

# **Durchführung von Modellversuchen zur Dämpfung der Welle im Profil E durch die vorgelagerte Insel**



Abbildung A: Übersichtsmodell

## **Kurzbericht**

**Auftraggeber**    **Lausitzer und Mitteldeutsche  
Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH**  
01968 Senftenberg, Knappenstraße 1

**Auftragnehmer**   **Institut für Wasserwirtschaft, Siedlungswasserbau und  
Ökologie GmbH**  
99423 Weimar, Coudray-Straße 4

**Projektleiter**    Konrad Thürmer

**Bearbeiter**        Magdalena Klich  
Hendrik Stopp  
Alexander Paulmann  
Jens Sauerwein

**Bestellnummer**   45060325

**Endfertigung**    26.08.2022

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis .....                | 2  |
| Abbildungsverzeichnis .....             | 3  |
| Tabellenverzeichnis .....               | 5  |
| Abkürzungsverzeichnis .....             | 6  |
| Symbolverzeichnis.....                  | 7  |
| Einleitung .....                        | 8  |
| 1. Grundlagen.....                      | 9  |
| 2. Modellgebiet .....                   | 13 |
| 3. Versuche.....                        | 20 |
| 4. Messergebnisse .....                 | 26 |
| 5. Auswertung                           | 32 |
| 6. Zusammenfassung der Ergebnisse ..... | 56 |
| 7. Fazit und Ausblick .....             | 58 |
| Literaturverzeichnis .....              | 59 |
| Anhang .....                            | 60 |

Ermittlung der Wellenlaufzeiten bei Rutschung im Knappensee als Vorlage für die Vorwarnzeit

## Abbildungsverzeichnis

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Abb. A    | Übersichtsmodell .....  | 1  |
| Abb. 1.1  | Wellenparameter ideale Sinuswelle [3].....  | 10 |
| Abb. 1.2  | Diagramm zur mathematischen Wellenklassifikation [4] .....  | 10 |
| Abb. 1.3  | Stokeswellenprofil [3].....   | 12 |
| Abb. 1.4  | Wellenprofil Bore [3].....  | 12 |
| Abb. 1.5  | Cnoidalwellenprofil [3].....  | 13 |
| Abb. 1.6  | Solitärwellenprofil [3].....  | 13 |
| Abb. 2.1  | Lageplan mit Insel, Innenkippe und Uferteilbereich E1 .....   | 14 |
| Abb. 2.2  | Modellgeometrie auf Übersichtskarte des Knappensees im Maßstab 1:5000 .....                           | 18 |
| Abb. 3.2  | Knappensee in 1:5000, Planzustand Inselerweiterung / Störkörper Variante V1 (grün).....               | 23 |
| Abb. 3.3  | Knappensee in 1:5000, Planzustand Inselerweiterung / Störkörper Variante V2 (grün).....               | 24 |
| Abb. 3.4  | Knappensee in 1:5000, Planzustand Inselerweiterung / Störkörper Variante V3 (grün).....               | 25 |
| Abb. 3.5  | Wellenhöhen A/5 grafisch .....  | 26 |
| Abb. 3.6  | Wellenhöhen B/73 grafisch.....  | 27 |
| Abb. 3.7  | Wellenhöhen C/118 grafisch.....   | 28 |
| Abb. 3.8  | Wellenhöhen D/295 grafisch.....   | 29 |
| Abb. 3.9  | Wellenhöhen E/188 grafisch .....  | 30 |
| Abb. 3.10 | Wellenhöhen F/244 grafisch .....  | 31 |
| Abb. 4.1  | Wellenausbreitung im Modellzustand A, Bereich nach der Wellenerzeugung .....                          | 33 |
| Abb. 4.2  | Wellenausbreitung im Modellzustand A, Bereich Beginn der fragmentarischen Insel.                      | 33 |
| Abb. 4.3  | Wellenausbreitung im Modellzustand A, Bereich Mitte bis Ende der fragmentarischen Insel.....          | 34 |
| Abb. 4.4  | Wellenausbreitung im Modellzustand A, Bereich zw. fragmentarischer Insel und Uferteilbereich E1 ..... | 34 |
| Abb. 4.5  | Grafische Darstellung der Wellenausbreitung im ungestörten Raum, Modellzustand B.....                 | 36 |
| Abb. 4.6  | Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich nach der Wellenerzeugung .....                          | 37 |
| Abb. 4.7  | Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich auf Höhe des Störkörpers und Beginn der Insel.....      | 37 |
| Abb. 4.8  | Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich Mitte der Insel .....                                   | 38 |
| Abb. 4.9  | Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich Mitte bis Ende der Insel .....                          | 38 |
| Abb. 4.10 | Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich Ende der Insel bis Uferteilbereich E1 .....             | 38 |
| Abb. 4.11 | Grafische Darstellung der Wellenausbreitung im gestörten Raum, Modellzustand F .....                  | 43 |
| Abb. 4.12 | Wellenhöhenquotienten für WSP 125,5 m NHN.....  | 44 |
| Abb. 4.13 | Wellenhöhenquotienten für WSP 126,0 m NHN.....  | 45 |
| Abb. 4.14 | Gesamtvergleich der Wellenhöhenquotienten .....   | 46 |
| Abb. 4.15 | Wellenhöhenquotienten in Abhängigkeit von der Fallkörpergröße bei WSP-Lage 125,5 m NHN                | 48 |
| Abb. 4.16 | Wellenhöhenquotienten in Abhängigkeit von der Fallkörpergröße bei WSP-Lage 126,0 m NHN                | 49 |

Abb. 4.17 Abnahme der Wellenhöhe in % für die Modellzustände A und B für vers.

|   |    |
|---|----|
| Falkkörpervarianten .....   | 50 |
| Abb. 4.18 Wellen Höhenentwicklung in Uferrichtung bei WSP-Lage 125,5 m NHN.....         | 52 |
| Abb. 4.19 Wellen Höhenentwicklung in Uferrichtung bei WSP-Lage 126,0 m NHN.....         | 53 |
| Abb. 4.20 Prozentuale Abnahme der Wellenhöhe von Erzeugung bis Uferteilbereich E1 ..... | 55 |

## Tabellenverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tab. 1.1 | Typisierung von Impulswellenformen (zusammengefasst aus [3])..... | 12 |
| Tab. 2.1 | Wellenerzeugungsarten für Versuchsdurchführung .....              | 15 |
| Tab. 3.1 | Versuchsbedingungen .....   | 21 |
| Tab. 3.2 | Ultraschallmessung Wellenhöhe A/5 .....                           | 26 |
| Tab. 3.3 | Ultraschallmessung Wellenhöhe B/73 .....                          | 27 |
| Tab. 3.4 | Ultraschallmessung Wellenhöhe C/118 .....                         | 28 |
| Tab. 3.5 | Ultraschallmessung Wellenhöhe D/295 .....                         | 29 |
| Tab. 3.6 | Ultraschallmessung Wellenhöhe E/188.....                          | 30 |
| Tab. 3.7 | Ultraschallmessung Wellenhöhe F/244.....                          | 31 |

## Abkürzungsverzeichnis

|       |  |
|-------|--|
| WSP   | Wasserspiegel  |
| LDS   | Laserdistanzsensoren   |
| LDV   | Laser Doppler Velocimetry                                    |
| PIV   | Particle Image Velocimetry                                   |
| LMBV  | Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft |
| OBA   | Sächsisches Oberbergamt                                      |
| bspw. | beispielsweise   |
| u.a.  | unter anderem  |
| etc.  | und so weiter  |
| ggf.  | gegebenenfalls   |
| zw.   | zwischen   |

## Symbolverzeichnis

|                 |                               |                      |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|
| H               | Wellenhöhe                    | [m]                  |
| L               | charakteristische Wellenlänge | [m]                  |
| h               | Wassertiefe                   | [m]                  |
| $\alpha$        | Amplitude                     | [m]                  |
| c               | Wellengeschwindigkeit         | [m/s]                |
| T               | Periodendauer                 | [s]                  |
| g               | Erdbeschleunigung             | [m/s <sup>2</sup> ]  |
| $\pi$           | Kreiskonstante                | [-]                  |
| Fr              | Froudezahl                    | [-]                  |
| M               | Maßstab                       | [-]                  |
| l               | Länge                         | [m]                  |
| d               | Durchmesser                   | [m]                  |
| s               | Stechpegelhöhe                | [m]                  |
| $\rho$          | Dichte                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| p               | Druck                         | [Pa, bar]            |
| n               | Überhöhungsfaktor             | [-]                  |
| M <sub>x</sub>  | Maßstabsfaktor                | [-]                  |
| T <sub>L</sub>  | Fließzeit                     | [s]                  |
| N               | Kraft                         | [N]                  |
| E               | Energie                       | [J]                  |
| I               | Impuls                        | [Ns]                 |
| h <sub>wm</sub> | mittlerer WSP Modell          | [m]                  |
| h <sub>wh</sub> | hoher WSP Modell              | [m]                  |

## Einleitung

Der Knappensee ging aus dem verbliebenden Restloch des Tagebaus Werminghoff I hervor. Seit dem 1. Mai 2014 ist der Knappensee für die Allgemeinheit auf Grundlage einer Allgemeinverfügung des Sächsischen Oberbergamtes gesperrt. Das Sächsische Oberbergamt als zuständige Polizeibehörde beauftragte die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH mit der Durchführung notwendiger Sanierungsaufgaben am Knappensee. Diese Gefahrenabwehrmaßnahmen begannen im Jahr 2014. Ziel ist die Herstellung dauerstandsicherer Böschungen und Hinterlandbereiche, um vorhandene Gefahren für Leben, Gesundheit und Eigentum zu beseitigen [1]. Am 11. März 2021 gab es ein Setzungsfließereignis an der Ostböschung des Knappensees. Dabei löste sich ein Teil des Ufers auf einer Breite von 500 Metern, rutschte in den See und hinterließ einen bis zu 200 Meter in das Hinterland reichenden Rutschungskessel. Der Impuls aus der Masseneintauchbewegung erzeugte eine Schwallwelle, die das gegenüberliegende Ufer überspülte und Sachschäden an Gebäuden anrichtete (OBA; [2]).

Am 31. Mai 2021 fand eine Beratung zwischen dem OBA, der LMBV und dem Institut für Wasserwirtschaft, Siedlungswasserbau und Ökologie GmbH statt. Ziel der Beratung war es, die Möglichkeiten der gegenständlichen Modellierung für weitere Untersuchungen zur Risikominimierung für den Bereich E (Badestrand) zu diskutieren. Der Schwerpunkt lag dabei auf die Verwendung der Kleinen Insel als Wellendämpfer.

Im Rahmen der Studie wurde ein physikalisches Modell gebaut, um die Ausbreitung von Schwallwellen in einem Bereich des Sees in Abhängigkeit von verschiedenen Naturzuständen sowie der künstlichen Verlängerung der Kleinen Insel zu bestimmen und zu bewerten.

## 1 Grundlagen

Wellen sind räumliche und zeitliche Zustandsänderungen physikalischer Größen, die meist nach bestimmten periodischen Gesetzmäßigkeiten erfolgen. Die Wellentheorie beschäftigt sich mit der Entstehung, den Parametern, der Unterscheidung und den Arten von Wellen [3]. Im Hinblick des Schwerpunktes des Untersuchungsgebietes wird vor allem die Theorie der rutscherzeugten Impulswellen behandelt.

Wasserwellen werden in oszillatorische und translatorische Wellen sowie in Tiefwasser- und Flachwasserwellen unterschieden. Für die Klassifizierung kommt in der Wellentheorie entweder die mathematische Methode oder die physikalische Methode zur Anwendung. [3]

Bei der mathematischen Methode werden Gleichungssysteme und vereinfachte Rand- und Anfangsbedingungen von Wellen miteinander verglichen, um eine Klassifikation über die einzelnen Wellenparameter vorzunehmen. Dazu zählen:

|          |       |                               |
|----------|-------|-------------------------------|
| H        | [m]   | Wellenhöhe                    |
| L        | [m]   | charakteristische Wellenlänge |
| h        | [m]   | die Wassertiefe               |
| $\alpha$ | [m]   | Amplitude                     |
| c        | [m/s] | Wellengeschwindigkeit         |
| T        | [s]   | Periodendauer                 |

Für die Berechnung der Wellengeschwindigkeit und der Periodendauer sind außerdem von Bedeutung:

$g$  [m/s<sup>2</sup>] Erdbeschleunigung

$\pi$  [-] Kreiskonstante

Aus diesen Parametern folgt:

$$c^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (1.1)$$

$$T = L/c \quad (1.2)$$

Die nachstehende Abbildung 1.1 zeigt die wichtigsten Wellenparameter, dargestellt an einer idealen

Sinuswelle.

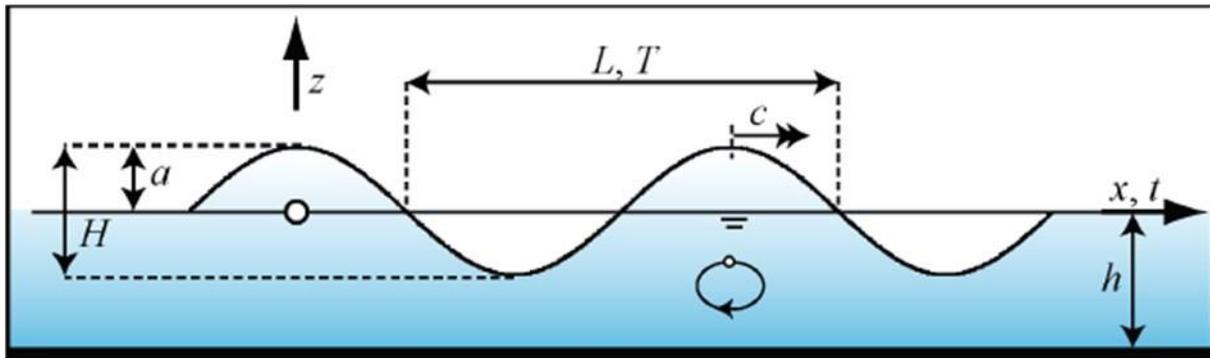


Abbildung 1.1: Wellenparameter ideale Sinuswelle [3]

Aus diesen grundlegenden Parametern werden wiederum Relativparameter wie bspw.  $H/L$  und  $H/h$  gebildet, um unter Nutzung des Klassifizierungsdiagramms nach *Dean* und *Dalrymple* (Abb. 1.2) zwischen Tiefwasserwellen und Flachwasserwellen unterscheiden zu können. [4]

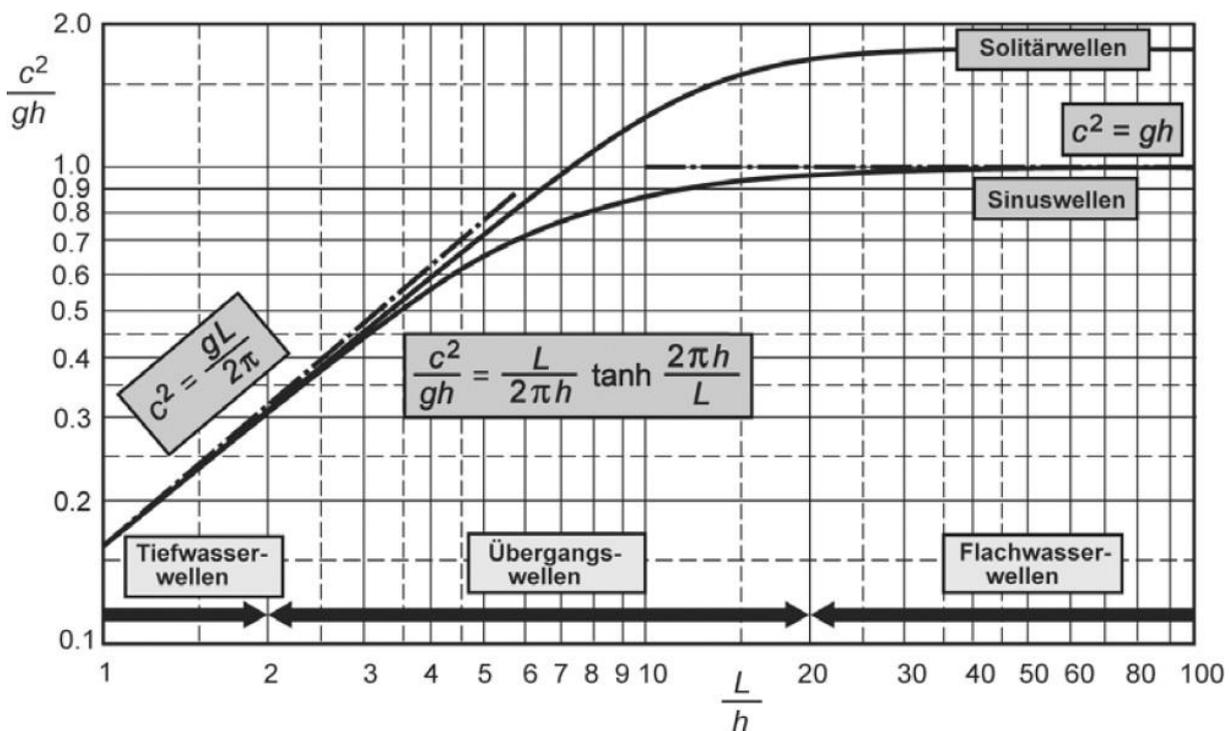


Abbildung 1.2: Diagramm zur mathematischen Wellenklassifikation. (Dean und Dalrymple, 1991) [4]

Die physikalische Methode unterscheidet Wellen hinsichtlich des Fluidtransportes. So ist dieser bei oszillatorischen Wellen gleich null, da sich die Wasserpartikel kreisförmig bewegen. Bei translatorischen Wellen findet der Fluidtransport in Richtung der Propagation statt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei translatorischen Wellen ein Massen- sowie Energietransport stattfindet und bei oszillatorischen Wellen nur die Energie transportiert wird.

Weiterhin können Wellen dahingehend unterschieden werden, ob sie periodisch in Gruppen oder nichtperiodisch einzeln auftreten. Außerdem kann eine Klassifizierung als lineare Welle erfolgen, wenn diese eine Sinuskurve beschreibt, was eintritt, wenn die relative Wellenhöhe  $H/h < 0.03$  und die Wellensteilheit  $H/L < 0.006$  ist. Wellen, die von diesen Verhältnissen und von einem idealen Sinusprofil abweichen, werden folglich als nichtlineare Wellen eingestuft. [4]

Rutscherzeugte Impulswellen sind Schwallwellen und zählen zu den Schwerewellen. Sie können unabhängig von der Gewässergröße, sowohl in Seen als auch in Ozeanen entstehen. Der Auslöser für einen wellenerzeugten Impuls in einem See ist die dynamische Massenbewegung über oder unter der Wasseroberfläche. Dazu zählen bspw. Felsstürze, Schneelawinen, Gletscherkalbungen oder wie im Fall des Knappensees: Erdbeben infolge Setzungsfließen. Letztere können über Wasser, teils eingetaucht oder unter Wasser auftreten. Die Generierung einer Schwallwelle beginnt mit der impulsartigen Verdrängung des Wasservolumens, bedingt durch die eintauchende Masse. Die Fortpflanzung der Welle erfolgt mit fortschreitender Frequenz sowohl gradlinig als auch seitlich. Die Wellenfortpflanzung endet entweder an Hindernissen, die sich der Welle entgegenstellen oder beim Auflaufen am gegenüberliegenden Ufer. Bei letzterem erfolgt eine zunehmende Aufteilung und ein Aufbruch des Wellenkammes aufgrund der in Uferichtung abnehmenden Wassertiefe. [3]

Die Ausbreitung einer Impulsquelle kann in zwei Kategorien unterteilt werden. Die zweidimensionale Ausbreitung ist eine der Möglichkeiten und beschreibt eine eingeeengte transversale Wellenausbreitung. Dieser Fall tritt in der Natur ein, wenn bspw. eine Rutschmasse längs in einen länglichen See eintaucht und die Breite dieser Rutschmasse mindestens gleich groß wie die Breite des Sees ist. In der Folge breitet sich die Impulsquelle in Stauseelängsrichtung aus, während die seitliche Ausbreitung behindert ist. [3]

Weiterhin ist eine dreidimensionale Wellenausbreitung möglich. Dabei kommt es zu einer freien radialen Ausbreitung, die weder in Längs- noch in Querrichtung behindert wird. Für solch einen Fall taucht die Rutschmasse an einer Stelle eines Sees ein, wobei die Breite der Rutschung deutlich geringer als die des Sees ist. Der Raum, welcher der Welle somit zur Verfügung steht, erlaubt ausgehend vom Rutscheintauchbereich die 3d-Ausbreitung. [3]

Impulswellen weichen von einer Sinuswelle wie in der zuvor gezeigten Abb. 1.1 ab. Für das Wellenprofil bedeutet dies, dass es nicht durch eine ideale Sinuskurve beschrieben werden kann, sondern eine andere Form annimmt.

Die nachfolgend aufgeführte Tabelle 1.1 zeigt eine Übersicht der möglichen Impulswellenformen und deren Charakteristik bezüglich des Wellenprofils, der Wellenklasse, der Wasserbewegung und des Massentransportes.

