



## **BERNER AU**

# **2D-MODELLBERICHT**

### **Projektbericht Gewässer- und Hochwasserschutz Nr. 05/2019**

Hydraulischer Nachweis der Wirksamkeit der Erweiterung von den Hochwasserrückhaltebecken (HRB) Sasel und Blakshörn an der Berner Au

2D Modellierung mit Delft3D Flexible Mesh



LSBG  
Landesbetrieb Straßen,  
Brücken und Gewässer  
Hamburg



**Hamburg**

Fachbehörde:

Bezirksamt Wandsbek

Dezernat Wirtschaft, Bauen und Umwelt

Fachamt Management des öffentlichen Raumes

Am Alten Posthaus 2

22041 Hamburg

Fachdienststelle:

Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG)

Geschäftsbereich Gewässer und Hochwasserschutz

Fachbereich Planung und Entwurf Gewässer - G1

Sachsenfeld 3 – 5

20097 Hamburg

© LSBG Hamburg 2019

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Prüfung und Genehmigung des LSBG ist es nicht gestattet, diesen dienstlichen Bericht oder Teile daraus zu veröffentlichen.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Untersuchungsgebiet.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Daten- und Plangrundlagen .....</b>	<b>8</b>
3.1	Vermessungsdaten.....	8
3.2	Modellvarianten .....	9
3.3	Bauwerke.....	10
3.3.1	Hochwasserrückhaltebecken .....	10
3.3.2	HRB Sasel .....	12
3.3.3	HRB Blakshörn.....	16
3.4	Rauheit.....	19
<b>4</b>	<b>Hydrodynamisch-numerisches Modell .....</b>	<b>21</b>
4.1	Ablaufdiagramm .....	21
4.2	Mathematische Modellgrundlagen .....	22
4.3	Hydrodynamische Grundgleichungen.....	24
4.4	Räumliche und zeitliche Diskretisierung .....	26
4.5	Randbedingungen.....	28
4.6	Implementierung Bauwerke .....	29
4.7	Gebäude im Abflussbereich.....	29
4.8	Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung .....	30
4.9	Modellplausibilisierung .....	30
<b>5</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>31</b>
5.1	Genauigkeit der Ergebnisse und Qualitätssicherung .....	31
5.2	Ergebnisse der Berechnung.....	32
5.2.1	Vergleich der Wasserstände für $HQ_{100}$ und $HQ_{10}$ .....	32
5.2.2	Vergleich der Größe der überschwemmten Fläche und Anzahl betroffener Häuser bei einem $HQ_{100}$ .....	35
5.2.3	Vergleich der Größe der überschwemmten Fläche bei einem $HQ_{10}$ .....	37
5.2.4	Wassertiefenkarten / Vergleichskarten .....	38
5.2.5	Schlussfolgerung und Diskussion.....	39

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>Symbole und Bezeichnungen.....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>Anlagen.....</b>	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>Aufstellungsvermerk .....</b>	<b>47</b>

# 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Mit Kontrakt vom 01.07.2018 beauftragt der Bezirk Wandsbek, Dezernat für Wirtschaft, Bauen und Umwelt, Fachamt Management des öffentlichen Raums, den Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG), Geschäftsbereich Gewässer und Hochwasserschutz, Fachbereich Planung und Entwurf Gewässer – G1, das bestehende 2-dimensionale, hydrodynamisch-numerische Modell für eine Machbarkeitsstudie zur Erweiterung der Hochwasserrückhaltebecken (HRB) Sasel und Blakshörn an der Berner Au zu verwenden. Die Wirksamkeit der Untersuchungsvarianten zur Erweiterung der HRB sollen für ein HQ<sub>10</sub> und HQ<sub>100</sub> nachgewiesen werden.

Die Anpassung des aufgebauten 2D-Modells der Berner Au erfolgt mit dem Modellsystem Delft3D Flexible Mesh Suite. Um die Überprüfung der Auswirkungen der beiden HRB Sasel und Blakshörn modelltechnisch durchzuführen, muss das Rechengitter lokal verfeinert und die Höhendaten gemäß der gewünschten zukünftigen Topographie angepasst werden. Die Berechnung eines HQ<sub>10</sub> Ereignisses erfordert zudem die Erstellung der entsprechenden Zeitreihen für das 2D-Modell. Für Gitter- und Höhenanpassung sowie für die HQ<sub>10</sub> Berechnung müssen Modellplausibilisierungen durchgeführt werden.

Bei der Modellierung handelt es sich um eine Voruntersuchung bezüglich der Auswirkungen bzw. hydraulischen Wirksamkeit von HRB Erweiterungen. Eine Kostenschätzung der daraus ggf. folgenden Umsetzung ist im Rahmen der geplanten Modellierungsarbeiten nicht beauftragt worden. Die Varianten werden bezüglich Positionierung, Ausdehnung, Profilierung und Dimensionierung - gemäß einer zuvor zwischen Bezirk Wandsbek und LSBG abgesprochenen Auswahl der Vorschläge der Bürgerinitiative - im Modell geprüft. Eine Optimierung der genannten Maßnahmen kann im Rahmen der Studie nicht geleistet werden.

Der vorliegende Bericht stellt die verschiedenen Varianten und Ergebnisse der hydraulischen Nachweise zur Erweiterung der HRB Sasel und Blakshörn vor. Mit Hilfe einer hydrodynamisch-numerischen (HN) Modellierung werden die Ansätze zur Erweiterung der HRB nach dem Stand der Technik überprüft.

## 2 Untersuchungsgebiet

Das Modellgebiet befindet sich in Hamburg Wandsbek (vgl. Abb. 1) an der Berner Au. Die Berner Au ist ein Fließgewässer im Nordosten der Freien und Hansestadt Hamburg (FFH). Die Berner Au entspringt südlich des Saseler Weges in dem Depenwiese genannten Wiesengebiet und nimmt auf ihrem Weg bis zum HRB Sasel u. a. Zuflüsse aus Klosterwiesengraben, Diekkampgraben, Kampgraben und Ilenwischgraben auf.

Die Berner Au gehört zum Einzugsgebiet (EZG) der Alster und umfasst eine Gesamtgröße von 0,213 km<sup>2</sup>. Sie hat eine Gesamtgewässerlänge von 8,4 km. Das Gewässer und das Einzugsgebiet liegen vollständig im Hamburger Stadtgebiet (vgl. Abb. 1).

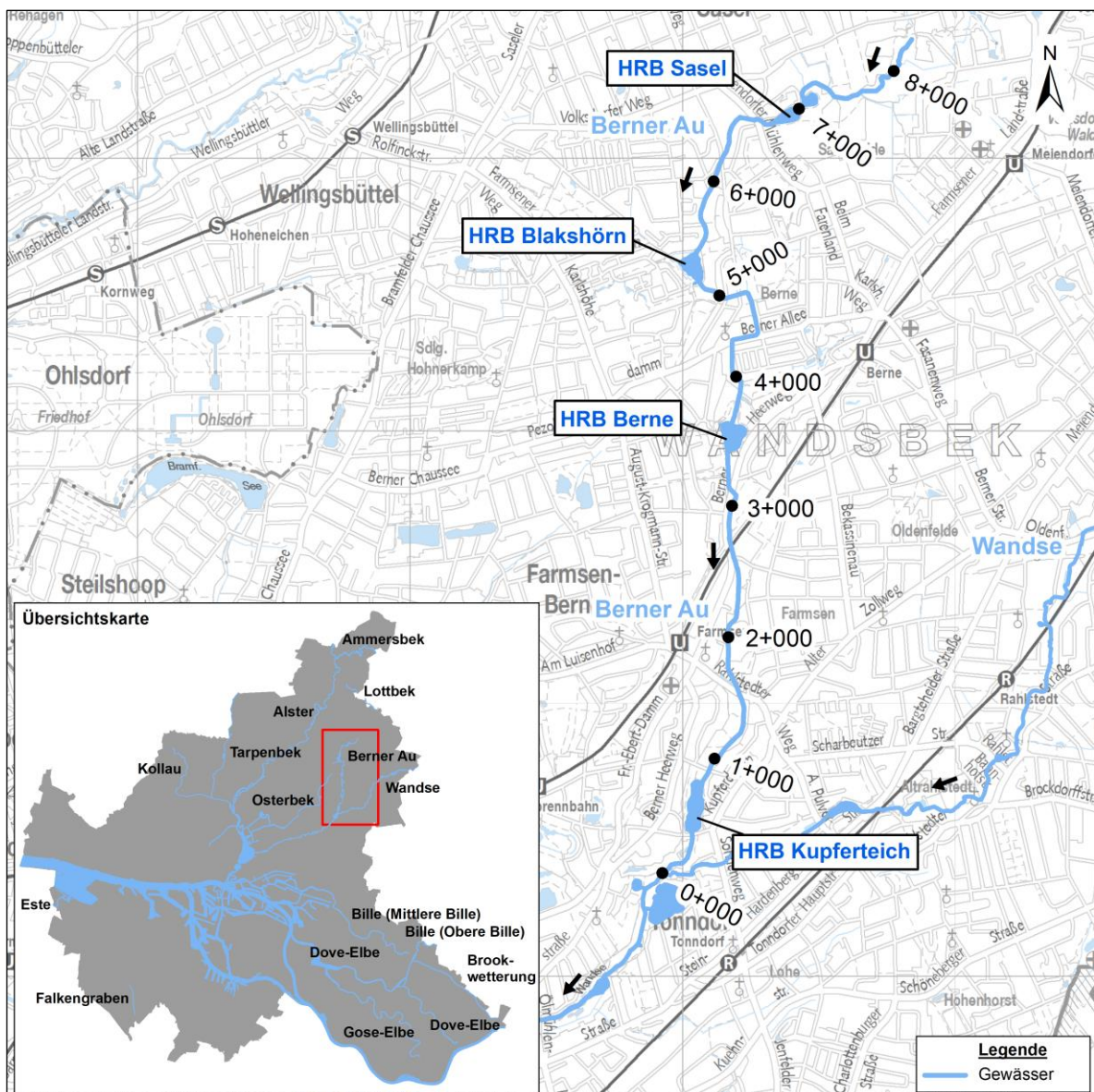


Abb. 1: Lageplan Berner Au mit Kilometrierung, ohne Maßstab (Kartengrundlage LGV, geändert)



Die Berner Au fließt auf ihrem Weg in die Wandse durch die Stadtteile Sasel, Farmsen-Berne und Tonndorf. Der Oberlauf bis zum HRB Sasel, fällt in Sommermonaten oftmals trocken. Die Berner Au ist in diesem Bereich naturnah geprägt.

Nach dem HRB Sasel weist die Berner Au Regenwassereinleitungen aus dem Siedlungsgebiet, Brücken und Durchlässe auf. Die Berner Au ist im Bereich unterhalb des Meindorfer Mühlenweg und parallel zur Krögerkoppel gekennzeichnet durch naturfernen Verbau, Gewässereinengungen bzw. -überbauungen, Grenzbebauungen auf der Böschungsoberkante und Abflusshindernissen im Gewässer. Der weitere Gewässerverlauf weist teilweise wieder naturnahe Gewässerabschnitte wie oberhalb des HRB Berne auf. Die Berner Au durchfließt bis zur Mündung in die Wandse vier Hochwasserrückhaltebecken (HRB) im Hauptschluss. Diese sind HRB Sasel, Blakshörn, Berne und Kupferteich Farmsen (vgl. Abb. 1).

Der Fokus der Untersuchung liegt zum einen auf dem HRB Sasel (vgl. Abb. 2) im nördlichen Bereich des Modellgebietes mit einem Dauerstauziel von NHN + 25,65 m und einem Vollstauziel von NHN + 26,35 m (Freie und Hansestadt Hamburg 1982). Zum anderen wird auch eine Erweiterung des HRB Blakshörn zur möglichen Erhöhung des Retentionsvolumens in Betracht gezogen. Das Dauerstauziel im HRB Blakshörn beträgt NHN + 23,00 m und das Vollstauziel NHN + 24,20 m (Freie und Hansestadt Hamburg 1988).



Abb. 2: HRB Sasel (Aufnahme vom 28.05.2019)

## 3 Daten- und Plangrundlagen

### 3.1 Vermessungsdaten

Das Gewässer und die dazugehörigen Vorländer werden im Modell als Rechengitter abgebildet. Dieses bildet die vorhandene Bathymetrie des Gewässerbettes und die Topographie der Vorländer mit Hilfe von Knoten und Elementen ab. Für die Erstellung des Rechengitters wurden das Gewässerbett sowie die Vorländer der Berner Au von der Mündung in die Wandse (km 0+000) bis zum Quellbereich (km 8+374) in den Jahren 2005 und 2011 topographisch vermessen (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) 2015).

Außerhalb der Gewässer, im Bereich der Vorländer, stellt das digitale Geländemodell (DGM) mit entsprechenden Massendaten die Grundlage für den Aufbau des 2D-Modells dar.

Das DGM wird vom Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV) für Hamburg bereitgestellt. Es wurde anhand von Höhendaten des Geländes generiert. Es basiert auf der Grundlage von sogenannten Laserscan-Vermessungsdaten des Geländes, die in 2010 mit einer hubschraubergestützten Laserscanvermessung ermittelt wurden. Die Genauigkeit des ermittelten Messpunktes hängt von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Auf eindeutig definierten Flächen wie z. B. Straßenflächen beträgt die Genauigkeit des einzelnen Laserscanmesspunktes ca.  $\pm 7$  cm. Die Genauigkeit nimmt in Bereichen mit viel Vegetation wie z. B. Wald- u. Strauchgebieten ab. Die Rohdaten der Laserscanvermessung werden automatisiert und manuell aufbereitet (Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung 2014). Dabei werden die Daten unter anderem um Gebäude und Vegetation bereinigt, um ausschließlich Geländeinformationen zu erhalten. Aus den aufbereiteten Daten wird anschließend das eigentliche DGM generiert. Dieses bildet als regelmäßiges Gitter die Grundlage für den Modellaufbau. Hierbei wurde für die Untersuchungen die höchste verfügbare Auflösung (Rasterweite 1 m) verwendet.



