausgehen.

Im Pegelwesen lassen sich vier Arbeitsbereiche (Abbildung 1) definieren. Das vorliegende Gutachten befasst sich ausschließlich mit dem Bereich der Pegelausstattung.

Abbildung 1: Arbeitsfelder im Pegelwesen



Die Erfahrungen zeigen, dass nicht alle Pegelstandorte baulich und messtechnisch hinreichend gut gestaltet sind, um hydrologische Extremereignisse aufzuzeichnen. Hier bedarf es Optimierungen, sowohl bautechnischer als auch messtechnischer Art. Dass dies nötig ist, hat unter anderem das Hochwasserereignis vom 14./15. Juli 2021 in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz deutlich gemacht.

Unter einem klimaresilienten Pegel wird in diesem Gutachten eine Anlage verstanden, die unter heutigen Randbedingungen so geplant und gebaut wird, dass ein Betrieb auch bei zukünftigen Änderungen und Extremereignissen ermöglicht wird. Allgemein bekannt ist, dass der Hochwasserschutz niemals auf das höchstmögliche Ereignis ausgelegt werden kann. Es wird immer wieder zu Schäden kommen. Auch andere Extreme, wie Dürre und Stürme, können Schäden verursachen. Deshalb ist es wichtig, eine allumfassende Klimaanpassung im Pegelwesen herbeizuführen, um sich dem dynamischen Verhalten des Klimawandels anzupassen und das

Schadensausmaß so gering wie möglich zu halten. Das vorliegende Gutachten ist daher als eine Ergänzung zu dem „Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)¹ zu verstehen, so dass die darin enthaltenen Vorgaben für Pegelanlagen nicht umfänglich wiederholt werden.

Dennoch muss berücksichtigt werden, dass die Erreichung der in diesem Gutachten beschriebenen Ziele und Ausbaustufen durch die gegebenen örtlichen Rahmenbedingungen, die Messverfahren und die Bauweise von Pegeln beeinflusst wird. Die lokalen Besonderheiten an den Pegelstationen und deren Umfeld (Restriktionen) können dazu führen, dass eine vollständige Zielerreichung nicht möglich ist. Hier ist dann ein unter den gegebenen Bedingungen erreichbarer optimaler Zustand anzustreben und die Zielerreichung ist entsprechend zu bewerten. Dafür muss eine individuelle Kombination aller Komponenten gefunden werden, um das Optimum einer Anlage herbeizuführen. Positive Beispiele für einen erfolgreichen Wiederaufbau des Pegelmessnetzes sind in anderen Bundesländern, vor allem in Sachsen nach dem Elbehochwasser von 2002, zu finden.

2 Anforderungen an Pegelanlagen (Stand der Technik)

Die rechtlichen und gestalterischen Grundlagen für die Errichtung und die Beobachtung von Messstellen, sowie die Auswertung und Verwendung der Daten, sind im „Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) festgelegt (s.o.).

Zudem haben die Verbände der Länder weitere Richtlinien und Leitfäden veröffentlicht, welche die Anforderungen an Pegel hinsichtlich der Klimaveränderungen aufzeigen.

Die Anforderungen an die Pegelanlage werden aus dem LAWA-Leitfaden und den Richtlinien der Länder Baden-Württemberg² und Nordrhein-Westfalen³ zusammengefasst.

¹ Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2018): Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch; online verfügbar unter: https://www.lawa.de/documents/02_anhang_2_lawa_pegelhandbuch_2_3_1552303807.pdf

² Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2015): Gestaltung von Pegelanlagen; online verfügbar unter: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/68730>

³ Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) (2013): Messnetzkonzept Hydrologie NRW

2.1 Allgemeines

Generell ist eine Pegelanlage so zu gestalten, dass die Arbeitsschutzbestimmungen eingehalten werden und Schutz gegen Einbruch sowie Witterungseinflüsse besteht. Dies beinhaltet neben dem Hochwasser- und Blitzschutz, auch den Schutz der Messtechnik gegen Vandalismus und durch Tiere hervorgerufene Schäden. Ebenfalls sind ein Überspannungsschutz, Signalleitungen und Fernsprechanchlüsse vorzusehen.

2.2 Standortwahl und Einrichtung

Bei der Suche und Eignungsprüfung eines Standorts gibt es neben den allgemeinen Anforderungen weitere wichtige Punkte, die geprüft werden sollten. Als Grundlage dient eine intensive Gewässerbegutachtung, bei der eine Momentaufnahme des Gewässers und der Umgebung gemacht wird. Es ist ratsam, die anliegenden Personen zu befragen. Zudem ist eine Analyse der historischen Abflussereignisse durchzuführen. Hydraulische Berechnungen bezüglich der Leistungsfähigkeit der Messstelle, sowie die Bewertung der Gewässernutzung sind ebenfalls Teil der Grundlagenermittlung für die Standortwahl eines Pegels. Eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Leitungen (Strom, Telekommunikation etc.) ist durchzuführen, da zusätzliche Versorgungsstrukturen für den Betrieb einer Pegelanlage von Nöten sind. Der Standort des Pegels sollte zugänglich sein, um Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten gewährleisten zu können.

Um die Eignung eines Standortes zu ermitteln, kann es sinnvoll sein, die neue Pegelanlage zunächst in einer niedrigeren Ausbaustufe, z.B. als Solarpegel, zu betreiben und den Endausbau entsprechend der Vorgaben zu einem späteren Zeitpunkt vorzunehmen.

2.2.1 Wasserstandsmessstellen

Messstellen zur Aufnahme des Wasserstandes sind an repräsentativen Stellen des Gewässers anzuordnen. Die LAWA macht folgende Aufzählung:

- am Oberlauf des Gewässers,
 - an der Mündung des Gewässers
 - unterhalb wichtiger Zuflüsse mit markanter Zunahme der Größe des Einzugsgebietes
 - an Stauhaltungen, natürlichen und künstlichen Seen mit Wasserstandsdynamik sowie deren Zu- und Abflüssen
 - an Orten mit bedeutsamen Übergängen oder Verbindungen zum Grundwasser
-

- an Orten mit wesentlichen Änderungen der Tidewellencharakteristik im Ästuar
- am Übertritt des Gewässers in einen meteorologisch, morphologisch oder geologisch stark differenten Naturraum
- an Bifurkationen, an Überleitungen in ein anderes Gewässersystem

Es sollten zudem die Anforderungen an die Messstrecke und den Messquerschnitt erfüllt sein (siehe Abschnitt 2.2.3). Innerhalb der Messstrecke sollte die Pegelanlage im oberstromigen Bereich errichtet werden, da im unterstromigen Bereich mit Störeinflüssen des Unterlaufes zu rechnen ist.

2.2.2 Durchflussmessstellen

Die Messstellen zur Erfassung des Durchflusses sollten, genau wie die Wasserstandsmessstellen, an hydrologisch repräsentativen Standorten geplant werden und ein möglichst stabiles Gewässerbett vorweisen. Ein weiterer Grundsatz gibt für die vollständige Erfassung des Durchflusses vor, dass der Querschnitt orthogonal zur Strömungsrichtung angeordnet werden muss. Der Durchfluss ist in unmittelbarer Nähe zum Pegel zu erfassen. Außerdem ist zu beachten, dass es nicht zu Unter- oder Umläufigkeiten, sowie Rückstauerscheinungen kommt. Für die Erzielung besserer Messergebnisse ist es sinnvoll, unterschiedliche Messquerschnitte für den Niedrig-, Mittel- und Hochwasserbereich zu wählen und gegebenenfalls hydraulische Verbesserungen in Form von baulichen Maßnahmen am Gewässer herbeizuführen.

2.2.3 Messstrecke und Messquerschnitt

Unter einer Messstrecke ist ein Fließgewässerabschnitt an einem Pegel zu verstehen, in welchem sich das Messprofil befindet. An die Messstrecke werden besondere bauliche Ansprüche gestellt. Das Gewässerbett sollte möglichst stabil sein, z.B. durch Einbau wasserbaulicher Erosionssicherungen. Zudem sollte eine gerade und gleichmäßige uferparallele Strömung vorliegen. Das Gefälle sollte stetig sein, die Länge sollte ausreichend sein und die hydraulischen Bedingungen des Gewässers widerspiegeln. Innerhalb der Messstrecke sollte sich der Querschnitt nicht aufweiten oder einengen. Die Erfassung des Wasserstandsbereiches, von NNW (niedrigster bekannter Wasserstand) bis HHW (höchster bekannter Wasserstand), sollte gewährleistet sein. Dabei sind Sicherheitsbeiwerte zu beachten. Bei allen Wasserständen sollte ein stabiler strömender Abfluss (Froudezahl $Fr < 0,5$) vorherrschen, Turbulenzen oder Wellenbildungen dürfen nicht auftreten. Oberhalb des Messprofils darf kein schießender Abfluss vorliegen, unterhalb des Messprofils ist dies vorteilhaft, um einen Rückstau zu vermeiden. Durchflussänderungen sollten in adäquater Weise am Wasserstand abgebildet werden. Die Messstrecke muss den Verlauf des

Fließgewässers angemessen abbilden. Nur unter den genannten Kriterien können hydrologische Aufgabenstellungen ordnungsgemäß bearbeitet werden. Der Aufbau eines Messnetzes sollte strecken- und gebietsorientiert angelegt werden. Ist der Abfluss wesentlichen Veränderungen ausgesetzt, ist die Anpassung des Messnetzes erforderlich. Zudem sollte eine regelmäßige Vermessung des Messquerschnittes durchgeführt werden.