Tab. 1.1 Typisierung von Impulswellenformen (zusammengefasst aus [3])

| Typ                        | Wellenprofil   | Wellenklasse                                | Wasserbewegung                                      | Massentransport |
|----------------------------|--|---|---|-----------------|
| Stokeswelle<br>(Abb. 1.3)  | steiler als Sinusprofil, Wellental ist länger und flacher als Wellenberg | Tief- bis Übergangswelle                    | leicht geöffnete Orbitalbewegung, gering elliptisch | gering          |
| Bore<br>(Abb. 1.4)         | steile Wellenfront, flacher Wellenrücken                                 | Flachwasserwelle                            | horizontal  | sehr groß       |
| Cnoidalwelle<br>(Abb. 1.5) | periodische Gruppe aus Wellenberg und Wellental                          | periodische Übergangs- bis Flachwasserwelle | elliptisch  | gering          |
| Solitärwelle<br>(Abb. 1.6) | nur Wellenberg und kein Wellental  | Flachwasserwelle                            | horizontal  | groß            |

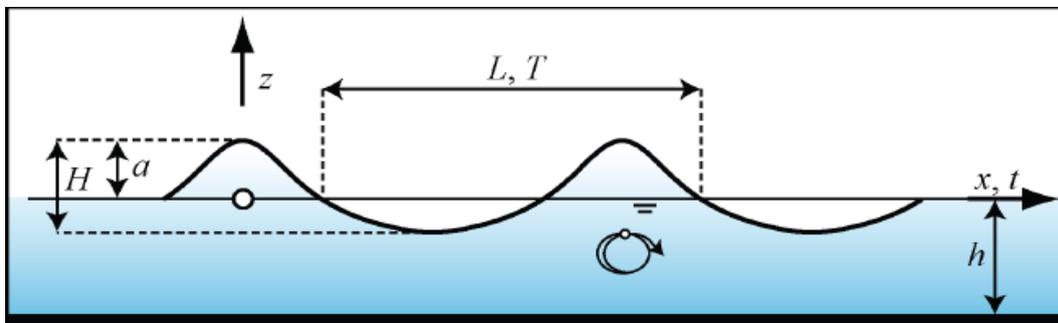


Abbildung 1.3: Stokeswellenprofil [3]

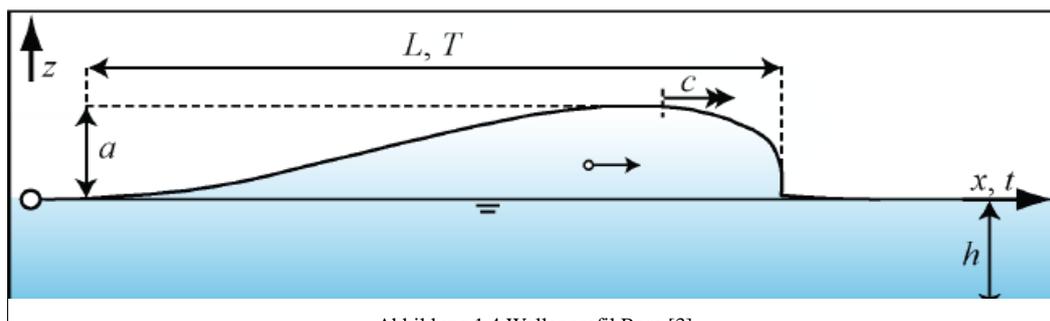


Abbildung 1.4 Wellenprofil Bore [3]

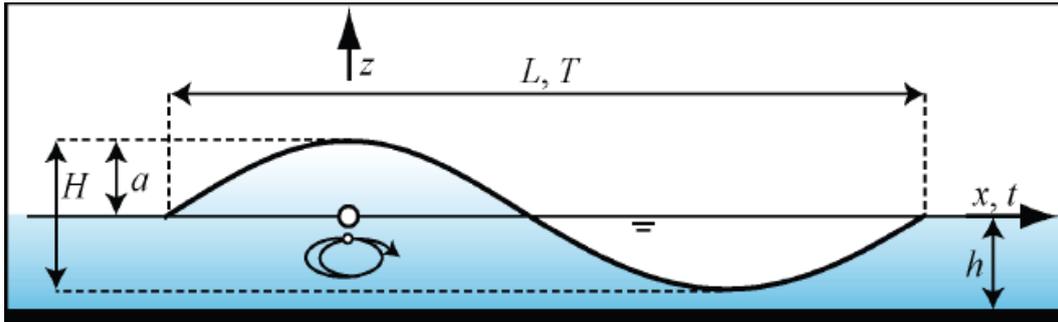


Abbildung 1.5: Cnoidalwellenprofil [3]

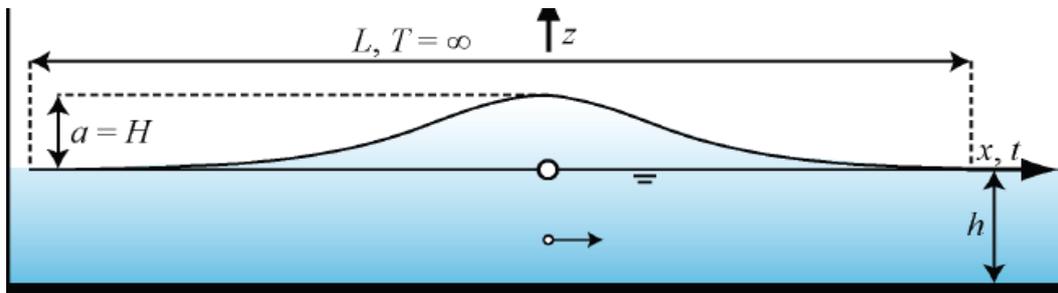


Abbildung 1.6: Solitärwellenprofil [3]

Übertragen auf die Ereignisse am Knappensee kann die rutscherzeugte Impulswelle aufgrund eines großen Massentransportes, eines markanten Wellenberges, einer horizontalen Wasserbewegung sowie anhand der Parameterverhältnisse, die auf eine Flachwasserwelle hindeuten, als Schwallwelle mit Solitärwellenform eingestuft werden.

## 2 Modellgebiet

### Untersuchungsgegenstand – Knappensee

Der Knappensee hat eine Wasserfläche von 264 Hektar und eine Wassertiefe bis zu 10 Metern. Charakteristisch sind die bewaldeten Innenkippen.

### Konzeption und Modellaufbau

Der zu untersuchende Bereich umfasste den in Abb. 2.1 gelb markierten Teilbereich E1 (Badestrand) sowie die ebenfalls gelb markierte Insel „Innenkippe“ und Kleine Insel. Der Fokus lag auf der Wellenausbreitung im Bereich E1 infolge von Rutschungen an der Innenkippe sowie auf der Auswirkung der vorgelagerten Kleinen Insel auf die Wellenbrechung, -ablenkung und Wellenumlenkung.

Aus den Ergebnissen systematischer Vorversuche konnte abgeleitet werden, dass die Welle von der Insel so beeinflusst wird, dass am Uferprofil E1 ein Strömungsschatten sowie entsprechend der Interferenztheorie Überlagerungszonen mit Wellenberg, Wellental und Wellenausgleich auftreten.

Die Untersuchung dazu erfolgt an einem gegenständlichen dreidimensionalen Modell des

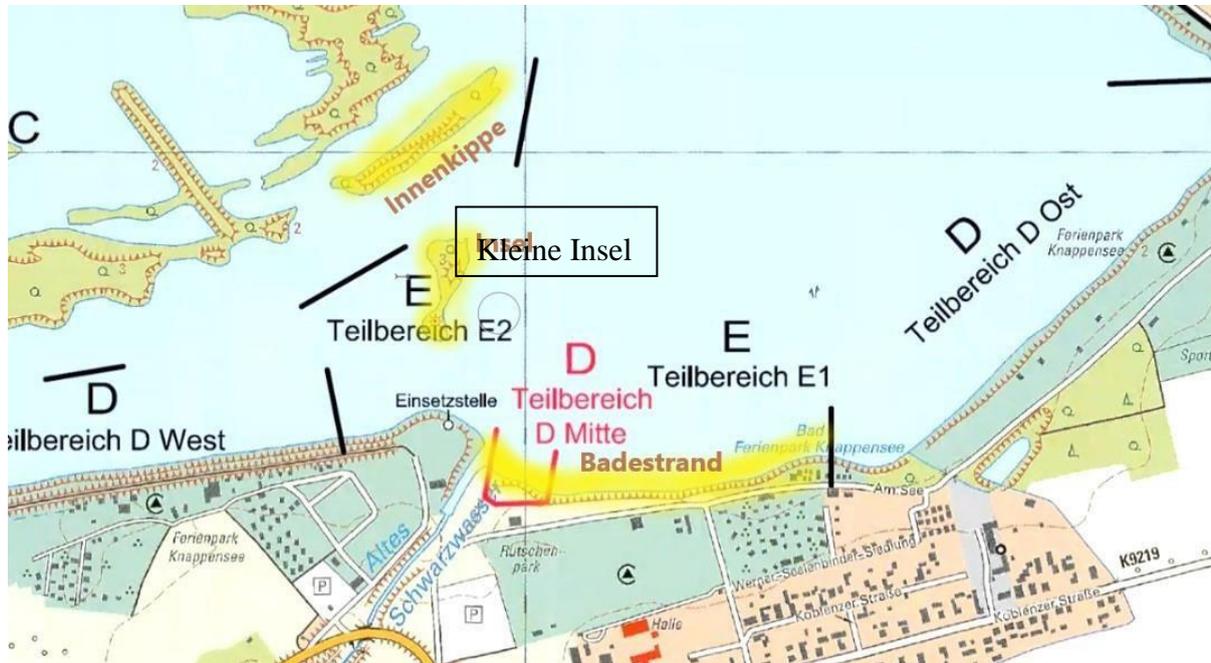


Abbildung 2.1: Lageplan mit Insel, Innenkippe und Uferbereich E1

Teilbereichs, das die Wirklichkeit des Sees im verkleinerten Maßstab darstellt. Für qualitative Aussagen zur Wellenentwicklung wurde eine Modifikation und Versuchswiederholung bei verschiedenen Wellenhöhen durchgeführt. Der Vergleich der ermittelten Wellenhöhen an unterschiedlichen Stellen, wie bspw. vor dem Inselbereich oder im Strömungsschatten gestattete Aussagen zur Wirkung der Insel auf die Wellenentwicklung in Richtung E1.

Im Modell wurden mehrere Variationen der Wellen erzeugt. Aufgrund dessen waren die Wellenentstehungsorte und die Impulsstärke veränderlich, sodass die Wellen linienförmig und segmentiert erzeugt werden konnten.

Tab. 2.1 Wellenerzeugungsarten für Versuchsdurchführung

| Linienförmige Welle  | Segmentierte Wellen  |
|--|--|
| Erzeugung einer linearen durchgehenden Wellenfront entlang der Abbruchkante der Innenkippe | Erzeugung einer segmentierten Welle, infolge Eintauchens von Teilbereichen der Innenkippe (25 %, 50 %, 75 %) |

Um den Einfluss des Tiefenprofils auf die Welle nicht zu vernachlässigen, muss eine Profilierung des Seebodens entsprechend den natürlichen Gegebenheiten erfolgen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf dem Bereich zwischen der Innenkippe und der Kleinen Insel. Dieser ähnelt aufgrund eines steilen Abhangs und eines steilen Anstiegs in Richtung der Kleinen Insel, einem Seegraben. Auf Höhe der Kleinen Insel erstreckt sich der Seeboden flach abfallend in Richtung Nordosten.

### Modellgesetze

Die in der Natur und im Modell zu erwartenden Strömungen während der Wellenausbreitung und Wellenablenkung sind vorwiegend turbulent. In diesem Fall eignet sich für die Übertragung der physikalischen Größen zwischen Modell und Natur das Ähnlichkeitsgesetz nach Froude. Es schließt die Trägheits- und Schwerekräfte ein, vernachlässigt Zähigkeitseinflüsse und definiert, dass die Froudezahl der Strömung (Maß für das Verhältnis aus Trägheits- und Schwerekraft) in Natura und im Modell gleich groß sein muss. [8]

Da der Wasserkörper im Verhältnis zu seiner Flächenausdehnung von zwei Kilometern nur eine Wassertiefe von 10 m aufweist, liegen bei einer Modellierung in einem einheitlichen Maßstab für alle geometrischen Größen zu geringe Wassertiefen vor. Dies wiederum hat zur Folge, dass Oberflächenspannungen oder Reibungskräfte berücksichtigt werden müssen. [7]. Aus diesem Grund wurde das verzerrte Froudemodell mit verschiedenen Übertragungsverhältnissen für die Höhe und die Länge gewählt. Im Verhältnis dieser Maßstabszahlen ergibt sich der Überhöhungsfaktor  $n = 4$ .

Der Übertragungsmaßstab der Modellgeometrie wurde für die Längen und Breiten mit 1:100 festgelegt, sodass ein ausreichend großes Modell, mit dem nachteilige Maßstabeffekte begrenzt werden konnten, entstand. Des Weiteren erfolgte eine 4-fach überhöhte Darstellung des Modells.

**Längen- und Breitenmaßstab:**

$$M_L = \frac{L_N}{L_M} = 100 \quad (2.1)$$

|       |               |         |             |
|-------|---------------|---------|-------------|
| $L$   | Länge [m]     | Index N | Naturobjekt |
| $M_L$ | Längenmaßstab | Index M | Modell      |

**Höhenmaßstab:**

$$M_H = \frac{M_L}{n} = \frac{H_N}{H_M} = 25 \quad (2.2)$$

|       |              |         |             |
|-------|--------------|---------|-------------|
| $H$   | Höhe [m]     | Index N | Naturobjekt |
| $M_H$ | Höhenmaßstab | Index M | Modell      |

**Fließzeitmaßstab:**

$$M_{TL} = \sqrt{M_L * n} = \frac{T_{LN}}{T_{LM}} = 20 \quad (2.3)$$

|          |                  |         |             |
|----------|------------------|---------|-------------|
| $T_L$    | Fließzeit [s]    | Index N | Naturobjekt |
| $M_{TL}$ | Fließzeitmaßstab | Index M | Modell      |

**Geschwindigkeitsmaßstab:**

$$M_v = \sqrt{M_L/n} = \frac{v_N}{v_M} = 5 \quad (2.4)$$

|       |                         |         |             |
|-------|-------------------------|---------|-------------|
| $v$   | Geschwindigkeit [m/s]   | Index N | Naturobjekt |
| $M_v$ | Geschwindigkeitsmaßstab | Index M | Modell      |

**Kraftmaßstab:**

$$M_N = M_L^3 / n^2 = \frac{N_N}{N_M} = 62500 \quad (2.5)$$

|       |              |         |             |
|-------|--------------|---------|-------------|
| $N$   | Kraft [N]    | Index N | Naturobjekt |
| $M_N$ | Kraftmaßstab | Index M | Modell      |

**Energiemaßstab:**

$$M_E = \frac{M_L^3}{n^2} * M_L = \frac{E_N}{E_M} = 6250000 \quad (2.6)$$

|       |                |         |             |
|-------|----------------|---------|-------------|
| $E$   | Energie [J]    | Index N | Naturobjekt |
| $M_E$ | Energiemaßstab | Index M | Modell      |

## Ausgangswerte

Die Planung des Übersichtsmodells erfolgte auf der Grundlage von Luftaufnahmen, Lageplänen sowie einer thematischen Karte mit Lotung der Bathymetrie. Aus diesen Daten konnte die Geometrie der Innenkippe, der Kleinen Insel, des Uferbereichs E1 sowie die Bathymetrie entnommen und nachfolgend im Übersichtsmodell im Längenmaßstab 1:100 und im Höhenmaßstab 1:25 übernommen werden. Besonders zu berücksichtigen war die Veränderung des Seebodens, aufgrund der zuletzt im März 2021 stattgefundenen Rutschung. Die damit einhergehende Massenablagerung führte zu einer Erhöhung des Seebodens von 117 m NHN auf 119 m NHN.

Naturhöhen:

- Basis Sohle See ohne Erdmassen: 117 m NHN \*
- Basis Sohle See mit Erdmassen: 119 m NHN \*
- maximale Erhebung: 127 m NHN \*
- mittlere WSP-Lage: 125,5 m NHN
- hohe WSP-Lage: 126,0 m NHN

*\* Diese Angaben gelten für den zu untersuchenden Teilbereich des Knappensees und weichen an anderen Stellen ab.*

Modellhöhen vor Massenablagerung:

- max. Modellhöhe ohne Erdmassen: 40,0 cm
- mittlere Wasserstand: 34,0 cm
- Höchstwasserstand: 36,0 cm

Modellhöhen nach Massenablagerung:

- max. Modellhöhe mit Erdmassen: 32,0 cm
- mittlere Wasserstand: 26,0 cm
- Höchstwasserstand: 28,0 cm

Naturlängen:

- Innenkippe: 175 m
- Kleine Insel: 141 m
- Uferbereich: 775 m

Modelllängen:

- Innenkippe: 166 cm
- Kleine Insel: 138 cm
- Uferbereich: 765 cm

### Aufbau des physikalischen Modells

Als Basis diente ein Becken mit der maximalen Länge von 7,5 m und einer maximalen Breite von 6,20 m.

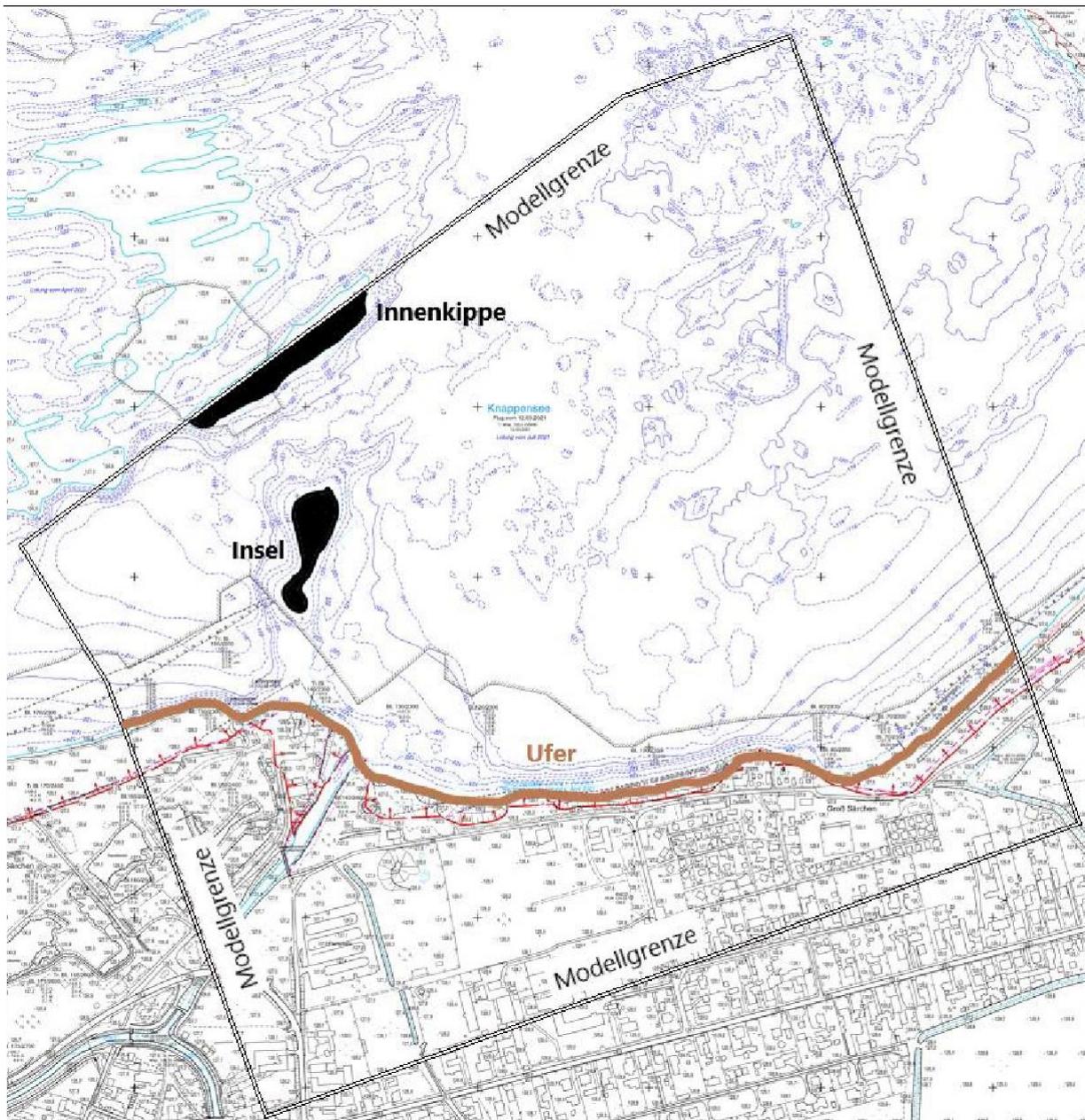


Abbildung 2.2: Modellgeometrie auf Übersichtskarte des Knappensees im Maßstab 1:5000

Der ursprüngliche Modellzustand, stellt den Knappensee ohne ausgeflossene Erdmassen und somit im Zustand vor den Rutschungen dar. An diesem wurden Untersuchungen durchgeführt, um im Verlauf Vergleiche zum derzeitigen Ist- Zustand (mit Ablagerungen) zu ermöglichen.

### **Ausbauzustand 1 – Erdmassenablagerungen auf Seeboden**

Nach Abschluss der Untersuchungen zum Zustand ohne Erdmassen erfolgte der Umbau des Modells. Dazu wurden zunächst die Erdmassenablagerungen am Grund des Sees, die infolge vergangener Rutschungen entstanden sind, modelliert. Die Ablagerungen haben in der Natur eine Mächtigkeit von bis zu zwei Metern, was im Modellmaßstab einer Dicke von acht Zentimetern entspricht. Das fertige physikalische Modell im Ausbauzustand 1 stellte den Seeboden in seinem aktuellen natürlichen Istzustand dar.

### **Ausbauzustand 2 – Insel Überwasserbereich**

Der zweite Umbau erfolgte mit der Erhöhung der modellierten Kleinen Insel. Dabei wurde der in Inseloberbau aus Stahlbeton auf den Unterwasserbereich aufgebaut. Zwischen beiden Inselteilen wurde eine transparente Folie eingearbeitet, die einen Verbund beider Teile verhinderte. Somit konnte auch nachträglich der Ober- vom Unterbau getrennt werden und es bestand die Möglichkeit, Versuche im Zustand ohne Kleiner Insel, falls nötig, zu wiederholen.

### **Ausbauzustand 3 - Inselerweiterung mit künstlichen Störkörpern**

Der dritte und letzte Umbau des Modells war notwendig, um die Auswirkungen der künstlichen Inselerweiterungen auf die Wellenausbreitung zu untersuchen. Die Körper verliefen dabei auf dem Grund des Sees und simulierten eine Ausdehnung der Insel in Richtung Osten.

Als Grundlage für diesen Modellausbau dienten die Ergebnisse der Versuche zu den Ausbauzuständen 2 und 3. Insgesamt wurden drei verschiedene Formzustände der Inselerweiterung festgelegt, die sich alle an die Seemorphologie anpassten, aber jeweils unterschiedliche Längen und Höhen aufwiesen.

- Die **Variante V1** beinhaltete einen Störkörper, der die Kleine Insel in Richtung Nordosten nur kurzstreckig erweitert. Der Störkörper reicht übertragen auf die Natur vom Seeboden = 119,0 m NHN bis auf 122,0 m NHN am Unterwasserhang der Kleinen Insel. Im Modell hatte die Inselerweiterung V1 eine Höhe von 12,0 cm und eine Länge von 48,0 cm.
- In der **Variante V2** fand ein Störkörper Anwendung, der übertragen auf die Natur bis auf eine Höhe von 123,0 m NHN reicht. Übertragen auf das Modell ergab sich eine Höhe von 16,0 cm und eine Länge von 176,5 cm.

- Die **Variante V3** beinhaltete die künstliche Erweiterung der Kleinen Insel auf der gesamten Wirkungslänge des potenziellen Rutschungsbereichs und wäre in der Natur auf gleicher Höhe wie die WSP-Lage 126,0 m NHN. Im Modell wies der Körper einer Höhe von 28,0 cm und eine Länge von 126,0 cm auf.

### **3 Versuche**

#### **Versuchsprogramm**

Das Versuchsprogramm umfasste 6 Versuchsreihen (A bis F) für insgesamt 6 unterschiedliche Modellzustände. In jedem Versuch wurde die Wellenausbreitung mit der unter Kap. 2.4.4 erläuterten Kameratechnik foto- und videografisch aufgenommen und die Wellenhöhen mit Ultraschall gemessen. Dabei wurde das Ziel verfolgt, gleichgroße Wellenhöhen unmittelbar nach dem Fallkörper in den Größenordnungen 1,6 cm, 1,8 cm, 2,0 cm, 2,5 cm, 3,0 cm sowie 3,5 cm zu erzeugen, um später Vergleiche vorzunehmen.

Bis auf die Versuchsreihen A und B, welche nur bei mittlerer WSP-Lage (in Natur = 125,5 m NHN) durchgeführt wurden, fanden alle anderen Versuche der Reihen C bis F sowohl bei mittlerer WSP-Lage als auch bei hoher WSP-Lage (in Natur = 126,0 3-+ NHN) statt. Bei einigen Versuchen gelang es mit einer Fallkörpergröße von 50 % nicht, entsprechend große und vergleichbare Wellenhöhen zu erzeugen. Bei diesen Versuchen wurde der Fallkörper zusätzlich belastet, damit dieser mit einem stärkeren Impuls eintaucht und dadurch höhere Schwallwellen erzeugt.