## 3.2 Modellvarianten

Folgende Varianten der Erweiterung der HRB Sasel und Blakshörn wurden mit dem Auftraggeber besprochen und modelltechnisch überprüft:

### Modellvarianten

- |             |  |
|-------------|--|
| Variante 0  | Die Variante 0 zeigt die hydraulischen Auswirkungen der Randbedingungen im Modellgebiet ohne jegliche bauliche Veränderung (Referenzzustand).  |
| Variante 1A | Die Variante 1A zeigt die hydraulischen Auswirkungen der Randbedingungen im Modellgebiet bei Erweiterung des HRB Blakshörn um ein westlich von Blakshörn gelegenes Trockenbecken ohne Veränderung der Geländehöhe. Das Trockenbecken wurde im Modell mittels Damm (Höhe: NHN +25,00 m) vom umliegenden Gebiet abgegrenzt.    |
| Variante 1B | Die Variante 1B zeigt die hydraulischen Auswirkungen der Randbedingungen im Modellgebiet bei Erweiterung des HRB Blakshörn um ein westlich von Blakshörn gelegenes Trockenbecken mit vertieftem und verbreitertem Einlassgraben zwischen Trockenbeckenerweiterung und Berner Au. Der Bodenabtrag beträgt 52 m <sup>3</sup> . |
| Variante 1C | Die Variante 1C entspricht der Variante 1A. Zusätzlich wurde das gesamte modellierte Trockenbecken auf eine Höhe von NHN +23 m abgesenkt. Der Bodenabtrag beträgt 32.211 m <sup>3</sup> .  |
| Variante 2A | Die Variante 2A zeigt die hydraulischen Auswirkungen der Randbedingungen im Modellgebiet bei Erweiterung des HRB Sasel um ein schmales, südlich von Sasel gelegenes Trockenbecken (Sohle: NHN +26,50 m). Der Bodenabtrag beträgt 60.449 m <sup>3</sup> .   |
| Variante 2B | Die Variante 2B entspricht im Bereich HRB Sasel der Variante 2A. Zusätzlich wurde das HRB Blakshörn entsprechend der Variante 1C im Modell erweitert. Der Bodenabtrag beträgt insgesamt für beide Trockenbecken 92.661 m <sup>3</sup> .  |
| Variante 2C | Die Variante 2C zeigt die hydraulischen Auswirkungen der Randbedingungen im Modellgebiet bei Erweiterung des HRB Sasel um ein südlich gelegenes Trockenbecken mit größerer flächiger Ausdehnung im Vergleich zu Variante 2A. Diese Variante wurde mit dem höchsten Bodenabtrag von 110.864 m <sup>3</sup> überprüft.         |

### 3.3 Bauwerke

Im Gewässer der Berner Au befinden sich zahlreiche technische Bauwerke wie Hochwasserrückhaltebecken, Brücken und Durchlässe. Diese werden im HN-Modell berücksichtigt. Die Sicherheit von Stauanlagen (Sicherheitskonzept) muss folgende Aspekte umfassen:

- die wasserrechtliche Genehmigung bzw. Anlagengenehmigung
- die wasserwirtschaftliche, geotechnische und konstruktive Sicherheit
- den ordnungsgemäßen Betrieb und die Unterhaltung
- die Verkehrssicherheit
- die Sicherheitsüberwachung und
- das Notfallkonzept für Ereignisse, die das Restrisiko erhöhen.

Die Sicherheit der Stauanlagen wird bei dieser Überprüfung nicht untersucht, weil es für diese Aufgabenstellung ohne Belang ist. Dies kann in einem Erhaltungsmanagementsystem (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2013) integriert werden.

#### 3.3.1 Hochwasserrückhaltebecken

Im Gewässerlauf der Berner Au befinden sich vier HRB:

- HRB Sasel
- HRB Blakshörn
- HRB Berne
- HRB Kupferteich.

Alle HRB befinden sich im Hauptschluss (vgl. Abb. 3) der Berner Au und werden im Dauerstau betrieben.

HRB sind Stauanlagen mit einem Absperrbauwerk und zugehörigem Stau- bzw. Speicherbecken. Die drei erstgenannten HRB sind mit einem mönchartigen Absperrbauwerk konstruktiv ausgestattet. Das Absperrbauwerk am HRB Kupferteich ist eine Wehranlage.

Die DIN 19700-10:2004-07 legt in Teil 10 die allgemeinen Anforderungen für Stauanlagen fest. Besonderheiten für HRB werden in DIN 19700-12:2004-07 behandelt. Stauanlagen müssen definierte Stauziele einhalten (vgl. Abb. 4).

Für die Überprüfung des Überschwemmungsgebietes der Berner Au werden die HRB Sasel und Blakshörn modelltechnisch erweitert und deren Auswirkungen auf die Wasserstände geprüft.

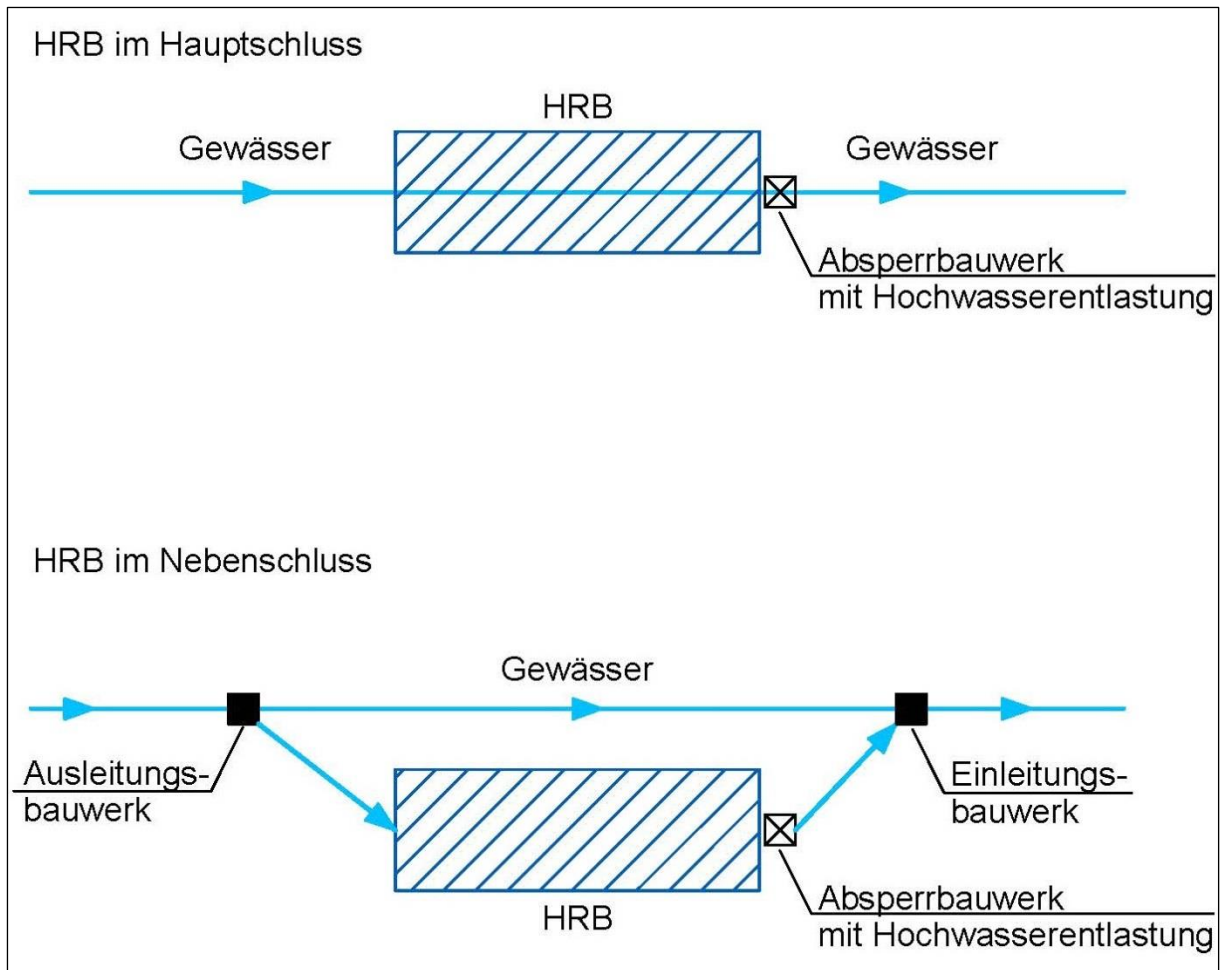


Abb. 3: HRB im Haupt- oder Nebenschluss



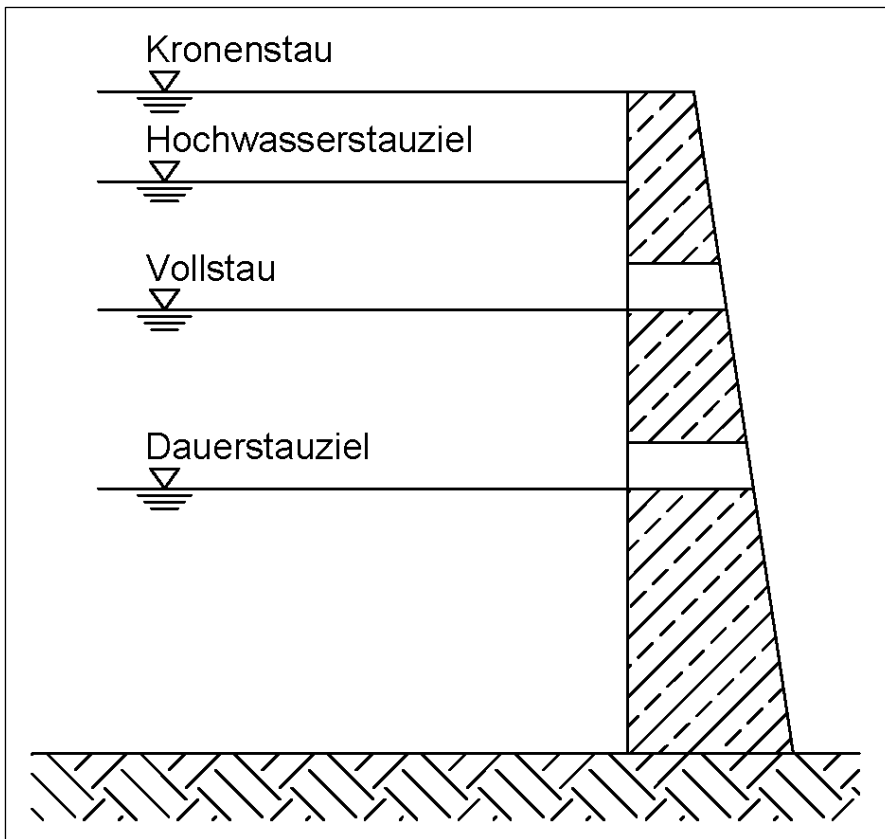


Abb. 4: Stauziele von HRB gemäß DIN 19700 (Bieberstein 2006)

### 3.3.2 HRB Sasel

Das mönchartige Absperrbauwerk des HRB Sasel wird durch Schütz und festes Wehr gedrosselt und aufgestaut (vgl. Abb. 5 bis Abb. 7). Die wasserrechtliche Genehmigung liegt dem LSBG nicht vor. In der Haushalts- und Ausführungsunterlage Bau, Ausbau des HRB Sasel und Herrichtung einer Spülfläche – 2. Bauabschnitt – vom 28.01.1982, wird ein Dauerstauziel von NHN + 25,65 m und ein Vollstauziel von NHN + 26,35 m genannt (Freie und Hansestadt Hamburg 1982).

Der Betrieb und die Unterhaltung des HRB Sasel obliegt dem Bezirk Wandsbek der FHH.

Bezeichnung	Dauerstauziel [NHN + m]	Vollstauziel [NHN + m]	Dauerstauoberfläche [m <sup>2</sup> ]	Vollstauoberfläche [m <sup>2</sup> ]	HW-Rückhalteraum [m <sup>3</sup> ]	Aktenzeichen Wasserbuch
HRB Sasel	25,65	26,35	k. A.	28.000	k. A.	kein Eintrag

Tab. 1: Kenndaten des HRB Sasel laut wasserrechtlicher Genehmigung (Freie und Hansestadt Hamburg 1982)

Die Bemessung des HRB erfolgte anhand eines maximalen Zuflusses von  $6,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Davon sind  $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$  aus dem natürlichen und  $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$  vom versiegelten EZG des angeschlossenen Regenwassersiels angesetzt worden. Das Wiederkehrintervall des Bemessungsregens wird mit  $T = 10 \text{ a}$  angegeben. Das Wiederkehrintervall des Abflusses ist nicht bekannt. Die maximale Leistungsfähigkeit des Unterlaufs wird mit  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$  angegeben. Bei dem höchsten Stauziel von  $\text{NHN}^{\circ} + 26,35 \text{ m}$  hat das HRB eine oberflächige Ausdehnung von  $28.000 \text{ m}^2$ . Die Stauhöhe ist mit  $0,70 \text{ m}$  angegeben. Über das Volumen des Hochwasserrückhalteraums ist keine Angabe zu finden. Überschläglich ermittelt beträgt es ca.  $19.600 \text{ m}^3$ .

Nach der Klassifizierung der DIN 19700-10:2004-07 entspricht das HRB Sasel der Kategorie „HRB - sehr kleine Becken“ (Höhe Absperrbauwerk  $\leq 4 \text{ m}$  und Gesamtstauvolumen  $\leq 50.000 \text{ m}^3$ ). Das HRB verfügt über keine unabhängige Hochwasserentlastung, sondern nur über ein aufgeständertes Gitterrost im Absperrbauwerk selbst als Notüberlauf. D. h., ab einem definierten Wasserstand im HRB wird im Hochwasserfall zusätzlich Wasser über das Gitterrost in das Absperrbauwerk geleitet. Die hydraulische Leistungsfähigkeit des Absperrbauwerks wird durch den Durchlass begrenzt.