2.2.4 Ausstattung

Zur Grundausstattung einer Pegelanlage gehört ein Lattenpegel, um einen Referenzwasserstand ablesen zu können. Des Weiteren sollte eine Messstelle so ausgestattet sein, dass diese zur kontinuierlichen Anzeige, Aufnahme und Übertragung von Messwerten verwendet werden kann. Die aufgenommenen Messwerte müssen vor Ort von dem Datensammler abgelesen werden können. Der Datenversand und -abruf hat nach dem jeweiligen Stand der Technik zu erfolgen. Außerdem sind die allgemein geltenden Regeln zur Datensicherheit einzuhalten.

2.3 Messtechnik

Zur Erfassung des Wasserstandes gibt es verschiedene gebräuchliche Messtechniken. Die Eigenschaften der Messtechniken sowie deren Vor- und Nachteile sind im Pegelhandbuch der LAWA genauer aufgeführt. Die gängigen Wasserstandsmessverfahren sind:

- Lattenpegel
- Schwimmerpegel
- Einperlpegel
- Drucksondenpegel
- Radarpegel
- Ultraschallpegel

Die gängigen Verfahren zur Messung des Durchflusses werden nach LAWA-Leitfaden (s.o.) in drei Unterkategorien geteilt. Die Erfassung des Durchflusses kann über die Fließgeschwindigkeit (in einzelnen Punkten) erfolgen:

- Messflügel (stangengeführte Systeme)
- magnetisch-induktive Strömungsmesser
- Ultraschallsonden
- Oberflächenschwimmer

Integrierende Verfahren:

- Gefäßmessung
 - Tracermessung
 - Kettenschwimmer
 - Tauchstabmessung nach Jens
-

Kontinuierliche Verfahren:

- Messwehre
- Ultraschall-Doppler-Verfahren
- Oberflächenradar / Oberflächenvideo

2.4 Datenübertragung

Die Datenfernübertragung erfolgt durch einen regelmäßigen Datenversand oder durch Datenabruf (Datenfernübertragung, DFÜ) nach dem jeweiligen Stand der Technik. Die geltenden Regelungen zur Datensicherheit sind einzuhalten. Die Datenübertragung ist je nach Ausbaustufe redundant auszustatten.

3 Defizitanalyse aus Erfahrungen des Hochwasserereignissen vom 14./15. Juli 2021

Das Hochwasser-Ereignis im Juli 2021 hat in Deutschland in mehreren Bundesländern zu massiven Schadensausmaßen geführt. In NRW lag der Schwerpunkt der Ereignisse an den Tagen vom 14.-17.07.2021. In dem Ereigniszeitraum traten durch das Tiefdruckgebiet „Bernd“ Starkniederschläge verschiedener Dauer auf. Die meisten Ereignisse in dieser Phase (Mittel- und Westdeutschland) konnten mindestens als Jahrhundertereignis (Wiederkehrintervall $T \geq 100$ Jahre) eingestuft werden. Aus Abbildung 2 ist ersichtlich, dass es in der Eifel und in weiten Teilen NRW zu erheblichen Niederschlagssummen von bis zu 197 mm Niederschlag innerhalb von 72 Stunden kam⁴.

⁴ Junghänel et al. (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021 (DWD); online verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_sta_rkniederschlaege_tief_bernd.pdf;jsessionid=43AC77FE0BDEA678CFA78A7E8DB8FD7E.liv_e21072?__blob=publicationFile&v=6

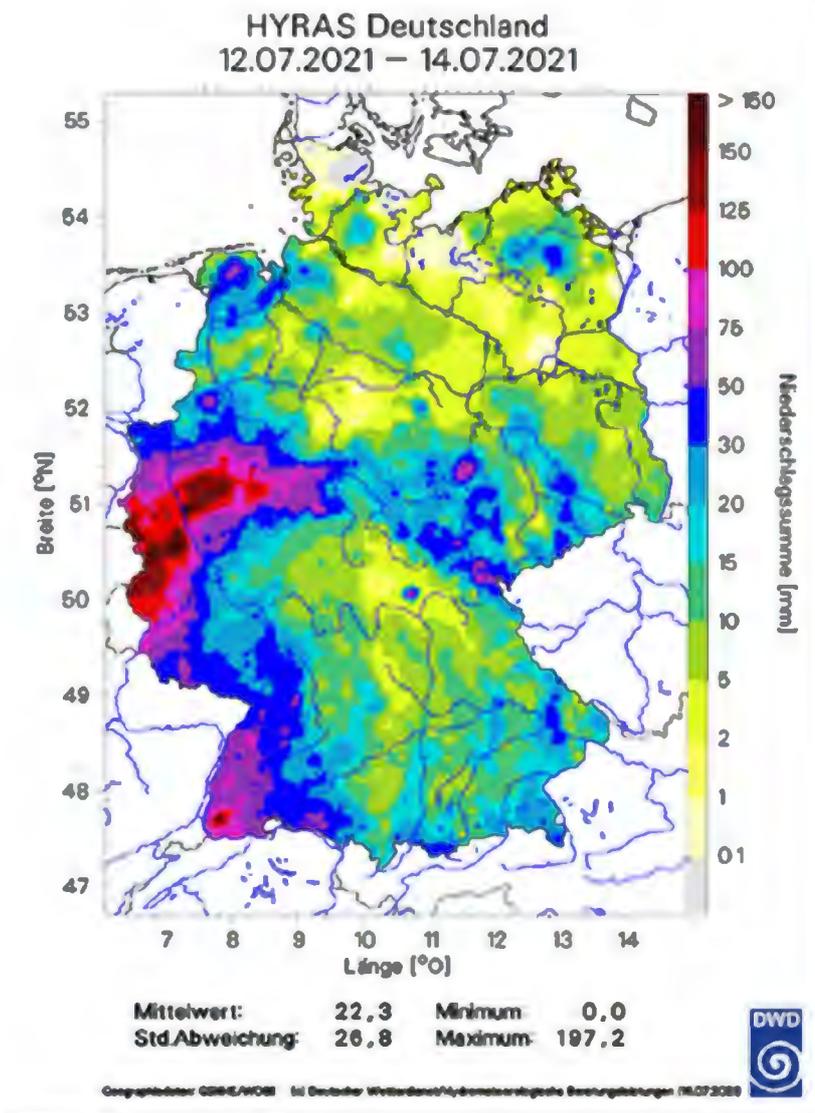


Abbildung 2: Niederschlagsanalyse auf Basis von Hydrometeorologischen Rasterdaten (HYRAS) für die Dauerstufe 72 Std. Bis zum 15.07.2021 08:00 Uhr MESZ (Junghänel et al., 2021)

Die Folgen des Hochwasser-Ereignisses können bisher noch nicht abschließend beurteilt werden. In Nordrhein-Westfalen belaufen sich die geschätzten Schäden bereits auf über 12,3 Milliarden Euro. Betroffen waren 180 der insgesamt 427 kommunalen Gebietskörperschaften (Abbildung 3). Besonders stark betroffen sind der Kreis Euskirchen, der Rhein-Erft-Kreis, der Rhein-Sieg-Kreis, der Märkische Kreis sowie die Städteregion Aachen⁵.