Tab. 3.1 Versuchsbedingungen

| Versuchsreihe | Sohle        | Insel                        | Störkörper                              | WSP-Lage   | Falkörper [%] | Versuchszahl |
|---------------|--------------|------------------------------|---|--|---------------|--------------|
| A             | ohne Schlamm | fragmentarisch, unter Wasser | kein Störkörper                         | mittlerer Wasserstand (125,5 m NHN) ( $\pm$ 34 cm im Modell ohne Schlamm)  | 100 / 75 / 50 | 31           |
| B             | mit Schlamm  | fragmentarisch, unter Wasser | kein Störkörper                         | mittlerer Wasserstand (125,5 m NHN) ( $\pm$ 26 cm im Modell)   | 100 / 75 / 50 | 82           |
| C             | mit Schlamm  | vollständig, über Wasser     | kein Störkörper                         | mittlerer Wasserstand (125,5 m NHN) ( $\pm$ 26 cm im Modell)<br>hoher Wasserstand (126,0 m NHN) ( $\pm$ 28 cm im Modell) | 100 / 75 / 50 | 70           |
| D             | mit Schlamm  | vollständig, über Wasser     | kleiner Störkörper V1 (auf 122 m NHN)   | mittlerer Wasserstand (125,5 m NHN) ( $\pm$ 26 cm im Modell)<br>hoher Wasserstand (126,0 m NHN) ( $\pm$ 28 cm im Modell) | 100 / 75 / 50 | 56           |
| E             | mit Schlamm  | vollständig, über Wasser     | mittlerer Störkörper V2 (auf 123 m NHN) | mittlerer Wasserstand (125,5 m NHN) ( $\pm$ 26 cm im Modell)<br>hoher Wasserstand (126,0 m NHN) ( $\pm$ 28 cm im Modell) | 100 / 75 / 50 | 55           |
| F             | mit Schlamm  | vollständig, über Wasser     | großer Störkörper V3 (auf 126 m NHN)    | mittlerer Wasserstand (125,5 m NHN) ( $\pm$ 26 cm im Modell)<br>hoher Wasserstand (126,0 m NHN) ( $\pm$ 28 cm im Modell) | 100 / 75 / 50 | 53           |

## **Versuchsziele**

### **Versuchsreihe A**

Die Versuchsreihe A diente zur Untersuchung der Wellenausbreitung mit der Randbedingung eines geringen Feststoffanteils der Erdmassen auf dem Grund des Sees. Somit sollten sich die Erdmassen mit der Welle mitbewegen und faktisch nicht als feste unbewegliche Masse fungieren. Um diesen Zustand zu erreichen, wurde der Schlamm weggelassen, sodass sich die Welle ungehindert und in voller Wassertiefe ausbreiten konnte. Des Weiteren war die Insel nur fragmentarisch modelliert und befand sich entsprechend vollständig unter Wasser. Es konnten somit Vergleiche zu den Versuchen der anderen Modellvarianten, bei denen die Insel vollständig bis über die Wasseroberfläche modelliert war, gezogen und daraus der Einfluss der verschiedenen Inselzustände auf die Wellenausbreitung abgeleitet werden.

### **Versuchsreihe B**

Die Versuchsreihe B galt der Untersuchung der Schwallwellenausbreitung in Abhängigkeit der Erdmassen, wenn dieser als feste und unbewegliche Masse wirkt. Diesbezüglich erfolgte ein Vergleich mit der Versuchsreihe A, deren Randbedingungen, sich abgesehen von den Erdmassen, nicht von der Versuchsreihe B unterscheiden.

### **Versuchsreihe C**

Mit Hilfe der Versuchsreihe C konnte die Ausbreitung der Wellen beurteilt werden, wenn die Insel, wie im Naturzustand, komplett aus dem Wasser herausragt. Der Unterschied zur Versuchsreihe B betraf die Höhe der Insel. Aus diesem Grund konnte anhand der Ergebnisse aus B und C verglichen werden, welche Bedeutung die vollständige Insel bspw. für die Schwächung oder Ablenkung der Wellen hat und ob sie somit einen Beitrag zum Schutz des Uferbereichs E1 vor hohen Schwallwellen leistet.

### **Versuchsreihe D**

Anders als bei den vorherigen Zuständen, wurde mit der Versuchsreihe D erstmalig ein Zustand untersucht, der bis jetzt in der Natur noch nicht vorkommt. Die Intention war die Erzeugung eines Wellenschattens im Strandbereich des Uferprofils E1. Dafür wurde ein künstlicher Störkörper (V1) in der Verlängerung der Insel und schräg zur Innenkippe auf einer Höhe bis 122,0 m NHN (Naturhöhe) eingebaut (Abb. 3.2). Der Störkörper war vollständig überstaut und simulierte eine minimale Erweiterung der Insel in Richtung Nordosten, die im optimalen Fall die Wellen dämpft. Das Ziel dieser Untersuchung war es, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, ob dieser Störkörper die

Wellenfront aufteilt und sekundäre Wellen im Raum entstehen.

Hinweis: Mit vorangegangenen systematischen Untersuchungen konnte bereits eine dämpfende Wirkung von überstauten Störkörpern bewiesen werden.

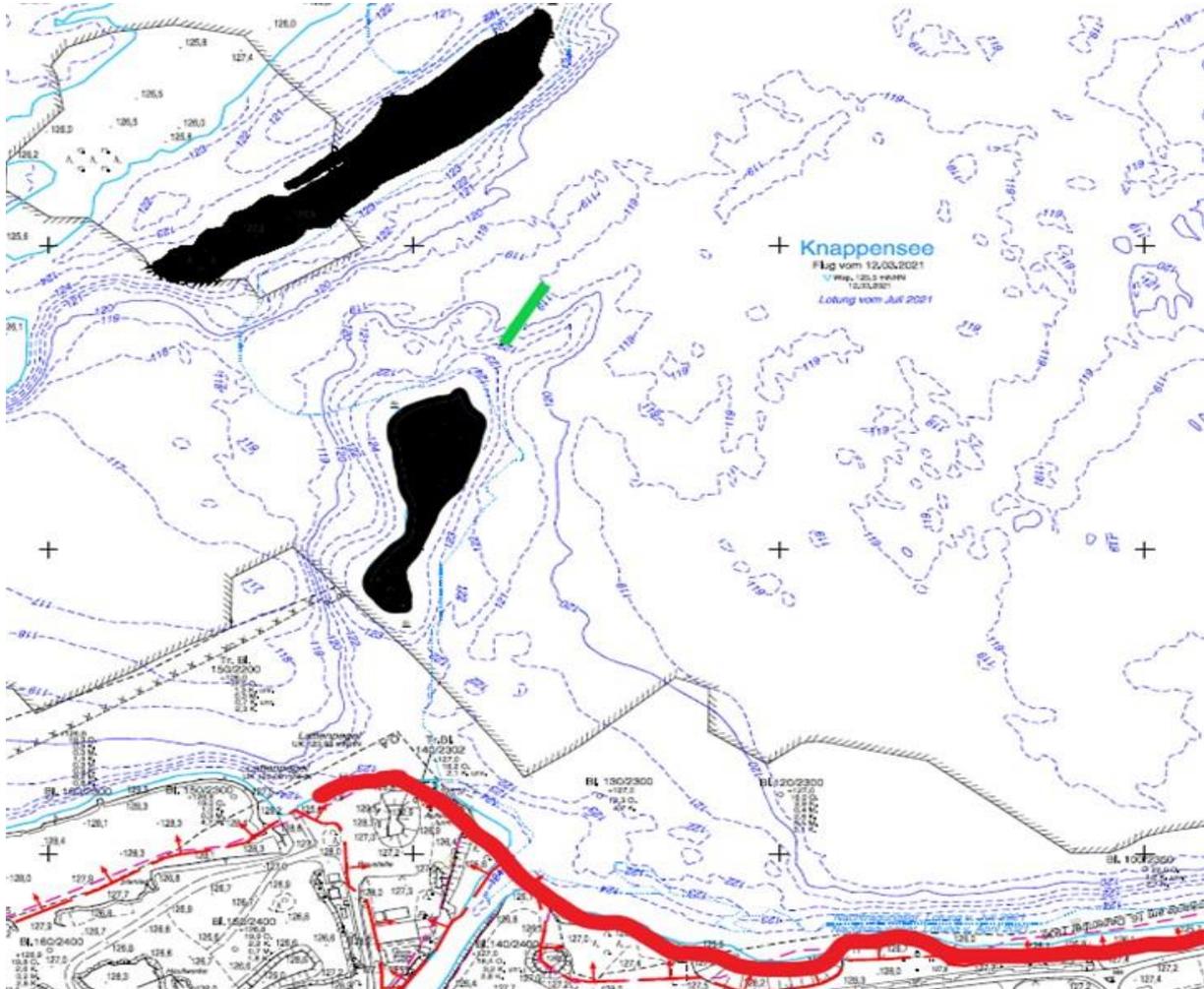


Abbildung 3.2: Knappensee in 1:5000, Planzustand Inselerweiterung / Störkörper Variante V1 (grün)

## Versuchsreihe E

Die Versuchsreihe E verfolgte das gleiche Ziel wie D, mit der Ausnahme, dass der Störkörper V2 hier parallel zur Innenkippe bis auf einer Höhe von 123,0 m NHN (Naturhöhe) angeordnet wurde und mehr als dreimal so lang war wie V1. Damit schattet dieser in natura den betroffenen Bereich auf der Länge der abrutschenden Innenkippe vollständig ab (Abb. 3.3). Ein Vergleich der Ergebnisse aus D und E diente zur Ermittlung der Wirkung von unterschiedlich hohen und unterschiedlich langen Unterwasserbarrieren auf Schwallwellen.

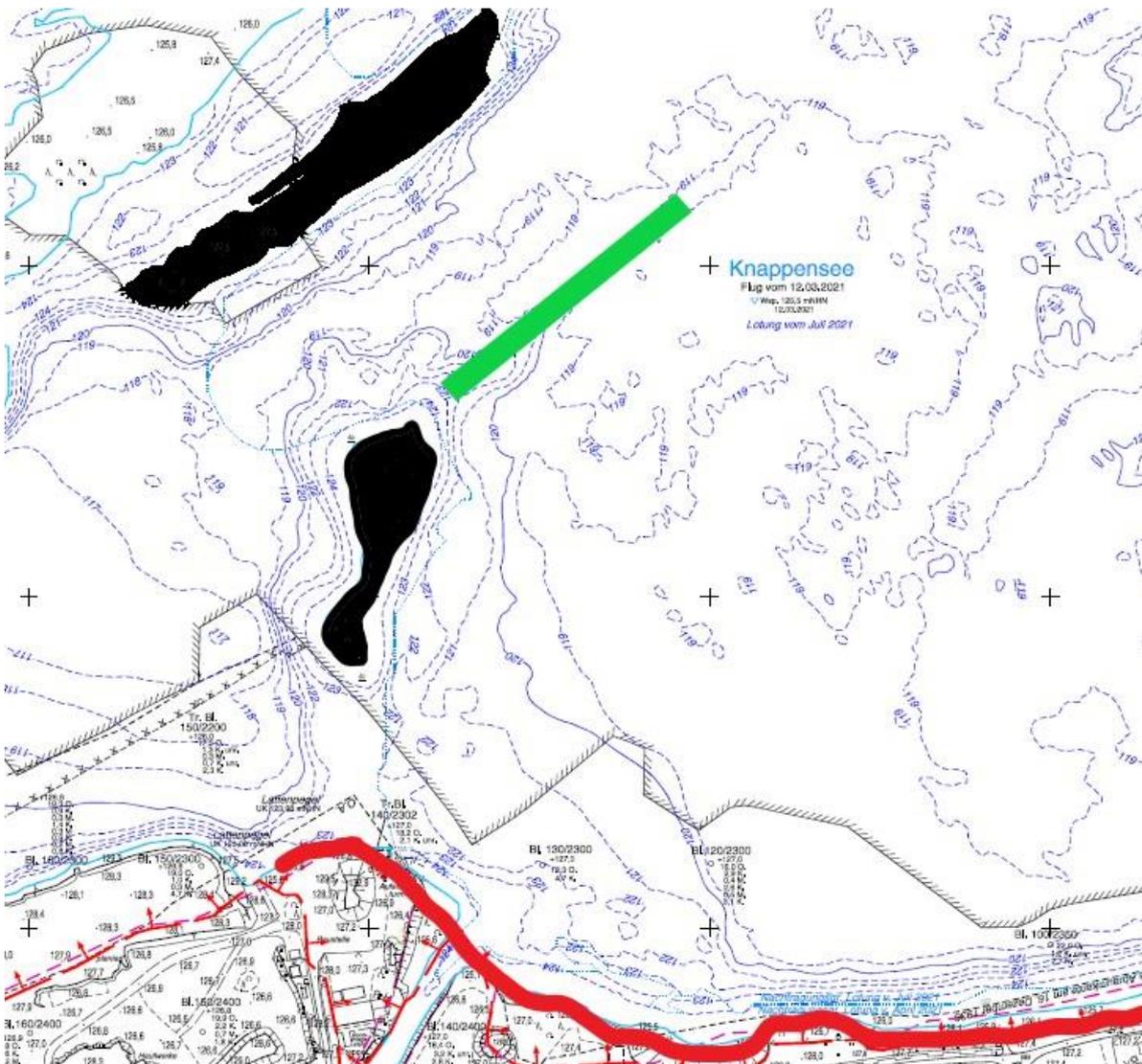


Abbildung 3.3: Knappensee in 1:5000, Planzustand Inselerweiterung / Störkörper Variante V2 (grün)

## Versuchsreihe F

Mit der Versuchsreihe F wurde eine direkte Erweiterung der Insel auf einer Höhe von 126,0 m NHN (Naturhöhe) und auf der Wirkungslänge des Rutschungsbereichs und damit kürzer als Variante 2 untersucht (Abb. 3.4). Ziel war es, im Vergleich zu den Versuchsreihen D und E, Unterschiede hinsichtlich der Wirkung von vollständig überstauten und teilweise überstauten Störkörpern festzustellen sowie die wirkungsvollste Variante aus V1, V2 und V3 zur Erzeugung eines Wellenschattens im Uferbereich E1 zu bestimmen.

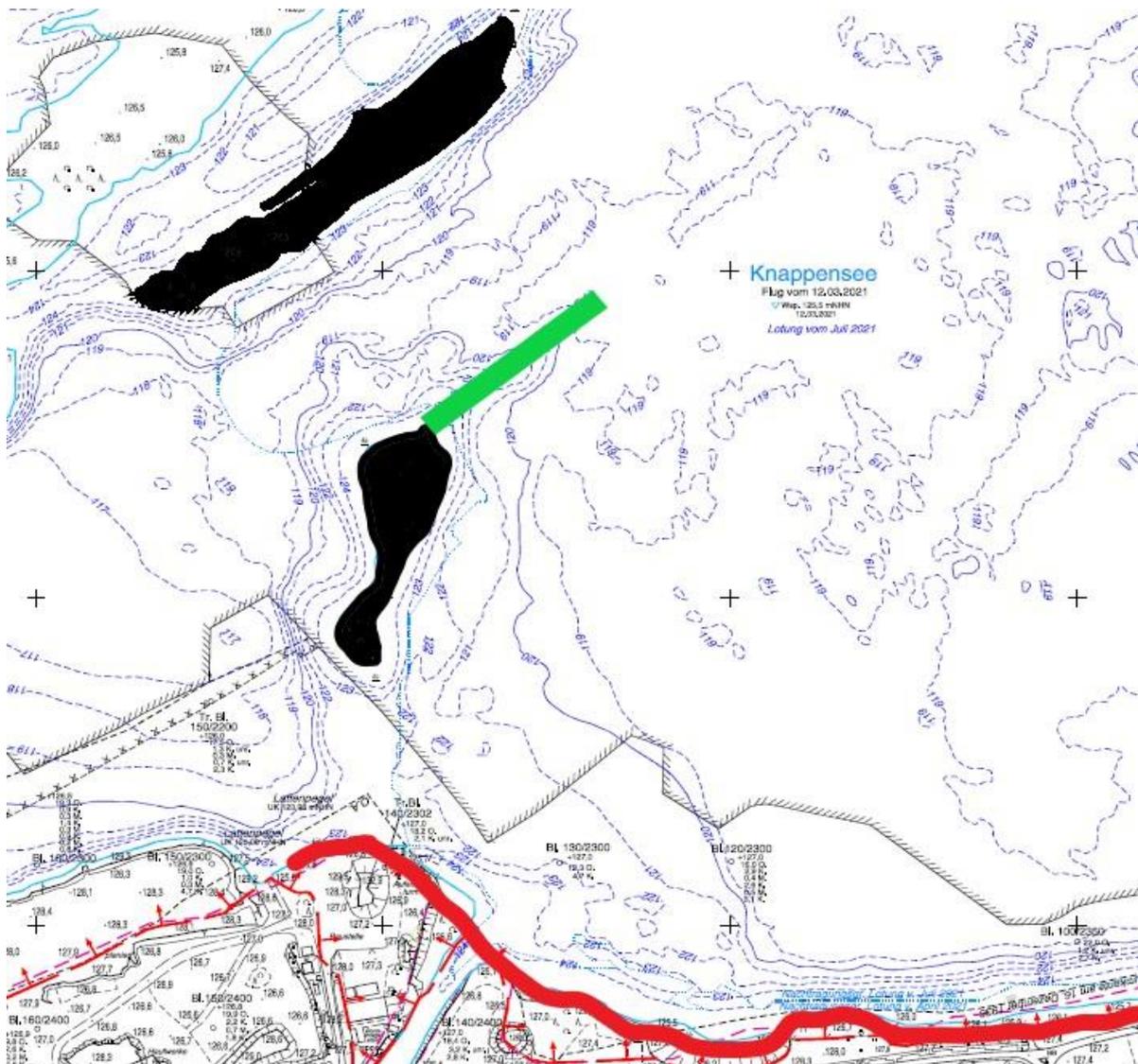


Abbildung 3.4: Knappensee in 1:5000, Planzustand Inselerweiterung / Störkörper Variante V3 (grün)

## 4 Messergebnisse

Im Folgenden werden die Rohmessdaten für die Modellzustände A bis F, wie sie am Ende jeder Messung vorlagen, dargestellt. Die dafür ausgewählten Versuche fanden alle bei einem Wellenhöhenziel von 2,0 cm, bei einer WSP-Lage von 125,5 m NHN (Naturhöhe) und bei 100 % Fallkörpergröße statt. Unterschiede traten im Ergebnis der Messungen bei den tabellarisch aufgelisteten (Tab. 3.2 bis Tab. 3.7) und grafisch dargestellten Wellenhöhen (Abb. 3.5 bis Abb. 3.10) auf, die bspw. für F / 244 (F=Versuchsreihe / XXX=Laufende Versuchsnummer) deutlich geringer ausfallen als für A / 5.

Tab. 3.2 Ultraschallmessung Wellenhöhe A/5

**Versuchsreihe / Versuchsnummer:** A / 5

| <b>Versuchsbezeichnung:</b> |  | UM_117_MZ1_MR5_V5 |      |      |      |      |
|-----------------------------|--|-------------------|------|------|------|------|
| Sensor                      |  | 5                 | 4    | 3    | 2    | 1    |
| Wellenhöhe Modell [cm]      |  | 2,08              | 0,92 | 0,54 | 0,39 | 0,46 |
| Wellenhöhe Natur [m]        |  | 0,52              | 0,23 | 0,14 | 0,10 | 0,11 |

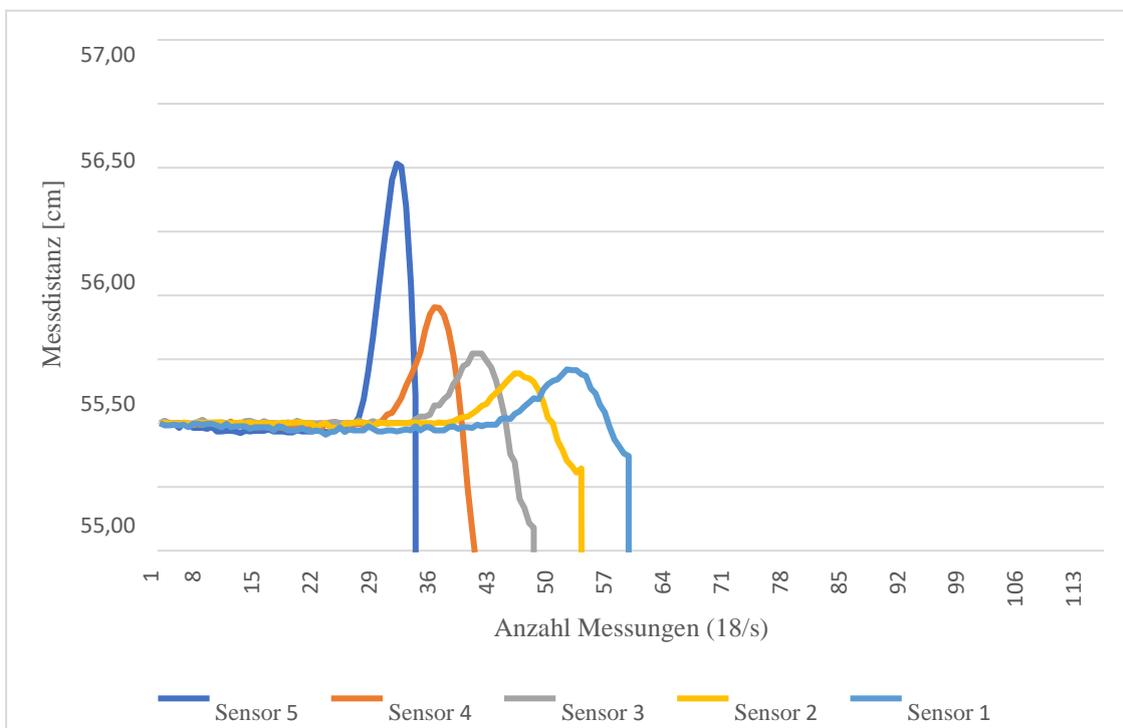


Abbildung 3.5: Wellenhöhen A/5 grafisch

Tab. 3.3 Ultraschallmessung Wellenhöhe B/73

**Versuchsreihe / Versuchsnummer:** B / 73

**Versuchsbezeichnung:** UM\_119\_MZ1\_MR5\_V5-7

| Sensor                 | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    |
|------------------------|------|------|------|------|------|
| Wellenhöhe Modell [cm] | 1,98 | 0,89 | 0,61 | 0,45 | 0,56 |
| Wellenhöhe Natur [m]   | 0,40 | 0,18 | 0,12 | 0,09 | 0,11 |

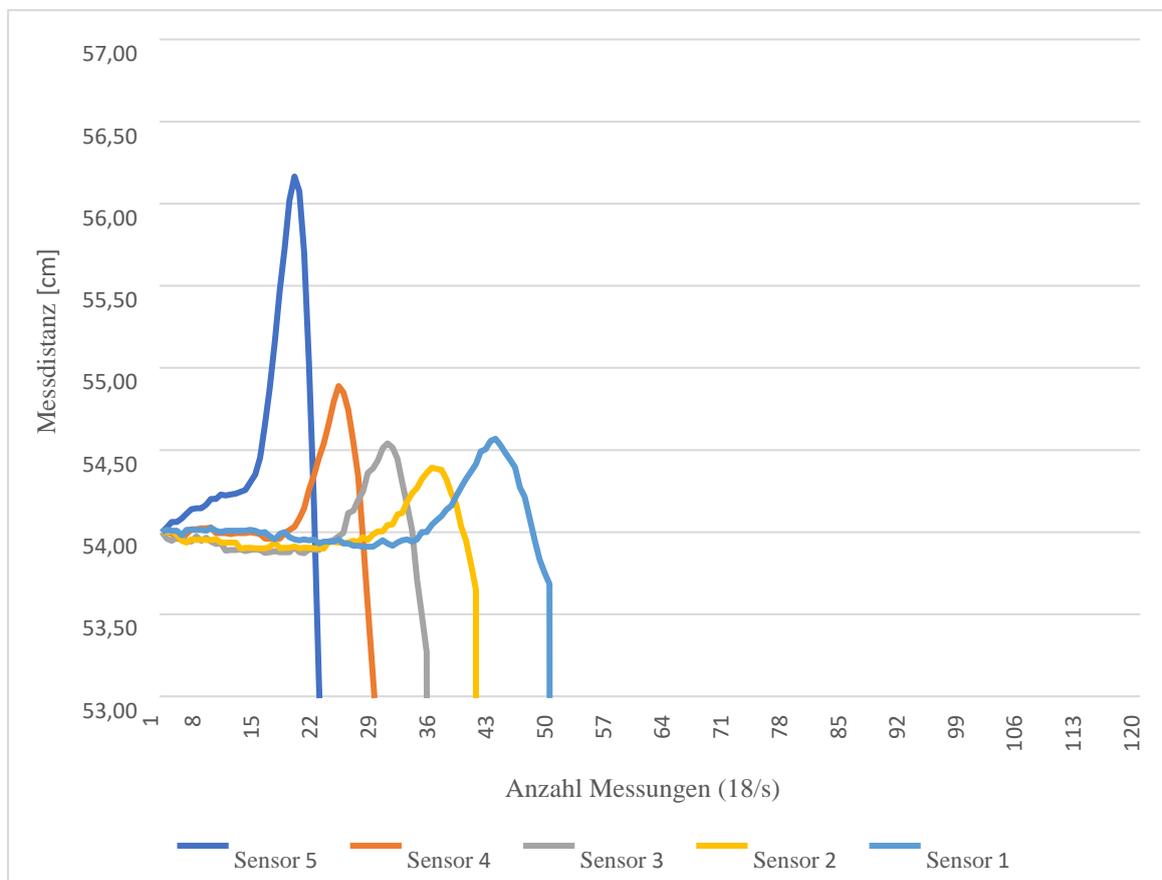


Abbildung 3.6: Wellenhöhen B/73 grafisch

Tab. 3.4 Ultraschallmessung Wellenhöhe C/118

**Versuchsreihe / Versuchsnummer:** C / 118

|                             |                     |      |      |      |      |
|-----------------------------|---------------------|------|------|------|------|
| <b>Versuchsbezeichnung:</b> | UM_119_I_MZ1_MR5_V5 |      |      |      |      |
| Sensor                      | 5                   | 4    | 3    | 2    | 1    |
| Wellenhöhe Modell [cm]      | 2,04                | 0,98 | 0,54 | 0,40 | 0,41 |
| Wellenhöhe Natur [m]        | 0,51                | 0,24 | 0,13 | 0,10 | 0,10 |