Abb. 5: Absperrbauwerks HRB Sasel mit rechtsseitigem Regenwasserzulauf im Juni 2015





Abb. 6: Unterströmtes Schütz HRB Sasel



Abb. 7: Wehr HRB Sasel

### 3.3.3 HRB Blakshörn

Das HRB Blakshörn wird durch ein Schütz und festes Wehr gedrosselt und aufgestaut (vgl. Abb. 9 und Abb. 10). Die wasserrechtliche Genehmigung wurde am 09.09.1987 erteilt (Freie und Hansestadt Hamburg 1987). Des Weiteren liegt ein Zustimmungsbescheid vom 16.02.1988 vor (Freie und Hansestadt Hamburg 1988). Im Zustimmungsbescheid wird ein Dauerstauziel von NHN + 23,00 m und ein Vollstauziel von NHN + 24,20 m genannt.

Bezeichnung	Dauerstauziel [NHN + m]	Vollstauziel [NHN + m]	Dauerstauoberfläche [m <sup>2</sup> ]	Vollstauoberfläche [m <sup>2</sup> ]	Hochwasserrückhalteraum [m <sup>3</sup> ]	Aktenzeichen Wasserbuch
HRB Blakshörn	23,00	24,20	18.700	40.000	50.000	kein Eintrag

Tab. 2: Kenndaten HRB Blakshörn laut wasserrechtlicher Genehmigung (Freie und Hansestadt Hamburg 1988)

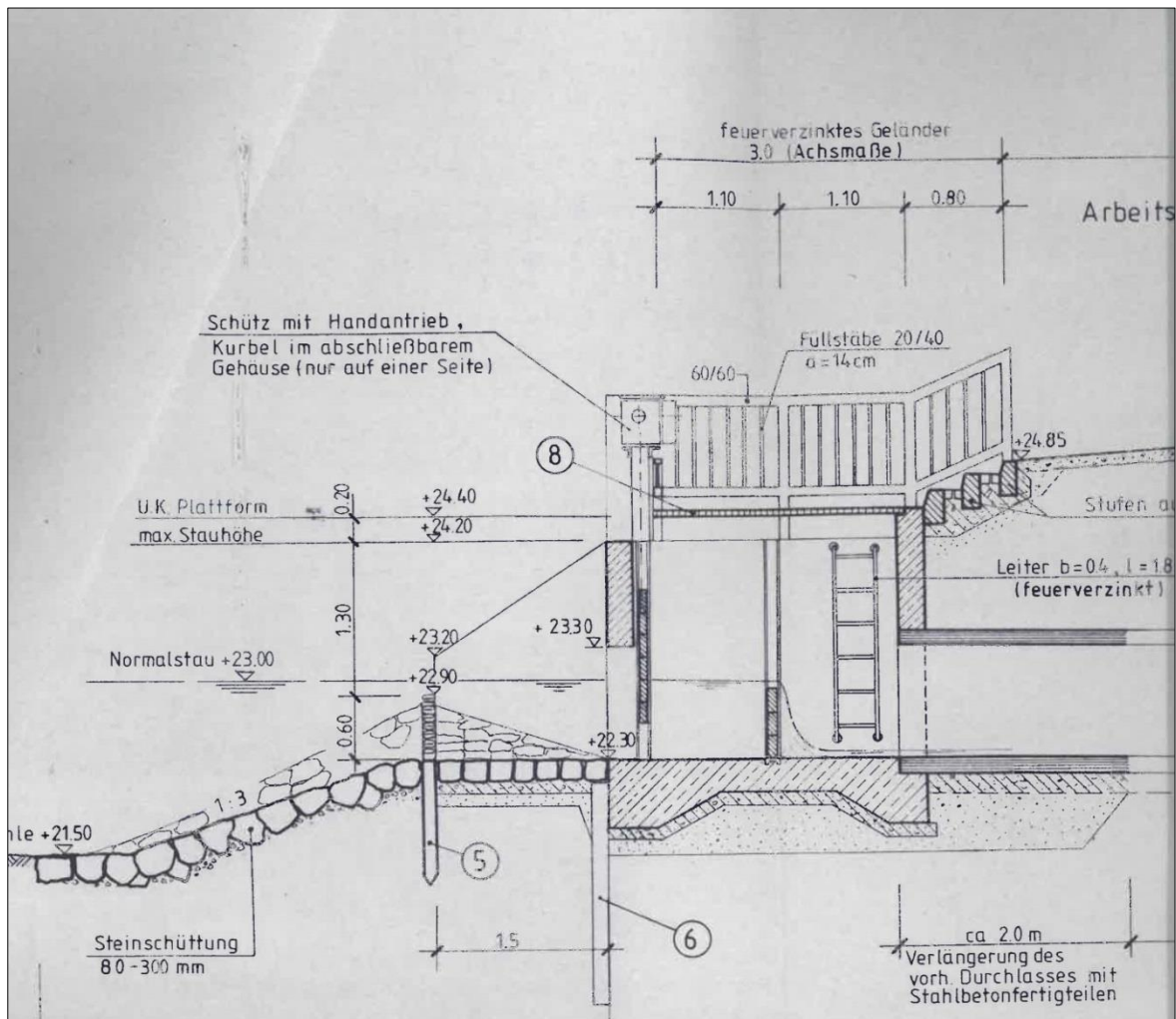


Abb. 8: Schnitt Absperrbauwerk HRB Blakshörn gemäß wasserrechtlicher Genehmigung (Freie und Hansestadt Hamburg 1987)

Die Bemessung des HRB erfolgte anhand eines maximalen Zuflusses von 11,75 m<sup>3</sup>/s und Abflusses von 1,00 m<sup>3</sup>/s. Das Wiederkehrintervall des Bemessungsregen wird mit T = 20 a angegeben. Das Wiederkehrintervall des Abflusses ist nicht bekannt. Bei dem Dauerstauziel von NHN + 23,00 m hat das HRB eine oberflächige Ausdehnung von 13.000 m<sup>2</sup> bzw. inkl. der Flachwasserzonen 18.700 m<sup>2</sup>. Die Wassertiefe ist mit 1,50 m angegeben. Das Volumen des Hochwasserrückhalteraums beträgt 50.000 m<sup>3</sup>.

Nach Klassifizierung der DIN 19700-10:2004-07 entspricht das HRB Blakshörn der Kategorie „HRB - sehr kleine Becken“ (Höhe Absperrbauwerk ≤ 4 m und Gesamtstauvolumen ≤ 50.000 m<sup>3</sup>). Das HRB verfügt über keine unabhängige Hochwasserentlastung, sondern nur über ein aufgeständertes Gitterrost im Absperrbauwerk selbst als Notüberlauf. D. h., ab einem definierten Wasserstand im HRB wird im Hochwasserfall zusätzlich Wasser über das Gitterrost in das Absperrbauwerk geleitet. Die hydraulische Leistungsfähigkeit des Absperrbauwerks wird durch den Durchlass begrenzt.

In der Tabelle 3 sind die Hauptdaten gemäß DIN 19700-12:2004-07 aufgeführt.

Hinsichtlich des Gesamtstauvolumens könnte das HRB in der Kategorie „HRB - kleine Becken“ subsumiert werden.

Lage/Bezeichnung	Anlagentyp	Hauptzweck	Lage zum Gewässer	Art des Absperrbauwerks	Klassifizierung
HRB Blakshörn	ungesteuert im Hauptschluss	Hochwasserschutz	Hauptschluss	unterströmtes Schütz und Wehranlage	HRB - sehr kleines Becken

Tab. 3: Hauptdaten bzw. Klassifizierung gemäß DIN 19700-12, HRB Blakshörn





Abb. 9: Absperrbauwerks HRB Blakshörn im Juni 2015



Abb. 10: Wehr mit anschließenden Durchlass HRB Blakshörn

### 3.4 Rauheit

Die Rauheit des Gewässerbettes und der Geländeoberfläche hat einen erheblichen Einfluss auf die Fließdynamik des Wassers. Sie beschreibt den Widerstand einer Oberfläche aufgrund der Unebenheit der Oberflächenhöhe. Sie ist gekennzeichnet durch Oberflächenunterschiede wie z.B. Gras, Sand, Ackerland oder Straßen. Anhand von Landnutzungsdaten und Ortsbegehungen wird die Rauheit des Gewässerbettes mit  $k_s = 0,05$  m festgelegt. Die Rauheit der Vorländer wird automatisiert mit Hilfe der digitalen Landnutzungsdaten zugewiesen. Sie liegen im bundesweit einheitlichen System ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem) flurstückscharf vor. Herausgeber der Daten ist der LGV. Das Erscheinungsjahr der Daten ist 2014.

Nr.	Datenformat	Datenquelle/Herausgeber	Erscheinungsjahr
1	ALKIS-Format	LGV	2014

Tab. 1: Übersicht Landnutzungsdaten

Ähnliche Landnutzungen mit gleicher Rauheit werden in sogenannte Rauheitsklassen zusammengefasst. Insgesamt 77 Landnutzungen werden einheitlich 39 Rauheitsklassen zugeordnet (Tab. 4).

Den Rauheitsklassen sind die zur Berechnung der Fließwiderstände nach den Gleichungen Gl. 4.4 bis Gl. 4.6 erforderlichen äquivalenten Sandrauheiten ( $k_s$ -Werte) zugewiesen. Über den Parameter der äquivalenten Sandrauheit wird die Auswirkung der Bodenrauheit im Gewässer und auf dem Vorland bei der Berechnung des Fließfeldes berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.3). In Abhängigkeit des Materials bzw. der Vegetation sind in der Fachliteratur physikalisch sinnvolle Bereiche für den  $k_s$ -Wert beschrieben.

Nr.	Rauheitsklasse / Landnutzung	k <sub>s</sub> - Werte [m]
1	Ackerland	0,3
2	Bahngelände	0,55
3	Brachland (Grünland)	0,5
4	Entsorgungsanlage (Abfall)	0,3
5	Gewerbe und Industrie	0,3
6	Handel und Dienstleistungen	0,3
7	Land- und Forstwirtschaft (Wohnen, Betrieb)	0,3
8	Entsorgungsanlagen (Abfallbeseitigung, Abwasserbeseitigung)	0,3
9	Verkehrsanlagen (Parken)	0,3
10	Versorgungsanlagen (Elektrizität, Wasser, andere Versorgungsanlagen)	0,3
11	Erholung (Sport, Wochenendhaus, und Erholungseinrichtung)	0,25
12	Gehölz	0,3
13	Graben	0,4
14	Grünland	0,2
15	Grünland (Streuobstwiese)	0,2
16	Obstbauplantagen, Baumschulen	0,25
17	Laub- und Mischwald	0,25
18	Nadelwald	0,2
19	Straßen, Plätze, Wege	0,15
20	Sportfläche (Sportplatz, Sportanlagen)	0,3
21	See (Speicherbecken)	0,04
22	Teich, Weiher	0,06
23	Gewässerbegleitfläche	0,3
24	Unland (Felsen, Steinriegel)	0,5
25	Mischnutz. Wohnen (Gewerbe/Industrie./Wohnen/Handel/ Dienstleistung)	0,3
26	Wohnen	0,3
27	Wohnen (behelfsmäßig)	0,3
28	öffentliche Einrichtung (Bildung, Forschung, Gesundheit, Verwaltung)	0,3
29	ungenutzt (Bauplatz)	0,4
30	ungenutzt (andere Freifläche)	0,3
31	Grünanlage (Garten, Gartenland)	0,25
32	Grünanlage (Kleingarten, Spielplatz, Bolzplatz, andere Grünanlagen)	0,3
33	Grünanlage (Park)	0,2
34	Moor, Sumpf	0,3
35	Friedhof	0,25
36	Halde	0,3
37	Schiffsverkehr	0,15
38	Flugverkehr	0,2
39	Heide, NSG (Naturschutzgebiet)	0,25

Tab. 4: Übersicht Rauheitsklassen



## 4 Hydrodynamisch-numerisches Modell

### 4.1 Ablaufdiagramm

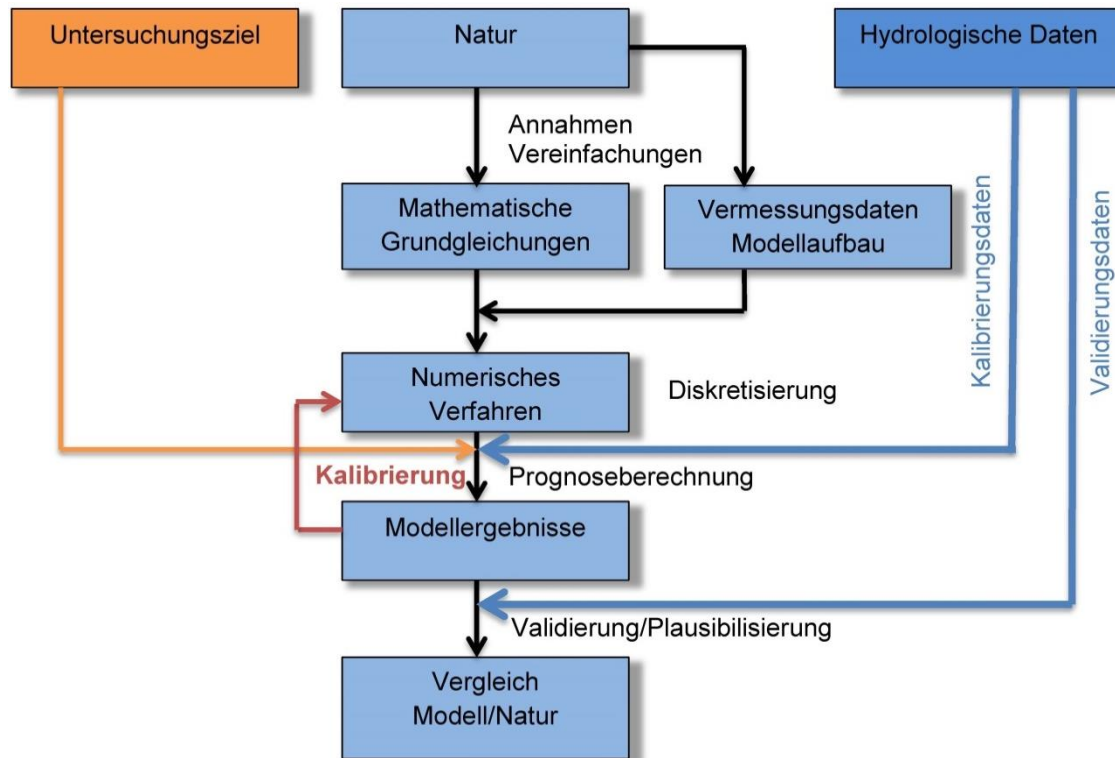


Abb. 11: Ablaufschema der hydronumerischen Modellierung (verändert nach Landesanstalt für Umweltschutz 2003)

Das Vorgehen der Modellierung ist für alle hydrodynamisch-numerischen Modelle grundsätzlich identisch (vgl. Abb. 11). Die blauen Kästen stellen den Arbeitsablauf zur Modellerstellung dar. Da für die Anwendung partieller Differentialgleichungssysteme auf reale Probleme keine analytischen Lösungen existieren, werden Lösungsverfahren wie das Finite-Differenzen-Verfahren (FDV), die Finite-Volumen-Methode (FVM) oder die Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt. Diese Verfahren sind dem Grunde nach gitterbasierte Verfahren, die an jedem Gitterpunkt eine Lösung des Gleichungssystems ermitteln.