⁵ Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat (BMI); Bundesministerium der Finanzen (BMF) (2022): Bericht zur Hochwasserkatastrophe 2021: Katastrophenhilfe, Wiederaufbau Evaluierungsprozesse; online verfügbar unter: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2022/abschlussbericht-hochwasserkatastrophe.pdf?__blob=publicationFile&v=1

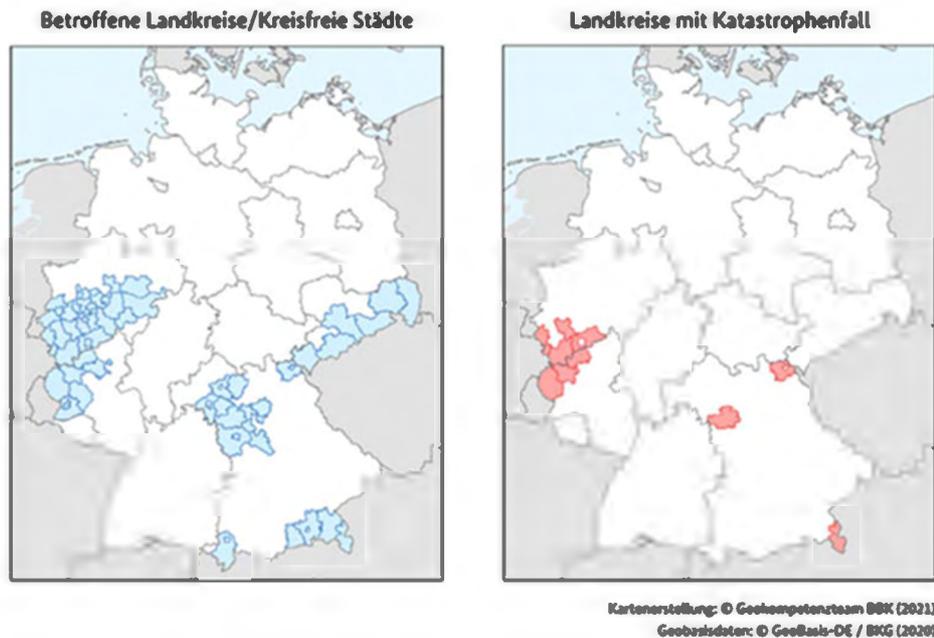


Abbildung 3: Von dem Hochwasserereignis betroffene Landkreise/kreisfreie Städte in Deutschland (BMI & BMF, 2022)

An 40 von 175 Pegeln an NRW-Gewässern wurden während des Hochwasser-Ereignisses stark erhöhte Wasserstände gemessen, die teilweise die bisher bekannten Hochwassermarken um bis zu einem Drittel überschritten haben⁶. Erste Auswertungen zu dem Hochwasser-Ereignis an der Ahr in Rheinland-Pfalz zeigen, dass die gemessenen Abflusswerte zu weiten Teilen sowohl über den bisher gemessenen Spitzenwerten lagen als auch über den HQ₁₀₀-Werten⁷. Diese wurden bis zu einem Faktor von ca. 2,0 überschritten, woraus sich Jährlichkeiten in der Größenordnung von 10.000 Jahren ableiten lassen.

Die Gewässerpegel sind ein zentraler Baustein für das gesamte Wassermanagement sowie für den Hochwasserwarndienst in NRW. Es hat sich während und nach dem Ereignis gezeigt, dass einige Pegel durch das Hochwasser beschädigt wurden. Die Menge und die Geschwindigkeit des Wassers, sowie Geschiebe und weitere Schwimmstoffe, haben zu starken Erosionen innerhalb des Fließquerschnittes geführt und zu Verwüstungen im Umland.

Die in den betroffenen Pegeln verbaute redundante Messtechnik hat sich in sehr vielen Fällen bewährt. Dennoch musste festgestellt werden, dass die

⁶ Ministerium für Umwelt Landwirtschaft Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV NRW) (2021): Schriftlicher Bericht zu dem Hochwasserereignisse Mitte Juli 2021

⁷ A. Schäfer, B. Mühr, J. Daniell, U. Ehret, F. Ehmele, K. Küpfer, J. Brand, C. Wisotzky, J. Skapski, L. Rentz, S. Mohr, M. Kunz (2021) Hochwasser Mitteleuropa, Juli 2021 (Deutschland), CEDIM Forensic Disaster Analysis (FDA) Group, online verfügbar unter https://www.cedim.kit.edu/download/FDA_HochwasserJuli2021_Bericht1.pdf, zuletzt abgerufen am 11.08.2022

bauliche Gestaltung einiger Pegel, sowie die installierte Messtechnik in einigen Fällen nicht geeignet waren, um die extremen Hochwasserabflüsse angemessen aufzeichnen zu können. Teilweise wurden Pegelanlagen umströmt oder die Höhe der Messeinrichtung war nicht ausreichend und somit wurde der Messbereich überschritten. Durch den Ausfall der Stromversorgung und der Telekommunikationsinfrastruktur konnte eine kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte und eine ordnungsgemäße Datenübertragung nicht überall gewährleistet werden.

Häufig konnten die Verläufe des Hochwassers im Nachgang rekonstruiert werden, teilweise gingen aber wertvolle Informationen verloren, die für eine eingehende Analyse des Hochwasser-Ereignisses und daraus abgeleitete Erkenntnisse wichtig wären.

4 Erfahrung aus dem Wiederaufbau des Pegelnetzes in Sachsen

Nach der Jahrhundertflut in Sachsen im August 2002 wurden intensive Anstrengungen unternommen, um die Auswirkungen auf das Pegelnetz und begünstigende Faktoren sowie Mängel an diesem zu untersuchen und es zu verbessern⁸. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich die Erneuerung des sächsischen Pegelnetzes nur auf die Hochwassersicherheit bezieht.

4.1 Allgemeines

Das vorhandene Pegelnetz wurde verbessert und es wurden neue Anforderungen an dessen Qualität gestellt. Konkret wurde die Hochwassermeldezentrale des Freistaates sowie die Technik und Datenerhebung für Pegelanlagen aufgebaut und angepasst und somit deutlich verbessert.

Zudem wurde das Niederschlagsmessnetz erheblich ausgebaut und wird seitdem zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) betrieben. So ist es möglich, Niederschlagsdaten direkt in die Hochwasserprognosen miteinzubeziehen.

4.2 Anforderungen an das künftige Pegelmessnetz

4.2.1 Hochwasserschutz

Es wurde eine Hochwassermeldezentrale eingerichtet und neue Alarm- und Meldestufen für alle Pegel konzipiert. Insgesamt werden für jeden Pegel vier Stufen berechnet. Die Leitung obliegt dem Landesamt für Umwelt,

⁸ Umweltbetriebsgesellschaft in Sachsen (UBG) (2005): Der Wiederaufbau des sächsischen Pegelmessnetzes; online verfügbar unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/17956>

Landwirtschaft und Geologie (LfULG), genauer dem Landeshochwasserzentrum.

4.2.2 Pegelkonzeption

Um den Bemessungsfaktoren der Pegel einen Wichtigkeitswert zuzuweisen, wurden je nach Funktion vier Kategorien eingeführt (Tabelle 1), nach denen Sicherheitsbeiwert, Messtechnik etc. angesetzt werden.

Tabelle 1: Pegelkategorien in Sachsen

| | |
|--------------------|---|
| Kategorie A | Bedeutung für Hochwassermeldedienst, aus technischen Gründen nicht in Kategorie B, Erfassung der Variabilität des Wasserdargebots |
| Kategorie B | Bedeutung für Hochwassermeldedienst, Erfassung der Variabilität des Wasserdargebots |
| Kategorie C | Kontroll- und Steuerfunktion |
| Kategorie D | Örtlich begrenzte Bedeutung, Sondermessfunktion (Betrieben von Dritten) |

Die Ausrüstung und Funktionalität aller Pegel des Landes, ausgenommen Pegel der Kategorie D, werden entsprechend der Pegelkonzeptionierung von der Sächsischen Umweltbetriebsgesellschaft sichergestellt.

4.2.3 Bauliche und technische Anforderungen zur Gewährleistung der Datenverfügbarkeit

Um die sichere Datenerfassung und -übertragung zu gewährleisten, sind die baulichen Anlagen von Pegeln als grundlegend anzusehen. Aus dem LAWA-Leitfaden wurden einige Bemessungsrichtlinien unverändert übernommen.

Das HQ_{500} wird als empfohlene Größe für das Bemessungshochwasser (BHQ) festgelegt. Der Bemessungswasserstand (BHW) kann ermittelt werden, in dem das HQ_{100} mit einem Faktor von 1,3 bis 1,9 beaufschlagt wird. Dabei werden auch einzugsgebietsspezifische Größen in die Gewichtung miteinbezogen. Basierend auf diesen Bemessungsdurchflüssen und -wasserständen müssen die entsprechenden statischen Nachweise erbracht werden, um eine baulich geeignete Lösung zu erzielen. Für Pegelanlagen im Bestand müssen nachträglich Nachweise zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit geführt werden. Pegellatten sollten mindestens 1 m über dem BHQ der jeweiligen Messstrecke liegen, um die Erfassung aller Wasserstandsbereiche zu gewährleisten. Die Messstege sollten ebenfalls mindestens 1 m über dem jeweiligen BHQ liegen (von der Unterkante aus), um der Gefahr der Zerstörung durch Akkumulation von Treib- und Schwimmstoffen entgegenzuwirken. Aus diesem Grund sollten die Steganlagen entsprechend gegründet werden, zum Beispiel durch Schwerlastanker oder Betonwiderlager. Möglichkeiten des Rückstaus

(Brücken, Wehre etc.) sollten ausgeschlossen werden. Pegelanlagen sollten grundsätzlich nicht mit trocken gesetzten Mauerverbänden errichtet werden. Bewährt haben sich in Unterbeton gesetzte und bündig mörtelverfugte Mauerverbände. Sämtlich Bauteile der Pegelanlage in Bereichen mit hohem Gefälle oder in erosionsgefährdeten Bereichen sind baulich angemessen abzusichern. Generell ist ein hochwassersicherer Standort für Pegelhäuser, Stromanschlüssen und Telefon-/Funkverbindungen sicherzustellen, um die Datenerfassung, -speicherung und -übertragung zu gewährleisten.