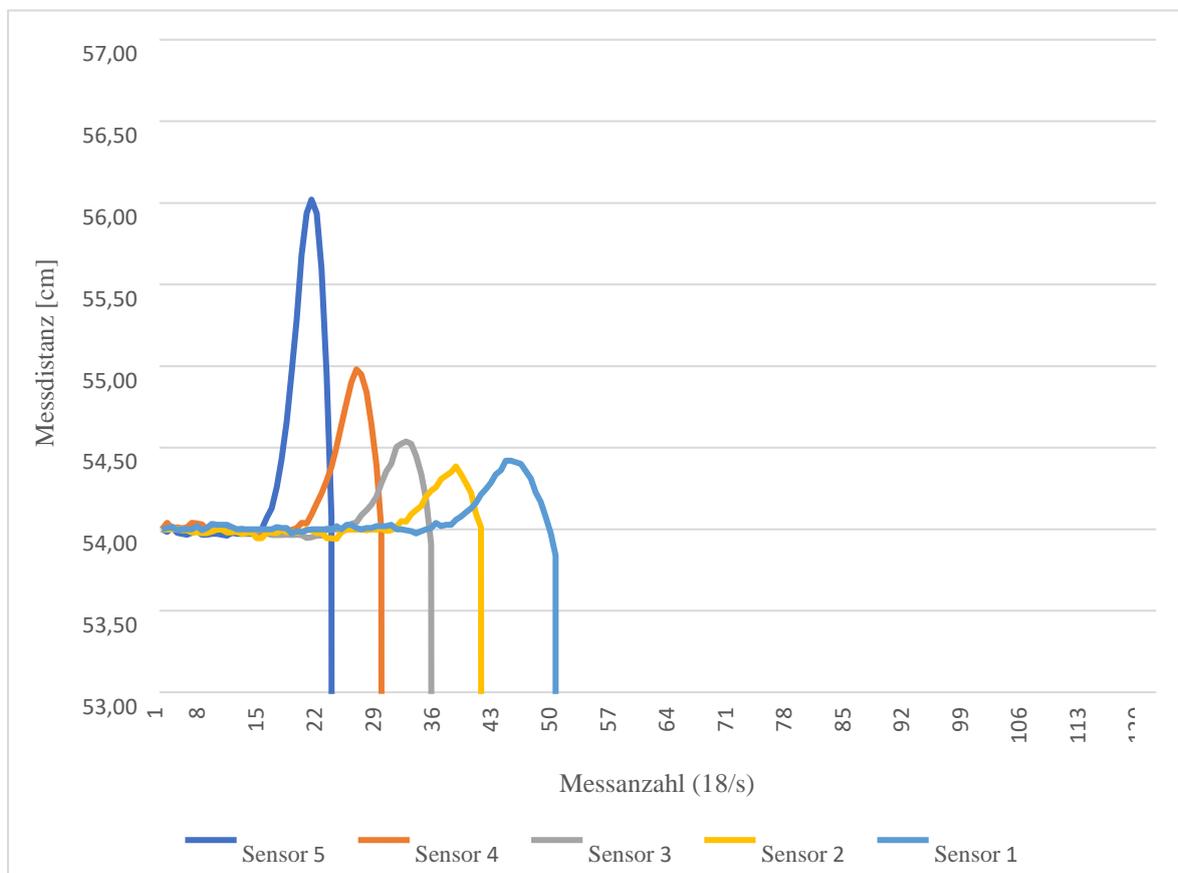


Abbildung 3.7: Wellenhöhen C/118 grafisch

Tab. 3.5 Ultraschallmessung Wellenhöhe D/295

**Versuchsreihe / Versuchsnummer:** D / 295

|                             |                        |      |      |      |      |
|-----------------------------|------------------------|------|------|------|------|
| <b>Versuchsbezeichnung:</b> | UM_125 5_V1_MZ1_MR4_V4 |      |      |      |      |
| Sensor                      | 5                      | 4    | 3    | 2    | 1    |
| Wellenhöhe Modell [cm]      | 1,99                   | 1,10 | 0,56 | 0,34 | 0,46 |
| Wellenhöhe Natur [m]        | 0,50                   | 0,28 | 0,14 | 0,09 | 0,11 |

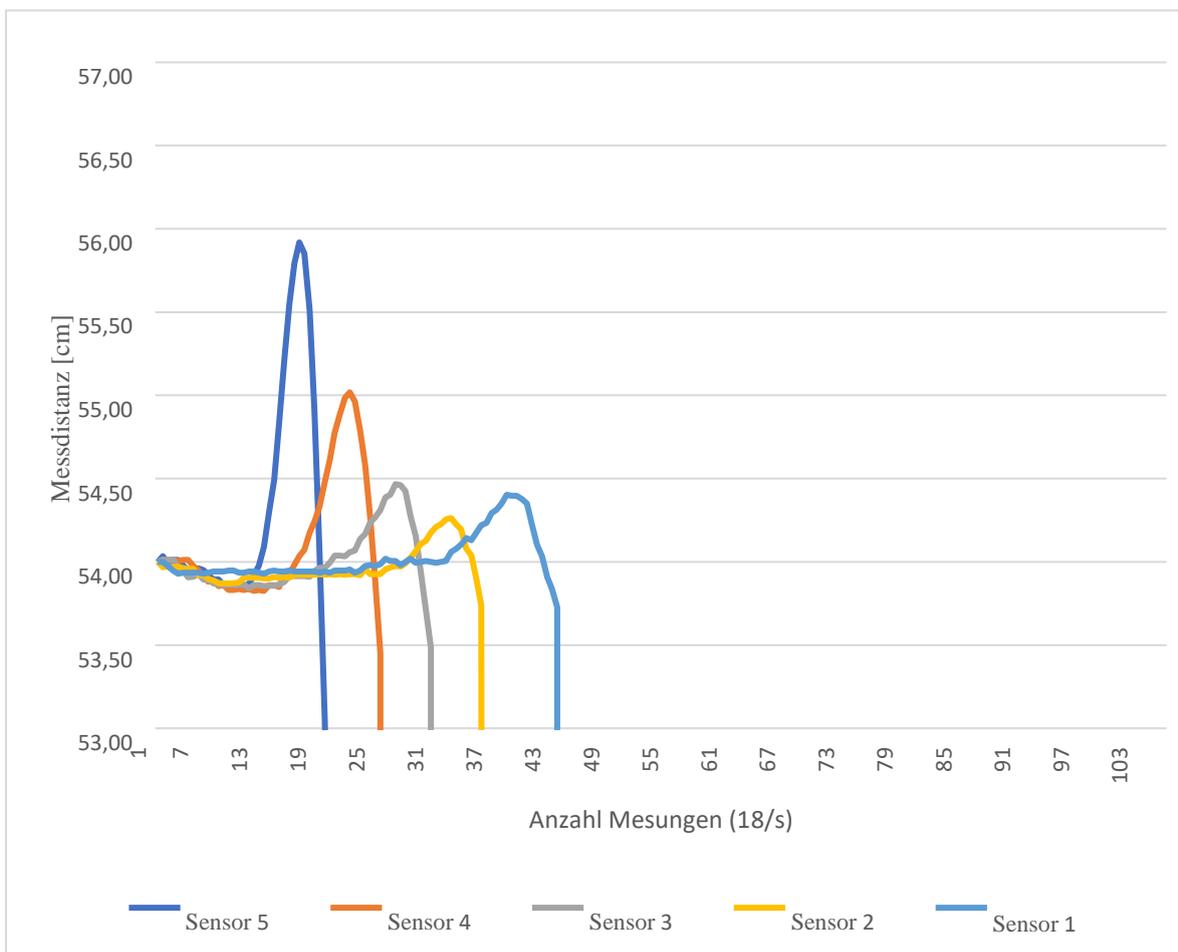


Abbildung 3.8: Wellenhöhen D/295 grafisch

Tab. 3.6 Ultraschallmessung Wellenhöhe E/188

**Versuchsreihe / Versuchsnummer:** E / 188

|                             |                        |      |      |      |      |
|-----------------------------|------------------------|------|------|------|------|
| <b>Versuchsbezeichnung:</b> | UM_125 5_V2_MZ1_MR5_V5 |      |      |      |      |
| Sensor                      | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Wellenhöhe Modell [cm]      | 2,08                   | 1,03 | 0,58 | 0,37 | 0,37 |
| Wellenhöhe Natur [m]        | 0,52                   | 0,26 | 0,15 | 0,09 | 0,09 |



Abbildung 3.9: Wellenhöhen E/188 grafisch

Tab. 3.7 Ultraschallmessung Wellenhöhe F/244

**Versuchsreihe / Versuchsnummer:** F / 244

**Versuchsbezeichnung:** UM\_125 5\_V3\_MZ1\_MR4\_V4

| Sensor                 | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    |
|------------------------|------|------|------|------|------|
| Wellenhöhe Modell [cm] | 1,95 | 0,28 | 0,18 | 0,15 | 0,17 |
| Wellenhöhe Natur [m]   | 0,49 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

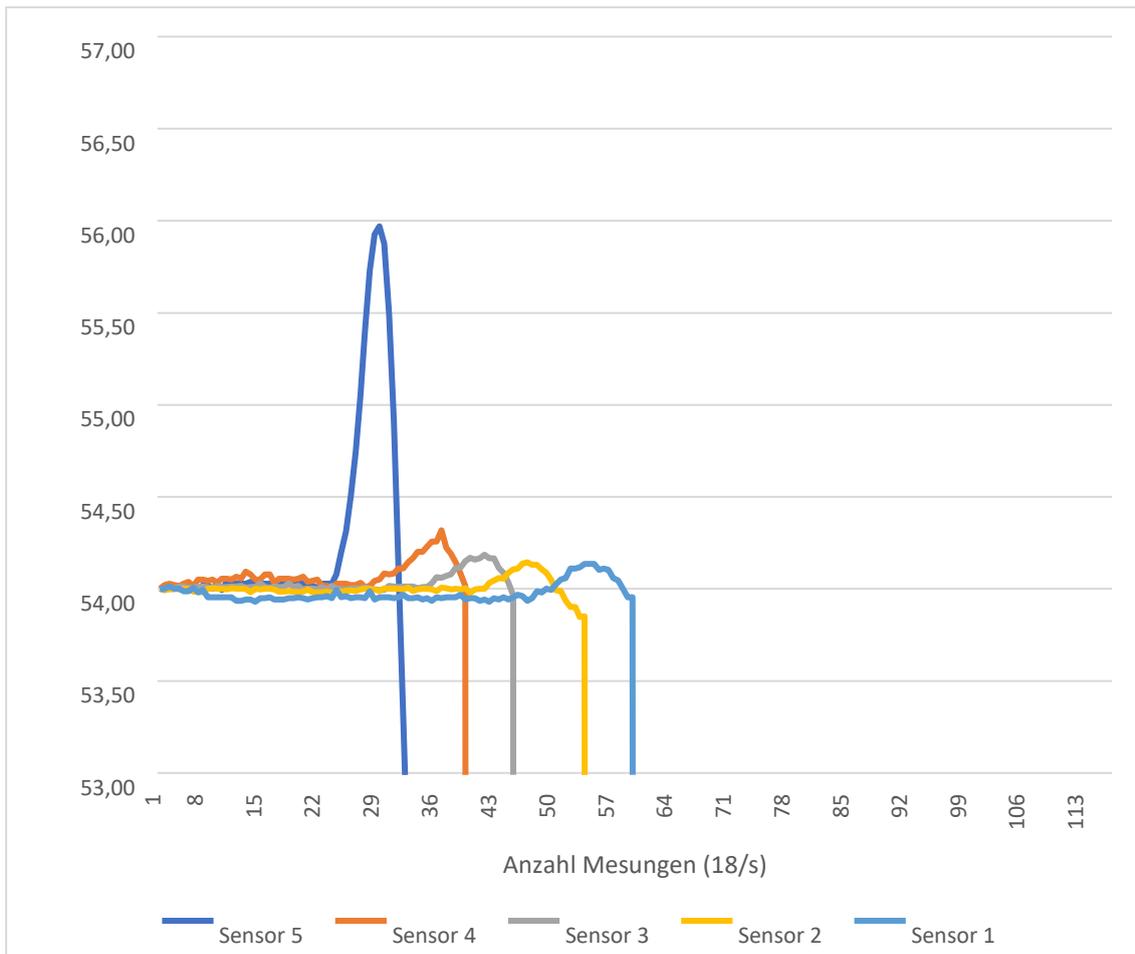


Abbildung 3.10: Wellenhöhen F/244 grafisch

## 5 Auswertung

Die Auswertung der Modellversuche umfasste die Ermittlung, Charakterisierung und Bewertung der Wellenausbreitung. Unter Einbeziehung der visuellen Aufnahmen wurde die Wellenausbreitung im ungestörten und gestörten Raum verglichen, um schließlich qualitative Aussagen zur Wellenentwicklung in Abhängigkeit von den Modellzuständen machen zu können. Über die Auswertung der Ultraschallmessdaten wurde die Wellenausbreitung in Relation zur Wellenhöhe, zur Bathymetrie und zur Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit gesetzt. Die Vergleiche erfolgten dabei weitestgehend über Quotienten der Wellenhöhen. Abschließend wurde auf eine Korrelation der Messergebnisse mit einer Berechnung der 2d-Ausbreitung einer Solitärwelle eingegangen.

Nach der Beschreibung der Aufnahmen und der Charakterisierung einzelner Bereiche, wurde die Wellenausbreitung einmal im ungestörten Raum und einmal im gestörten Raum über der Bathymetrie-Karte des Knappensees grafisch dargestellt.

## Wellenausbreitung im ungestörten Raum

Bei der Wellenausbreitung im ungestörten Raum beeinflussten weder die Insel noch die Störkörper die Welle.

### Modellzustand A:



Abbildung 4.1: Wellenausbreitung im Modellzustand A, Bereich nach der Wellenerzeugung

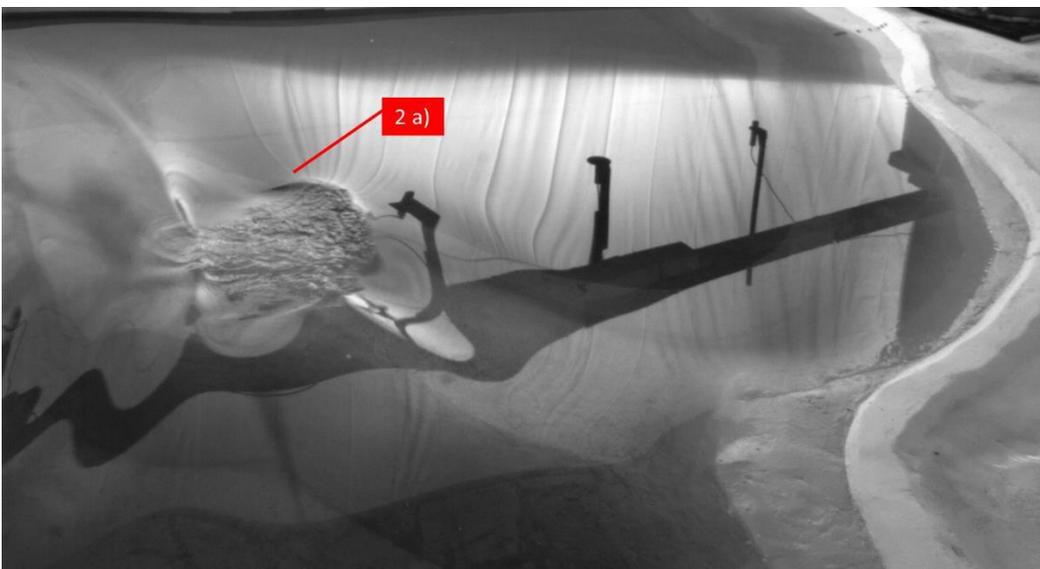


Abbildung 4.2: Wellenausbreitung im Modellzustand A, Bereich Beginn der fragmentarischen Insel

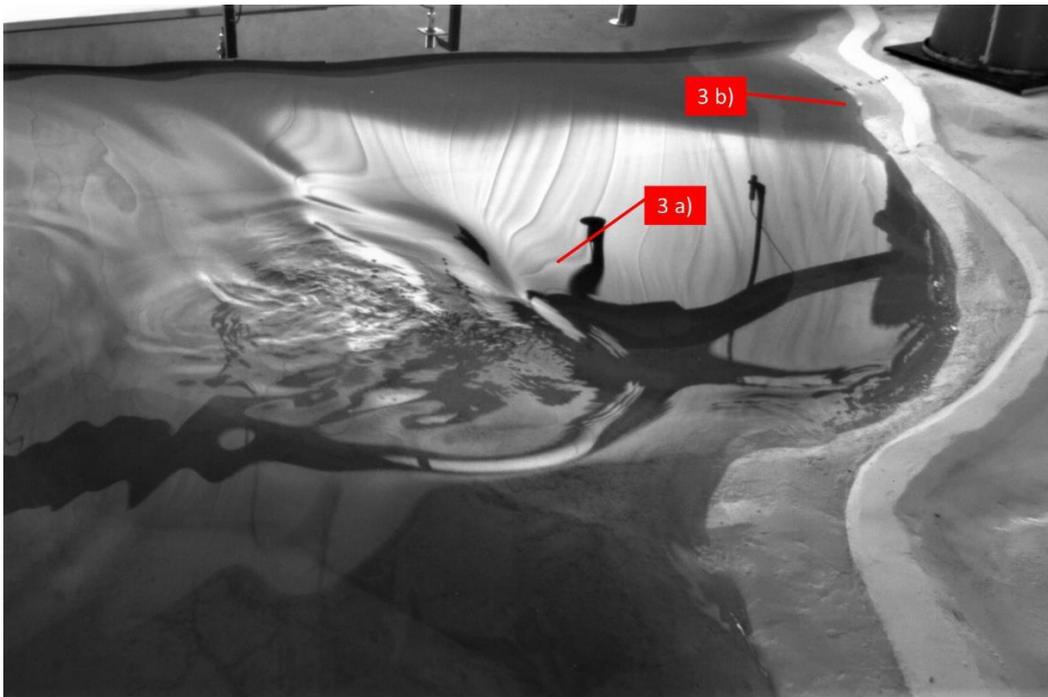


Abbildung 4.3: Wellenausbreitung im Modellzustand A, Bereich Mitte bis Ende der fragmentarischen Insel

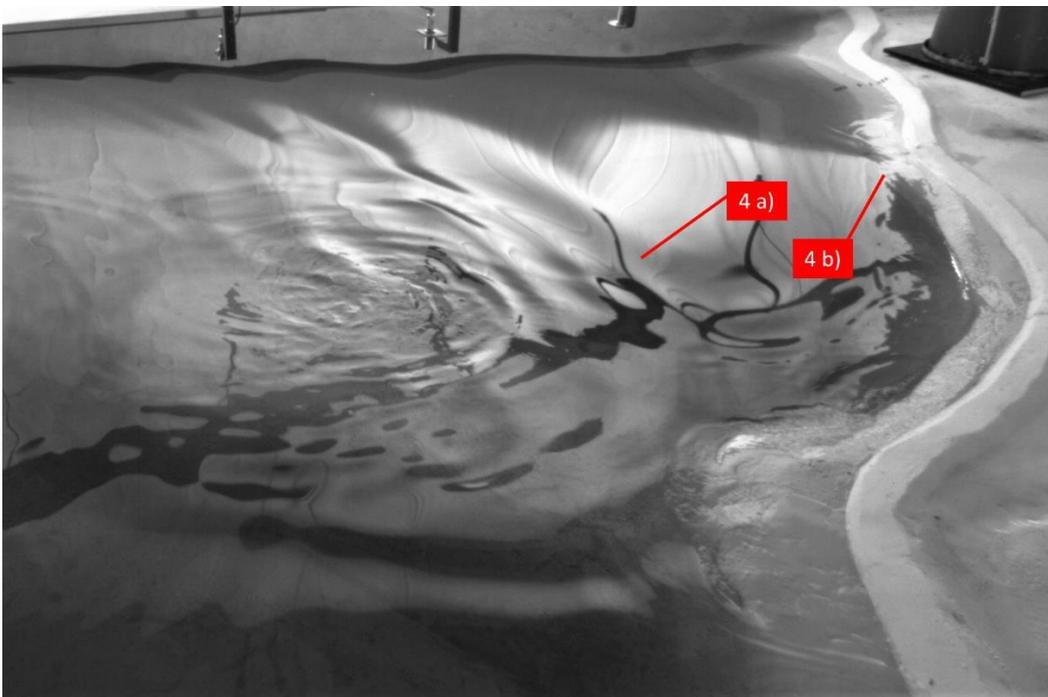


Abbildung 4.4: Wellenausbreitung im Modellzustand A, Bereich zw. fragmentarischer Insel und Uferteilbereich E1

## **Beschreibung der oberflächennahen Wellenausbreitung in den Modellzuständen A und B:**

- 1) Bereich unmittelbar nach der Wellenerzeugung
  - a) radiale Ausbreitung, Solitärwellenform
- 2) Bereich auf Höhe der fragmentarischen Insel
  - a) Auflaufen der Welle und Turbulenzen → Ablösung und Wirbelbildung → Störung der Wellenausbreitung
- 3) Bereich nach der fragmentarischen Insel
  - a) Fortgang der Welle immer noch radial, aber mit sichtbar kleinerer Wellenhöhe und Wellenlänge
  - b) WSP-Absenkung am Ufer vor dem Wellenauflauf  
Auftreffen des Energieimpulses am Ufer noch vor der Welle → Impuls ist schneller als Welle, beschleunigt das Wasser und drückt es in Richtung der Sohle
- 4) Bereich vor dem Uferteilbereich E1
  - a) radiale Wellenausbreitung, andeutungsweise in Solitärwellenform
  - b) Auflaufen am gesamten Uferteilbereich E1
  - c) höherer Wellenauflauf bei Modellzustand B (Ableseung an Höhenlinien am Ufer)

Der einzige Unterschied zwischen dem Zustand ohne Schlamm (A) und dem Zustand mit Schlamm (B) zeigte sich im stärkeren Auflaufen der Welle am Uferteilbereich E1 im Zustand mit Schlamm. Eine mögliche Ursache dafür ist die geringere Wassertiefe im Zustand mit Schlamm, welche dazu führt, dass die Welle am Unterwasserhang des Ufers auf einer kleineren Fläche Reibung erfährt und dadurch mit größerer Geschwindigkeit höher aufläuft.