Die Güte der Ergebnisse hängt u. a. davon ab, wie gut die für die Fragestellung relevanten physikalischen Prozesse mathematisch im Modell abgebildet werden. Dementsprechend sind Daten- und Plangrundlagen die Voraussetzung für eine hohe Güte der Ergebnisse. Mit der Kalibrierung kann die Genauigkeit der Modellierung verbessert werden. Dafür werden gemessene Größen (hier Wasserstände und/oder Durchflüsse) mit simulierten Größen verglichen und empirische Parameter in den Grundgleichungen (Kalibrierparameter) im Rahmen physikalisch sinnvoller Grenzen angepasst.

Bei der Validierung wird die Modellgüte anhand eines unabhängigen Ereignisses, welches nicht für die Kalibrierung verwendet wurde, überprüft.

## 4.2 Mathematische Modellgrundlagen

Für die Fragestellung der Machbarkeitsuntersuchung zur HRB-Erweiterung der Berner Au wird das hydrodynamisch-numerische Modell D - Flow Flexible Mesh verwendet. Das Modell kann zwei- und dreidimensionale instationäre Strömungen und Stofftransporte simulieren und wird vom niederländischen Forschungsinstitut Deltares entwickelt und vorgehalten (Deltares 2019). Die Modellierung der Hamburger Fließgewässer als Grundlage für die Berechnung der Überschwemmungsgebiete erfolgt im zweidimensionalen Modell. Bei den zu simulierenden Hochwasserereignissen herrschen in den Gewässern und auf den Vorländern vergleichsweise geringe Wassertiefen vor. Dementsprechend dominieren horizontale Strömungsprozesse.

Es werden im Modell die 2D-zeit- und 2D-tiefengemittelten Flachwassergleichungen verwendet (vgl. Abb. 12).

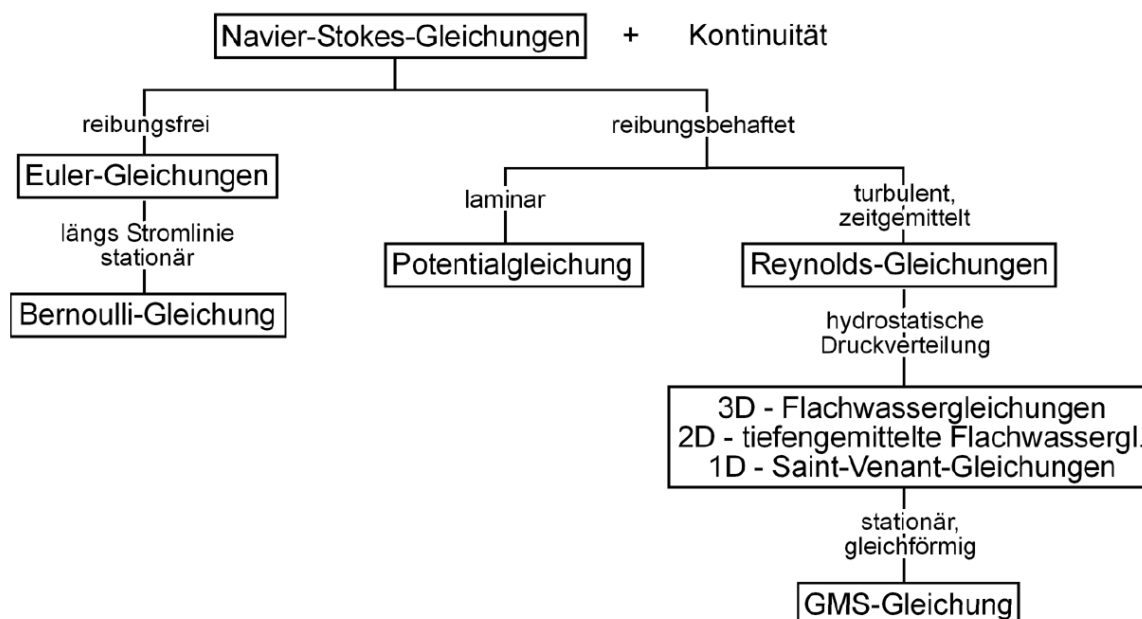


Abb. 12: Grundgleichungen hydrodynamisch-numerischer Modelle (Musall 2011)

Diese Gleichungen wurden im 19. Jahrhundert vom Franzosen St. Venant hergeleitet und stellen eine mathematische Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen unter bestimmten Annahmen dar. Die Navier-Stokes-Gleichungen werden unter Anwendung der Impulserhaltung an einem infinitesimalen Volumenelement hergeleitet und beschreiben das Fließfeld und die Wassertiefe im dreidimensionalen Raum in Form von drei partiellen Differentialgleichungen. Die Navier-Stokes-Gleichungen stellen somit die Impulsgleichungen für die Strömung inkompressibler Flüssigkeiten dar. Eine allgemeine analytische Lösung dieser Gleichungen existiert bisher nicht. Durch eine zeitliche Mittelung werden die Navier-Stokes-Gleichungen in die Reynoldsgleichungen überführt. Diese Vereinfachung charakterisiert das Fließfeld durch mittlere Strömungsgrößen. Der Einfluss turbulenter kleinskaliger Schwankungsbewegungen wird dabei über die Wirbelviskosität parametrisiert.

Die Integration der Reynoldsgleichungen in vertikaler Richtung führt schließlich auf die tiefengemittelten 2D-Flachwassergleichungen. Hierdurch wird die Zahl der Gleichungen von

drei auf zwei reduziert. Diese beiden Gleichungen beschreiben das Fließfeld in der horizontalen Ebene in Form von tiefengemittelten Größen und bilden eine rechen-zeitoptimierte Lösung bei der Berechnung von Fließfeldern, bei denen vertikale Strömungskomponenten vernachlässigbar sind. Dies ist bei der Berechnung Hamburger Gewässern zutreffend.

Um ein 2D-Fließfeld eindeutig beschreiben zu können, muss neben den beiden tiefengemittelten Geschwindigkeiten auch die Wassertiefe bestimmt werden. Hierzu ist eine weitere Gleichung erforderlich.

Die Kontinuitätsgleichung wird unter Anwendung der Massenerhaltung an einem infinitesimalen Volumenelement hergeleitet und wird wie die Navier-Stokes Gleichungen zeitlich und über die Tiefe gemittelt. Durch die Lösung des resultierenden Gleichungssystems aus zwei Flachwassergleichungen und einer Kontinuitätsgleichung kann das Fließfeld nun eindeutig beschrieben werden.

Da eine analytische Lösung des Gleichungssystems nicht existiert, ist ein Lösungsverfahren erforderlich. Zumeist kommen gitterbasierte Methoden (FDM<sup>1</sup>, FVM<sup>2</sup> und FEM<sup>3</sup>) zum Einsatz. Bei Anwendung dieser Methoden wird das Lösungsgebiet (hier das Überschwemmungsgebiet) in eine endliche (finite) Anzahl von Gitterzellen (Elemente) unterteilt. Das Ziel dieser sogenannten räumlichen Diskretisierung ist es, die topographischen Gegebenheiten des Modellgebietes möglichst exakt im Rechengitter abzubilden. Das Gleichungssystem wird nun nicht mehr auf dem gesamten Lösungsgebiet, sondern nur noch an den diskreten Gitterpunkten gelöst.

Neben der räumlichen Diskretisierung ist auch eine zeitliche Diskretisierung der Gleichungen erforderlich, um eine Formulierung für die zeitlichen Differenzenquotienten zu erhalten. Für die oben genannten Methoden stehen unterschiedliche explizite oder implizite Ansätze zur Verfügung.

Das verwendete Modell D - Flow Flexible Mesh basiert auf der FVM. Zur Diskretisierung des Modellgebietes können beispielweise Rechtecke, gekrümmt-lineare Vierecke und Dreiecke verwendet werden. Mit diesen variablen Elementen lassen sich kleinteilige Gewässerstrukturen, wie sie an den Hamburger Gewässern auftreten, genau abbilden.

---

<sup>1</sup> Finite Differenzen Methode

<sup>2</sup> Finite Volumen Methode

<sup>3</sup> Finite Elemente Methode

### 4.3 Hydrodynamische Grundgleichungen

Die Formulierung der hydrodynamischen Grundgleichungen wird der Übersichtlichkeit halber in kartesischen Koordinaten mit den Richtungen  $x, y, z$  gezeigt. Für die kurvenlinearen Gitterkoordinaten werden die Gleichungen komplexer (Deltares, 2014). Die Kontinuitätsgleichung für inkompressible Flüssigkeiten lautet:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = (q_{in} - q_{out}) \quad \text{Gl. 4.1}$$

mit dem Geschwindigkeitsvektor  $u, v, w$  sowie  $q_{in}$  und  $q_{out}$  als Volumenänderung infolge von Quellen oder Senken, d. h. Zufluss oder Abfluss.

Die aus den Navier-Stokes-Gleichungen abgeleiteten zeit- und tiefengemittelten Flachwassergleichungen für inkompressible Flüssigkeiten lassen sich wie folgt formulieren:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial t} - fv + \frac{\tau_{bx}}{\rho_w(d + \eta)} - \frac{F_x}{\rho_w(d + \eta)} - v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad \text{Gl. 4.2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial t} + fu + \frac{\tau_{by}}{\rho_w(d + \eta)} - \frac{F_y}{\rho_w(d + \eta)} - v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad \text{Gl. 4.3}$$

(1)      (2)      (3)      (4)      (5)      (6)                      (7)                      (8)

Die Gl. 4.2 und Gl. 4.3 beinhalten folgende Terme:

- 1      lokale Beschleunigung
- 2, 3    konvektive Beschleunigung
- 4      Erdbeschleunigung
- 5      Coriolisparameter
- 6      Fließwiderstände
- 7      äußere Kräfte (Wind)
- 8      Diffusion und Dispersion



Die Größen der o. g. Gleichungen beinhalten:

d	Wassertiefe unterhalb einer Bezugsfläche [m]
$F_{x,y}$	Indices der x- und y-Komponenten der äußern Kräfte [N/m <sup>2</sup> ]
u,v	tiefengemittelte Geschwindigkeit [m/s]
U	absolute Geschwindigkeit [m/s]
$\rho_w$	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	Viskosität [m <sup>2</sup> /s]
H	Wassertiefe oberhalb einer Bezugsfläche [m]
g	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$f_{v,u}$	Indices x- und y-Komponenten der Corioliskraft [N]
$\tau_{bx,y}$	Indices x- und y-Komponenten der Sohlschubspannung [N/m <sup>2</sup> ]
t	Zeit [s]

Die Fließwiderstände werden mit einem quadratischen Geschwindigkeitsansatz als Sohlschubspannung  $\tau_b$  berechnet:

$$\tau_{bx} = \rho_w g \frac{|U|u}{C^2} \quad \text{Gl. 4.4}$$

$$\tau_{by} = \rho_w g \frac{|U|v}{C^2} \quad \text{Gl. 4.5}$$

Die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes nach Chézy wird auf Grundlage des Widerstandsgesetzes nach Colebrook/White wie folgt ermittelt:

$$C = 18 \log_{10} \left( \frac{12h}{k_s} \right) \quad \text{Gl. 4.6}$$

mit:

$k_s$	äquivalente Sandrauheit [m]
h	Wassertiefe [m]

Die äquivalente Sandrauheit entspricht einem fiktiven Korndurchmesser.

#### 4.4 Räumliche und zeitliche Diskretisierung

Die räumliche und zeitliche Diskretisierung stellt stets eine Näherung der realen Lösung dar. Die Abweichung der numerischen Lösung von der realen Lösung wird durch den Approximationsfehler ausgedrückt, der unter anderem von der Zellgröße  $\Delta x$  des Rechengitters und der Zeitschrittweite  $\Delta t$  abhängig ist. Dementsprechend beeinflusst die Wahl dieser Größen die Genauigkeit und die Stabilität der numerischen Lösung.

Courant, Friedrichs und Lewy formulierten den nachfolgenden Zusammenhang zwischen der Zeitschrittweite  $\Delta t$ , dem Betrag der Fließgeschwindigkeit  $v$  und der Zellgröße  $\Delta x$ .

$$CFL = \frac{|v|\Delta t}{\Delta x} \quad \text{Gl. 4.7}$$

Um ein stabiles und hinreichend genaues Ergebnis zu erhalten, darf CFL eine definierte Größenordnung nicht überschreiten. Der numerische Rechenzeitschritt wird auf Grundlage der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der lokalen Gitterzellengröße ermittelt. Der maximal zulässige Zeitschritt ist somit durch das CFL-Kriterium definiert. Die einzuhaltende Größenordnung hängt vom numerischen Verfahren ab. Für die eingesetzte Software muss die Bedingung  $CFL < 10$  erfüllt sein (Deltares, 2015).