Variable Faktoren wie die Standortkonditionen, Messverfahren und die Bauweise von Pegeln, schränken die Möglichkeit zur pauschalen Vorgabe von Bemessungswerten stark ein. Vorrangig ist es das Ziel, auch während eines Hochwassers die Arbeitssicherheit, Ausfallsicherheit und Messgenauigkeit zu gewährleisten. Dafür muss eine individuelle Kombination aller Komponenten gefunden werden, um das Optimum einer Anlage herbeizuführen.

4.3 Gewählte technische und organisatorische Lösungen

Der Handlungsbedarf am Pegelnetz wurde nach dem Hochwasser im August 2002 ermittelt und anschließend in Prioritätsklassen eingeteilt.

4.3.1 Pegelneubau und Ertüchtigung vorhandener Pegel

Es wurden teilweise neue Standorte für den Wiederaufbau von zerstörten Pegeln gewählt. Diese Standorte wurden strategisch so gewählt, dass die Hochwassersicherheit sich deutlich verbessert hat. Außerdem wurden auch pragmatische und kosteneffiziente Lösungen gefunden, wie zum Beispiel die Verlagerung des Pegels in die Nähe von Straßenbrücken. So konnte in einem Fall auf das Einrichten eines Messstegs verzichtet werden.

Außerdem wurde die Gefährdung für Pegelhäuser, Messtechnik, Seilkrananlagen, Messstege und die Zugänglichkeit, für geringfügig oder nicht beschädigte Pegel, in vier Klassen eingeteilt (Abbildung 4). Darauf basierend wurde ebenfalls der Handlungsbedarf für Verbesserungsmaßnahmen bestimmt.

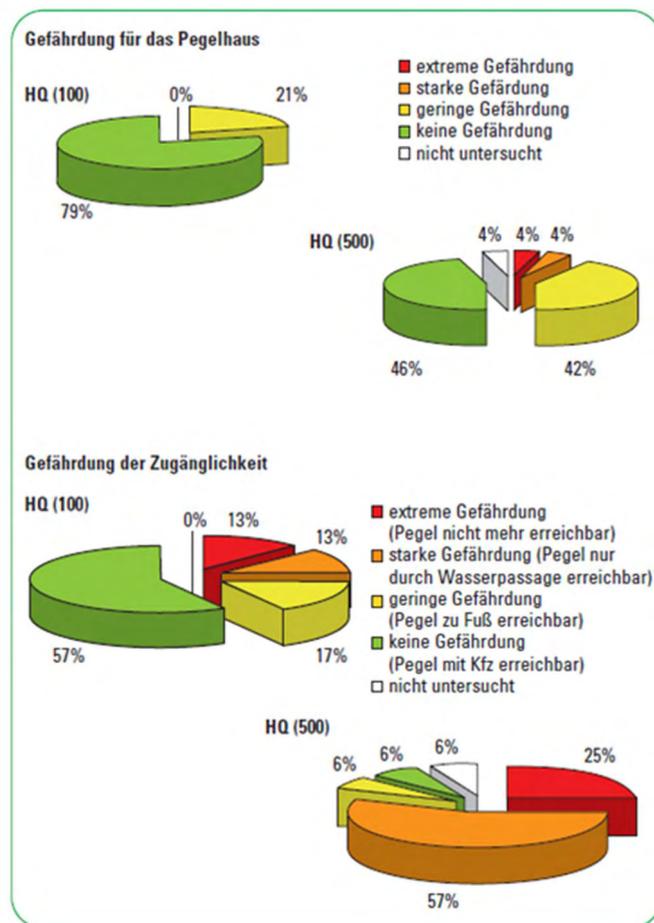


Abbildung 4: Hochwassergefährdung der Pegelhäuser des Bereichs Chemnitz (UBG, 2005)

4.3.2 Datenverfügbarkeit und Datenfernübertragung

Eine weitere Konsequenz, die aus dem Hochwasserereignis gezogen wurde, ist die erforderliche redundante Ausrüstung der bedeutendsten Pegelanlagen des sächsischen Netzes. Dafür muss die Datenerfassung und -übertragung durch zwei voneinander unabhängigen Systemen erfolgen. Außerdem sollten Systeme zur Stromausfallüberbrückung installiert werden. Besonders erfolgreich in der Praxis sind solarversorgte Anlagen auf Basis einer 12 Volt-Technik. Zusammen mit dem Einsatz von Einperlsystemen (Abschnitt 5.5.1), sowie dem Abruf von Messdaten über das GSM-Funknetz konnte auch an Pegeln ohne Pegelschacht eine netzautarke Datenfernübertragung sichergestellt werden. Bei festem Stromanschluss ist für den Fall eines Ausfalls für einen ausreichenden Akkupuffer zu sorgen. Die Messtechnik ist so zu installieren, dass eine einwandfreie Funktion im Hochwasserfall gewährleistet werden kann. Wenn die Sicherheitswerte nicht eingehalten werden können, müssen schwimmerfreie Systeme zum Einsatz kommen. An Pegelstandorten mit schlechter Verbindung zum GSM-Funknetz oder unökonomischem Festnetzanschluss ist eine Datenübertragung per Satellit oder Kurzstreckenfunk möglich.

4.3.3 Durchflussmessungen bei Hochwasser mittels ADCP

Der Einsatz von Acoustic Doppler Current Profilern (ADCP) während des Hochwasserereignisses hat sich als erfolgreich und zukunftsweisend erwiesen. Die Mobilität und die Exaktheit des ADCP sind hervorzuhebende Vorteile dieser Ultraschall-Messtechnik.

5 Planung und Gestaltung von klimaresilienten Pegelanlagen

5.1 Allgemeines

Aus der Defizitanalyse (Abschnitt 3) geht hervor, dass eine Pegelausstattung nach dem Stand der Technik nicht ausreichend ist und eine klimaresiliente Anpassung über das aktuelle Regelwerk hinausgehen muss.

Die vermehrte Nutzung der Wasserstands- und Durchflussdaten für die Hochwasservorhersage oder Hochwassermanagementsysteme erfordert Messdaten, die weitestgehend ausfallsicher, operationell nutzbar sind und zeitnah zur Verfügung stehen. Die Messdaten müssen bereits als ungeprüfte Rohdaten im Hochwasserfall verlässlich sein. Das gilt auch für die aus den Abflusskurven ermittelten Durchflüsse.

Eine klimaresiliente Auslegung heißt, sowohl Hochwasser- als auch Niedrigwasserbedingungen zu erfassen und gleichzeitig für die Betreiber sinnvolle und umsetzbare Lösungsansätze zu liefern.

Mit der redundant-diversitären Wasserstands Erfassung, d.h. dem Einsatz von zwei oder mehr voneinander unabhängigen Messverfahren, wird sichergestellt, dass auch bei Ausfall eines Messwertgebers die Daten übermittelt werden können. Die Datenübertragung erfolgt ebenfalls auf zwei voneinander unabhängigen Wegen. Damit wird das Risiko reduziert, dass Datenlücken bei der Registrierung des Wasserstandes entstehen. Ebenso können systematische Abweichungen der verschiedenen Messsysteme erkannt werden.

Zusätzlich muss die Arbeitssicherheit bei Betrieb und Wartung der Pegelanlagen sichergestellt werden. Dafür können sich bestimmte Applikationen (Apps) für die tägliche Kontrolle eignen.

5.2 Pegelkonzeption

Durch das Juli-Hochwasser sind einige Pegelanlagen umströmt oder zerstört worden. Um dies zukünftig bei der Planung von neuen Pegelanlagen zu berücksichtigen, ist es sinnvoll, für Pegel mit übergeordneten Aufgaben ein Bemessungsereignis BHQ größer HQ₁₀₀ zu wählen. Ist es technisch und wirtschaftlich umsetzbar, so ist die Wahl eines HQ_{Extrem} (in NRW entspricht dies

weitgehend einem HQ_{1000}) oder auch darüber hinaus zu empfehlen. Der zu einem Bemessungsabfluss (BHQ) zugehörige Wasserstand kann jeweils über eine hydrodynamisch-numerische Simulation ermittelt werden.

Die Pegel werden nach deren Funktion in vier Hauptkategorien unterteilt (Tabelle 2). Für die Pegelkategorien werden Ausbaustufen definiert (s.u.).

Tabelle 2: Pegelkategorien und erforderliche Ausbaustufe

| Kategorie | Funktion/Bezeichnung | Ausbaustufe |
|-----------|---|--------------|
| A | Hochwassermeldepegel | 3 |
| B | Gewässerkundliche Pegel | 2 oder höher |
| C | Kontroll- und Steuerfunktion | 1 oder höher |
| D | Sondermessfunktion oder örtlich begrenzte Bedeutung | 1 oder höher |

Um die Pegel der Bedeutung nach klimaresilient auszustatten, werden vier Ausbaustufen für Pegelanlagen vorgeschlagen (Tabelle 3).