Die Wellenausbreitung wird bei beiden Modellzuständen teilweise von der fragmentarischen Insel beeinflusst, der größte Teil der Schwallwelle erreicht den Uferteilbereich E1 in beiden Fällen jedoch ungestört. In der nachfolgenden Abb. 4.5 ist die oberflächennahe Wellenausbreitung im ungestörten Raum für den Modellzustand B skizzenhaft über den gesamten Modellbereich dargestellt.

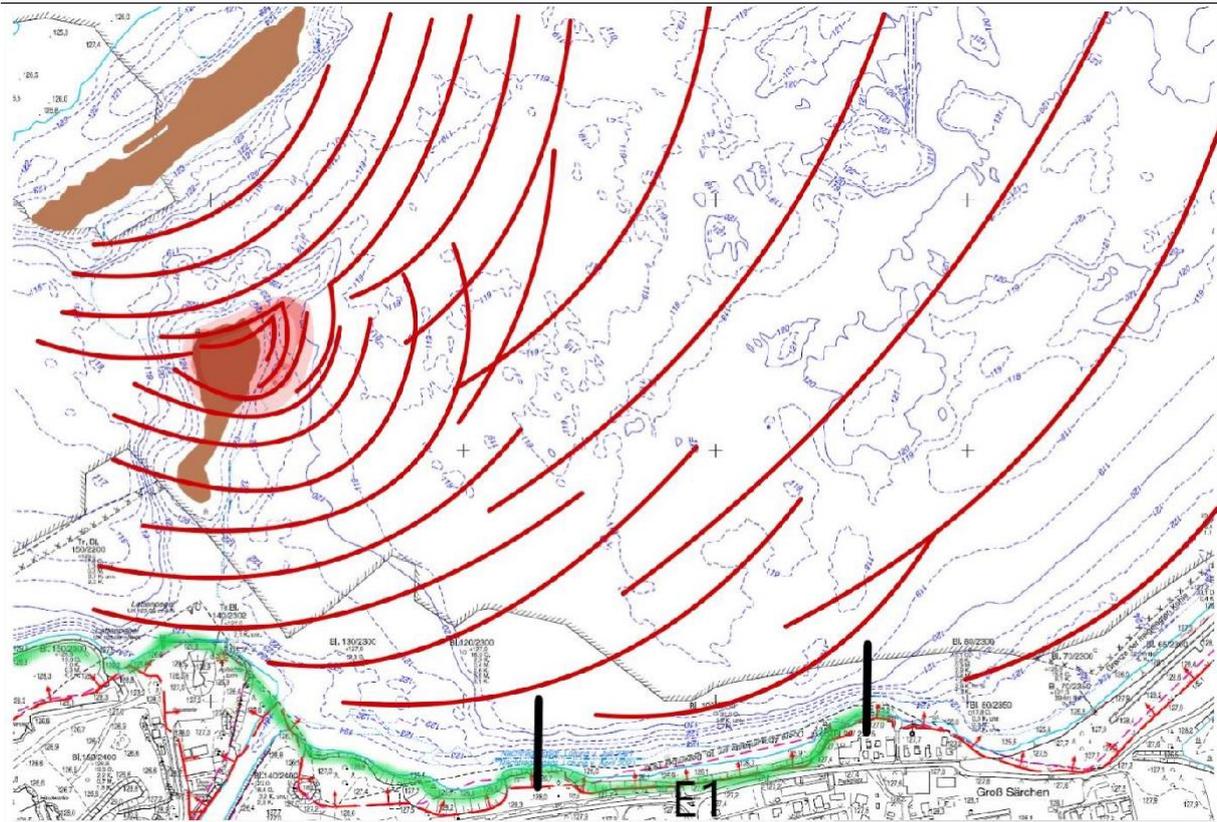


Abbildung 4.5: Grafische Darstellung der Wellenausbreitung im ungestörten Raum, Modellzustand B

## Wellenausbreitung im gestörten Raum

Bei der Wellenausbreitung im gestörten Raum erfolgte eine Beeinflussung der Welle durch die Insel und / oder die Störkörper (Versuche C bis F).

### Modellzustand F:

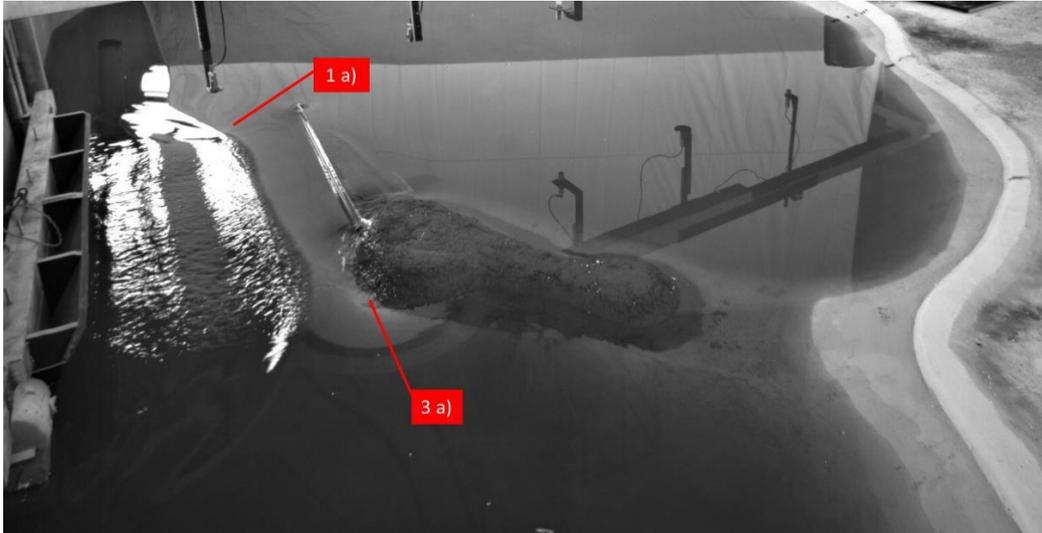


Abbildung 4.6: Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich nach der Welle

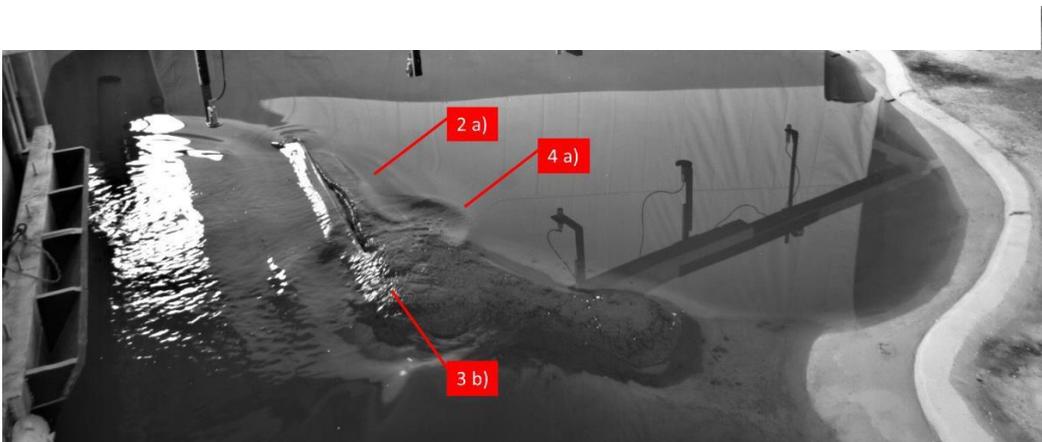


Abbildung 4.7: Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich auf Höhe des Störkörpers und Beginn der Insel

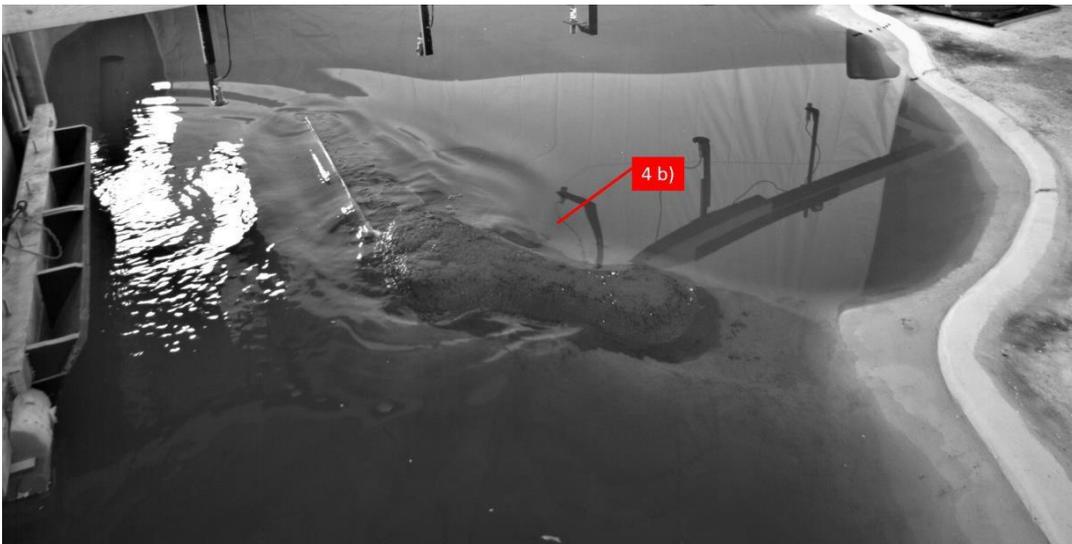


Abbildung 4.8: Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich Mitte der Insel



Abbildung 4.9: Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich Mitte bis Ende der Insel

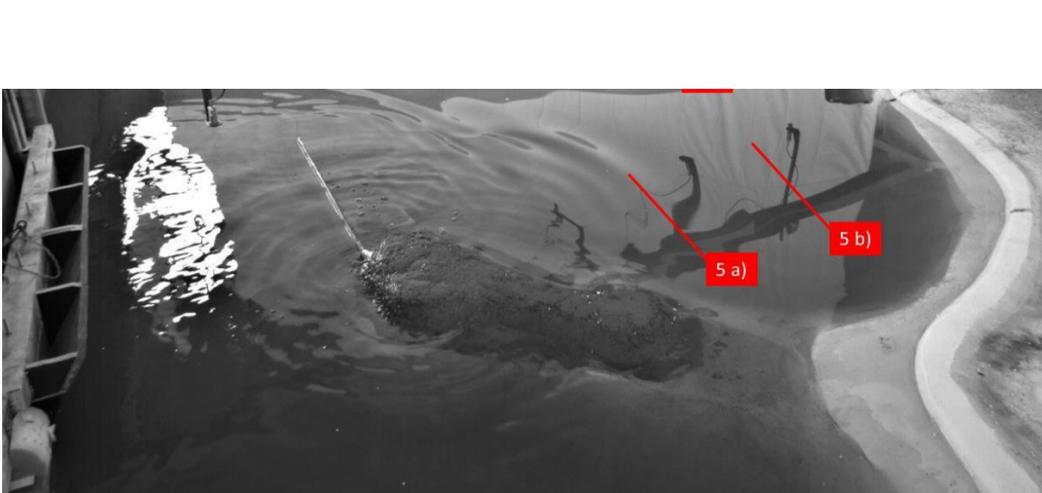


Abbildung 4.10: Wellenausbreitung im Modellzustand F, Bereich Ende der Insel bis Uferteilbereich E1

**Beschreibung der oberflächennahen Wellenausbreitung im Modellzustand C (mit Schlamm und Insel, ohne Störkörper):**

- 1) Bereich unmittelbar nach der Wellenerzeugung  
radiale Wellenausbreitung, Solitärwellenform
- 2) Bereich Beginn der Insel
  - a) Beschleunigung des Wassers durch Energieimpuls in Richtung Sohle → Wellental vor Welle an der Insel
  - b) nach Wellental → Auflaufen mit Wellenberg auf die Insel → teilweise Überspülung der Insel
- 3) Bereich auf Höhe der Insel
  - a) Wellenteilung
  - b) Diffraktion (Umwanderung der Insel von einem Teil der Welle) → Abgabe eines Teils der ursprünglichen Wellenenergie → sichtbar flachere Welle nach der Insel
  - c) WSP-Absenkung am Ufer vor dem Wellenauflauf
    - i) Auftreffen des Energieimpulses am Ufer noch vor der Welle
    - ii) Wasser wird in Richtung Sohle gedrückt
- 4) Bereich vor dem Uferteilbereich E1
  - a) Überlagerung beider Wellenteile nach der Insel
  - b) Vermischung der Ausbreitungsrichtung → weder radial noch transversal → Erkennung einer eindeutigen Solitärwellenform nicht mehr möglich
  - c) hohe Welle im östlichen Uferteilbereich E1 → großer Wellenauflauf
  - d) flache Welle im westlichen Uferteilbereich E1 (im Schatten der Insel) → geringerer Wellenauflauf

**Beschreibung der oberflächennahen Wellenausbreitung im Modellzustand D (mit Schlamm, Insel und Störkörper V1):**

- 1) Bereich unmittelbar nach der Wellenerzeugung  
radiale Wellenausbreitung, Solitärwellenform
- 2) Bereich auf Höhe des Störkörpers

keine sichtbare Veränderung der oberflächennahen Wellenausbreitung

- 3) Bereich Beginn der Insel
  - a) Beschleunigung des Wassers durch Energieimpuls in Richtung Sohle → Wellental vor Welle an der Insel
  - b) nach Wellental → Auflaufen mit Wellenberg auf die Insel → teilweise Überspülung der Insel
- 4) Bereich auf Höhe der Insel
  - a) Wellenteilung
  - b) Diffraktion (Umwanderung der Insel von einem Teil der Welle) → Abgabe eines Teils der ursprünglichen Wellenenergie
  - c) WSP-Absenkung am Ufer vor dem Wellenauflauf
    - i) Auftreffen des Energieimpulses am Ufer noch vor der Welle
    - ii) Wasser wird in Richtung Sohle gedrückt
- 5) Bereich vor dem Uferteilbereich E1
  - a) Überlagerung beider Wellenteile nach der Insel
  - b) Vermischung der Ausbreitungsrichtung → weder radial noch transversal → Erkennung einer eindeutigen Solitärwellenform nicht mehr möglich
  - c) hohe Welle im östlichen Uferteilbereich E1 → großer Wellenauflauf
  - d) flache Welle im westlichen Uferteilbereich E1 (im Schatten der Insel) → geringerer Wellenauflauf

**Beschreibung der oberflächennahen Wellenausbreitung im Modellzustand E (mit Schlamm, Insel und Störkörper V2):**

- 1) Bereich unmittelbar nach der Wellenerzeugung  
radiale Wellenausbreitung, Solitärwellenform
- 2) Bereich auf Höhe des Störkörpers
  - a) sichtbare Veränderung der oberflächennahen Wellenausbreitung
    - i) geringes Abflachen der Welle hinter dem Störkörper
- 3) Bereich Beginn der Insel

- a) Beschleunigung des Wassers durch Energieimpuls in Richtung Sohle → Wellental vor Welle an der Insel
  - b) nach Wellental → Auflaufen mit Wellenberg auf die Insel → teilweise Überspülung der Insel
- 4) Bereich auf Höhe der Insel
- a) Wellenteilung
  - b) Diffraktion (Umwanderung der Insel von einem Teil der Welle) → Abgabe eines Teils der ursprünglichen Wellenenergie
  - c) WSP-Absenkung am Ufer vor dem Wellenauflauf
    - i) unveränderter Durchgang des Energieimpulses im Wasserkörper trotz mittlerem Störkörper
    - ii) Auftreffen des Energieimpulses am Ufer vor der Welle
    - iii) Wasser wird in Richtung Sohle gedrückt
- 5) Bereich vor dem Uferteilbereich E1
- a) Überlagerung beider Wellenteile nach der Insel
  - b) Vermischung der Ausbreitungsrichtung → weder radial noch transversal → Erkennung einer eindeutigen Solitärwellenform nicht mehr möglich
  - c) hohe Welle im östlichen Uferteilbereich E1 → großer Wellenauflauf
  - d) flache Welle im westlichen Uferteilbereich E1 (im Schatten der Insel) → geringerer Wellenauflauf

**Beschreibung der oberflächennahen Wellenausbreitung im Modellzustand F (mit Schlamm, Insel und Störkörper V3):**

- 1) Bereich unmittelbar nach der Wellenerzeugung
  - radiale Wellenausbreitung, Solitärwellenform
- 2) Bereich auf Höhe des Störkörpers
  - a) sichtbare Veränderung der oberflächennahen Wellenausbreitung
    - i) starkes bis vollständiges Abflachen der Welle hinter dem Störkörper
    - ii) Reflexion eines Teils der Welle entgegen der ursprünglichen

### Ausbreitungsrichtung

- 3) Bereich Beginn der Insel
  - a) Beschleunigung des Wassers durch Energieimpuls in Richtung Sohle → Wellental vor Welle an der Insel
  - b) nach Wellental → Auflaufen mit Wellenberg auf die Insel → teilweise Überspülung der Insel
  
- 4) Bereich auf Höhe der Insel
  - a) Rückfluss des auf die Insel aufgelaufenen Wassers → Erzeugung einer kleinen Welle
  - b) Diffraktion (Umwanderung der Insel von kleiner Welle)
  - c) sehr geringe WSP-Absenkung am Ufer vor dem Wellenauflauf
    - i) Behinderung des Energieimpulses im Wasser durch den großen Störkörper → stark abgeschwächtes Auftreffen am Ufer → Wasser wird weniger beschleunigt und am Ufer kaum bis gar nicht in Richtung Sohle gedrückt

5) Bereich vor dem Uferteilbereich E1

- a) hauptsächlich radiale Ausbreitung der kleinen Welle
- b) flacher Wellenberg, Abnehmende Solitärwellenform in Richtung Ufer
- c) niedriger Wellenauflauf am gesamten Uferteilbereich E1

Die Auswertung der visuellen Aufnahmen ergab, dass sowohl die Insel als auch der überstaute Störkörper V2 mit einer Höhe von 123,0 m NHN und der Störkörper V3 über bzw. auf WSP-Lage mit einer Höhe von 126,0 m NHN die oberflächennahe Wellenausbreitung beeinflussen. Lediglich der überstaute Störkörper V1 mit einer Höhe von 122,0 m NHN bewirkte keine sichtbare Dämpfung der Welle. In der nachfolgenden Abb. 4.11 ist die oberflächennahe Wellenausbreitung im gestörten Raum für den Modellzustand F über den gesamten Modellbereich dargestellt.

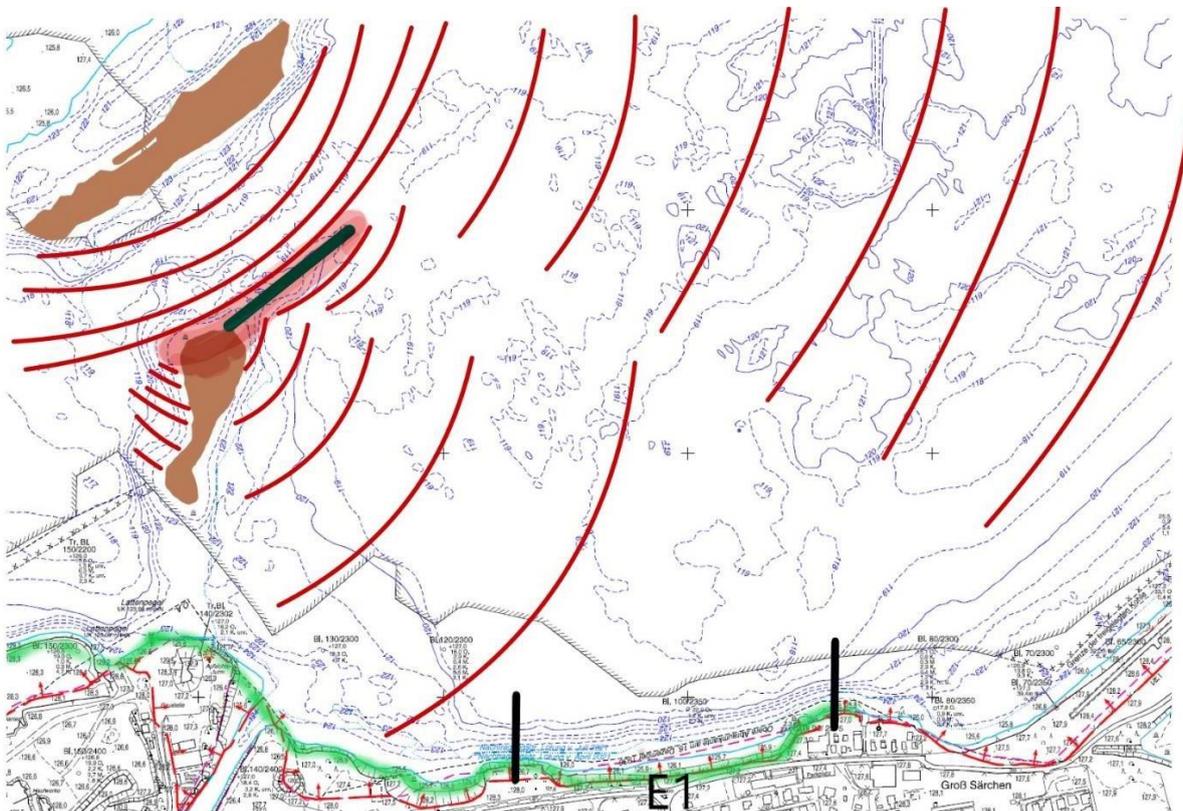


Abbildung 4.11: Grafische Darstellung der Wellenausbreitung im gestörten Raum, Modellzustand F

## Wellenausbreitung in Abhängigkeit von der Wellenhöhe

Das Hauptaugenmerk der Auswertung der Wellenhöhen lag im Gebiet vor dem Uferteilbereich E1, das mit dem Ultraschallsensor 1 untersucht wurde.

Für eine qualitative Einschätzung wurden jeweils die Quotienten aus der ersten Wellenhöhe nach der Wellenerzeugung (Sensor 5) sowie der letzten Wellenhöhe vor dem Ufer (Sensor 1) gebildet und für die verschiedenen Modellzustände miteinander verglichen.

### 1) Vergleich des Gesamtdurchschnitts der Wellenhöhenquotienten aller Modellzustände zur Ermittlung des Modellzustandes, bei dem die Wellenhöhe bis zum Uferteilbereich E1 am stärksten geschwächt wird und der somit den größten Einfluss auf die Wellenausbreitung hat.