Die Fließgeschwindigkeit ist u. a. durch die Gewässertopographie, Rauheiten und das gewählte Abflussereignis vorgegeben. Die Zellgröße wird im Rahmen der räumlichen Diskretisierung festgelegt. Bei vorgegebener Zellgröße  $\Delta x$  im Rechengitter ergibt sich damit der Zeitschritt  $\Delta t$  zu

$$\Delta t = \frac{10\Delta x}{|v|} \quad \text{Gl. 4.8}$$

Wird bei der räumlichen Diskretisierung eine kleine Zellgröße  $\Delta x$  gewählt, z. B. um kleinskalige Strukturen im Gewässer abzubilden, führt dies zu einem kleinen Zeitschritt  $\Delta t$  und letztendlich zu einer längeren Berechnungszeit als im Fall einer großen Zellgröße.

Die Festlegung der Zellgrößen im Rahmen der räumlichen Diskretisierung der Berner Au und deren Vorländer orientiert sich u. a. an der Gewässermorphologie, kleinräumigen Strukturen, der Landnutzung und Gebäuden.

Der Aufbau des Rechengitters für den zu betrachtenden Abschnitt der Berner Au umfasst zwei hoch aufgelöste Gitternetze (vgl. Abb. 13). Das erste bildet das Gewässer selbst ab und besteht aus gekrümmten Viereckselementen mit einer Kantenlänge von 0,10 bis 0,70 m quer zur Strömungsrichtung und 0,25 bis 3,30 m längs in Strömungsrichtung. Das zweite Rechengitter stellt den gesamten Vorland- und Siedlungsbereich dar und besteht aus Dreieckselementen.

Das Modell ist in allen Richtungen erweiterbar und wird nur durch die Anzahl der Elemente begrenzt. Das gesamte Rechengitter des Gewässerbettes, beginnt oberhalb des HRB Sasel bis einschließlich des HRB Kupferteich und weist eine Länge von 8,4 km auf. Die Gewässerbreite variiert überwiegend zwischen ca. 1 bis 2 m. Der linke und rechte Vorland- und Siedlungsbereich variiert zwischen 15 bis 140 m. Die seitliche Ausdehnung des Modells ist

größer als der potenzielle Überschwemmungsbereich beim Hochwasserabfluss. Das Vorgehen stellt sicher, dass keine Geländeinformationen verloren gehen und gerade kleinräumliche Strukturen genau abgebildet werden.

Gebäude werden aus dem Gitternetz ausgeschlossen. Durch das geschilderte Vorgehen ist sichergestellt, dass alle wesentlichen Geländeinformationen im Rechengitter enthalten sind und gerade kleinräumliche Strukturen genau abgebildet werden.

Das strukturangepasste Gitternetz der Berner Au besteht aus ca. 400.000 Vierecks- und Dreieckselementen sowie ca. 230.000 Gitternetzpunkten.

Die Berechnungen werden auf leistungsfähigen Servern mit bis zu 32 Rechenkernen durchgeführt. Das Abflussgeschehen im Modell verläuft wie in der Natur zeitabhängig (instationär). Die benötigte Rechenzeit resultiert letztendlich aus der Zeitschrittweite  $\Delta t$ , die sich aus dem oben genannten Kriterium. Zur vollständigen Berechnung des zu Grunde gelegten Hochwasserereignisses ergeben sich Rechenzeiten langsamer als die Realzeit, d. h. die Hochwasserwelle des  $HQ_{100}$  von 15,5 h Dauer wird in bis zu 25 h simuliert.

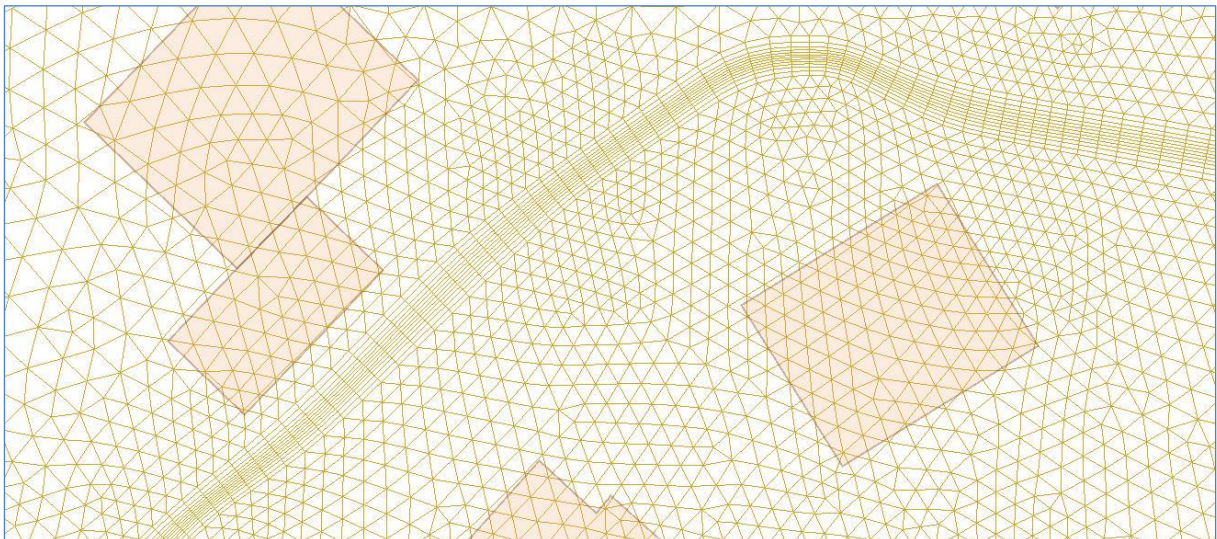


Abb. 13: Rechengitter im Bereich der Krögerkoppel, ohne Maßstab

## 4.5 Randbedingungen

Zur eindeutigen Lösung der hydrodynamischen Grundgleichungen (Kap. 4.3) sind Randbedingungen am äußeren Rand des Modellgebietes und eine Anfangsbedingung für das gesamte Modellgebiet erforderlich.

Entlang des Modellrandes werden unterschiedliche Randbedingungen vorgegeben. An offenen Modellrändern, über die Wasser ins Modellgebiet hinein- oder hinausfließt, werden Zeitreihen des Abflusses bzw. der Wasserstandes vorgegeben.

An geschlossenen Modellrändern wird eine Geschwindigkeit von  $v = 0$  vorgegeben (free slip condition). Das bedeutet u. a., dass kein Wasser über den Modellrand hinzukommen oder verlorengehen kann, woraus sich die Bezeichnung „geschlossen“ ableitet.

Kleinere Gewässer mit ihren Zuflüssen werden als Quellen im Berechnungsgitter abgebildet. Hierzu wird einzelnen Elementen, die sich im Bereich der Einmündung des Nebengewässers befinden, die entsprechende Zeitreihe des Abflusses zugeordnet.

Als obere Randbedingung ist der instationäre Abfluss aus dem EZG oberhalb des HRB Sasel maßgeblich. Die Abflussmengen und der zeitliche Verlauf werden mit Hilfe des N-A-Modells und einem vergangenen repräsentativen Niederschlagsereignis (Hochwasser Juli 2002) ermittelt. Dieses wird mittels Skalierung auf statistisch ermittelte Abflussmengen für ein  $HQ_{100}$  erhöht (vgl. Abb. 14). Als untere Randbedingung ist der Dauerwasserspiegel des HRB Kupferteich mit  $NHN + 14,80$  m angesetzt.

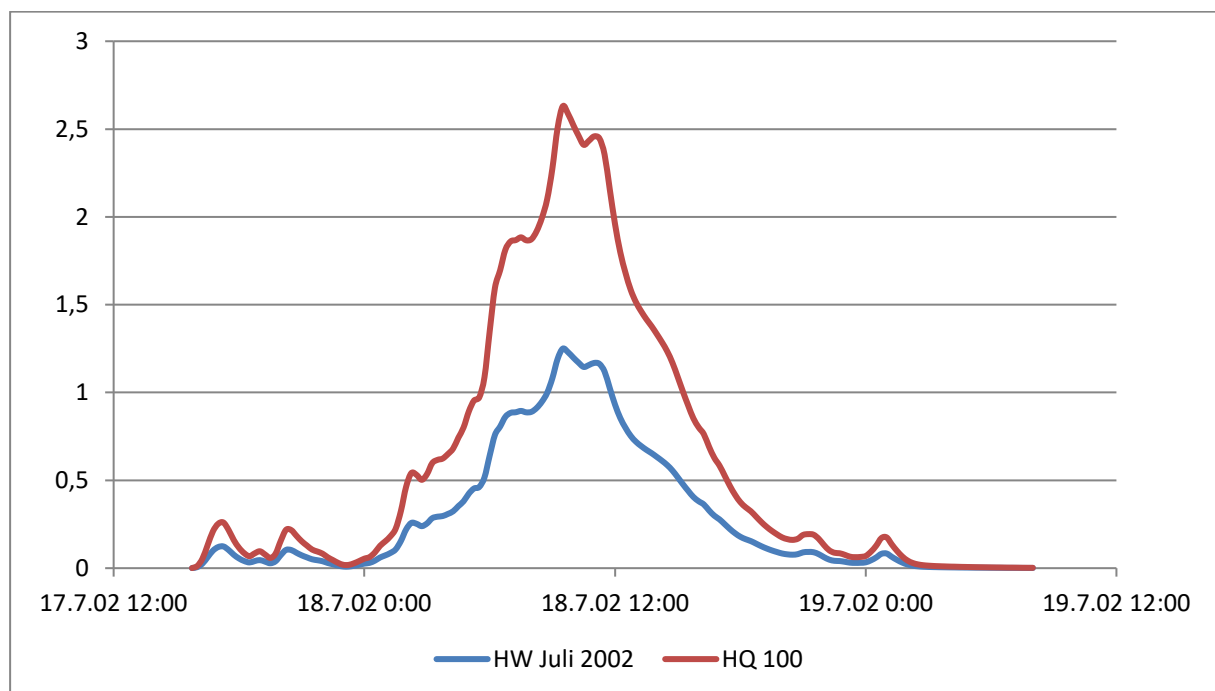


Abb. 14: Obere Randbedingung am Modellknoten 18



Als Anfangslösung wird ein trockenes Modellgebiet vorgegeben. Anschließend wird für eine Vorfällung des Gewässers und der HRB so lange ein konstanter Abfluss im Mittelwasserbereich eingespeist, bis sich ein quasi-stationärer Zustand eingestellt hat. Danach beginnt die eigentliche Simulation des Abflussereignisses mit den instationären Abflussganglinien aus dem N-A-Modell.

#### 4.6 Implementierung Bauwerke

Im Gewässerverlauf des modellierten Gewässers befinden sich technische Bauwerke wie Brücken. Diese werden im HN-Modell in ihrer Breite durch die Topographie berücksichtigt. Da sie aufgrund ihrer Höhe über dem Wasserspiegel nicht abflussrelevant sind kann auf eine Parametrisierung der Bauwerksgeometrie in der Höhe verzichtet werden. Steuerungsbauwerke wie Durchlässe oder auch niedrige Brücken werden in ihrer Geometrie vollständig vom Modell parametrisiert. Damit kann auch die Auswirkung der Änderung von Durchlassbauwerken im Vergleich zum Ist-Zustand berechnet werden.

#### 4.7 Gebäude im Abflussbereich

Infolge der Ausuferung des Gewässers befinden sich häufig Gebäude im Abflussbereich. Die Gebäude werden entsprechend umströmt. Bei der 2D-Modellierung können die Gebäude im Abflussbereich mittels drei verschiedener Verfahren berücksichtigt werden:

- Die Gebäude werden aus dem Gitternetz „ausgestanzt“.
- Die Gebäude werden mit ihrer geometrischen Form im Gitternetz abgebildet.
- Die Gebäude werden aus dem Gitternetz entfernt und ihre Flächen werden mit Rauheiten belegt.

Für die beiden erstgenannten Verfahren besteht praktisch kein Unterschied, da die Umströmung physikalisch naturähnlich berücksichtigt wird. Das letztgenannte Verfahren erhöht den Kalibrierungsaufwand und bildet das Strömungsverhalten des Gebietes nicht zwangsläufig besser ab.

Für die hier vorliegende Untersuchung findet aufgrund der genaueren Interpretierbarkeit der Ergebnisse deshalb das erstgenannte Verfahren Anwendung.

Im Vergleich zur Überprüfung des vorläufig gesicherten ÜSGs im Jahr 2014/2015 (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) 2015) hat sich die Anzahl der Häuser im Modellgebiet verändert. Um eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der Anzahl betroffener Häuser im Überschwemmungsgebiet zu gewährleisten, wurden auch für diese Machbarkeitsstudie derselbe Gebäudelayer aus dem Jahr 2014 verwendet. Somit werden Häuser, welche seit dem Jahr 2014 neu gebaut, abgerissen oder erweitert wurden, nicht berücksichtigt.

## 4.8 Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung

Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung wurde auf eine Sensitivitätsanalyse, sowie auf Kalibrierung und Validierung verzichtet, da das verwendete Modell bereits für vorangehende Untersuchungen kalibriert wurde (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) 2015). Der Fokus dieser Studie liegt auf der Überprüfung der Auswirkungen bei Erweiterung des HRB Sasel und/oder Blakshörn auf das derzeit ausgewiesene Überschwemmungsgebiet der Berner Au.