Pegelanlagen der ersten Stufe (**Ausbaustufe 1**) sind nach dem Stand der Technik auf ein Bemessungshochwasser (BHQ) HQ_{100} auszulegen. Eine Ausstattung nach dem Stand der Technik bedeutet mindestens eine redundante Ausstattung in der Wasserstandsmessung (2 Wasserstandsgeber). Je nach Funktion des Pegels und örtlichen Gegebenheiten können Sensorsysteme zur berührungslosen Erfassung von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit vorgesehen werden. Die Messtechnik ist hochwassersicher auszulegen auf ein Niveau von $BHQ + 0,5$ m.

Die **Ausbaustufe 2** baut auf der Ausbaustufe 1 auf und es werden höhere Anforderungen an das Bemessungsereignis (BHQ) gestellt. Hier wird der höhere Wert aus HHQ und HQ_{Extrem} verwendet. Sollte im Einzelfall nicht möglich sein, dieses Ziel zu erreichen (z.B. aufgrund von Umströmungen des Pegels), sollte das maximal technisch umsetzbare Niveau als BHQ angesetzt werden, was jedoch in jedem Fall größer HQ_{100} sein muss. Bei der Datenerfassung sollten drei Wasserstandsgeber vorhanden sein. Davon sollte ein Geber möglichst auf einer berührungslosen Technik basieren (z.B. Radar). Ein besonderes Augenmerk sollte auch auf der Erfassung von Niedrigwasserereignissen liegen. Ebenso ist eine kontinuierliche Erfassung der Fließgeschwindigkeiten vorzusehen. Die Messtechnik ist hochwassersicher auszulegen auf ein Niveau von $BHQ + 1,0$ m.

Bei **Ausbaustufe 3** werden hohe Anforderungen an das Bemessungsereignis (BHQ) gestellt. Auch hier wird der höhere Wert aus HHQ und HQ_{Extrem} verwendet. Sollte im Einzelfall nachgewiesen werden können, dass dieses Ziel nicht zu erreichen ist, ist – abweichend zu Ausbaustufe 2 – mindestens ein HQ_{500} anzusetzen. Bei Ausbaustufe 3 ist der dritte Wasserstandsgeber hinsichtlich Stromversorgung und Datenübertragung möglichst autark auszugestalten. Zusätzlich sollte ein autarkes optisches Messsystem (z.B. Video/Kamera) installiert werden. Die Messtechnik ist hochwassersicher anzulegen auf ein Niveau von $BHQ + 1,0$ m.

Falls eine Pegelanlage die Anforderungen für die vorgesehene Ausbaustufe nicht erfüllen kann, muss die Anlage einer Kategorie zugeordnet werden, deren Anforderungen erfüllt werden können. Alternativ kann ein Standortwechsel durchgeführt werden.

Tabelle 3: Ausbaustufen der Pegel

| Ausbau- stufe | Bemessungshochwasser (BHQ) | Ausstattung zu Messung Wasserstand W | Ausstattung zur Messung Fließgeschwindigkeit v | Sonstiges |
|------------------|---|---|--|--|
| 1 | HQ_{100} | redundante W-Messung (2 Wasserstandsgeber, davon ggf. ein berührungsloser Wasserstandsgeber) | ggf. Erfassung der Oberflächengeschwindigkeit (z.B. Radar) | Messtechnik Auslegung auf BHQ + 0,5 m |
| 2 | $\max\{HQ_{Extrem}, HHQ\}$ Anmerkung: mind. HQ_{100} , wenn aus technischen Gründen kein Ausbau bis $\max\{HQ_{Extrem}, HHQ\}$ möglich ist | redundante W-Messung (3 Wasserstandsgeber, davon möglichst ein berührungsloser Geber), Erfassung von Niedrigwasser | Radar, Horizontal ADCP oder vergleichbar | Messtechnik Auslegung auf BHQ + 1,0 m ausfallsichere Datenspeicherung und Datenübertragung |
| 3 | $\max\{HQ_{Extrem}, HHQ\}$ Anmerkung: mind. HQ_{500} , wenn aus technischen Gründen kein Ausbau bis $\max\{HQ_{Extrem}, HHQ\}$ möglich ist | redundante W-Messung (3 Wasserstandsgeber) Der 3. Wasserstandsgeber sollte möglichst ein berührungsloser Geber mit autarker Stromversorgung und DFÜ sein. Ergänzend sollte ein autarkes optisches Messverfahren vorhanden sein. | Radar, Horizontal ADCP oder vergleichbar | Messtechnik Auslegung auf BHQ + 1,0 m ausfallsichere Datenspeicherung und echtzeitnahe Datenübertragung |

In Abbildung 5 ist beispielhaft eine klimaresiliente Pegelmessstelle der Kategorie A dargestellt. Es können zudem drei Betriebszustände definiert werden:

Betriebszustand L: $< \text{MNQ}$ (Extrembetrieb Niedrigwasser)

Betriebszustand N: MNQ bis BHQ (Normalbetrieb)

Betriebszustand H: $> \text{BHQ}$ (Extrembetrieb Hochwasser)

Für jeden Pegel sollte eine optimierte Auslegung der Messtechnik anhand der Pegelkategorie und der einzelnen Betriebszustände erfolgen. Die Datenerfassung sollte im Betriebszustand N ordnungsgemäß erfolgen. In den Betriebszuständen L und H sollte der Pegel ebenfalls noch Daten aufzeichnen, allerdings können höhere Unsicherheiten ($> 10\%$ *Messunsicherheit*) in Kauf genommen werden.

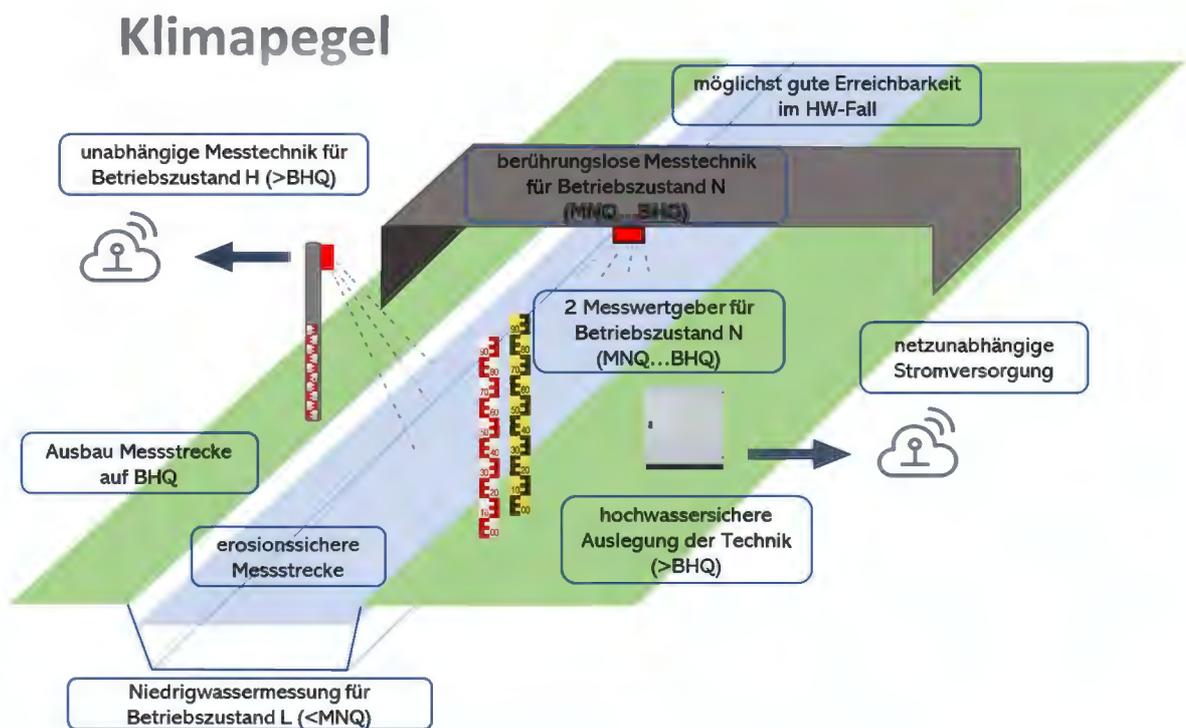


Abbildung 5: Darstellung einer klimaresilienter Pegelanlage der Kategorie A

5.3 Anforderungen an Datenerfassung und Datenübertragung bei unterschiedlichen Betriebszuständen

Die Datenerfassung ist ein wichtiger Bestandteil der Wasserwirtschaft. Daher sollte ein Pegel möglichst alle auftretenden Wasserstände aufzeichnen können. Abhängig von dem Betriebszustand bestehen unterschiedliche Anforderungen an die Erfassung und Übertragung von Daten.

5.3.1 Pegelbetrieb im Normalbetrieb (Zustand N, MNQ bis BHQ)

Wenn sich der Abfluss zwischen MNQ und BHQ befindet, dann läuft der Pegel im Normalbetrieb. In diesem Zustand muss die vollumfängliche Funktionalität der Pegelanlage gewährleistet sein. Die Datenerfassung und -übertragung muss redundant aufgebaut sein (Abschnitt 5.2). Die Qualität und Verfügbarkeit der Daten müssen einen hohen Standard aufweisen.