- WSP-Lage 125,5 m NHN und 126,0 m NHN
- alle Fallkörpergrößen einbezogen
- alle Wellenhöhenziele einbezogen

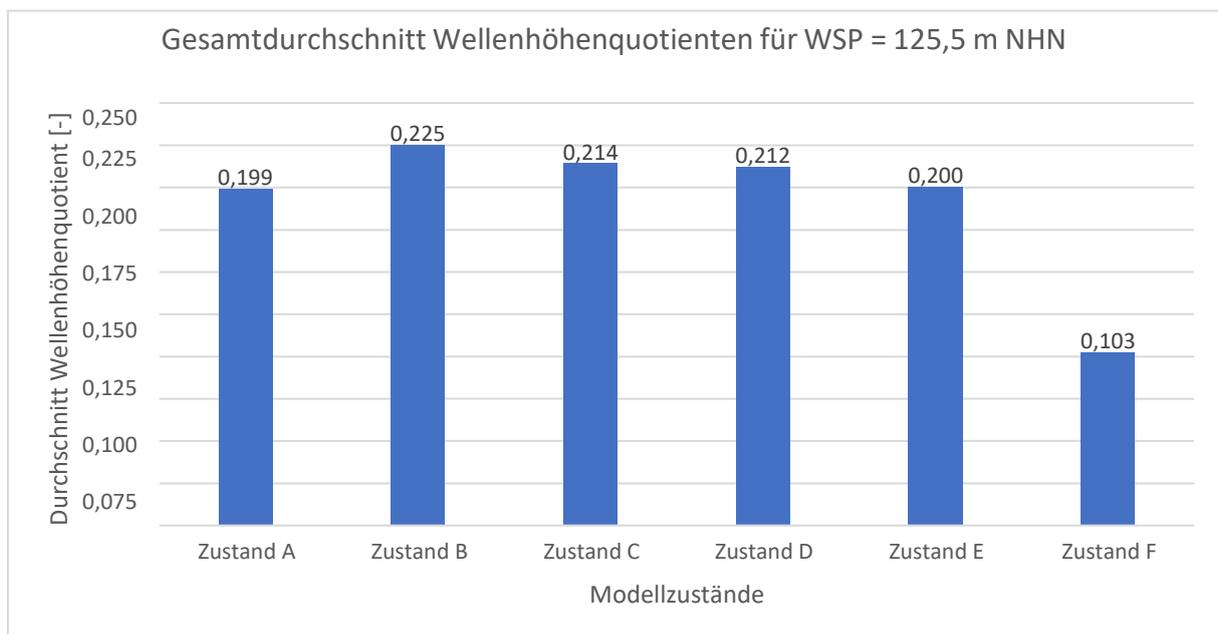


Abbildung 4.12: Wellenhöhenquotienten für WSP-Lage 125,5 m NHN

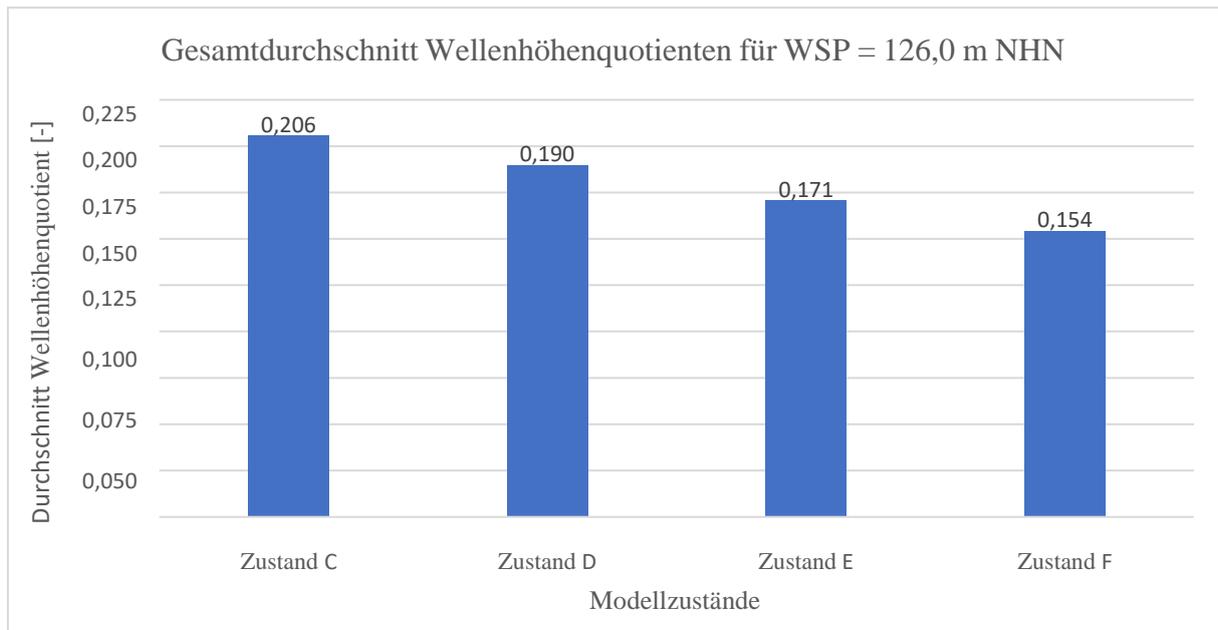


Abbildung 4.13: Wellenhöhenquotienten für WSP-Lage 126,0 m NHN

### Auswertung:

Die Diagramme (Abb. 4.12 und 4.13) zeigen den Gesamtdurchschnitt aller Wellenhöhenquotienten der entsprechenden Modellzustände für je eine WSP-Lage.

Für beide WSP-Lagen liegt im Durchschnitt im Zustand F der kleinste Quotient vor. Daraus lässt sich ableiten, dass der Störkörper V3 mit einer Höhe von 126,0 m NHN die Wellenhöhen am stärksten reduziert und somit die größte Wellendämpfung bewirkt.

Der Vergleich zeigt weiterhin, dass auch mit den Störkörpern V1 (Zustand D) und V2 (Zustand E) eine geringe wellendämpfende Wirkung erzielt werden konnte, trotz dass beide Einbauten im Gegensatz zu V3 vollständig unter Wasser waren. Bekräftigt werden kann dies durch Ergebnisse aus Detailversuchen, die bestätigten, dass auch Störkörper, die vollständig unter Wasser sind, eine dämpfende Wirkung auf Schwallwellen haben. Die Säulendiagramme in der Abb. 4.12 veranschaulichen zusätzlich den Einfluss der Insel auf die Wellenausbreitung, da im Zustand C (mit Insel) der Wellenquotient mehrheitlich kleiner ist als im Zustand B (ohne Insel). Dieser Vergleich verdeutlicht den positiven Beitrag der Insel zur Abschwächung und Ablenkung einer Welle bezüglich des Uferteilbereichs E1.

**2) Vergleich der Modellzustände C, D, E und F in Abhängigkeit unterschiedlicher WSP- Lagen zur Ermittlung des Einflusses der WSP-Lage und der ersten Wellenhöhe auf die Wellenausbreitung.**

- WSP-Lage 125,5 m NHN und 126,0 m NHN
- Fallkörpergröße gleichbleibend 100 %
- Vergleich der Wellenausbreitung anhand der Wellenquotienten aus der 1. und 5. Welle für beide WSP-Lagen und für die Modellzustände C, D, E und F

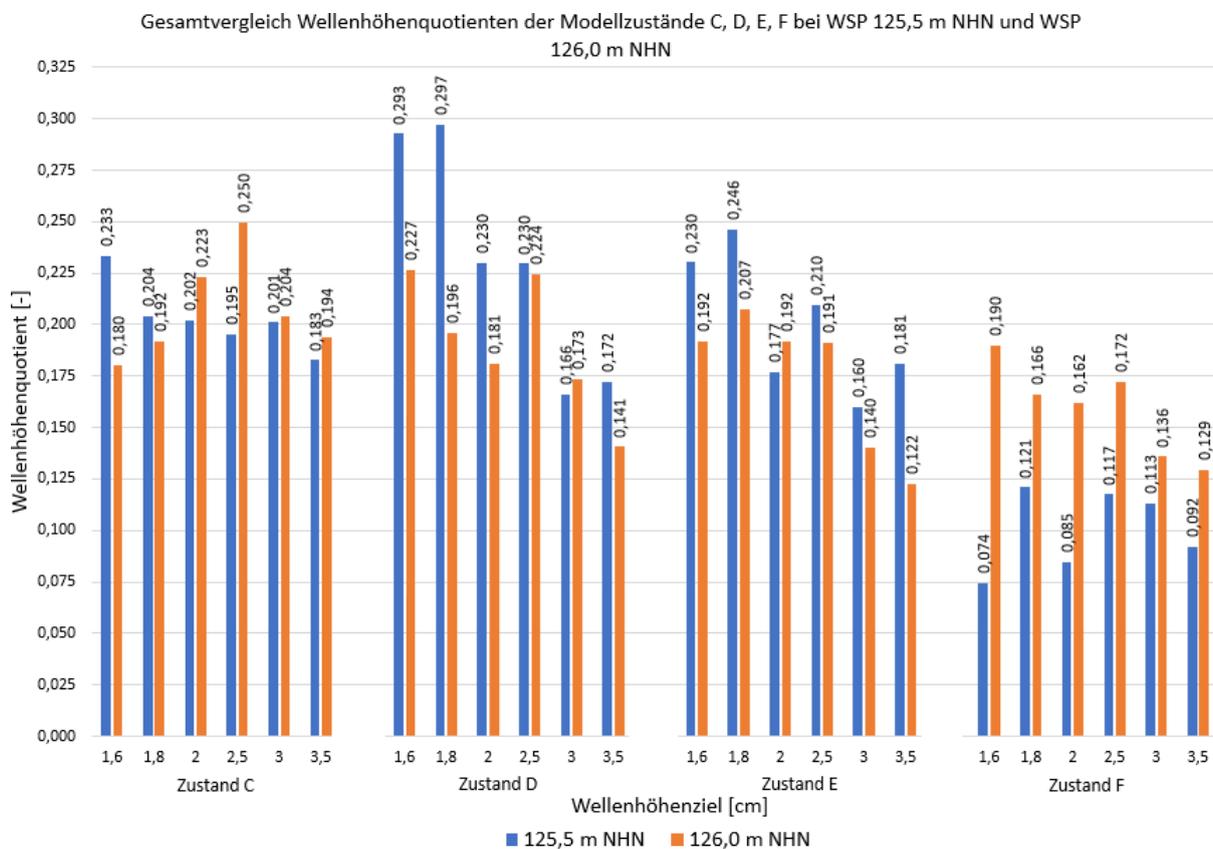


Abbildung 4.14: Gesamtvergleich der Wellenhöhenquotienten

**Auswertung:**

Der Gesamtvergleich der Modellzustände bei unterschiedlichen WSP-Lagen (Abb. 4.14) zeigt im Zustand F (Störkörper V3) deutlich größere Wellenquotienten bei einer WSP-Lage von 126,0 m NHN als bei 125,5 m NHN. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass im Zustand F die Wellendämpfung bei der WSP-Lage 126,0 m NHN verhältnismäßig kleiner ist als bei

der WSP-Lage 125,5 m NHN. Somit konnte die Abnahme der wellendämpfenden Wirkung dieses Störkörpers bei hoher WSP-Lage festgestellt werden. Die Ursache dafür ist die Zustandsänderung des Störkörpers. Bei einer WSP-Lage von 125,5 m NHN ist dessen Oberkannte über der Wasseroberfläche und bei einer WSP-Lage von 126,0 m NHN darunter bzw. beim Durchgang einer Welle gleich der Wasseroberfläche. Ergebnisse aus Detailversuchen zur Wirkung von Störkörpern in Unter- und Überwasserlage bestätigten, dass Störkörper über Wasser eine Welle stärker dämpfen als Störkörper unter Wasser. Diese Wirkungsänderung lässt sich zwischen den beiden WSP-Lagen im Zustand F eindeutig feststellen. Im Gegensatz dazu fällt die Änderung der Wellenhöhen in den Zuständen D und E in Abhängigkeit der zwei verschiedenen WSP-Lagen entgegengesetzt aus. Bei der WSP-Lage 126,0 m NHN liegen kleinere Wellenquotienten vor als bei der WSP-Lage 125,5 m NHN. Tendenziell nimmt daher die Dämpfung der Welle von der Erzeugung bis zum Erreichen des Ufers mit der Wasserhöhe zu. Somit beeinflussen weniger die Störkörper V1 und V2 die Welle, sondern mehr der Wasserkörper. Die Welle breitet sich bei gleicher Erzeugung in dem kleinen Wasserkörper (WSP-Lage 125,5 m NHN) stärker aus als in dem großen Wasserkörper (WSP-Lage 126,0 m NHN) (gleiche Beobachtung siehe Kap. 4.3.1). Die Wellendämpfung in den Zuständen D und E ist folglich weniger von den Störkörpern abhängig, sondern mehr von der WSP-Lage. Somit ist der Einfluss der Störkörper V1 und V2 auf die Wellenausbreitung sehr gering.

Die Auswertung der Wellenausbreitung in Abhängigkeit von der Wellenhöhe erbrachte die Erkenntnis, dass die Abnahme der Wellenhöhe über die Wellenquotienten bei höheren Wellen stärker ausfällt als bei niedrigeren Wellen. Das bedeutet, je höher die erste Welle nach der Erzeugung ist, desto größer fällt die verhältnismäßige Reduzierung derer Wellenhöhe bis zum Erreichen des Uferteilbereiches E1 aus. Eine mögliche Ursache dafür ist die Ablenkung der Wellen durch die Insel. Höhere Wellen besitzen eine größere Amplitude und dementsprechend eine größere Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Je schneller wiederum eine Welle auf ein Hindernis trifft, wie in diesem Fall auf die Insel, desto ausgeprägter ist auch die Ablenkung der Welle und desto niedriger fällt die Wellenhöhe im Uferteilbereich E1 aus.

### 3) Vergleich der Modellzustände in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fallkörpergrößen zur Ermittlung des Einflusses des Ortes der Wellenerzeugung auf die Wellenausbreitung zum Uferteilbereich E1

- WSP-Lage 125,5 m NHN und 126,0 m NHN
- Wellenhöhenziel gleichbleibend
- Fallkörpergröße veränderlich

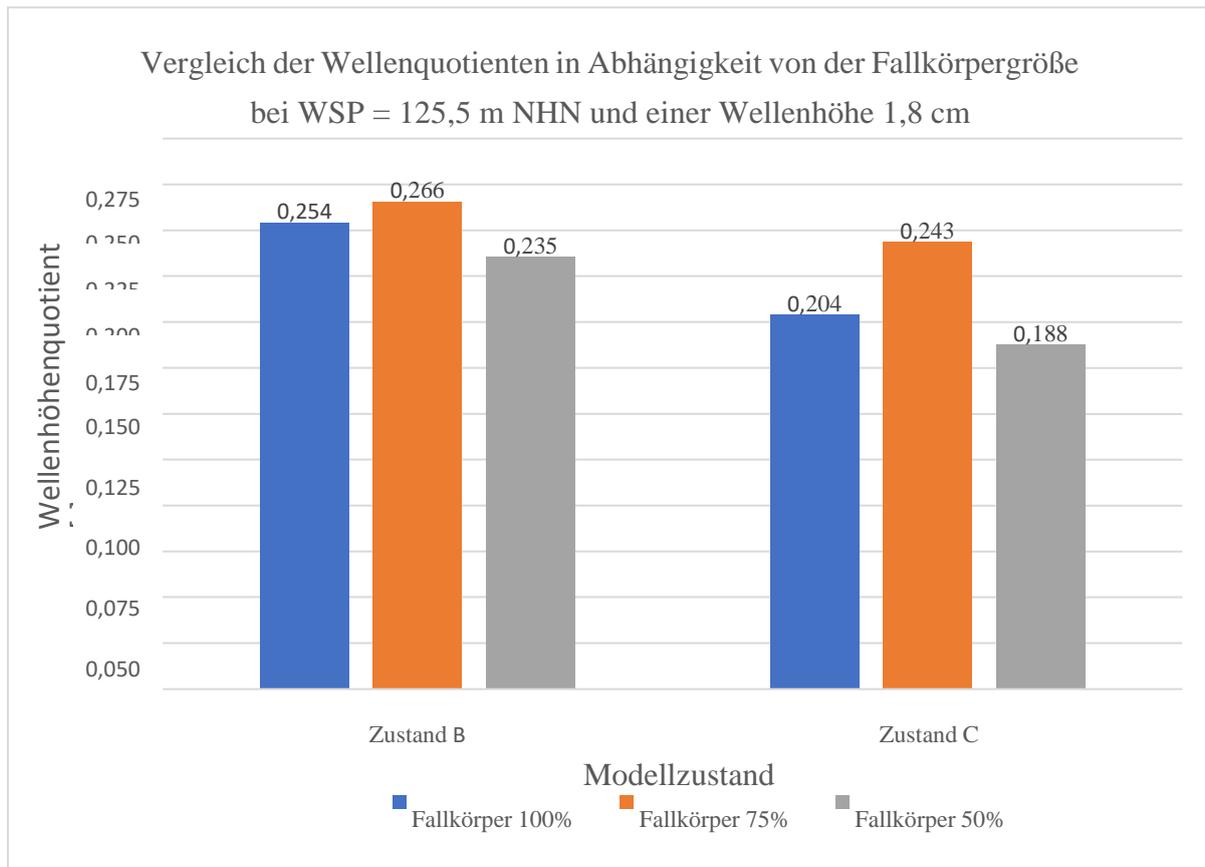


Abbildung 4.15: Wellenhöhenquotienten in Abhängigkeit von der Fallkörpergröße bei WSP-Lage 125,5 m NHN

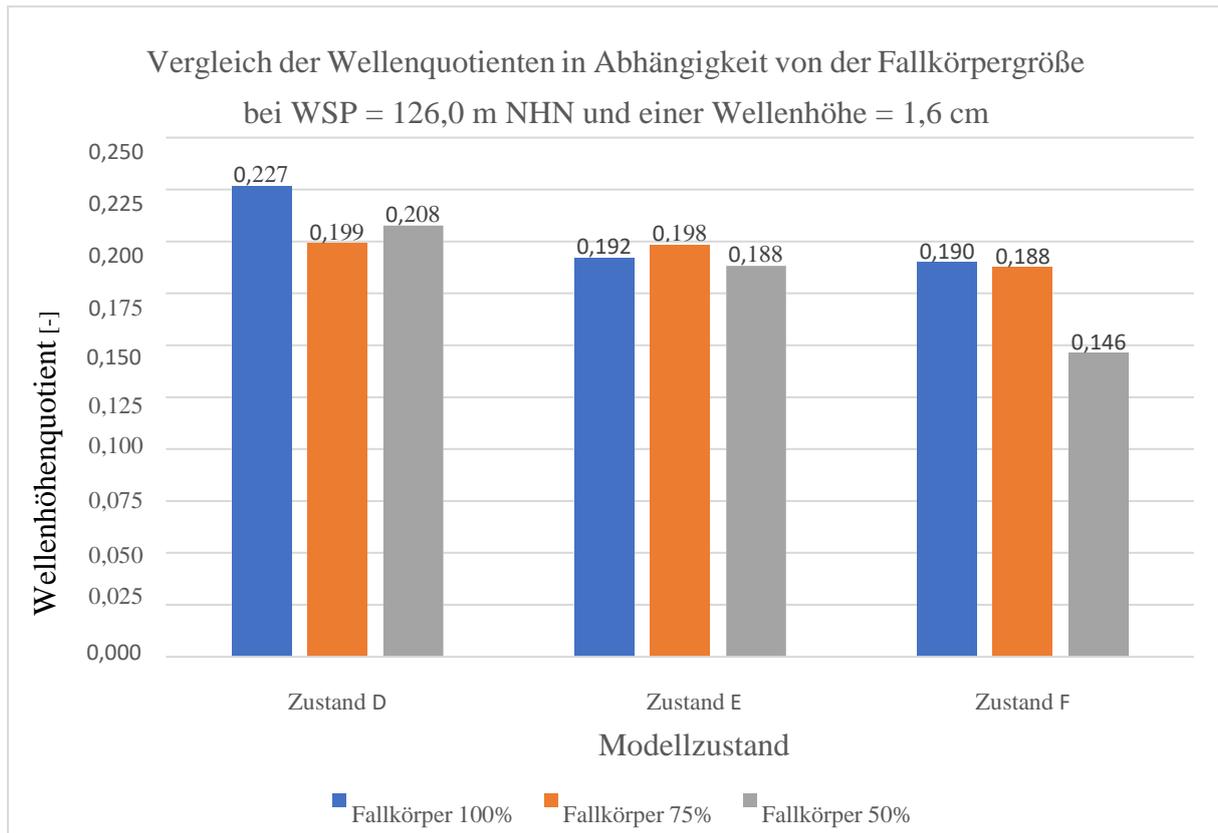


Abbildung 4.16: Wellenhöhenquotienten in Abhängigkeit von der Fallkörpergröße bei WSP-Lage 126,0 m NHN

### Auswertung:

Die grafische Darstellung der Wellenhöhenquotienten in Abhängigkeit vom Ort der Wellenerzeugung (Abb. 4.15 bzw. 4.16) zeigt eine Abnahme der Wellenhöhe lediglich im Zustand F mit abnehmender Größe der Rutschung, bzw. mit reduzierter Rutschungslänge. Für alle anderen Modelzustände und Störkörpervarianten lässt sich dieser Tendenz nicht feststellen. Demnach hat nur bei Vorhandensein des Störkörpers V3 eine segmentierte Wellenerzeugung einen Einfluss auf die Ablenkung und Reduzierung der Wellenhöhe, bezogen auf den Uferteilbereich E1. Der Ort der Wellenerzeugung hat für die Zustände B, C, D und E keine Auswirkung auf die Veränderung der Wellenhöhe im Uferteilbereich E1.

## Wellenausbreitung in Abhängigkeit der Bathymetrie und der Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit

Für die Untersuchung der Wellenentwicklung in Abhängigkeit der Bathymetrie bietet sich zum einen ein Vergleich der Modellzustände A (ohne Schlammablagerung) und B (mit Schlammablagerung) im Hinblick auf das Vorhandensein des Schlammes an, zum anderen die Auswertung der Entwicklung der Wellenhöhen bei einem Anstieg der Sohle des Sees in Uferrichtung.

### Einfluss von den Erdmassen

- WSP-Lage 125,5 m NHN
- Fallkörpervarianten: 100 %, 75 %, 50 %
- Vergleich Versuchsreihe A und B über die prozentuale Abnahme der Wellenhöhe von der Erzeugung bis zum Auftreffen am Uferteilbereich E1

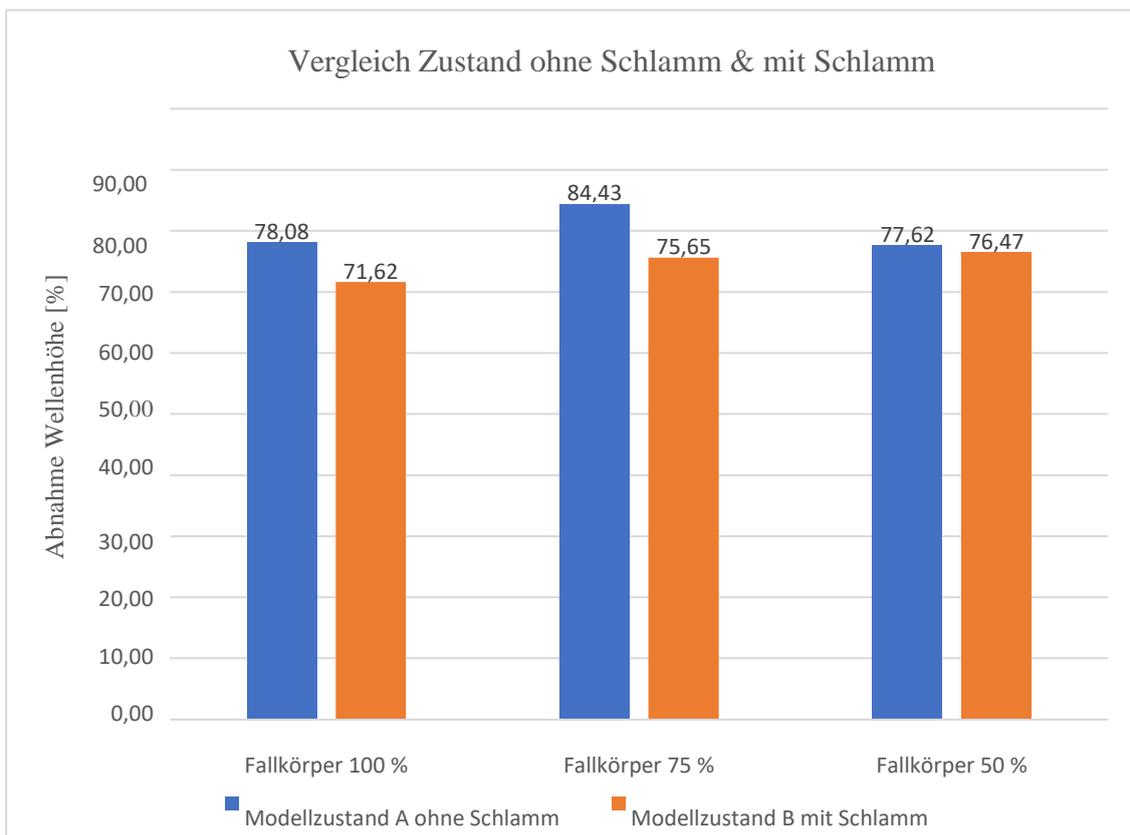


Abbildung 4.17: Wellenhöhenquotienten in Abhängigkeit von der Fallkörpergröße bei WSP-Lage 126,0 m NHN

**Auswertung:**

Für die drei unterschiedlichen Wellenerzeugungsarten bzw. Fallkörpervarianten 100, 75 und 50 % kann festgestellt werden, dass die prozentuale Abnahme der Wellenhöhe von der Wellenerzeugung bis zum Erreichen des Uferteilbereichs E1 im Zustand A ohne Schlamm größer ist als im Zustand B mit Schlamm (Abb. 4.17). Die Wassertiefe ist im Zustand ohne Schlamm größer, weshalb auch das Volumen des Wasserkörpers größer ist. Wird der Impuls, welcher in beiden Zuständen gleich groß ist, in den größeren Wasserkörper im Zustand A ohne Schlamm eingeleitet, so wird die Energie vom Wasser auch in einem höheren Maße absorbiert und die prozentuale Abnahme der Wellenhöhe vergrößert sich. Im Zustand B mit Schlamm ist das Volumen des Wasserkörpers kleiner, wodurch die Welle weniger gedämpft wird und die prozentuale Abnahme der Wellenhöhe geringer ausfällt. Folglich laufen ähnlich erzeugte Wellen im Zustand mit Schlamm höher am Uferteilbereich E1 auf als im Zustand ohne Schlamm.

In natura konnte der Schlamm nicht eindeutig klassifiziert werden, da bislang keine genauen Untersuchungen zu dessen Konsistenz erfolgten. Aus diesem Grund liegt kein Nachweis vor, dass der Schlamm als Feststoff wirkt, weshalb die Ergebnisse diesbezüglich mit einer gewissen Unsicherheit betrachtet werden müssen.

## Einfluss des Anstiegs des Gewässergrundes in Richtung Ufer

- Vergleich der Entwicklung der Wellenhöhen in Richtung Uferzone für alle Modellzustände, die mit beiden WSP-Lagen untersucht wurden (B-F) bei gleicher Wellenhöhe  $H = 2,0 \text{ cm}$
- WSP-Lage 125,5 m NHN und 126,0 m NHN

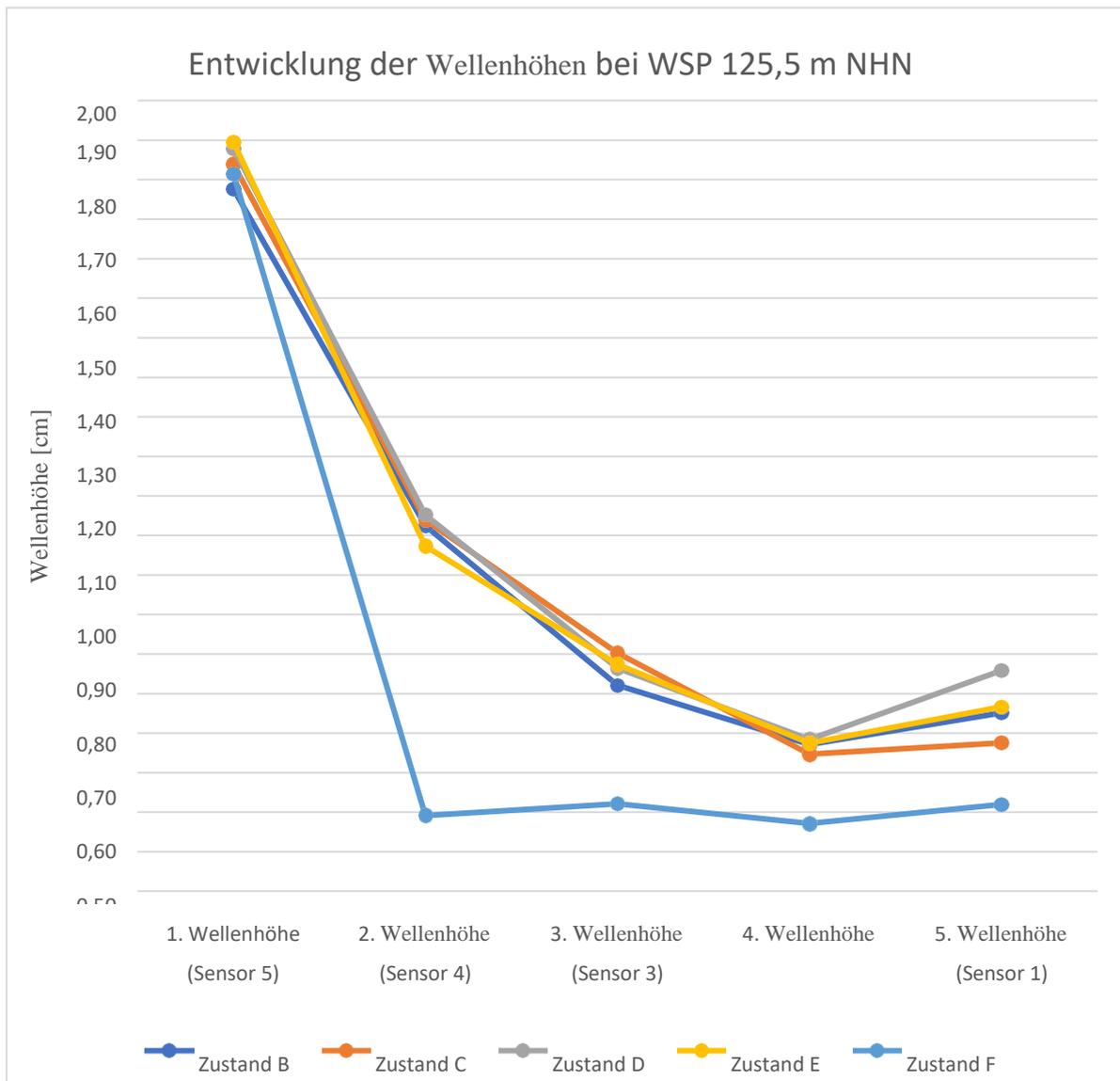
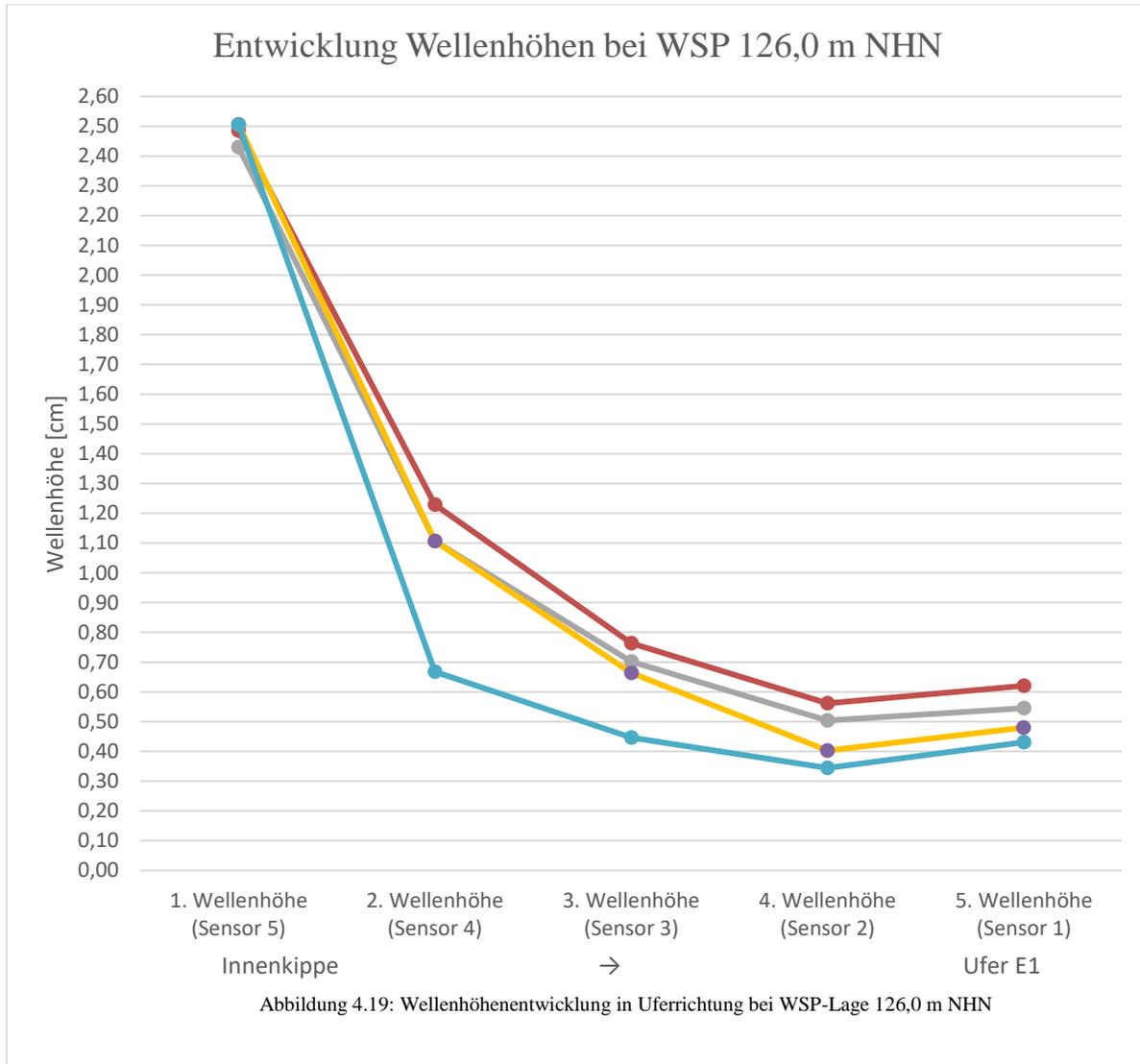


Abbildung 4.18: Wellenhöhenentwicklung in Uferichtung bei WSP-Lage 125,5 m NHN



### Auswertung:

Bei der WSP-Lage 125,5 m NHN und der WSP-Lage 126,0 m NHN zeigen die Diagramme in Abb. 4.18 und Abb. 4.19 eine leichte Zunahme der Wellenhöhe beim Erreichen der Uferzone, nachdem zuvor eine fortschreitende Abnahme der Wellenhöhe deutlich wurde. Sowohl für die Fallkörpervarianten 75 % und 50 % als auch für andere Wellenhöhen bestätigt sich diese Entwicklung. Die Zunahme der Wellenhöhe im Uferbereich belegt den Einfluss der Bathymetrie auf die oberflächennahe Wellenausbreitung. Dieses Phänomen wird als Shoaling bezeichnet und beschreibt die Zunahme der Wellenhöhe einer Flachwasserwelle im Uferbereich durch höhere Reibungsverluste aufgrund des Anstieges der Bathymetrie [3]. Zusammenfassend kann die Wellenausbreitung vor der Uferzone als immer stattfindender, von der WSP-Lage, der Fallkörpergröße und der Wellenhöhe unabhängiger, Wellenauflauf charakterisiert werden.

Darüber hinaus wird anhand des steilen Abfalls der Wellenhöhe zwischen Sensor 5 und Sensor 4

nochmals verdeutlicht, dass vor allem die Insel und die Störkörper für die Abflachung der Welle verantwortlich sind. Zwischen dem 2. und dem 4. Sensor ist der Rückgang der Welle hingegen deutlich geringer. Die Bathymetrie weist in diesem Bereich lediglich kleine Erhöhungen und Vertiefungen auf, die in natura weniger als einen Meter betragen und deshalb auch im Modell keinen maßgebenden Einfluss auf die Wellenausbreitung haben.

### **Abhängigkeit von der Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit**

Die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit für Schwallwellen mit Solitärwellenform berechnet sich wie folgt:

$$c = [g(h + a)]^{1/2} \quad (4.1)$$

mit

a [m] = Wellenamplitude = Wellenhöhe H (gilt nur für Solitärwellenform)

c [m/s] = Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit

g [m/s<sup>2</sup>] = Erdbeschleunigung

h [m] = Ruhewassertiefe

Aus der Gleichung (4.1) folgt, dass die Größe einer gemessenen Wellenhöhe ein Indikator für die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit ist. Die Wellenhöhe hängt wiederum von der Stärke des Impulses bzw. der Größe der Energie ab, mit der die Welle erzeugt wird. Solitärwellen zeichnen sich durch eine horizontale Wasserbewegung mit großem Massentransport aus. Das bedeutet, dass der wellenerzeugende Impuls des Rutsches zu einem großen Teil in kinematische Energie umgewandelt wird, mit der sich die Schwallwelle in horizontaler Ebene bewegt. Im Gegensatz zu anderen Wellenformen mit elliptischen Bewegungen, ist die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit von einer Solitärwelle aufgrund

ihrer horizontalen Wasserbewegung ein direktes Maß für deren kinematische Energie. Für die Wellenausbreitung bedeutet das, dass sich hohe Wellen schneller fortpflanzen als flache Wellen, da hohe Wellen mehr kinematische Energie besitzen.

In der Abbildung 4.20 sind die diesbezüglichen Ergebnisse in einem Diagramm dargestellt. Die prozentuale Abnahme der Wellenhöhen bis zum Uferbereich E1 steigt mit der Größe der ersten Wellenhöhe an. Daraus lässt sich eine stärkere Beeinflussung von größeren und sich schneller ausbreitenden Wellen durch die Insel und die Störkörper schlussfolgern. Die Art dieser Beeinflussung kann mit der Diffraktion beschrieben werden. Dabei umwandert die Welle ein Hindernis und gibt einen Teil ihrer Energie in den Wellenschatten ab. Dieses Phänomen fällt bei einer Welle mit großer Fortpflanzungsgeschwindigkeit stärker aus als bei einer Welle mit kleiner Fortpflanzungsgeschwindigkeit [3].

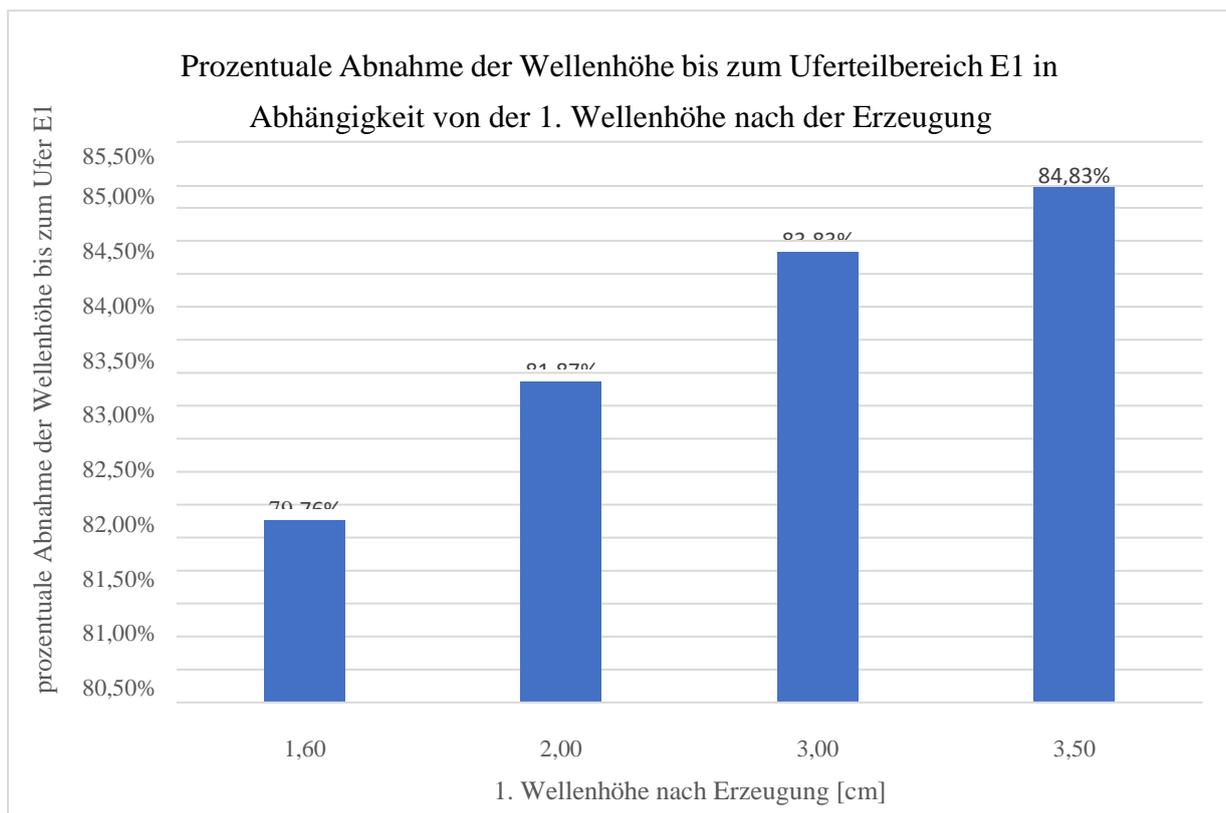


Abb. 4.20 Prozentuale Abnahme der Wellenhöhe von der Erzeugung bis zum Erreichen des Uferbereiches E1 für die Varianten C, D, E und F

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

### Visuelle Auswertung

1. Der Energieimpuls nach dem Eintauchen des Fallkörpers erreicht den Uferteilbereich E1 eher als die Impulswelle und bewirkt noch vor dem Auflaufen der Welle eine WSP-Absenkung am Ufer. (Kap. 4.1.1 und 4.1.2)
2. Unmittelbar nach ihrer Erzeugung durch den Impuls, breitet sich die Schwallwelle radial dreidimensional in Solitärwellenform aus. (Kap. 4.1.1 und 4.1.2)
3. Die fragmentarische Insel beeinflusst (Versuche A und B) die Wellenausbreitung. Es treten Wirbel und Ablösungen auf Höhe der Insel auf. (Kap. 4.1.1)
4. In Anwesenheit der fragmentarischen Insel und in Abwesenheit der Störkörper breitet sich die Welle vor dem Uferteilbereich E1 nahezu ungestört aus. (Kap. 4.1.1)
5. Für den Zustand der vollständigen Insel konnte ermittelt werden, dass die Schwallwellen zuerst an der Insel auflaufen und diese danach umwandern. Dieses Wellenphänomen kann als Diffraktion klassifiziert werden. Ein Teil der Wellenenergie wird dadurch in den Wellenschatten abgeben und die Welle pflanzt sich nach der Insel flacher in Richtung Ufer fort. (Kap. 4.1.2)
6. Der überstaute Störkörper V1 mit einer Naturhöhe von 122,0 m NHN bewirkt kein sichtbares Abflachen der Welle (Versuch D), der überstaute Störkörper V2 mit einer Naturhöhe von 123,0 m NHN ein leichtes Abflachen (Versuch E). Der Störkörper V3 mit einer Höhe von 126,0 m NHN flacht die Welle deutlich ab und reflektiert die Welle teilweise entgegen ihrer Ausbreitungsrichtung (Versuch F). (Kap. 4.1.2)
7. Aufgrund der minimalen WSP-Absenkung am Ufer vor dem Auflaufen der Welle im Modellzustand F wird deutlich, dass der Störkörper V3 den Durchgang des Energieimpulses durch den Wasserkörper behindert. (Kap. 4.1.2)

### Auswertung der Ultraschallmessungen

1. Die stärkste Abflachung einer Schwallwelle bezüglich des Uferteilbereichs E1 erfolgt im Modellzustand F durch den Störkörper V3. (Kap. 4.2)
2. Eine Änderung der WSP-Lage hat nur bei dem Störkörper V3 einen Einfluss auf dessen wellendämpfende Wirkung. Diese ist bei einem WSP von 126,0 m NHN (Naturhöhe) geringer, weil der Störkörper dabei teilweise überstaute ist. Somit beeinflussen überstaute

- Störkörper die Schwallwellen in geringerem Maße als Störkörper über WSP-Lage. (Kap. 4.2)
3. Bei der WSP-Lage von 126,0 m NHN wird die Welle durch den größeren Wasserkörper stärker gedämpft als bei der WSP-Lage von 125,5 m NHN. (Kap. 4.2)
  4. Die prozentuale Abnahme der Wellenhöhen von der Erzeugung bis zum Erreichen des Uferteilbereiches E1 fällt stärker aus bei Wellen, die zu Beginn eine größere Wellenhöhe haben. (Kap. 4.2)
  5. Der Ort der Wellenerzeugung wirkt sich nur im Modellzustand F mit dem Störkörper V3 direkt auf die Wellenausbreitung aus. Je kleiner die segmentierte Welle dabei ist bzw. je geringer die Fallkörpergröße ist, desto schwächer ist die Wellenausbreitung am Uferteilbereich E1. (Kap. 4.2)
  6. Wirkt der Schlamm auf dem Grund des Sees als Festkörper, so reduziert sich die Größe des Wasserkörpers gegenüber dem Zustand ohne Schlamm. Dadurch werden Wellen im Zustand mit Schlamm schwächer gedämpft und breiten sich bis zum Uferteilbereich E1 mit einer größeren Wellenhöhe aus als im Zustand ohne Schlamm. (Kap. 4.3.1)
  7. Die Bathymetrie wirkt sich auf die oberflächennahe Wellenausbreitung aus. Der Unterwasserbereich der Insel und die Störkörper bewirken dabei ein Abflachen der Welle und der steile Anstieg des Uferbereichs trägt zu einer Vergrößerung der Wellenhöhe unmittelbar vor dem Ufer bei. (Kap. 4.3.2)
  8. Eine Welle mit großer Wellenhöhe pflanzt sich schneller fort als eine Welle mit kleiner Wellenhöhe. Bei Wellen mit großer Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit lässt sich eine größere Refraktion am Ufer und eine deutlichere Diffraktion der Welle infolge der Insel und des Störkörpers beobachten als bei langsamen Wellen mit kleinen Wellenhöhen. (Kap. 4.3.3)
  9. Die Wellenausbreitung der Schwallwelle im Knappensee lässt sich nicht mit den standardisierten Formeln für eine 2-dimensionale transversale Wellenausbreitung berechnen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit von prototyp-spezifischen Modellversuchen zur Untersuchung derartiger Problemstellungen. (Kap. 4.5)

## 7 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen am physikalischen Modell des Knappensees ermöglichten die qualitative Bestimmung der Ausbreitung von Schwallwellen im stehenden Wasserkörper. Neben der Insel und der Bathymetrie, haben auch die künstlichen Störkörper, die als Inselerweiterung fungieren, einen Einfluss auf die durch eine Rutschung der Innenkippe erzeugte Impulswelle, wie mit Hilfe der Versuche gezeigt werden konnte. Die Welle wird durch diese Hindernisse auf unterschiedliche Weise gedämpft und geschwächt, sodass sie am Uferteilbereich E1 flacher auftritt. Im Gegensatz dazu können keine quantitativen Ergebnisse vorgestellt werden, wie bereits im Vorfeld der Untersuchungen angekündigt wurde. Aufgrund von Modellimperfektionen war es nicht möglich, absolute Messwerte zu generieren, die ohne Fehlerbehaftung direkt auf das Naturbauwerk übertragen werden können. Somit ist es zwar nicht möglich, eine Aussage zur genauen Wellenhöhe vor dem Uferteilbereich E1 in Abhängigkeit von den verschiedenen Modellzuständen zu machen, jedoch können Störkörper als Inselerweiterung zur Schwächung der Schwallwelle im Uferteilbereich E1 empfohlen werden. Die Untersuchungen zeigten, dass die Wellenausbreitung von den konkreten Gegebenheiten abhängig und nicht auf andere Problemstellungen übertragbar ist.

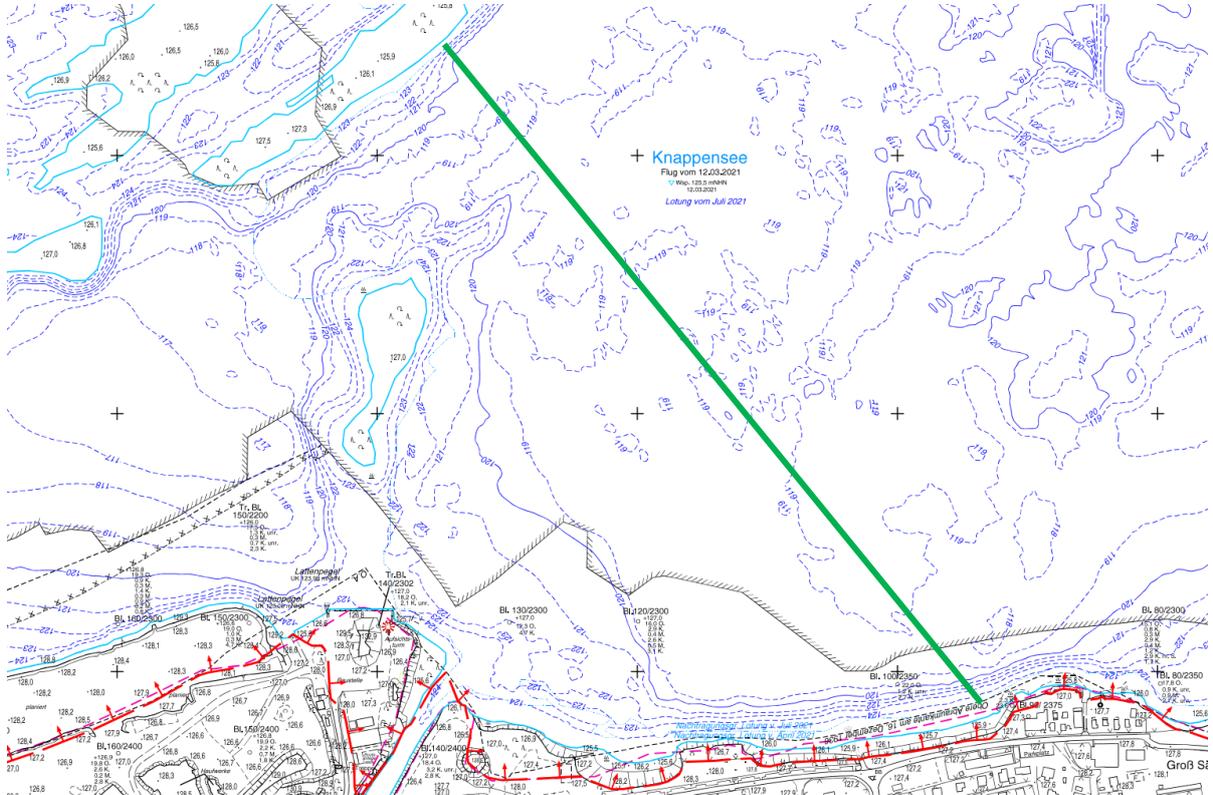
## Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.lausitzerseenland.de/de/die-seen/artikel-knappensee.html>; [22.11.2021]
- [2] Cramer (2021, 11. März). *Sächsisches Oberbergamt: Rutschungsereignis am Knappensee*.  
<https://www.medien-service.sachsen.de/medien/news/248559>
- [3] Heller, V., Hager, W.H. und Minor, H.-E. (2008).  
*Rutscherzeugte Impulswellen in Stauseen: Grundlagen und Berechnung*. Mitteilungen 206, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), H.-E. Minor, Hrsg. ETH Zürich.
- [4] Zweifel, A. (2004).  
*Impulswellen: Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe*.  
Dissertation, ETH Zürich
- [5] Werner Albring und die Ähnlichkeitsmechanik; Der Forscher und der Zweifler : Werner Albring zum 90. Geburtstag ; Vorträge des Ehrenkolloquiums am 28. September 2004. Herausgegeben von der Berlin Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Berlin 2005, S. 57-77.
- [6] Bauer, G. (1923): *Der Schiffsmaschinenbau/Die Theorie des Dampfmaschinenprozesses, die Konstruktion der Kolbendampfmaschinen, Theorie und Konstruktion der Schiffschraube sowie einen theoretischen Anhang*. Reprint 2019. Berlin.
- [7] Aigner Skript Experimentalhydraulik (2007): *Hydraulisches Versuchswesen; Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik Technische Universität Dresden*
- [8] Detlef Aigner, Gerhard Bollich, Dirk Carstensen, Hans-Jörg G. Diersch, Hans-Burkhard Horlacher: *Technische Hydromechanik 4, Hydraulische und numerische Modelle*; 3. Auflage,  
Berlin Verl. für Bauwesen; Beuth
- [9] Schuth, Michael; Buerakov, Wassili (2017):  
*Handbuch optische Messtechnik. Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung*; Verlag Hanser, München

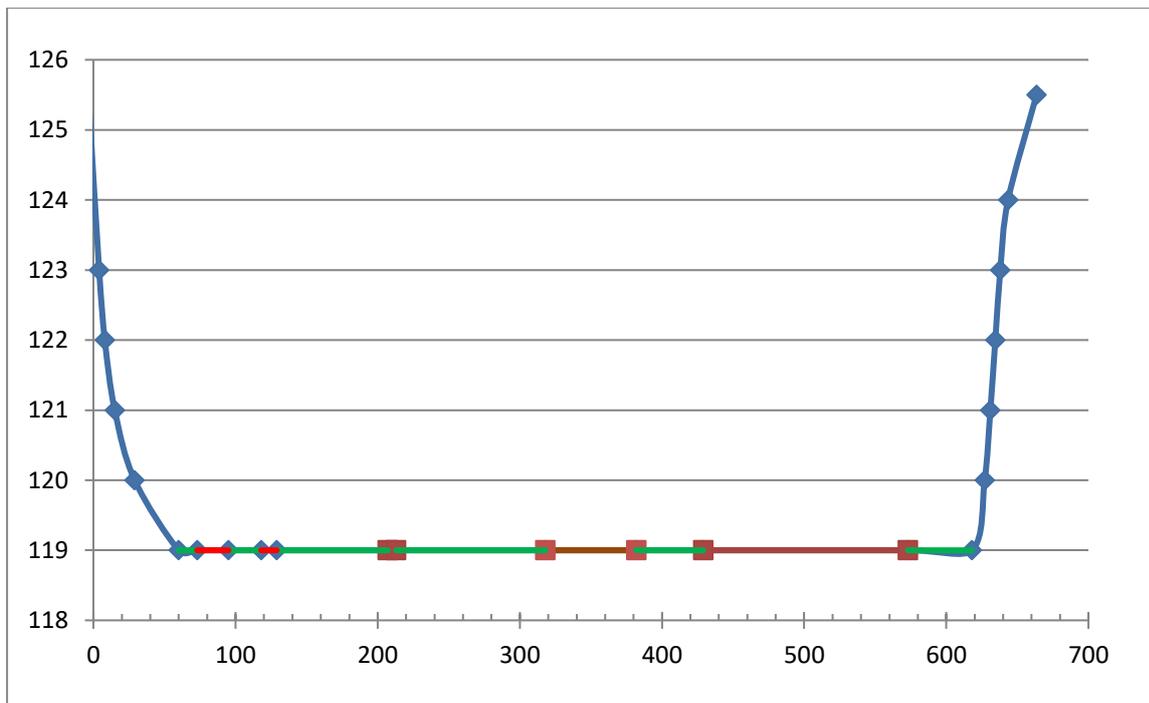
## **Anlage**

# **Ermittlung der Wellenlaufzeiten bei Rutschung im Knappensee als Vorlage für die Vorwarnzeit**

Auf der Grundlage der Lotung von Juli 2021 wurde das Sohlprofil für den grün eingetragenen Laufweg der Welle ermittelt.



Es ergibt sich damit folgendes Profil:



Es wird abgeschätzt, dass die im Juli 2021 gelotete Seesohle noch weiteren Konsolidierungen unterliegt. Aufgrund dessen wurde mit einer gleichbleibenden Höhe der Sohle von 119 m NHN gerechnet.

Damit ergeben sich folgende Laufzeiten (s. Tabellen):

**Ermittlung der Wellenlaufzeiten bei Rutschung im Knappensee**

| Wasserspiegel [m NHN]             |         |       | 125,5          |                | 0,50 Wellenhöhe [m] |          |               | 1,00 Wellenhöhe [m] |                 |          |               |  |
|-----------------------------------|---------|-------|----------------|----------------|---------------------|----------|---------------|---------------------|-----------------|----------|---------------|--|
| <b>Vereinfachter Naturzustand</b> |         |       |                |                |                     |          |               |                     |                 |          |               |  |
| Sohlprofil entlang Laufweg        |         |       |                |                |                     |          |               | Laufzeit            |                 | Laufzeit |               |  |
| Station                           | Höhe    | Länge | mittlere Tiefe | mittlere Tiefe | Geschw.             | Laufzeit | kumulativ     | mittlere Tiefe      | Geschwindigkeit | Laufzeit | kumulativ     |  |
| [m]                               | [m NHN] | [m]   | [m]            | [m]            | [m/s]               | [s]      | [s]           | [m]                 | [m/s]           | [s]      | [s]           |  |
| -3,5                              | 125,5   | 7,5   | 1,25           | 1,75           | 4,143               | 1,810    | 1,810         | 2,25                | 4,698           | 1,596    | 1,596         |  |
| 4                                 | 123     | 4     | 3              | 3,5            | 5,860               | 0,683    | 2,493         | 4,00                | 6,264           | 0,639    | 2,235         |  |
| 8                                 | 122     | 7     | 4              | 4,5            | 6,644               | 1,054    | 3,546         | 5,00                | 7,004           | 0,999    | 3,234         |  |
| 15                                | 121     | 14    | 5              | 5,5            | 7,345               | 1,906    | 5,452         | 6,00                | 7,672           | 1,825    | 5,059         |  |
| 29                                | 120     | 31    | 6              | 6,5            | 7,985               | 3,882    | 9,334         | 7,00                | 8,287           | 3,741    | 8,800         |  |
| 60                                | 119     | 13    | 6,5            | 7              | 8,287               | 1,569    | 10,903        | 7,50                | 8,578           | 1,516    | 10,316        |  |
| 73                                | 119     | 22    | 6,5            | 7              | 8,287               | 2,655    | 13,558        | 7,50                | 8,578           | 2,565    | 12,881        |  |
| 95                                | 119     | 23    | 6,5            | 7              | 8,287               | 2,776    | 16,334        | 7,50                | 8,578           | 2,681    | 15,562        |  |
| 118                               | 119     | 11    | 6,5            | 7              | 8,287               | 1,327    | 17,661        | 7,50                | 8,578           | 1,282    | 16,844        |  |
| 129                               | 119     | 78    | 6,5            | 7              | 8,287               | 9,413    | 27,074        | 7,50                | 8,578           | 9,093    | 25,938        |  |
| 207                               | 119     | 6     | 6,5            | 7              | 8,287               | 0,724    | 27,798        | 7,50                | 8,578           | 0,699    | 26,637        |  |
| 213                               | 119     | 105   | 6,5            | 7              | 8,287               | 12,671   | 40,468        | 7,50                | 8,578           | 12,241   | 38,879        |  |
| 318                               | 119     | 64    | 6,5            | 7              | 8,287               | 7,723    | 48,192        | 7,50                | 8,578           | 7,461    | 46,340        |  |
| 382                               | 119     | 47    | 6,5            | 7              | 8,287               | 5,672    | 53,863        | 7,50                | 8,578           | 5,479    | 51,819        |  |
| 429                               | 119     | 144   | 6,5            | 7              | 8,287               | 17,377   | 71,241        | 7,50                | 8,578           | 16,788   | 68,607        |  |
| 573                               | 119     | 45    | 6,5            | 7              | 8,287               | 5,430    | 76,671        | 7,50                | 8,578           | 5,246    | 73,853        |  |
| 618                               | 119     | 9     | 6              | 6,5            | 7,985               | 1,127    | 77,798        | 7,00                | 8,287           | 1,086    | 74,939        |  |
| 627                               | 120     | 4     | 5              | 5,5            | 7,345               | 0,545    | 78,343        | 6,00                | 7,672           | 0,521    | 75,461        |  |
| 631                               | 121     | 3,5   | 4              | 4,5            | 6,644               | 0,527    | 78,869        | 5,00                | 7,004           | 0,500    | 75,961        |  |
| 634,5                             | 122     | 3,5   | 3              | 3,5            | 5,860               | 0,597    | 79,467        | 4,00                | 6,264           | 0,559    | 76,519        |  |
| 638                               | 123     | 5,5   | 2              | 2,5            | 4,952               | 1,111    | 80,577        | 3,00                | 5,425           | 1,014    | 77,533        |  |
| 643,5                             | 124     | 20    | 0,75           | 1,25           | 3,502               | 5,711    | <b>86,289</b> | 1,75                | 4,143           | 4,827    | <b>82,360</b> |  |

**Ermittlung der Wellenlaufzeiten bei Rutschung im Knappensee**

| Wasserspiegel [m NHN]      |         |       | 123,00         | 0,40 Wellenhöhe [m] |                 |          |                | 1,00 Wellenhöhe [m] |                 |          |                |
|----------------------------|---------|-------|----------------|---------------------|-----------------|----------|----------------|---------------------|-----------------|----------|----------------|
| <b>Ebenes Modell</b>       |         |       |                |                     |                 |          |                |                     |                 |          |                |
| Sohlprofil entlang Laufweg |         |       |                |                     |                 | Laufzeit |                |                     | Laufzeit        |          |                |
| Station                    | Höhe    | Länge | mittlere Tiefe | mittlere Tiefe      | Geschwindigkeit | Laufzeit | kumulativ      | mittlere Tiefe      | Geschwindigkeit | Laufzeit | kumulativ      |
| [m]                        | [m NHN] | [m]   | [m]            | [m]                 | [m/s]           | [s]      | [s]            | [m]                 | [m/s]           | [s]      | [s]            |
| 4                          | 123     | 4     | 0,5            | 0,9                 | 2,971           | 1,346    | 1,346          | 1,50                | 3,836           | 1,043    | 1,043          |
| 8                          | 122     | 7     | 1,5            | 1,9                 | 4,317           | 1,621    | 2,968          | 2,50                | 4,952           | 1,413    | 2,456          |
| 15                         | 121     | 14    | 2,5            | 2,9                 | 5,334           | 2,625    | 5,592          | 3,50                | 5,860           | 2,389    | 4,845          |
| 29                         | 120     | 31    | 3,5            | 3,9                 | 6,185           | 5,012    | 10,604         | 4,50                | 6,644           | 4,666    | 9,511          |
| 60                         | 119     | 13    | 4              | 4,4                 | 6,570           | 1,979    | 12,583         | 5,00                | 7,004           | 1,856    | 11,367         |
| 73                         | 119     | 22    | 4              | 4,4                 | 6,570           | 3,349    | 15,931         | 5,00                | 7,004           | 3,141    | 14,509         |
| 95                         | 119     | 23    | 4              | 4,4                 | 6,570           | 3,501    | 19,432         | 5,00                | 7,004           | 3,284    | 17,793         |
| 118                        | 119     | 11    | 4              | 4,4                 | 6,570           | 1,674    | 21,107         | 5,00                | 7,004           | 1,571    | 19,363         |
| 129                        | 119     | 78    | 4              | 4,4                 | 6,570           | 11,872   | 32,979         | 5,00                | 7,004           | 11,137   | 30,501         |
| 207                        | 119     | 6     | 4              | 4,4                 | 6,570           | 0,913    | 33,892         | 5,00                | 7,004           | 0,857    | 31,357         |
| 213                        | 119     | 105   | 4              | 4,4                 | 6,570           | 15,982   | 49,874         | 5,00                | 7,004           | 14,992   | 46,350         |
| 318                        | 119     | 64    | 4              | 4,4                 | 6,570           | 9,741    | 59,615         | 5,00                | 7,004           | 9,138    | 55,488         |
| 382                        | 119     | 47    | 4              | 4,4                 | 6,570           | 7,154    | 66,769         | 5,00                | 7,004           | 6,711    | 62,199         |
| 429                        | 119     | 144   | 4              | 4,4                 | 6,570           | 21,918   | 88,687         | 5,00                | 7,004           | 20,561   | 82,760         |
| 573                        | 119     | 45    | 4              | 4,4                 | 6,570           | 6,849    | 95,537         | 5,00                | 7,004           | 6,425    | 89,185         |
| 618                        | 119     | 9     | 3,5            | 3,9                 | 6,185           | 1,455    | 96,992         | 4,50                | 6,644           | 1,355    | 90,539         |
| 627                        | 120     | 4     | 2,5            | 2,9                 | 5,334           | 0,750    | 97,742         | 3,50                | 5,860           | 0,683    | 91,222         |
| 631                        | 121     | 3,5   | 1,5            | 1,9                 | 4,317           | 0,811    | 98,552         | 2,50                | 4,952           | 0,707    | 91,929         |
| 634,5                      | 122     | 3,5   | 0,5            | 0,9                 | 2,971           | 1,178    | 99,730         | 1,50                | 3,836           | 0,912    | 92,841         |
| 638                        | 123     | 5,5   |                | 0,4                 | 1,981           | 2,777    | <b>102,507</b> | 1,00                | 3,132           | 1,756    | 94,597         |
| 643,5                      | 124     | 20    |                |                     |                 |          |                | 1,00                | 3,132           | 6,386    | <b>100,983</b> |
| 663,5                      | 125,5   |       |                |                     |                 |          |                |                     |                 |          |                |



## Zusammenfassung

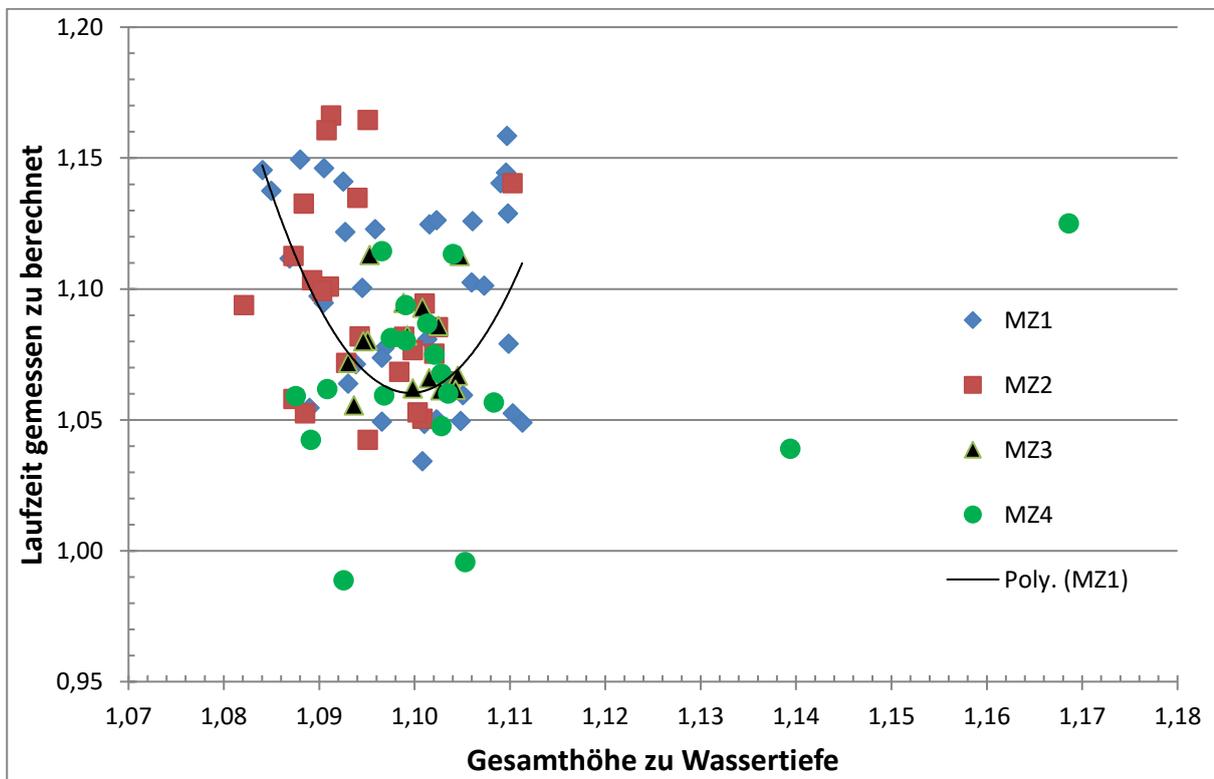
Die berechneten Wellenlaufzeiten für den Naturzustand, auf Grundlage der Lotung vom Juli 2021, betragen in Abhängigkeit der Wellenhöhe:

- bei Wasserspiegel auf 125,5 m NHN und Wellenhöhe 0,5 m: **86,3 s**
- bei Wasserspiegel auf 125,5 m NHN und Wellenhöhe 1,0 m: **82,4 s**

Um die Versuche am ebenen Modell auf die theoretischen Wellenhöhen zu übertragen, wurde die Wassertiefe mit 4 m entsprechend der Wasserspiegellage bei 123,0 m NHN und die zugehörige Wellenhöhe mit 0,4 m angenommen. Es ergibt sich daraus eine Laufzeit von **102,5 s** für eine Lauflänge von 634 m.

Im Modell 1:20 wurden für eine Lauflänge von 3,47 m, dies entspricht 69,4 m in der Natur, Laufzeiten von 2,4 s bis 2,6 s ermittelt. Unter Verwendung des Maßstabes der Zeit ergibt sich eine Laufzeit von 10,7 s bis 11,6 s. Umgerechnet auf die Lauflänge von 634 m in der Natur ergeben sich damit Laufzeiten von 97,7 s bis 106,0 s. Diese sind mit dem theoretischen Wert von 101 s (bei 1 m Wellenhöhe) bzw. 102,5 s (bei 0,4 m Wellenhöhe) vergleichbar.

Für die Versuchsreihen am ebenen Modell ergeben sich folgende Verhältnisse:



Bis auf wenige Ausreißer sind die gemessenen Laufzeiten um 5 % bis 15 % größer als die theoretisch berechneten Laufzeiten!

Die Auswertungen für die Naturverhältnisse berücksichtigen nicht die Abnahme der Wellenhöhe und damit der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Lauflänge, wodurch sich die Laufzeit etwas vergrößert.

## **Einschätzung**

Unter der Voraussetzung, dass mit dem Beginn der Erzeugung der Welle eine Warnung erfolgt (Sirene, Knall etc.), bestehen begrenzte Möglichkeiten den Gefahrenbereich zu verlassen. Bei einer minimalen Vorwarnzeit von 86 Sekunden können 119 m und bei einer maximalen Vorwarnzeit von 106 Sekunden können 147 m unter Annahme einer möglichen Geschwindigkeit beim Laufen im Wasser von 5 km/h zurückgelegt werden.

Hinweis:

Wenn der Gefahrenbereich in drei Zonen gegliedert wird, ist die obige Aussage zu differenzieren. Gefahrenbereich 1 stellt das nicht benetzte Ufer dar. In diesem Bereich ist eine Evakuierung möglich. Der Gefahrenbereich 2 ist der Flachwasserbereich. Dieser soll so definiert sein, dass der Abstand vom Standort zum freien Wasser sowie zum Ufer größer ist als die oben angegebenen Distanzen. Der Gefahrenbereich 3 ist der Freiwasserbereich, bei dem die gefährdete Person schwimmend das Tiefenwasser erreicht.

Zudem kann man sich in Folge der Warnung auf die Welle einstellen, sich entsprechend positionieren bzw. kleine Kinder festhalten.