## 4.9 Modellplausibilisierung

Folgende Schritte werden im Rahmen der Plausibilisierung durchgeführt:

- Visuelle Kontrolle der dynamischen Ausuferung der Berner Au während des betrachteten Hochwasserereignisses
- Vergleich von Modellergebnissen mit Bestandsergebnissen der 2D-Berechnung (Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) 2015) für das HQ<sub>10</sub> und HQ<sub>100</sub>
  - Vergleich Anzahl betroffener Häuser im ÜSG Berner Au
  - Vergleich ausgewählter Orte im Modellgebiet hinsichtlich Veränderungen in der Wassertiefe [+/- cm]
  - Vergleich der potentiellen neuen überschwemmten Fläche mit dem derzeit ausgewiesenen ÜSG der Berner Au. Folglich kann der Indikator „prozentualen Veränderung“ für die Bewertung der modellierten Maßnahme herangezogen werden.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Genauigkeit der Ergebnisse und Qualitätssicherung

Als Grundlage für die Belastbarkeit der Prognose der räumlichen Ausdehnung des Wassers im Modellgebiet, sind Modelle und deren Ergebnisse hinsichtlich ihrer relativen und ihrer absoluten Genauigkeit zu beurteilen. Bei der relativen Genauigkeit können die Auswirkungen - beispielweise von baulichen Maßnahmen - im Rahmen des modellbedingten Ansatzes beurteilt werden. Die absolute Genauigkeit ist die Abweichung des Modellergebnisses vom eingetretenen Naturereignis, welches beispielsweise auf der Grundlage von Messungen beurteilt werden kann. Daraus leitet sich ab, dass auch die räumliche Ausdehnung des Wassers innerhalb des Modellgebiets hinreichend genau berechnet wird. Die absolute Genauigkeit von Modellen ist wegen der Vielzahl und Vielfalt der Eingangsgrößen grundsätzlich mit Toleranzen behaftet.

Zu den systematisch bedingten Toleranzen der Eingangsgrößen zählen beispielsweise:

- Unterschiedliche Genauigkeiten von Vermessungsdaten,
- Genauigkeiten der Pegelmessungen (Wasserstände) und den dazugehörigen Abflussmessungen (Geschwindigkeiten),
- systematische und statistische Abweichungen bei der Ermittlung der Bemessungsabflüsse,
- Ungenauigkeiten bei der Schätzung der Modellparameter (Rauheiten, Wirbelviskositäten).

Die Toleranzen der Eingangsgrößen überlagern sich. Sie können sich teilweise aufheben oder addieren. Wegen der teilweise nichtlinearen Wechselbeziehungen der Eingangsgrößen ist die Genauigkeit der Ergebnisse begrenzt. Die Erfahrung zeigt, dass trotz sorgfältiger Bearbeitungstiefe, bei der Ermittlung von Wasserständen eine bessere Genauigkeit als etwa  $\pm 0,20$  m für die durchgeführte Modellanwendung kaum erreicht werden kann.

Das eingesetzte HN-Modell setzt regelmäßige parallele, gradlinige Stromfäden voraus. Damit verbunden ist eine gleichmäßige hydrostatische Druckverteilung. Bei abrupter Änderung des Wasserspiegels oder des Fließquerschnittes, wie es bei Wehren oder Schützbauwerken der Fall ist, entsteht eine Krümmung der Stromfäden und somit eine Sekundärströmung. Diese kann große Turbulenzen und Vertikalgeschwindigkeiten hervorrufen, sodass lokal abweichende Ergebnisse zur Realität entstehen können.

So liegen beispielsweise bei hydrodynamisch-numerischen 2D-Berechnungen die Ungenauigkeiten des berechneten Wasserspiegels auf den Vorländern bei mittelgroßen Flüssen im Bereich von 0,20 bis 0,40 m (Yörük 2009). Niedersachsen gibt eine Genauigkeit von  $\pm 0,20$  m an (Niedersachsen 2008). Der relative Vergleich verschiedener Modellvarianten untereinander, die mit demselben Modell und DGM gerechnet werden, ermöglicht eine Abschätzung der Wirksamkeit verschiedener Varianten und gewährt Vergleichbarkeit der Ergebnisse unabhängig von den absoluten Ungenauigkeiten.

Die mit dieser Untersuchung erzielte rechnerische Genauigkeit führt im wissenschaftlich-technischen Zusammenhang zu einer fachlich belastbaren Aussage, die völlig hinreichend für die in Rede stehende Fragestellung ist.

## 5.2 Ergebnisse der Berechnung

Für die Machbarkeitsuntersuchung zur Erweiterung der HRB Sasel und Blakshörn wurden sechs Modellvarianten (vgl. Kap. 3.2, S.9) für je zwei hydraulische Randbedingungen -  $HQ_{10}$  und  $HQ_{100}$  - untersucht.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Wasserstände, Ausdehnung der überschwemmten Fläche und Anzahl betroffener Häuser in Tabellenform dargestellt und beschrieben.

### 5.2.1 Vergleich der Wasserstände für $HQ_{100}$ und $HQ_{10}$

Um die Wasserstandsänderungen infolge der unterschiedlichen Modellvarianten darstellen zu können, werden exemplarisch vier Beobachtungspunkte im Modell (vgl. Abb. 15) entlang der Berner Au definiert und die Berechnungsergebnisse an diesen Stellen miteinander verglichen. Bei den Punkten handelt es sich um Orte oberstrom der Berner Au wie dem HRB Sasel, dem HRB Blakshörn, einen Vergleichspunkt nahe der Krögerkoppel und einem bei der St. Jürgen Straße.

Der Vergleich der berechneten Wasserstände (vgl. Tab. 5 und Tab. 6) zeigt, dass für alle Varianten verglichen mit dem Referenzzustand (Variante 0), überwiegend Wasserstandabsenkungen oder unveränderte Wasserstände an den ausgewählten Punkten berechnet werden. Die Varianten 1A bis 1C (Maßnahmen am HRB Blakshörn) weisen insgesamt eine geringere Änderung im Gegensatz zu den Varianten 2A bis 2C (Maßnahmen am HRB Sasel) auf. Für die Varianten mit Erweiterung südlich des HRB Sasel (2A, 2B und 2C) können im Fall des untersuchten  $HQ_{100}$  Absenkungen des Wasserstandes im Bereich der Krögerkoppel von bis zu 18 cm erreicht werden.

Für das simulierte  $HQ_{10}$  treten hingegen kaum Wasserstandänderungen infolge der überprüften Varianten ein (vgl. Tab. 5). Insgesamt werden im Bereich des HRB Blakshörn und der St. Jürgen Straße keinerlei Wasserstandänderungen berechnet. Stromauf bei der Krögerkoppel und dem HRB Sasel werden lediglich infolge der Varianten mit südlicher Erweiterung des HRB Sasel Absenkungen um 7 bis 14 cm erreicht. Der geringere Effekt der Modellvarianten auf das  $HQ_{10}$  im Vergleich zum  $HQ_{100}$  lässt sich darauf zurückführen, dass die bestehenden HRB das  $HQ_{10}$  besser zurückhalten können.



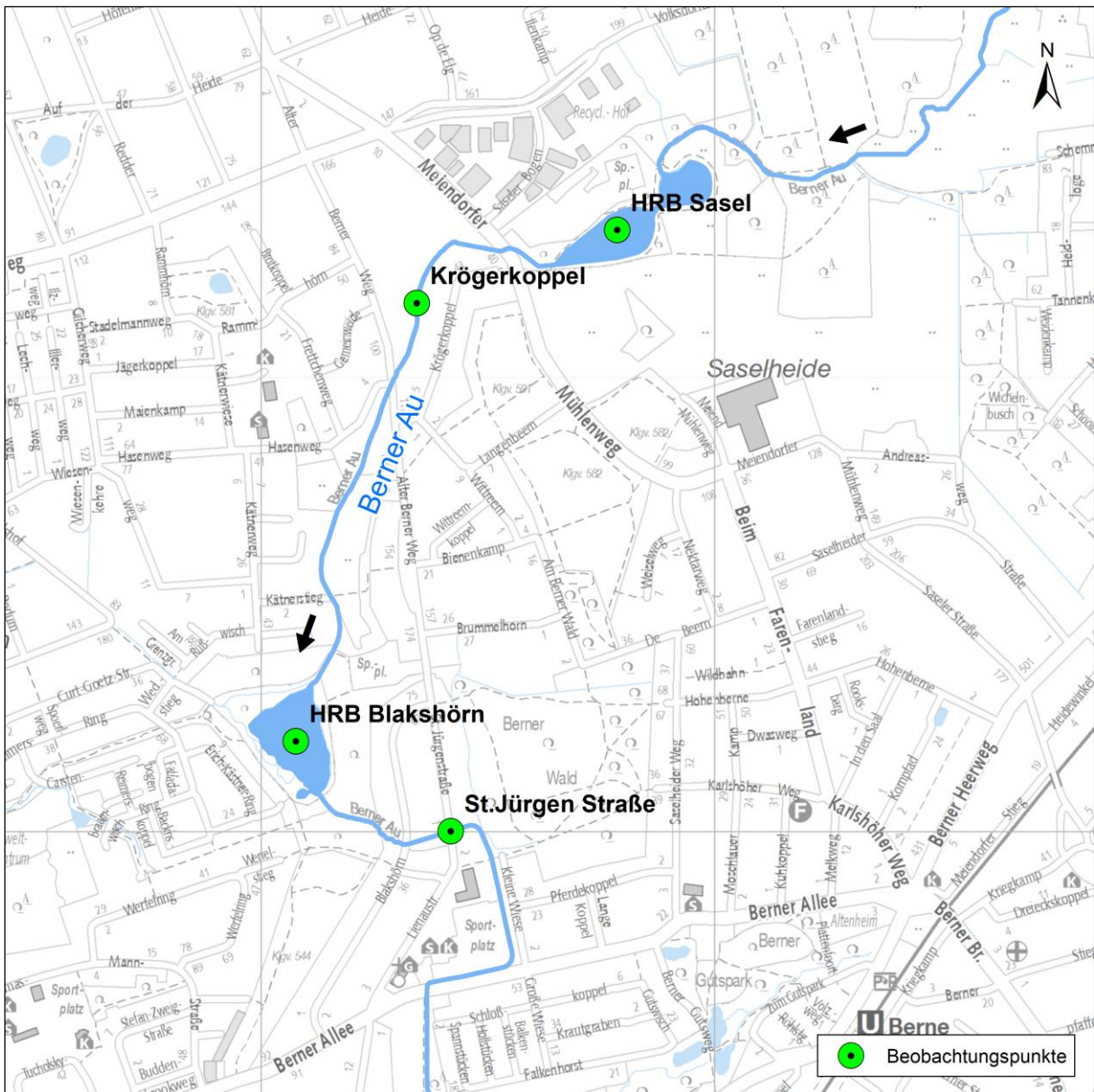


Abb. 15: Übersicht der Beobachtungspunkte entlang der Berner Au zum Vergleich der Wasserstände bei unterschiedlichen Modellvarianten

Zusammenfassend sind für beide Hochwasserereignisse ( $HQ_{100}$  und  $HQ_{10}$ ) die größten Veränderungen hinsichtlich der Wasserstände entlang der Berner Au infolge der Variantenüberprüfung bei Sasel zu verzeichnen. Insbesondere Variante 2C zeigt deutliche Absenkungen der Wasserstände an den 4 Vergleichspunkten (vgl. Abb. 15). Diese Variante beinhaltet zugleich die größten Abgrabungsvolumina im Raum Sasel (vgl. Kapitel 3.2).

	Bezeichnung	HRB Sasel [+/- cm]	Krögerkop- pel [+/- cm]	HRB Blaks- hörn [+/- cm]	St.Jürgen Straße [+/- cm]
<b>Erweiterungen am HRB Blakshörn</b>	VARIANTE 1A	+/- 0	+/- 0	+1	-1
	VARIANTE 1B	+/- 0	-2	-4	-5
	VARIANTE 1C	+/- 0	+/- 0	-7	-8
<b>Erweiterungen am HRB Sasel</b>	VARIANTE 2A	-28	-14	-5	-3
	VARIANTE 2B	-28	-14	-5	-12
	VARIANTE 2C	-37	-18	-5	-4

Tab. 5: Veränderungen der Wasserstände bei einem HQ<sub>100</sub> Ereignis infolge der Modellvarianten im Vergleich zum Referenzzustand

	Bezeichnung	HRB Sasel [+/- cm]	Krögerkop- pel [+/- cm]	HRB Blaks- hörn [+/- cm]	St.Jürgen Straße [+/- cm]
<b>Erweiterungen am HRB Blakshörn</b>	VARIANTE 1A	+/- 0	+/- 0	+/- 0	+/- 0
	VARIANTE 1B	+/- 0	+/- 0	+/- 0	+/- 0
	VARIANTE 1C	+/- 0	+/- 0	+/- 0	+/- 0
<b>Erweiterungen am HRB Sasel</b>	VARIANTE 2A	-13	-7	+/- 0	+/- 0
	VARIANTE 2B	-14	-7	+/- 0	+/- 0
	VARIANTE 2C	-14	-7	+/- 0	+/- 0

Tab. 6: Veränderungen der Wasserstände bei einem HQ<sub>10</sub> Ereignis infolge der Modellvarianten im Vergleich zum Referenzzustand

## 5.2.2 Vergleich der Größe der überschwemmten Fläche und Anzahl betroffener Häuser bei einem HQ<sub>100</sub>

Für eine aussagekräftige Bewertung der modellierten Maßnahmen ist die alleinige Auswertung der Wasserstände (vgl. Kapitel 5.2.1) nicht ausreichend. Aus diesem Grund werden die jeweiligen überschwemmten Flächen der einzelnen Varianten miteinander verglichen.

In der nachstehenden Tabelle sind sowohl die Fläche und prozentuale Verkleinerung der überschwemmten Flächen als auch die Änderung der Anzahl der von der Überschwemmung betroffenen Häuser infolge aller überprüften Varianten aufgelistet.