5.3.2 Pegelbetrieb bei extremem Niedrigwasser (Zustand L, < MNQ)

Eine klimaresiliente Ausstattung der Pegelanlagen bedeutet auch eine Auslegung für extreme Niedrigwassersituationen. Die Erfassung von Mindestwasserständen und -durchflüssen muss gewährleistet werden. In diesem Betriebszustand ist für eine passende Messtechnik und gegebenenfalls für eine bauliche Veränderung, zum Beispiel durch Niedrigwasserrinnen, zu sorgen. Geringere Unsicherheiten in den Messdaten sind bei Niedrigwasser vertretbar ($> 10\%$ *Messunsicherheit*).

5.3.3 Pegelbetrieb bei extremem Hochwasser (Zustand H, > BHQ)

Im Falle eines Hochwassers ($> BHQ$) muss die Pegelanlage weiterhin verwendbare Daten aufzeichnen und übertragen. Es darf zu Unsicherheiten in der Datenerfassung kommen ($> 10\%$ *Messunsicherheit*). Die Datenübertragung sollte so lange wie möglich gewährleistet werden können. Neben der redundanten Messtechnik muss für diesen Betrieb bei Pegeln mit Ausbaustufe 3 eine weitere, unabhängige Messtechnik (autarker Hochwassergeber) vorhanden sein.

5.4 Bauliche und technische Anforderungen

Um die Datenerfassung und -übertragung zu ermöglichen, sind die baulichen Anlagen durch entsprechende Planung und Ausführung vor den Einwirkungen des Wassers und des Treibgutes zu sichern. Neue Pegelstandorte und Abflussmessstrecken sollen für Extremhochwasser ausgewählt werden. Eine Zugänglichkeit auch bei Höchstwasserständen ist zu gewährleisten. Eine Umsetzung nach dem Stand der Technik ist unbedingt erforderlich.

5.4.1 Messstrecke und Messquerschnitt

Die Messstrecke muss ein möglichst stabiles Gewässerbett und ein gleichmäßiges Gefälle aufweisen. Ein homogenes Gewässerprofil ist herzustellen. Die Messstrecke ist wasserbaulich gegen Erosion zu sichern. Der Abfluss soll bei allen Wasserständen strömend erfolgen und Änderungen im Durchfluss sollen sich adäquat in Wasserstandsänderungen zeigen. Es ist besonders wichtig, dass der Abfluss auch bei sehr hohen Wasserständen erfasst werden kann und es zu keinen Umströmungen der Pegelanlagen kommt.

Ebenfalls sollte eine Niedrigwasserrinne in die Pegelanlage eingeplant werden. Diese sorgt für einen messbaren Wasserstand bzw. eine messbare Fließgeschwindigkeit im Betriebszustand L. Weiter ist zwangsläufig mindestens der Stand der Technik umzusetzen. Hierzu gehört vor allem die Unterhaltung der Pegelanlage.

5.4.2 Standortwahl

Ein geeigneter Standort für die Pegelanlage ist nach dem Stand der Technik zu wählen.

Es ist von Vorteil, wenn sich in der Nähe des Pegelstandortes eine Straßen- oder Fußgängerbrücke befindet, die für Durchflussmessungen, vor allem mit dem ADCP, genutzt werden kann. So kann auf den Bau von Seilkrananlagen oder Messstegen ggf. verzichtet werden (Abschnitt 2). Bei der Planung ist zu berücksichtigen, dass im BHQ-Fall Verlegungen und Verklausungen der Brücke die Messungen nicht wesentlich beeinflussen und die Messeinrichtungen nicht gefährden.

Bei der Standortwahl ist zu prüfen, ob sich bei extremen Abflussbedingungen klein- und großräumige Umströmungen einstellen können und dadurch die Erfassung des vollständigen Abflusses gefährdet wird.

Die Standorte für Pegelanlagen sind so zu wählen, dass ein möglichst dichtes Pegelnetz entsteht, um das Abflussgeschehen flächendeckend beschreiben zu können. Eine höhere Anzahl von Pegelanlagen in kleineren Einzugsgebieten ist erstrebenswert. Dabei sind die Pegel an hydrologisch markanten Punkten des Gewässers zu positionieren. Um bestehende Pegelmessnetze zu verbessern, ist es sinnvoll, eine Priorisierung bezüglich des Umbaus von Bestandspegeln aufzustellen. Basierend auf einer topografisch-hydrologischen Analyse sollten Standorte für zusätzliche Pegelanlagen in kleinen Einzugsgebieten geplant werden. Hier sollten besonders gefährdende Gewässer bzw. gefährdete Gebiete Vorrang in der Planung haben.

Es ist zu prüfen, ob an gut zugänglichen Standorten durch zusätzliches Anbringen von Pegellatten, sogenannten Hilfspegel, eine zusätzliche Sicherheit in der Datengewinnung erreicht werden kann.

Ein ungünstig gewählter Pegelstandort kann in der Praxis mittel- und langfristig zu erheblichen Qualitätsverlusten führen und kann nachträglich nicht durch punktuelle Messungen ausgeglichen werden. Bei Nichteignung eines Standortes muss die Verlegung des Pegels in Betracht gezogen werden, sollte es sich um einen Pegel mit hoher Bedeutung handeln (Pegelkategorie A/B). Ein neuer Standort für Bestandspegel muss unbedingt gewährleisten, dass eine homogene Zeitreihe erhalten bleibt.

Wichtig bei der Standortwahl ist die gefahrlose Erreichbarkeit der Messstelle auch im BHQ-Fall.

5.4.3 Pegelhaus

Ein Pegelhaus soll die erforderlichen Arbeiten der Pegelbetreuer*innen vor Ort ermöglichen. Es dient der witterungsgeschützten Unterbringung der Messtechnik und der Gerätschaften zur Datenerfassung und Datenfernübertragung. Gerade eine hochwassersichere Auslegung der Technik muss gewährleistet werden. Dafür sind entsprechende Sicherungsmaßnahmen zu treffen, zum Beispiel ein hoher Anbringungspunkt für die Technik zur Datenerfassung und -übertragung.

Generell sollte bei einem Neubau überlegt werden, ob ein Pegelhaus notwendig ist oder ob die Pegelanlage durch einen hochwassersicheren Messschrank ausreichend konzipiert ist.

Das Pegelhaus ist so zu planen, dass die Oberkante des Fußbodens oberhalb des BHQ liegt (vgl. Tabelle 3), um eine überflutungssichere Ausführung der elektrischen Anlagen zu gewährleisten. Entsprechende Standsicherheitsnachweise sind zu führen.

5.4.4 Messstege und Seilkrananlagen

Messstege können sich für kleinere Gewässerbreiten an ausgebauten Profilen eignen, wenn mit stangengeführten Messsystemen gemessen werden soll. Hier muss allerdings sichergestellt werden, dass die Höhe des Messsteiges ausreichend bemessen ist.

Seilkrananlagen eignen sich für hydrometrische Messungen bei besonders hohen Fließgeschwindigkeiten und bei großen Gewässerbreiten. Eine Installation einer Seilkrananlage kann in Erwägung gezogen werden, wenn keine bauliche Alternative (Brücke oder Messsteg) vorhanden ist, um über das Gewässer zu gelangen. Hierbei ist es oft ausreichend, wenn lediglich die Führung eines ADCP-Messsystems über das Gewässer möglich ist („Seilkrananlage Light“).

Für die Pegelkategorie A und B sollte ein Messsteg, eine Seilkrananlage oder eine Brücke vorhanden sein. Bei bestehenden Seilkrananlagen ist zu überprüfen, ob diese auch im Hochwasserfall den gesamten Gewässerquerschnitt erfassen können.

Ob ein Neubau von Seilkrananlagen wirtschaftlich sinnvoll ist, oder ob vorzugsweise eine andere Messmethode zum Einsatz kommen kann, muss individuell an jedem möglichen Pegel analysiert werden.

5.4.5 Unterhaltung der Anlage

Der Pegel ist regelmäßig zu überwachen und zu warten. Änderungen der Gewässersohle sind zu vermessen und zu dokumentieren. Grundsätzlich ist die einwandfreie Funktionsweise des Pegels und dessen Erreichbarkeit zu gewährleisten.

Nach einem Hochwasserereignis ist die Messstrecke freizuräumen und so der einwandfreie und störungsfreie Betrieb wieder herzustellen. Die veränderten Profilverhältnisse sind kurzfristig neu zu vermessen.

Es ist zu empfehlen, Rahmenverträge mit Baufirmen und Vermessungsbüros zu vereinbaren, um nach Hochwasserereignissen Arbeiten am Pegel schnellstmöglich aufzunehmen. So wird der Zeitaufwand in der Vergabe reduziert.