	Bezeichnung	Überschwemmte Fläche inklusive Gewässer bei HQ <sub>100</sub> [ha]	Prozentuale Veränderung der überschwemmten Fläche bei HQ <sub>100</sub> [%]	Anzahl betroffener Häuser bei HQ <sub>100</sub>	Anzahl neu betroffener Häuser bei HQ <sub>100</sub>
	VARIANTE 0	44,63	0	122	0
<b>Erweiterungen am HRB Blakshörn</b>	VARIANTE 1A	39,24	-12,08	109	8
	VARIANTE 1B	40,29	-9,73	104	0
	VARIANTE 1C	41,46	-7,11	107	8
<b>Erweiterungen am HRB Sasel</b>	VARIANTE 2A	40,46	-9,35	75	0
	VARIANTE 2B	41,73	-6,50	69	3
	VARIANTE 2C	42,16	-5,54	71	0

Tab. 7: Gegenüberstellung der überschwemmten Fläche (inkl. Gewässer) und der prozentualen Veränderung sowie Anzahl betroffener Häuser und neu betroffener Häuser infolge der baulichen Veränderung am HRB Sasel und Blakshörn bei einem HQ<sub>100</sub>

Insbesondere die prozentuale Verkleinerung der überschwemmten Fläche bei Variante 1A fällt auf Grund ihrer großen Abnahme auf. Bei dieser Variante wurde das HRB Blakshörn um ein westlich von Blakshörn gelegenes Trockenbecken ohne Veränderung der Geländehöhe im Modell erweitert. Das Trockenbecken wurde im Modell mittels Damm (Höhe: NHN +25,00 m) vom umliegenden Gebiet abgegrenzt. Bei dieser Variante wird die geplante Fläche östlich des HRB Blakshörn nicht zielgerichtet über den Einlass geflutet. Ein Teil des Wassers wird entlang des nördlich gelegenen Damms aufgestaut und westlich am Damm vorbei geleitet, sodass neue Bereiche wie in etwa der St. Jürgenstraße und Blakshörn überschwemmt werden (vgl. Abb. 16), die zuvor im Referenzfall trocken blieben. Infolgedessen

führt Variante 1A dazu, dass zuvor nicht betroffene Häuser in diesem Fall vom ÜSG Berner Au betroffen wären. Variante 1A zeigt somit zwar eine deutliche Verkleinerung der überschwemmten Fläche bei einem HQ<sub>100</sub>, jedoch mit einem unerwünschten Nebeneffekt neu betroffener Häuser im ÜSG Berner Au.

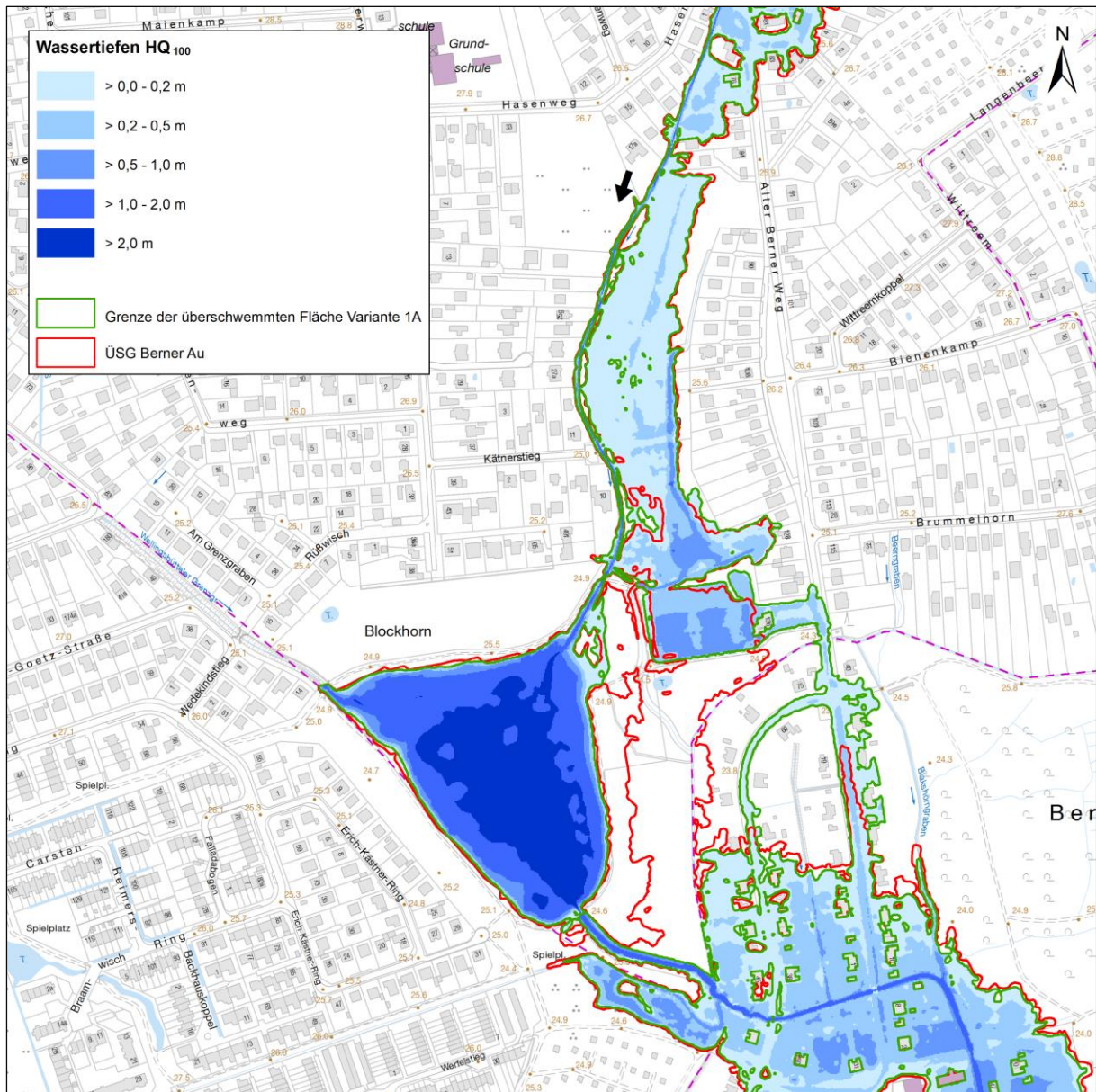


Abb. 16: Ausschnitt der Modellergebnisse Variante 1A – HQ<sub>100</sub> (ohne Maßstab)

Modellvarianten, welche keine neuen betroffenen Häuser im ÜSG zur Folge haben, ergeben sich infolge von Variante 2A und 2C. In beiden Fällen handelt es sich um Varianten, bei denen das HRB Sasel um ein südlich gelegenes Trockenbecken erweitert wurde. Die Karten der überschwemmten Flächen finden sich hierzu in Anlage 2 und 3 im Anhang.



### 5.2.3 Vergleich der Größe der überschwemmten Fläche bei einem HQ<sub>10</sub>

Neben der Auswertung der überschwemmten Fläche infolge eines HQ<sub>100</sub> – Ereignisses ist die Auswertung des HQ<sub>10</sub> ebenfalls Teil der Machbarkeitsstudie. Im Folgenden werden entsprechend dem Kapitel 5.2.2 für das HQ<sub>10</sub> die überschwemmten Fläche (inkl. Gewässer), die prozentuale Veränderung infolge der jeweilig überprüften Variante sowie die Anzahl betroffener Häuser und neu betroffener Häuser miteinander verglichen (vgl. Tab. 8).

	Bezeichnung	Fläche der überschwemmten Fläche inklusive Gewässer bei HQ <sub>10</sub> [ha]	Prozentuale Veränderung der überschwemmten Fläche bei HQ <sub>10</sub> [%]	Anzahl betroffener Häuser infolge des HQ <sub>10</sub> Bestand	Anzahl neu betroffener Häuser infolge des HQ <sub>10</sub>
	VARIANTE 0	24,13	0	18	0
<b>Erweiterungen am HRB Blakshörn</b>	VARIANTE 1A	25,72	+6,59	22	4
	VARIANTE 1B	25,44	+5,42	20	2
	VARIANTE 1C	25,59	+6,05	22	4
<b>Erweiterungen am HRB Sasel</b>	VARIANTE 2A	27,43	+13,66	17	2
	VARIANTE 2B	28,09	+16,39	19	4
	VARIANTE 2C	29,28	+21,33	17	2

Tab. 8: Gegenüberstellung der überschwemmten Fläche (inkl. Gewässer) und der prozentualen Veränderung infolge der baulichen Veränderung am HRB Sasel und Blakshörn bei einem HQ<sub>10</sub>

Während bei dem HQ<sub>100</sub> eine Abnahme der überschwemmten Fläche ermittelt wird (vgl. Kapitel 5.2.2, Tab. 7), werden für das HQ<sub>10</sub> Vergrößerungen der überschwemmten Fläche infolge der Maßnahmen berechnet. Diese sind dadurch zu erklären, dass das gesamte überschwemmte Gebiet flächig ausgewertet wurde. Hierbei werden alle Gewässerflächen eingerechnet, somit auch die neu modellierten Trockenbecken am HRB Sasel oder HRB Blakshörn. Infolgedessen werden zwar die mit Wasser benetzten Flächen größer, jedoch nicht unbedingt die potentiell für Mensch und Haus gefährdende Fläche. Zur Verdeutlichung wird hier auf Variante 2C verwiesen, welches die größten Änderungen der überschwemmten Fläche beinhaltet (vgl. Abb. 17). Die überschwemmte Fläche infolge Variante 2C ist in der Farbe Grün dargestellt und wird dem HQ<sub>10</sub> Bestand in Rot gegenübergestellt. Hierbei wird darauf hingewiesen, dass es sich bei dem HQ<sub>10</sub> Bestand um die aktuellste Überprüfung im

Rahmen der Risikobewertung der EG-Richtlinie zum Hochwasserrisikomanagement handelt, welche am 22.12.2019 veröffentlicht wird.

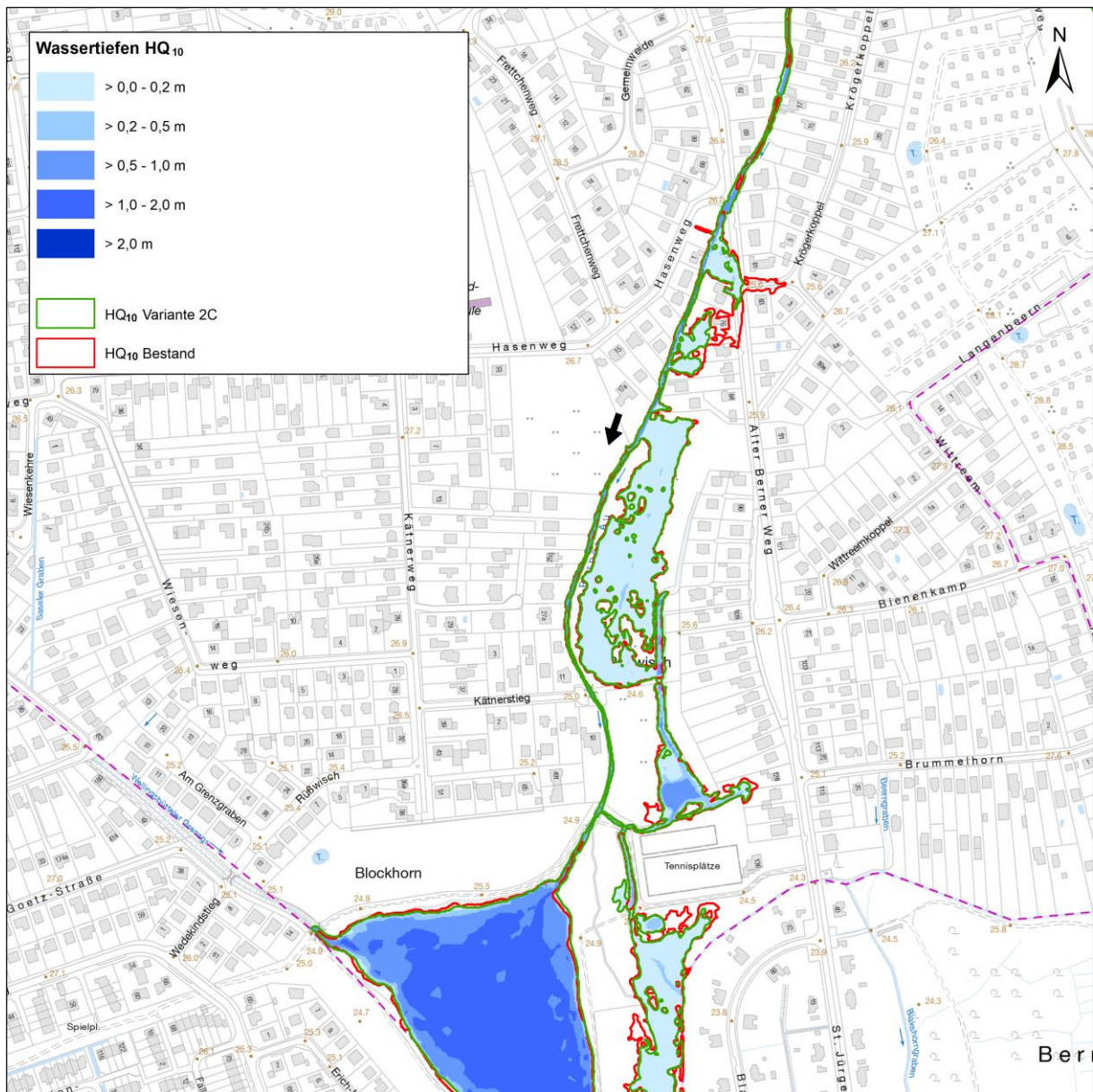


Abb. 17: Ausschnitt der Modellergebnisse Variante 2C – HQ<sub>10</sub> (ohne Maßstab)

Des Weiteren werden bei einem HQ<sub>10</sub>-Ereignis infolge der Variante 1A bis 1C vier zusätzliche Häuser betroffen sein. Bei Variante 2A und 2C kann die Anzahl der betroffenen Häuser in der Summe bei einem HQ<sub>10</sub> um ein Haus verringert werden, jedoch werden wiederum auch zwei zuvor nicht betroffene Häuser hinzukommen.