5.5 Messtechnik und Datenerfassung

Die Erfassung des Wasserstandes an einem Pegel sollte idealerweise auf kontinuierliche Art und Weise geschehen.

5.5.1 Kontinuierliche Erfassung des Wasserstands

Die Pegellatte gehört zu der Grundausstattung eines Pegels und dient als Referenzpunkt für jede Wasserstandsmessung. Für digitale Datenaufzeichnungen werden weitere Messverfahren herangezogen.

Eine Neuausstattung mit einem Schwimmerpegel ist sehr aufwändig und kostenintensiv in der Neuerrichtung und der Wartung. Durch eine begrenzte maximale Höhe kann keine zuverlässige Datenerfassung im Hochwasserfall gewährleistet werden. Für die kontinuierliche Erfassung im Normalbetrieb kann dieser als Absicherung vorgesehen werden, jedoch ist eine zusätzliche Messausstattung empfehlenswert.

Ein Einperlpegel hat sich als zuverlässiges Messverfahren bewährt. Die Vorteile dieser Methode liegen darin, dass die eigentliche Messtechnik nicht mit dem Wasser in Berührung kommt. Die Investitions- und Unterhaltungskosten sind vergleichsweise niedrig. Durch spezielle Konstruktionen kann das Messverfahren vor Beschädigungen durch Geschiebe geschützt werden. Jedoch können die Messwerte durch sehr hohe Fließgeschwindigkeiten beeinträchtigt werden.

Die Drucksonde hat sich ebenfalls als robustes und langzeitstabiles Verfahren etabliert. Die Vorteile einer einfachen und kostengünstigen Installation stehen einer Anfälligkeit für Verschmutzung gegenüber, da die Sonde direkt im Gewässer installiert wird. Auch hier ist eine entsprechende Sicherung notwendig.

Radarpegel und Ultraschallpegel bieten den Vorteil, dass sie im Hochwasserfall durch berührungslose Messtechnik den Wasserstand erfassen können. So werden die Störfaktoren durch Geschiebe reduziert. Sie gelten als robust, langzeitstabil und ausfallsicher. Zudem haben sich Radargeräte in der Praxis bewährt. Hier ist die Empfehlung, eine solche berührungslose Messmethode, zur Redundanz an den Pegelanlagen zu installieren. Ein hoher Messpunkt, zum Beispiel unter Brücken, eignet sich für eine berührungslose Messwertaufnahme. Dabei ist der ausreichende Abstand zwischen dem Geber und dem Wasserstand bei BHQ zu beachten.

Ultraschallpegel weisen aufgrund der Abhängigkeit von den aktuellen physikalischen Einflüssen (z.B. der Lufttemperatur) Messungenauigkeiten auf, die nur einen eingeschränkten Einsatz bei der Erfassung von Wasserständen in der Natur zulassen.

In der Ausbaustufe 3 ist ein autarker Hochwassergeber vorzusehen. Dieser sollte batteriebetrieben über mehrere Jahre wartungsarm betrieben werden. Die Anbringung muss BHQ-sicher erfolgen. Als Messwertgeber eignen sich vor allem Radarsonden oder optische Verfahren. Bei der Erfassung über digitale Bildaufnahmen (optische Verfahren) ist das primäre Ziel, im Hochwasserfall mit Daten in Form von Bildern den vorliegenden Wasserstand zu bestimmen. Dieses Verfahren ermöglicht aber keine kontinuierliche Erfassung des Wasserstandes.

Die Datenübertragung sollte über eine separate, autarke Möglichkeit erfolgen. Sollte der Datensammler überströmt werden oder die Datenübertragung abbrechen, ist ein Auslesen der Daten nach dem Hochwasser unbedingt erforderlich. Die Datenverfügbarkeit sollte mindestens 4 Wochen betragen.

5.5.2 Kontinuierliche Erfassung der Fließgeschwindigkeit

Im Hochwasserfall kommt es häufig zu Querschnittsänderungen im Gewässer, auch im Bereich von Pegelanlagen. Kritisch wird dies, wenn konkrete Informationen über den Durchfluss benötigt werden. Deshalb ist eine kontinuierliche Erfassung der Fließgeschwindigkeit sinnvoll, da so mindestens im Nachgang der Querschnitt neu aufgenommen werden kann und berechnet werden kann, wie viel Wasser zum Abfluss gekommen ist.

Ein bewährtes Verfahren sind Ultraschall-Laufzeitanlagen. Diese weisen einen großen Messbereich auf und sind auch für sehr kleine Fließgeschwindigkeiten geeignet. Das Verfahren liefert jedoch keine Information über eine

Geschwindigkeitsverteilung. Dies erfordert einen höheren konstruktiven Eingriff und einen höheren Strombedarf, was einen autarken Betrieb der Technik erschwert.

Es kommen immer häufiger Messverfahren, wie der Horizontal-ADCP zur Verwendung. Sie haben den Vorteil, dass nur ein geringer konstruktiver Aufwand notwendig ist und die Technik auch bei sehr breiten Profilen angewendet werden kann. Mittels ADCP kann auch die Geschwindigkeitsverteilung aufgezeichnet werden. Bei einer anlaufenden Hochwasserwelle und dem möglichen Auftreten von Schwebstoffen kann es durch die Trübung jedoch zu Störungen der Messwerterfassung kommen.

Bei größeren Durchflüssen eignet sich eine Messwerterfassung durch ein Oberflächenradar. Die Erfassung ist berührungslos möglich, wodurch die Technik als geschützt und ausfallsicher gilt. Außerdem hat sich diese Methode in der Praxis bewährt. Voraussetzung für die Anwendung ist eine markante Wellenstruktur im Gewässer, wodurch sich die Technik nur bedingt für die Erfassung von Niedrigwasser eignet. Eine systematische Fehlerquelle können die Oberflächenbewegungen durch Wind und Niederschlag darstellen, insbesondere bei geringen Fließgeschwindigkeiten.

Auch bei der Fließgeschwindigkeitserfassung können optische Messverfahren eingesetzt werden. Die Technik ist einfach zu installieren und gilt als ausfallsicher, da sie nicht mit dem Messmedium in Berührung kommt. Durch den geringen Stromverbrauch ist eine autarke Versorgung durch eine Batterie oder ein Solarpanel möglich.

5.5.3 Erfassung des Messquerschnitts

Eine Voraussetzung für die Bestimmung eines Durchflusses ist die genaue Kenntnis über den durchströmten Querschnitt. Bei vielen Durchflussmesstechniken (z.B. ADCP) wird ein Querprofil bereits mit aufgenommen. Trotzdem ist eine regelmäßige Vermessung der Querschnitte unbedingt notwendig. Die Messprofile sollten regelmäßig, in jedem Fall aber nach Hochwasserereignissen, vermessen werden, um morphologische Änderungen zu dokumentieren. Mit einer unmittelbaren Nachvermessung im Hochwasserfall können im Nachgang Aussagen über den Durchfluss getroffen werden. Falls sich bei einem Pegel mit einer Durchflussermittlung über eine W/Q-Beziehung Änderungen im Messprofil ergeben haben, ist der ursprüngliche Zustand schnellstmöglich wiederherzustellen, oder es muss eine neue gültige Abflusskurve erstellt werden. Die Vermessung ist somit auch die Basis für die Überprüfung der Gültigkeit der W/Q-Beziehung, falls die Durchflussermittlung mit dieser Methode erfolgt.

5.5.4 Sicherstellung der Stromversorgung

Essenziell für die Datenerfassung und die Datenübertragung ist eine Sicherstellung der Stromversorgung. Datenausfälle durch Stromausfälle müssen unbedingt vermieden werden. Hierzu ist ein Anschluss an eine Netzstromversorgung vorzusehen, insbesondere gilt das für Neubauten.

Auch wenn der Pegel über eine Anbindung an eine Stromleitung verfügt, ist eine zusätzliche Notstromversorgung zu realisieren, falls die Leitungen beschädigt werden oder es zu einem flächendeckenden Ausfall des Stromnetzes kommt. Bei Stromausfall muss eine Zeitspanne von mindestens 14 Tagen überbrückt werden können, um die vollständige Datenerfassung und -übertragung sicherzustellen. Zu empfehlen ist eine Redundanz bezüglich der Stromversorgung.

Durch moderne Technik und Datenübertragung ist der zu erwartende Stromverbrauch in der Regel so gering, dass eine Versorgung über Batterien, Solarzellen/Solarpaneele gewährleistet werden kann. Der Betrieb über eine Photovoltaikanlage ist zudem wartungsarm. Die Verbraucher einer Batterie müssen mit Gleichspannung versorgt werden können. Wenn an einem Standort keine anderweitige Stromversorgung möglich ist, kann in Ausnahmefällen eine Brennstoffzelle zum Einsatz kommen. Sie eignet sich vor allem zur Unterstützung oder Absicherung anderer Techniken, wie beispielhaft als hybride Anlage mit Photovoltaik. Eine Stromversorgung mit Brennstoffzellen ist wartungs- und kostenintensiv.