#### 5.2.4 Wassertiefenkarten / Vergleichskarten

Insgesamt wurden sechs verschiedene Varianten für den Bereich Blakshörn und Sasel sowohl für das HQ<sub>100</sub> als auch für das HQ<sub>10</sub> modelltechnisch geprüft. In den Anlagen 1, 2 und

3 werden drei verschiedene Varianten als Wassertiefenkarte dargestellt, welche die größten Auswirkungen hinsichtlich der Verkleinerung der überschwemmten Fläche als auch in der Anzahl betroffener Häuser im ÜSG Berner Au zeigen. Hierbei handelt es sich um die Varianten 1B, 2A und 2C (vgl. Kapitel 3.2). Der Umriss der überschwemmten Fläche infolge der untersuchten Maßnahme wird in den Anlagen in der Farbe Grün gekennzeichnet. Der Umriss des derzeit ausgewiesenen ÜSG Berner Au ist hingegen in der Farbe Rot dargestellt. Insbesondere die Unterschiede zwischen der HRB Erweiterung Blakshörn (Anlage 1) und der HRB Erweiterung Sasel (Anlage 2 und 3) zeigen deutliche Unterschiede im Bereich der Krögerkoppel.

Die Varianten 2A und 2C (Anlage 2 und 3) unterscheiden sich lediglich in der Größe des modellierten Trockenbeckens südlich von Sasel. Während Variante 2A ein Bodenabtragsvolumen von 60.449 m<sup>3</sup> infolge der HRB Erweiterung aufweist, sind es bei Variante 2C etwa 110.864 m<sup>3</sup>.

Für die Varianten 1A, 1C und 2B ist keine Hochwasserneutralität gegeben. Es würden zusätzliche Häuser vom überschwemmten Gebiet betroffen sein. Aus diesem Grund wurden diese Varianten nicht weiter untersucht.

### 5.2.5 Schlussfolgerung und Diskussion

Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung zur Erweiterung der HRB Sasel und Blakshörn wurden insgesamt sechs Varianten für je zwei Abflussereignisse (HQ<sub>10</sub> und HQ<sub>100</sub>) untersucht. Dabei wurden die Wasserstände (vgl. Tab. 5 und Tab. 6) an vier Punkten im Untersuchungsgebiet miteinander verglichen. Neben der Auswertung der Wassertiefen galt es auch die Ausbreitung der überschwemmten Fläche sowie die Anzahl betroffener Häuser (vgl. Tab. 7 und Tab. 8) bei beiden Ereignissen mit dem Referenzzustand zu vergleichen. Die Größe der überschwemmten Fläche bei einem HQ<sub>100</sub> ist maßgebend für die Ausweisung des Überschwemmungsgebietes der Berner Au.

Im Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass die Wasserstände der Berner Au vor allem in Folge von Anpassungen am HRB Sasel deutlich beeinflusst werden. Es können Absenkungen des Wasserstandes von 3 cm bei der St. Jürgen Straße, bis zu 18 cm bei der Krögerkoppel und bis zu 28 cm im HRB Sasel (vgl. Tab. 5) bei einem HQ<sub>100</sub> festgestellt werden. Hinsichtlich der Größe der überschwemmten Fläche sowie Anzahl betroffener Gebäude stehen insbesondere Variante 2A und 2C heraus (vgl. Tab. 7). Diese Varianten beinhalten Erweiterungen am HRB Sasel südlich des bestehenden Beckens. Während Variante 2C die größte Absenkung im Wasserstand zeigt, ist Variante 2A mit vergleichsweise geringem Bodenabtrag ebenfalls als sehr effektiv zu bewerten. Mit 60.449 m<sup>3</sup> Bodenabtrag kann die Anzahl betroffener Häuser bei einem HQ<sub>100</sub> von 122 auf 75 verringert werden. Bei Variante 2C würde die Anzahl der betroffenen Häuser in der überschwemmten Fläche von 122 auf 71 Häuser verringert werden, jedoch müsste hierfür ein Bodenabtragsvolumen von etwa 110.864 m<sup>3</sup> in Kauf genommen werden.

Die Variante 2A ist entsprechend des geringen Aufwandes und der zugleich hohen möglichen Absenkung der Wasserstände sowie Verringerung der betroffenen Häuser in der überschwemmten Fläche als Favoriten der Machbarkeitsstudie anzusehen.

## 6 Zusammenfassung

Ziel der Untersuchung ist es, die Erweiterung der HRB Blakshörn und Sasel entlang der Berner Au auf ihre hydraulische Wirksamkeit zu überprüfen. Insbesondere wurde hierbei untersucht, ob sich die Wasserstände oder die überschwemmte Fläche sowie die Anzahl der betroffenen Häuser durch die Realisierung von geplanten Umgestaltungen im Vergleich zum Referenzzustand verändern. Die Anzahl der betroffenen Häuser in der überschwemmten Fläche sowie die Größe der überschwemmten Fläche sind von maßgebender Bedeutung (vgl. Kapitel 5.2.2). Für die Machbarkeitsuntersuchung wurde das Modellsystem Delft3D Flexible Mesh (Deltares 2019) im 2D-Verfahren verwendet. Insgesamt wurden sechs Varianten für je zwei Abflussereignisse ( $HQ_{100}$  und  $HQ_{10}$ ) zur Erweiterung der HRB Sasel und Blakshörn untersucht. Dabei wurden die Wasserstände (vgl. Tab. 5 und Tab. 6) an vier Orten im Untersuchungsgebiet miteinander verglichen. Außerdem wurde die überschwemmte Fläche dem derzeitig ausgewiesenen ÜSG gegenübergestellt sowie die Anzahl der betroffenen Häuser im ÜSG und den überschwemmten Flächen der Varianten geprüft (vgl. Tab. 7).

Die Überprüfung der Varianten hat ergeben, dass im Hochwasserfall  $HQ_{100}$  im Bereich der Krögerkoppel die Wasserstände mit Erweiterung des HRB Sasel (Variante 2A und 2C) um 14 cm bzw. 18 cm gesenkt werden können. Zudem kann die überschwemmte Fläche (inklusive Gewässer) entlang der Berner Au infolge der Erweiterung des HRB Sasel (Variante 2A und 2C) um 5,5 % bzw. 9,4 % (vgl. Tab. 7) verringert werden. Infolgedessen wären im Optimalfall (Variante 2C) nur noch 71 statt 122 Häuser von der Überschwemmung im Hochwasserfall ( $HQ_{100}$ ) betroffen.

Im Falle eines  $HQ_{10}$  haben sich hingegen kaum Änderungen in der Höhe der Wasserstände (vgl. Kapitel 5.2.1, Tab. 6) ergeben. Insgesamt wird die überschwemmte Fläche bei einem  $HQ_{10}$  infolge der Trockenbeckenerweiterungen vergrößert (vgl. Tab. 8), da die Gewässerflächen der erweiterten Hochwasserrückhaltebecken ebenfalls in die überschwemmte Fläche eingerechnet werden.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung können drei wesentliche Erkenntnisse abgeleitet werden:

1. Die Maßnahmen im Bereich Blakshörn haben deutlich geringere Auswirkungen als im Bereich des HRB Sasel sowohl auf den Wasserstand als auch auf die Größe der überschwemmten Fläche entlang der Berner Au.
2. Die größten Wasserstandabsenkungen und Verkleinerungen der überschwemmten Fläche können im Falle eines  $HQ_{100}$  mittels Trockenbeckenerweiterung am HRB Sasel (Anlage 2 und 3) erreicht werden.
3. Im Falle der Varianten 2A und 2C (Anlage 2 und 3) waren infolge der Maßnahmenmodellierung am HRB Sasel keine zusätzlichen Häuser von einem  $HQ_{100}$  betroffen.

Zusammenfassend konnten für beide Ereignisse ( $HQ_{10}$  und  $HQ_{100}$ ) die größten Effekte bei Veränderungen im Bereich des HRB Sasel festgestellt werden. Deshalb wird empfohlen, weitergehende Maßnahmen hinsichtlich der Trockenbeckenerweiterung südlich von Sasel vorzunehmen. Hierbei wird darauf hingewiesen, die Grundwasserentwicklung im Raum Sasel zu prüfen.

Ziel der vorliegenden Studie war es nicht, Ausgestaltung und Positionierung der HRB Erweiterungen zu perfektionieren und/oder eine Kostenschätzung der daraus ggf. folgenden



Umsetzung im Rahmen der geplanten Modellierungsarbeiten durchzuführen. Stattdessen wurden Maßnahmen bezüglich Positionierung, Ausdehnung und Dimensionierung gemäß einer zuvor mit Bezirk und LSBG abgesprochenen Auswahl der Vorschläge der Bürgerinitiative untersucht. Eine Optimierung der genannten Maßnahmen kann im Rahmen der vorliegenden Studie nicht geleistet werden. Eine anschließende Optimierung und Planung mit naturnaher Gestaltung des Trockenbeckens kann seitens des LSBG im weiteren Verlauf ähnlich dem Projekt Stuck erfolgen.

## 7 Literaturverzeichnis

Bieberstein, Andreas (2006): DIN 19700-12:2004-07 – Arbeitshilfe zu den geotechnischen Anforderungen für Hochwasserrückhaltebecken sehr kleiner, kleiner und mittlerer Größe. Abschlussbericht. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik. Karlsruhe.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013): Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Bedeutung, Organisation, Kosten. Berlin.

Deltares (2019): Delft3D Flexible Mesh Suite. User Manual. Online verfügbar unter C:\Program Files (x86)\Deltares\Delft3D FM Suite 2019.02 HMWQ (1.5.2.42543)\bin\D-Flow\_FM\_User\_Manual.pdf, zuletzt geprüft am 26.09.2019.

Freie und Hansestadt Hamburg (1982): Haushalts- und Ausführungsunterlage Bau §24/54 LHO. Baumaßnahme: Ausbau Gewässer II. Ordnung, Teilmaßnahme: Ausbau des RHB Sasel und Herrichtung einer Spülfläche - 2. Bauabschnitt -. unveröffentlicht. Unter Mitarbeit von Bezirksamt Wandsbek - Tiefbauabteilung.

Freie und Hansestadt Hamburg (1987): Genehmigungsunterlage. Baumaßnahme: Ausbau der Gewässer II. Ordnung, Teilbaumaßnahme: Ausbau des Hochwasserrückhaltebeckens Blakshörn. unveröffentlicht. Unter Mitarbeit von Bezirksamt Wandsbek-Tiefbauabteilung, 09.09.1987.

Freie und Hansestadt Hamburg (1988): Zustimmungsbescheid. Bauungsplan: 1. Bramfeld 47: Parkanlage, Rückhaltebecken, 2. Sasel 14/Bramfeld 49: Wasserfläche, 3. Bstpl. Sasel: Außengebiet, Landschaftsschutzgebiet, Bauliche Anlage: Erweiterung des Hochwasserrückhaltebeckens Blakshörn. unveröffentlicht.

Landesanstalt für Umweltschutz (2003): Hydraulik naturnaher Fließgewässer, Teil 4. Karlsruhe.

Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (2014): Laserscandaten, 2014. mündliche Mitteilung an Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer.

Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) (Hg.) (2015): Überprüfung des vorläufig gesicherten Überschwemmungsgebietes der Berner Au. Unter Mitarbeit von Björn Ruge, Sebastian Schwiderski, Frank Noll, Stefan Kraatz, Jan-Moritz Müller, Sonja Peters et al. Hamburg (Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer, Nr.5).

Musall, Mark (2011): Mehrdimensionale hydrodynamische-numerische Modelle im praxisorientierten und operationellen Einsatz. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.

Niedersachsen (2008): Empfehlungen zur Feststellung und Festsetzung von Überschwemmungsgebieten. Niedersächsisches Ministerialblatt (Nr.40), 22.08.2008.

Yörük, Alpaslan (2009): Unsicherheiten der hydrodynamischen Modellierung von Überschwemmungsgebieten. Dissertation. Universität der Bundeswehr.

## 8 Symbole und Bezeichnungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$\partial$	Differenz	-
$u, v, w$	Geschwindigkeitsvektor	m/s
$x, y, z$	Achse im kartesisches Koordinatensystem	-
$q$	Volumenänderung	m <sup>3</sup> /s
$u, v$	tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit	m/s
$g$	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
$H$	Wassertiefe oberhalb einer Bezugsfläche	m
$t, T$	Zeit	s
$f v, u$	Indices x- und y-Komponenten der Corioliskraft	N
$\tau_{bx,y}$	Indices x- und y-Komponenten der Sohlschubspannung	N/m <sup>2</sup>
$\rho_w$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$d$	Wassertiefe unterhalb einer Bezugsfläche	m
$F_{x,y}$	Indices der x- und y-Komponenten der äußern Kräfte	N/m <sup>2</sup>
$U$	absolute Geschwindigkeit	m/s
$k_s$	äquivalente Sandrauheit	m
$h$	Wassertiefe	m
$\nu$	Viskosität	m <sup>2</sup> /s
$n_u$	Wirbelviskosität	m <sup>2</sup> /s
$C$	Widerstandsbeiwertes nach Chézy	m <sup>1/2</sup> /s
$L$	Länge	m
$c$	Abminderungsfaktor	-
$\mu$	Abflussbeiwert	-
$h_{\ddot{u}}$	Überfallhöhe	m
$A$	Fließquerschnitt	m <sup>2</sup>
$v_m$	mittlere Fließgeschwindigkeit	m/s
$\theta_{cr}$	Shields Parameter	dimensi- onslos
k. A.	keine Angabe	
n. n	nicht nennbar	





## 9 Anlagen

Anlage 1: Wassertiefenkarte HQ<sub>100</sub> Variante 1B

Anlage 2: Wassertiefenkarte HQ<sub>100</sub> Variante 2A

Anlage 3: Wassertiefenkarte HQ<sub>100</sub> Variante 2C



## 10 Aufstellungsvermerk

Bearbeitet und aufgestellt von:

Hamburg, den 26.11.2019

elektronisch gezeichnet

---

G1

Fachtechnisch geprüft:

Hamburg, den 26.11.2019

elektronisch gezeichnet

---

G1

Hamburg, den 26.11.2019

elektronisch gezeichnet

---

G10

(Fachbereichsleitung)

Freie und Hansestadt Hamburg  
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer  
Sachsenfeld 3-5  
20097 Hamburg

Titelbild:  
HRB Sasel im Mai 2019 (  )