Eine Energieversorgung mit Batterien kommt nur in Frage, wenn die Kontrolle und der Austausch der Batterien durch den Pegelbetreiber gewährleistet werden können.

5.5.5 Lokale Datenspeicherung

Der Datensammler muss vor Ort ausgelesen werden können. Eine Speicherung der Daten lokal ist erforderlich, falls es zu einem Netzwerkausfall bei der Datenfernübertragung oder der Stromversorgung kommt. Die lokale Datenaufzeichnung sollte mindestens den Zeitraum von 90 Tage umfassen.

5.5.6 Datenfernübertragung

Die Datenfernübertragung spielt für den Betrieb bei einem Ausfall der Energieversorgung und aus sicherheitstechnischen Aspekten eine maßgebende Rolle. Um im Hochwasserfall schnelles Handeln zu ermöglichen,

ist die Datenübertragung in Echtzeit⁹ entscheidend. Auch für viele weitere hydrologische Modellierungen sind Echtzeitdaten eine Voraussetzung.

Sowohl im Normalbetrieb als auch im Hochwasserfall muss die Datenfernübertragung funktionieren. Bei Pegelneubauten muss eine Datenfernübertragung eingeplant werden, bei bestehenden Pegeln ist zu prüfen, ob eine solche umgesetzt werden kann. Um die Übertragung sicher zu gestalten, empfiehlt es sich, mindestens an den Pegeln mit besonderer Bedeutung (Pegelkategorien A - C) eine redundante Datenfernübertragung einzurichten. Für Pegel der Kategorie A ist eine redundante Datenübertragung zwingend erforderlich

Nachfolgend sind die gängigen Techniken der Datenübertragung beschrieben:

Nicht an jedem Pegel ist ein LAN-Anschluss vorhanden. Es ist eine sehr schnelle Datenübertragung per Internet mit LTE/4G/5G möglich. Die Router verbrauchen allerdings relativ viel Energie. Es kann zu Störungen bei einem regionalen Netzausfall kommen. Teilweise sind einzelne Pegel nicht durch das Netz abgedeckt. Die Datenübertragung erfolgt jedoch in hoher Geschwindigkeit.

Die Datenübertragung sollte nicht ausschließlich über öffentlich Netze erfolgen, da diese bei länger andauernden flächendeckenden Stromausfällen ebenfalls ausfallen. Eine Datenübertragung über Satelliten ist für mindestens einen Datenstrang anzustreben. Eigene ausfallsichere Funknetze könnten eine Alternative darstellen. Eine Nutzung des Behörden-Tetrafunknetzes sollte erwogen werden, da das Behördenfunknetz von Feuerwehr und Polizei deutlich ausfallsicherer ist als die öffentlichen Netze. Darüber hinaus sollten alle wichtigen aktuellen Messdaten auch außerhalb der Behörden-IT-Struktur in einer sicheren Cloud-Umgebung verfügbar sein.

5.5.7 Sonstiges

Für die Pegelanlagen ist zu empfehlen, begleitend ein zweidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell (2D-HNM) mitzuführen. Mithilfe des Modells können hydraulische Veränderungen analysiert, Messwerte plausibilisiert und Extrapolationen der W/Q-Beziehungen durchgeführt werden. Das Modell sollte daher als digitaler Zwilling (*digital twin*) durch den Pegelbetreiber erstellt und nachgeführt werden.

Für eine schnelle visuelle Erfassung von Hochwasserständen am Pegel im Ereignisfall sollte die Pegellatte um einfaches optisches Klassifizierungssystem ergänzt werden. Im Bereich der Pegellatte oder an

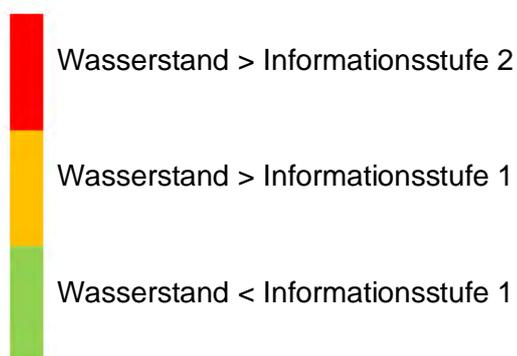
⁹ Echtzeitdaten sind Daten, die, nachdem sie aufgenommen wurden, mit so wenig Verzug wie möglich ausgewertet und weiterverarbeitet werden. Hierunter sind somit auch Sensorsysteme zu verstehen, die Daten als 5- oder 15-Minuten Mittelwerte aufzeichnen und diese dann so schnell wie möglich an einen zentralen Server übermitteln.

einer gut einsehbaren Stelle der Pegelanlage kann eine ergänzende dreifarbige Skala (*Ampel-System*) installiert werden. Die Einteilung der Skala sollte sich nach den örtlichen Gegebenheiten richten. Der Warnbereich (orange) sollte bei Ereignissen beginnen, die zu ufernahen Überflutungen führen. Eine Klassifizierung des Ampelsystems kann beispielsweise anhand der Informationsstufen¹⁰ erfolgen:

- **Informationsstufe 1:** Ggfs. Ausuferung des Gewässers, land- und forstwirtschaftliche Flächen können überflutet werden; leichte Verkehrsbehinderungen auf Hauptverkehrs- und Gemeindestraßen sind möglich.
- **Informationsstufe 2:** Gefahr der Überflutung einzelner bebauter Grundstücke oder Keller; Sperrung überörtlicher Verkehrsverbindungen oder vereinzelter Einsatz der Wasser- oder Dammwehr (Feuerwehr, Katastrophenschutz) möglich.
- **Informationsstufe 3:** Bebaute Gebiete in größerem Umfang können überflutet werden; Einsatz der Wasser- oder Dammwehr (Feuerwehr, Katastrophenschutz) in großem Umfang möglich.

Zusätzlich ist möglichst ein Bezug zu den Hochwasserkennwerten HQ_{10} , HQ_{100} und HQ_{Extrem} herzustellen, um einen direkten Vergleich der Wasserstände mit den ggf. vorhandenen Hochwassergefahrenkarten¹¹ (HWGK) vornehmen zu können. Somit besteht im Ereignisfall auch für „fachkundige Laien“ (z.B. Einsatzkräfte, informierte Bürger*innen) die Möglichkeit, sich anhand der aktuellen Wasserstände und der HWGK ein Bild über die potenziellen Überflutungsbereiche zu verschaffen. Das Ampelsystem ist bei Änderung der Hochwasserkennwerte ggf. zu aktualisieren. Eine Orientierung könnte die in Tabelle 4 dargestellte Klassifizierung geben.

Tabelle 4: Klassifizierung für Ampel-System an Pegelanlagen (Orientierungswerte)



¹⁰ <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/wasserkreislauf/wasserstaende/pegeldaten-online>

¹¹ <https://www.flussgebiete.nrw.de/hochwassergefahrenkarten-und-hochwasserrisikokarten-8406>

6 Fazit und Zusammenfassung

Trotz der regelkonformen Auslegung und des regelkonformen Betriebes der Pegelanlagen wurden Schwächen der Anlagen beim Auftreten sehr extremer Hochwasserlagen offensichtlich. Dies führt zu der Erkenntnis, dass sowohl bei der Auslegung als auch bei dem Betrieb der Anlagen Änderungen notwendig sind, um in Zukunft vergleichbare Hochwasserereignisse, welche nach wissenschaftlichem Konsens häufiger zu erwarten sind, zuverlässiger erfassen zu können.

Durch die Einordnung der Pegelanlagen in die Ausbaustufen 1 bis 3, sowie in die Kategorien A bis D können die Anforderungen an die bauliche Gestaltung und an die Ausstattung entsprechend der Bedeutung formuliert werden.

Eine Gestaltung von klimaresilienten Pegelanlagen ist nur mit erheblichen finanziellen Mitteln und Personal umsetzbar. Je größer die Ansprüche an die Datenqualität sind, umso mehr wird an Ausstattung und an finanziellen und personellen Ressourcen notwendig sein (Abbildung 6).

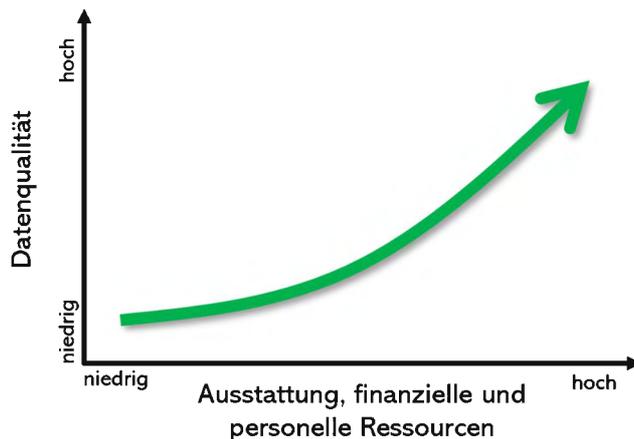


Abbildung 6: Datenqualität in Verbindung mit notwendigen Ressourcen

Bochum, 28.03.2023

Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach