
ÜBERPRÜFUNG DER SCHLIEßORDNUNG DES INNEREN ESTE-SPERRWERKS

FE-BERICHT

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing Peter Fröhle
Bearbeitung: Dipl.-Ing Edgar Nehlsen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
HAMBURG-HARBURG
Institut für Wasserbau
Denickestraße 22
21073 Hamburg

Hamburg, 26.08.2013

Projekt: Überprüfung der Schließordnung des Inneren Este-Sperrwerks

(Projekt-Nr.: 215045)

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg

Moorweidenstraße 14
20148 Hamburg

vertreten durch:
Dr.-Ing. Ingo Entelmann
Dipl.-Ing. Caro Feldmann

Auftragnehmer: TuTech Innovation GmbH

Institut für Wasserbau B 10
Denickestraße 22
21073 Hamburg
Tel.: +49 40 42878 – 4600
Fax.: +49 40 42878 – 2802
E-Mail: wasserbau@tu-harburg.de
Internet: www.tu-harburg.de/wb

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle
Bearbeiter: Dipl.-Ing. Edgar Nehlsen

Inhalt

1	Einleitung	9
2	Vergleich von Gebietsmerkmalen der Einzugsgebiete der Oberwasserpegel	13
2.1	Landnutzung und Versiegelungsgrad	13
2.2	Durchlässigkeit der Böden	15
2.3	Relief	16
2.4	Zeit- Flächen Funktion	19
2.5	Zusammenfassung	20
3	Überarbeitung der bestehenden Schließabelle	21
3.1	Übernahme des Pegels Emmen in die Schließabelle	22
3.1.1	Gültigkeit der Verknüpfungsvarianten	23
3.1.2	Vorläufige neue Schließabelle	26
3.2	Verfahren zur Überprüfung der vorläufigen Schließabelle	28
3.2.1	Schöpfwerksbetrieb	28
3.2.2	Mittlere Schließdauern	29
3.2.3	Stauraum im Unterlauf	30
3.2.4	Kritische Schließfälle	33
3.3	Modellgestützte Optimierung der Schließabelle	35
3.3.1	Das hydronumerische Modell der Este	35
3.3.2	Modellgestützte Systemanalyse (Szenarien 1-4)	38
3.3.3	Vorschläge für optimierte Schließabellen	43
3.3.4	Auswahl der optimierten Schließabellen	44
3.4	Zusammenfassung	45
4	Auswirkungen auf den Schließbetrieb	47
4.1	Schließhäufigkeit und Schließdauer	47
4.1.1	Verfahren zur Simulation der Sperrwerksschließungen	47
4.1.2	Schließhäufigkeit bei Verwendung der aktuell gültigen Schließabelle	49
4.1.3	Schließhäufigkeit bei Verwendung der neuen Schließabelle	51
4.1.4	Schließdauer bei Verwendung der aktuell gültigen Schließabelle	52
4.1.5	Schließdauer bei Verwendung der neuen Schließabelle	54
4.2	Testbetrieb im numerischen Modell	56
4.2.1	Szenarien	56
4.2.2	Ergebnisse	58
4.3	Zusammenfassung	60

5 Abschließende Zusammenfassung**63**

Schrifttum 66

Anhang 67

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die Lage der Pegel und die Einzugsgebiete der Pegel	10
Abbildung 2: Landnutzungsarten (zusammengefasst nach ALK) in den EZG Rockstedt und Emmen normiert über die jeweilige Gesamtfläche.	14
Abbildung 3: Einteilung der Böden in den Einzugsgebieten nach dem Durchlässigkeitsbeiwert des Bodenhorizontes bis 2m unter Geländeoberfläche (abgeleitet aus Bük50)	15
Abbildung 4: Verteilung der Geländehöhen in den Einzugsgebieten.....	16
Abbildung 5: Verteilung der Fließweglängen in den Einzugsgebieten.....	17
Abbildung 6: Summenkurve der Steigungen in den Einzugsgebieten	18
Abbildung 7 Zeit- Flächen Funktionen der beiden Einzugsgebiete	19
Abbildung 8: Summenkurve der Entwässerungszeiten der Einzugsgebiete.....	20
Abbildung 9: Abflussdauerlinien der Jahre 2003-2011 an den Pegeln Emmen und Rockstedt	22
Abbildung 10: Verknüpfungsfunktionen der Methode Überschreitungshäufigkeit (Variante 1) und stat. Eintrittswahrscheinlichkeiten (Variante 2)	23
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der vereinfachten Abschätzung des Öffnungswasserstandes	28
Abbildung 12: Tidekurven zur Ermittlung der Schließdauern des Inneren Sperrwerks, ausgehend von der mittleren Tidekurve (MTK) 2010.	30
Abbildung 13: Schließdauern vereinfacht abgeleitet aus der MTK 2010. Annahme: Schließwasserstand gleich Öffnungswasserstand	30
Abbildung 14: Wasserstand-Volumen Beziehung des Unterlaufes zwischen Buxtehude Hafen und Innerem Este-Sperrwerk sowie deren Steigung.....	31
Abbildung 15: Betroffene Wohnbaufläche (gemäß ALK Folie 1300 Wohnbaufläche) in Abhängigkeit vom Wasserstand	32
Abbildung 16: Übersicht des 2D-Modells der Este.....	36
Abbildung 17: Kalibrierungsergebnisse am Binnenpegel des Inneren Este-Sperrwerks	38
Abbildung 18: Ganglinien (Messwerte) im zu Grunde gelegten Simulationszeitraum vom 03.02.11 bis zum 09.02.11	39
Abbildung 19: Gemessener Niederschlag an der Station Jork (oben), gemessene und simulierte Wasserstände am Inneren Este-Sperrwerk ohne Schöpfwerkseintrag: Szenario 1 (mitte) und mit vollem Schöpfwerkseintrag: Szenario 2 (unten), gestrichelt dargestellt ist der Wert 7,20 mPN	41

Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung der 3 Parameter zur Simulation der Sperrwerksschließungen	48
Abbildung 21: Aufgetretene und simulierte Schließhäufigkeiten des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010.....	50
Abbildung 22: Fiktive Schließhäufigkeiten des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010 für die vorgeschlagenen Schließstabellen (Varianten A und B).....	51
Abbildung 23: Aufgetretene und simulierte Schließdauern des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010	53
Abbildung 24: Fiktive Schließhäufigkeiten des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010 für die vorgeschlagenen Schließstabellen (Varianten A und B).....	54
Abbildung 25: Ganglinien (Messwerte) im Simulationszeitraum vom 08.08.11 bis zum 12.08.11	56
Abbildung 26: Ergebnisse der Simulation der Szenarien 5 und 6, Wasserstände im Längsschnitt, berücksichtigt wurden nur gesperrte Tiden (hier alle 9).....	59
Abbildung 27: Ergebnisse der Simulation der Szenarien 7 und 8, Wasserstände im Längsschnitt, berücksichtigt wurden nur gesperrte Tiden (6 von 8).....	59
Abbildung 28: Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulation der Szenarien 5-8, Wasserstände im Längsschnitt, berücksichtigt wurden nur gesperrte Tiden	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Monatliche Höchstabflüsse [m ³ /s] am Pegel Rockstedt der hydrologischen Jahre 1997-2007 (entnommen [1]).....	24
Tabelle 2: Monatliche Höchstabflüsse [m ³ /s] am Pegel Emmen der hydrologischen Jahre 1997-2007 (entn. [1])	24
Tabelle 3: Monatliche Höchstabflüsse [m ³ /s] am Pegel Emmen der hydrologischen Jahre 1997-2007 bestimmt durch die Verknüpfungsfunktionen aus Dauerliniengegenüberstellung	24
Tabelle 4: Prozentuale Abweichungen bei Vergleich der gemessenen mit den nach Variante 1 berechneten monatlichen Höchstabflüssen [m ³ /s] am Pegel Emmen der hydrologischen Jahre 1997-2007	25
Tabelle 5: Prozentuale Abweichungen bei Vergleich der gemessenen mit den nach Variante 2 berechneten monatlichen Höchstabflüssen [m ³ /s] am Pegel Emmen der hydrologischen Jahre 1997-2007	26
Tabelle 6: Schließhöhen der vorläufigen neuen Schließabelle.....	27
Tabelle 7: Technische Daten der Schöpfwerke nach Angabe des AG.....	29
Tabelle 8: Neue Schließabelle mit überschläglich ermittelten maximalen Öffnungswasserständen, ohne Berücksichtigung des Schöpfwerkseintrages	34
Tabelle 9: Neue Schließabelle mit überschläglich ermittelten maximalen Öffnungswasserständen, mit Berücksichtigung des maximalen Schöpfwerkseintrages	34
Tabelle 10: Übersicht der Szenarien 1 bis 4	39
Tabelle 11: Maximale Wasserstände der Tiden des Simulationszeitraumes für die 4 Szenarien, rot markiert sind Wasserstände über 7,2 mPN.....	42
Tabelle 12: Vorgeschlagene Schließabelle A: Maximal tolerierbarer Wasserstand = 7,20 mPN, Schöpfwerkseintrag = 3,3 m ³ /s (entspricht ¼ der max. Leistung).....	43
Tabelle 13: Vorgeschlagene Schließabelle B: Maximal tolerierbarer Wasserstand = 7,20 mPN, Schöpfwerkseintrag = 6,6 m ³ /s (entspricht ½ der max. Leistung).....	44
Tabelle 14: Vorgeschlagene Schließabelle C: Maximal tolerierbarer Wasserstand = 7,20 mPN, Schöpfwerkseintrag = 13,2 m ³ /s (entspricht der max. Leistung).....	44
Tabelle 15: Zusammenfassung der simulierten und aufgetretenen Schließhäufigkeiten des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010.....	50
Tabelle 16: Berechnete Schließhäufigkeiten für den Zeitraum 2003 bis 2010.....	52
Tabelle 17: Zusammenfassung der simulierten und aufgetretenen Schließdauern des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010	53

Tabelle 18: Berechnete Schließdauern für den Zeitraum 2003 bis 2010.....	55
Tabelle 19: Übersicht der Szenarien 5 bis 8	57
Tabelle 20: Empfohlene Schließhöhen des Inneren Este-Sperwerks in mPN.....	65

1 Einleitung

Mit Auftrag vom 16.06.2011 beauftragte das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA HH) das Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg über die TuTech Innovations GmbH mit Untersuchungen zur „Überprüfung der Schließungsordnung des inneren Este-Sperrwerks“. Im Einzelnen wurden folgende Untersuchungen vereinbart:

- Vergleich der Einzugsgebietscharakteristika Pegel Rockstedt / Pegel Emmen
- Überarbeitung der bestehenden Schließabelle des Inneren Este-Sperrwerks mit dem Ziel, zukünftig den Pegel Emmen an Stelle des Pegels Rockstedt als Grundlage für die Schließung des inneren Este-Sperrwerks zu verwenden und die Zahl der Überflutungen des Este Vorlands zu vermindern
- Modelltechnische Überprüfung der neuen Schließabelle
- Abschätzung der Auswirkungen der neu entwickelten Schließabellen anhand verfügbarer Pegelaufzeichnungen (Nachtrag vom 14.12.2012) auf die Wasserstände in der Este

Das Innere Este-Sperrwerk dient seit der Errichtung des Äußeren Este-Sperrwerks laut seiner Betriebsordnung¹ der Abwehr von kleineren Sturmfluten sowie der Schaffung von Stauraum für das Oberwasser der Este und Betrieb der Schöpfwerke. Die Schließwasserstände sind in Form einer Schließabelle festgelegt. Diese definiert für verschiedene Kombinationen, im Folgenden Schließfälle genannt, aus erwartetem Außenwasserstand in der Elbe über dem MThw (Tideeinfluss / Zufluss von Unterstrom) und dem gemessenen Wasserstand am Pegel Rockstedt (Zufluss von Oberstrom) Wasserstände, bei denen das Sperrwerk geschlossen werden muss. Die folgende Abbildung 1 gibt einen Überblick über Einzugsgebiete und Pegelstandorte.

¹ Bekanntgabe, VkBf, Heft 21 – 1992, Nr. 242

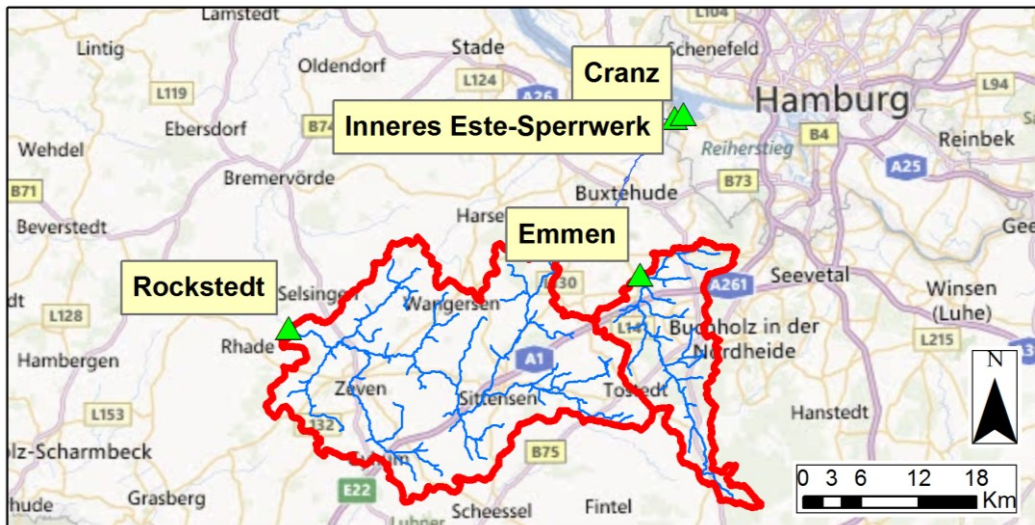


Abbildung 1: Übersicht über die Lage der Pegel und die Einzugsgebiete der Pegel

Der Pegel Rockstedt befindet sich im Einzugsgebiet der Oste und war zur Zeit der Festlegung der Schließordnung der nächstgelegene Pegel zum Einzugsgebiet der Este, der an die Datenfernübertragung angebunden war. Nach Auftrag des WSA Hamburg an die TUHH war zunächst zu überprüfen, ob es – wie im Auftrag vorgesehen - zielführend ist, bei der Überarbeitung der Schließabelle zukünftig den Pegel Emmen heranzuziehen, der sich im Einzugsgebiet der Este befindet und ca. 10 km stromauf von Buxtehude liegt. Der räumlich nächstgelegene Elbe-Pegel, für den Wasserstandsvorhersagen vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) herausgegeben werden, ist der Pegel Cranz nahe der Mündung der Este. Während des Betriebs gemäß der aktuellen Schließabelle häuften sich in der Vergangenheit Situationen, bei denen kritische Wasserstände im Schutzbereich des Inneren Este-Sperrwerks erreicht oder überschritten wurden. Der für die geschützten Gebiete geltende Bemessungshochwasserstand von 3,50 mNN wurde zwar bei weitem nicht erreicht, jedoch kam es zu ersten Überschwemmungen des Este-Vorlands, wodurch dort stehende Gebäude betroffen waren. Entsprechend ist im Folgenden mit der Bezeichnung „kritisch“ jeweils der Beginn derartiger „erster Überschwemmungen des Este-Vorlands“ gemeint.

Die Bebauung auf und hinter dem Deich ist im Unterlauf der Este traditionellen Ursprungs. Obwohl sich diese per Legaldefinition² im Überschwemmungsgebiet befindet, ist das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA HH) als Betreiber des Sperrwerks bestrebt, Überflutungen der Gebäudeflächen zu vermeiden.

² § 76 Abs. 1 Satz 1 WHG

Für die beauftragte Studie wurde zunächst überprüft, ob die vom WSA HH vorgeschlagene Aufnahme des Este-Pegels Emmen in die Schließtablelle sinnvoll ist. Die relevanten Betrachtungen sind in Kapitel 2 zusammengefasst, in dem hydrologische Eigenschaften der Einzugsgebiete Emmen und Rockstedt miteinander verglichen und Rückschlüsse auf Ähnlichkeiten bzw. Unterschiede bei der Abflussbildung gezogen werden. Da als Ergebnis der Prüfung festgehalten werden konnte, dass die Abflussverhältnisse an beiden Pegeln stark unterschiedlich sind und damit durch Umstellung auf den Pegel Emmen mit zu einem optimierten Sperrwerksbetrieb beitragen kann, wurde als erster Schritt eine Übertragung von Rockstedt auf Emmen (Umstellung der alten Schließ Tabellen unter vereinfachten Annahmen) unter Beibehaltung der in der Schließtablelle bestehenden Wasserstandsintervalle vorgenommen, die Grundlage für die weitere Entwicklung einer neuen Schließtablelle war.

Die übrigen wesentlichen Überlegungen zur Entwicklung einer neuen Schließtablelle sind in Kapitel 3 dargestellt. Ziel war es die Schließtablelle dahingehend zu optimieren, dass kritische Wasserstände während der Sperrwerksschließungen verstärkt vermieden werden können, gleichzeitig aber keine starke Zunahme der durchschnittlichen Anzahl jährlicher Sperrwerksschließung im Vergleich zu den Vorjahren erfolgt. Mit Einführung einer neuen Schließtablelle soll nach Auftrag des WSA Hamburg vorrangig die Anzahl der Fälle reduziert werden, in denen aufgrund von Ausnahmesituationen Schließungen außerhalb der derzeitigen gültigen Schließordnung erfolgen müssen: dies war nach Auskunft des WSA Hamburg in den zurückliegenden Jahren zunehmend der Fall. Über einen ermittelten funktionalen Zusammenhang der Wasserstände an den Pegeln Emmen und Pegel Rockstedt wird dazu in Kapitel 3 zunächst eine vorläufige Schließtablelle vorgestellt, in der der Pegel Emmen als Oberwasserindikator fungiert. Diese wird zunächst mittels eines vereinfachten Ansatzes und anschließend mit Hilfe eines zweidimensionalen hydrodynamischen Modells der Este überprüft und optimiert. Als Ergebnis werden am Ende des Kapitels verschiedene Vorschläge für eine neue Schließtablelle präsentiert.

Für zwei ausgewählte Schließ Tabellen sowie deren Kombination werden in Kapitel 4 die Auswirkungen auf den Schließbetrieb abgeschätzt. Zunächst werden die zu erwartenden Änderungen hinsichtlich der Schließhäufigkeit und –dauer ermittelt, bevor ein Testbetrieb im numerischen Modell erfolgt.

2 Vergleich von Gebietsmerkmalen der Einzugsgebiete der Oberwasserpegel

Die Einzugsgebiete (EZGs) der Pegel Emmen und Rockstedt zeigen wesentliche Unterschiede in Größe und Form (vgl. Abbildung 1). Die Fläche des Einzugsgebietes vom Pegel Rockstedt umfasst mit 614 km² das Dreifache der Fläche des Einzugsgebietes vom Pegel Emmen (185 km²). Betrachtet man die Form der Einzugsgebiete, so weist das EZG Rockstedt eine eher gedrungene und das EZG Emmen eine langgestreckte Form auf, was sich in dem Verhältnis Fläche zu Umfang deutlich macht. Für das EZG Rockstedt ergibt sich ein Verhältnis von $613,97 \text{ km}^2 / 155,95 \text{ km} = 3,94$, für Emmen ein Verhältnis von $184,74 \text{ km}^2 / 93,95 \text{ km} = 1,97$. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine differenziertere Betrachtung der für die Abflussbildung relevanten Eigenschaften wie Landnutzung und Versiegelungsgrad, Durchlässigkeit der Böden und Relief. Diese Eigenschaften werden zusammengefasst in der Zeit-Flächen-Funktion für das jeweilige Einzugsgebiet. Diese Funktion beschreibt den entwässerten Anteil des Einzugsgebietes über die Zeit. Näheres hierzu kann in [4] nachgelesen werden.

2.1 Landnutzung und Versiegelungsgrad

Die Bedeckung der Erdoberfläche durch Vegetation oder versiegelte Flächen beeinflusst unter anderem die Infiltration, die Interzeption sowie den Oberflächenabfluss von Wasser. Der Vergleich der Bedeckung wird auf Basis der Landnutzungsarten aus der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) des Landes Niedersachsen [2] durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die hierin erfassten Landnutzungsarten nicht ihrer vollen Differenziertheit dargestellt, d.h. es wurden beispielsweise Klassen wie Laubwald, Mischwald und Nadelwald in der Klasse Wald zusammengefasst. Die Verteilung der Landnutzungsarten in den EZGs kann in Anhang 2-1 eingesehen werden. Eine Zusammenfassung der Anteile der Landnutzungsarten in dem jeweiligen EZG ist in Abbildung 2 gegeben.

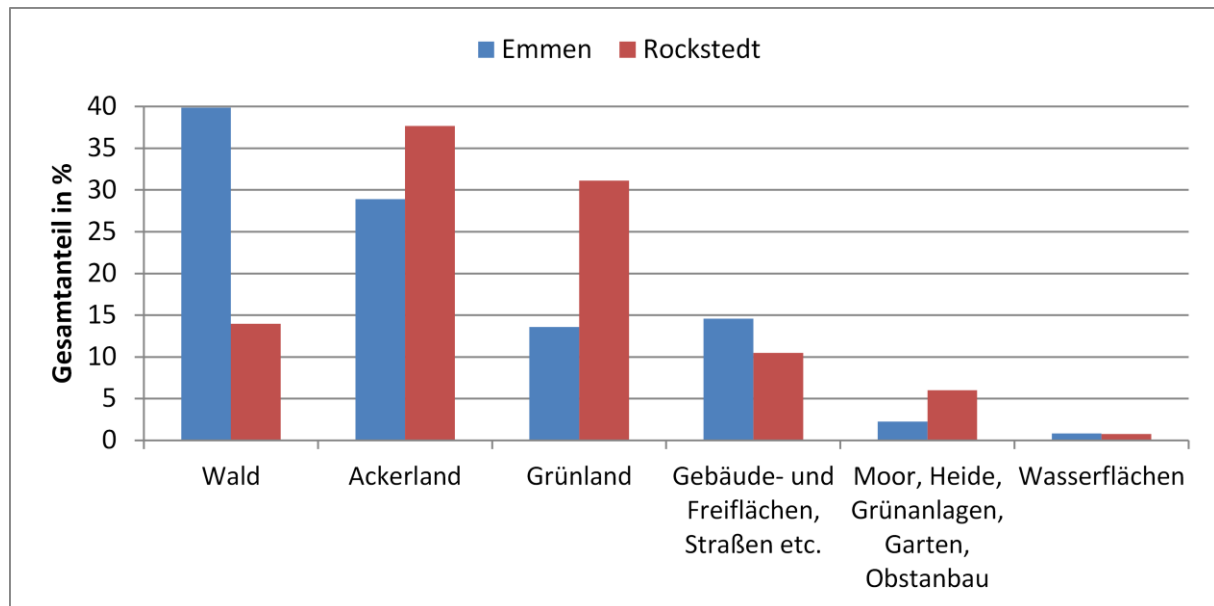


Abbildung 2: Landnutzungsarten (zusammengefasst nach ALK) in den EZG Rockstedt und Emmen normiert über die jeweilige Gesamtfläche.

Im EZG Rockstedt dominiert die Nutzungsart Ackerland (über 35%) vor Grünland (über 30%). Im EZG Emmen hingegen ist Wald (40%) die vorherrschende Nutzungsart vor Ackerland (knapp 30%). Für die Abflussbildung kann dieser Unterschied eine Rolle spielen, da das Wasserrückhaltevermögen eines Waldes in der Regel deutlich über dem von Grünland liegt. Im Wald fördern unter anderem die Lagerungsdichte des Bodens, die Wurzeltiefe sowie die Blattoberflächen die Rückhaltung. Auf Grund letzterer stellt sich im Frühjahr/ Sommer ein Höhepunkt des Potentials ein und im Herbst/ Winter ein Tiefpunkt, wobei das Niveau in der Regel stets über dem von Grünland liegt. Einen noch wesentlicheren Einfluss auf die Abflussbildung haben (teil-)versiegelte Flächen, da sie maßgeblich für den Direktabfluss verantwortlich sind. Diese machen im EZG Rockstedt ca. 10% und im EZG Emmen fast 15% des Flächenanteils aus. Je größer der Anteil versiegelter Flächen und je effektiver das Entwässerungsnetz aus Gräben und Kanälen, desto mehr Niederschlagswasser gelangt auf direktem Wege in den Vorfluter und führt zu einem steileren Anstieg der Hochwasserganglinie. Hierbei spielen jedoch auch weitere Einflussfaktoren wie z.B. Überlagerungseffekte von Hochwasserwellen aus Teileinzugsgebieten eine Rolle über die, auf Basis der vorliegenden Daten, keine quantitative Aussage getroffen werden kann.

2.2 Durchlässigkeit der Böden

Die Durchlässigkeit der oberen Bodenschichten bestimmt das Infiltrationsvermögen des Bodenkörpers. Im Rahmen dieser Untersuchung liegt die Bodenübersichtskarte des Landes Niedersachsen im Maßstab 1:50000 (BÜK50) vor. Die BÜK50 enthält eine bodenlandschaftliche Zuordnung der jeweiligen Fläche, den Bodentyp, Angaben zum charakteristischen Bodenprofil und zu den Horizonten, aus denen sich das Profil zusammensetzt. Nähere Informationen sind in [3] zu finden. Aus den angegebenen Eigenschaften kann die Durchlässigkeit der oberen Bodenschichten ermittelt werden. Diese wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert) beschrieben, der wesentlichen Einfluss auf die Abflussbildung in einem Einzugsgebiet hat. Er gibt an, mit welcher Geschwindigkeit Wasser unter definierter Druckdifferenz eine bestimmte Strecke in einem porösen Medium passiert. Je größer der Wert, desto größer ist das Infiltrationsvermögen des Bodens. Sieht man von der Bodenbedeckung ab, bedeutet ein hohes Infiltrationsvermögen gleichzeitig einen geringen Direktabfluss. Die Verteilung der Klassen in den Einzugsgebieten kann in Anhang 2-2 eingesehen werden. Abbildung 3 gibt eine Zusammenfassung über die Anteile verschiedener kf-Wert Klassen. Es fällt auf, dass 60% der Flächen im EZG Emmen eine hohe Durchlässigkeit von mehr als 400 cm/Tag aufweisen. Im EZG Rockstedt beträgt der Flächenanteil über diesem Wert nur 40%.

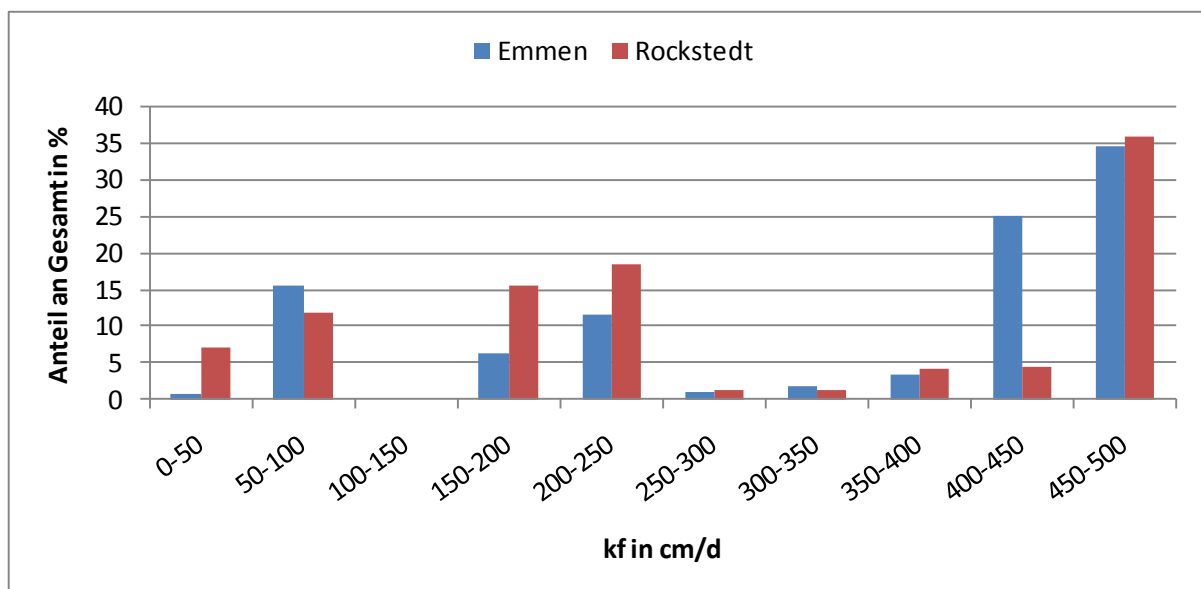


Abbildung 3: Einteilung der Böden in den Einzugsgebieten nach dem Durchlässigkeitsbeiwert des Bodenhorizontes bis 2m unter Geländeoberfläche (abgeleitet aus BÜK50)

2.3 Relief

Die Oberflächenform spielt eine wesentliche Rolle bei der Abflussbildung. Ein großes Gefälle führt zu hohen Fließgeschwindigkeiten des Oberflächen- und Grundwassers. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 10x10 m (DGM5) im Bereich der beiden EZGs ausgewertet. Die Anteile der Flächen gleicher Geländehöhen an der Gesamtfläche sind in Abbildung 4 dargestellt.

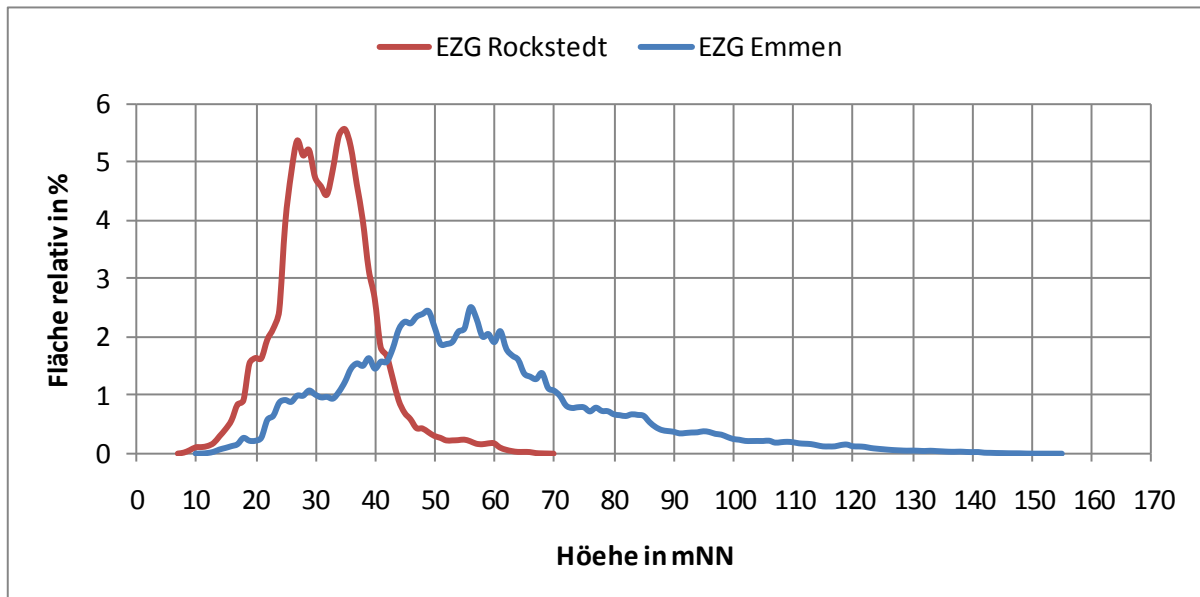


Abbildung 4: Verteilung der Geländehöhen in den Einzugsgebieten

Im EZG Rockstedt reichen diese von 7 mNN bis ca. 70 mNN, wobei der überwiegende Anteil der Oberfläche Höhen zwischen 15 und 45 mNN aufweist. Im Vergleich dazu ist die Verteilung der Geländehöhen im EZG Emmen deutlich inhomogener. Hier reicht die Spanne von etwa 10 mNN bis 155 mNN. Eine ausgeprägte Häufung der Höhenklassen wie im EZG Rockstedt ist nicht auszumachen. Die Verteilung der Geländehöhen in den Einzugsgebieten kann in Anhang 2-3 eingesehen werden. Hier zeigt sich, dass im EZG Rockstedt größere Ebenen vorhanden sind. Aus den Geländehöhen kann die Steigung berechnet werden woraus wiederum die Länge der Fließwege im Einzugsgebiet bestimmt werden kann. Die Verteilung der Fließweglängen in den Einzugsgebieten kann in Anhang 2-4 eingesehen werden. Die relativen Anteile der Flächen bestimmter Fließweglänge sind in Abbildung 5 dargestellt.

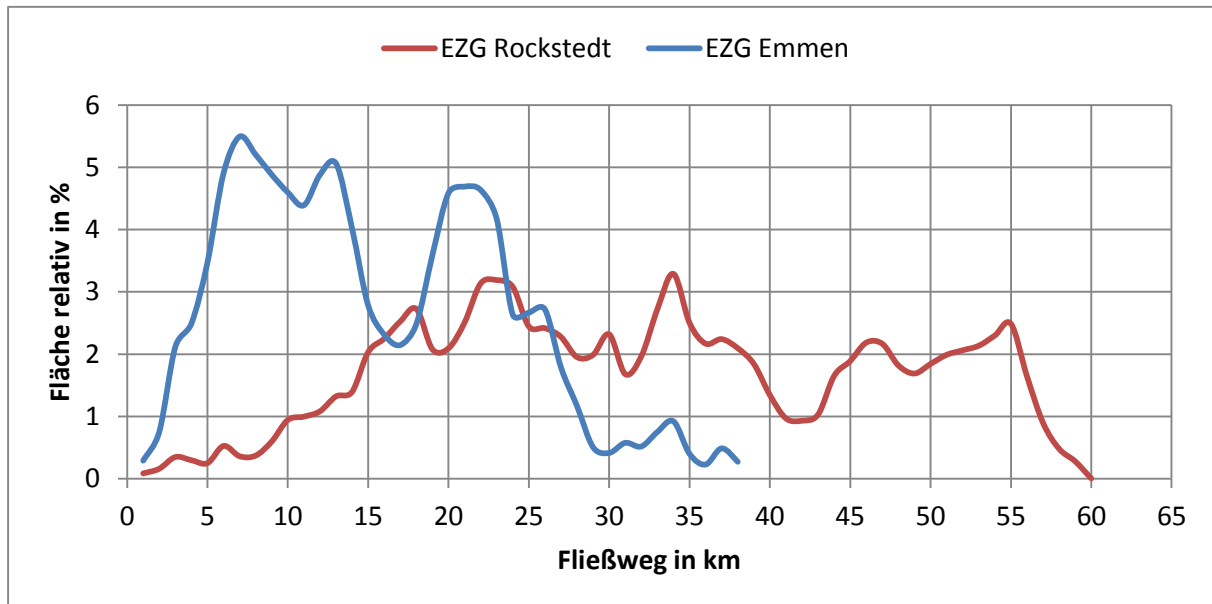


Abbildung 5: Verteilung der Fließweglängen in den Einzugsgebieten

Im EZG Rockstedt sind die Fließweglängen vergleichsweise homogen auf den Bereich 15 bis 60 km verteilt. Im EZG Emmen zeigen sich zwei lokale Maxima. Das erste liegt im Bereich von 3 bis 15 km und das Andere im Bereich 17 bis 23 km. Auf die Fließweglänge bezogen kann man eine schnellere Entwässerung des EZG Emmen erwarten. Trägt man die Flächenanteile als Summenkurve auf, wie in Abbildung 6, so wird der Unterschied noch deutlicher. Durch die inhomogenere Verteilung im EZG Emmen weisen 50% der Flächen eine Steigung von 1,5% oder weniger auf, 90% der Flächen haben eine Steigung von 7% oder weniger. Im EZG Rockstedt weist die Hälfte der Flächen eine Steigung von 0,5% und weniger auf, 90% der Flächen haben eine Steigung von 2% oder weniger.

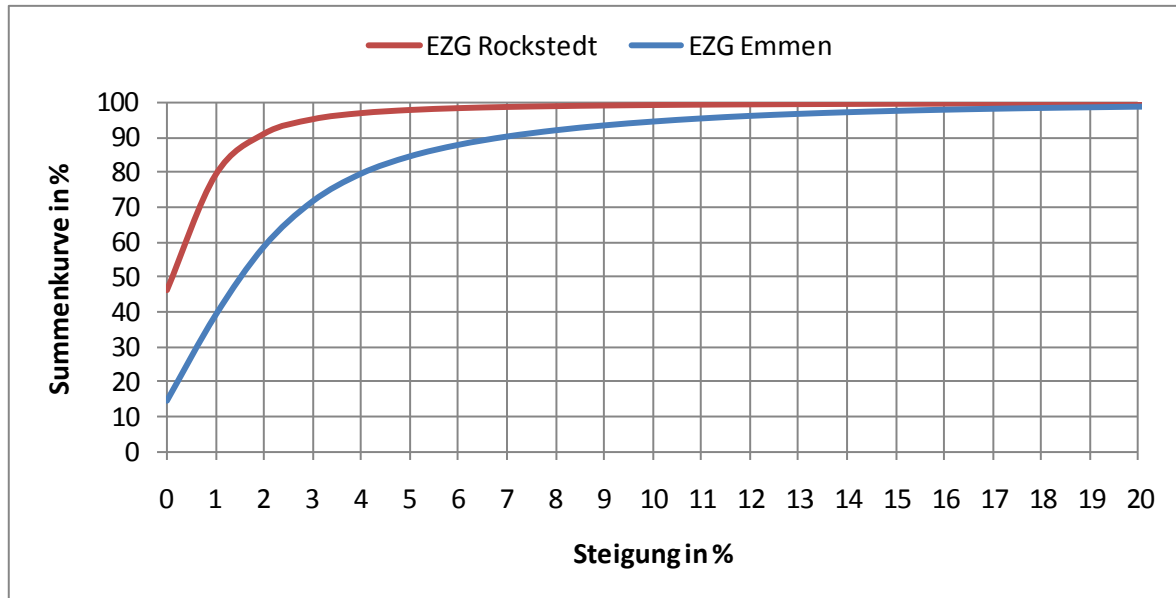


Abbildung 6: Summenkurve der Steigungen in den Einzugsgebieten

Hieraus errechnet sich ein Ungleichförmigkeitsmaß für das EZG Emmen von $7/1,5= 4,67$ und für das EZG Rockstedt zu $2/0,5= 4$. Bei Betrachtung der geringeren Steigungen im EZG Rockstedt können zumindest im Oberflächen- und Rillenabfluss geringere Fließgeschwindigkeiten und somit eine größere Rückhaltung des Niederschlagswassers erwartet werden. Die Verteilung der Gefälleklassen in den Einzugsgebieten kann in Anhang 2-5 eingesehen werden.

2.4 Zeit- Flächen Funktion

Ein sehr wesentliches hydrologisches Merkmal eines Einzugsgebietes stellt die Zeit-Flächen Funktion dar. Sie beschreibt die Zeit, die ein Wassertropfen theoretisch benötigen würde, um von dem Ort an dem er auf das Einzugsgebiet gefallen ist, über den Weg Oberflächenabfluss – Rillenabfluss - Gerinneabfluss zum Auslasspunkt zu gelangen. Für die beiden Einzugsgebiete wurde anhand des digitalen Geländemodells, daraus abgeleiteter Parameter sowie der Landnutzung die Entwässerungszeit bestimmt. Die Verteilung der Zeit-Flächen Funktion in den Einzugsgebieten kann in Anhang 2-6 eingesehen werden. Nicht berücksichtigt wurden bei der Ermittlung u.a. Infiltration, Evapotranspiration und Interzeption, so dass die Zeit-Flächenfunktion nicht zur quantitativen, sehr wohl aber zur qualitativen Beurteilung herangezogen werden kann. In Abbildung 7 ist die Zeit- Flächen Funktion dargestellt. Angegeben ist der Anteil der entwässerten Fläche über die dazu benötigte Entwässerungszeit.

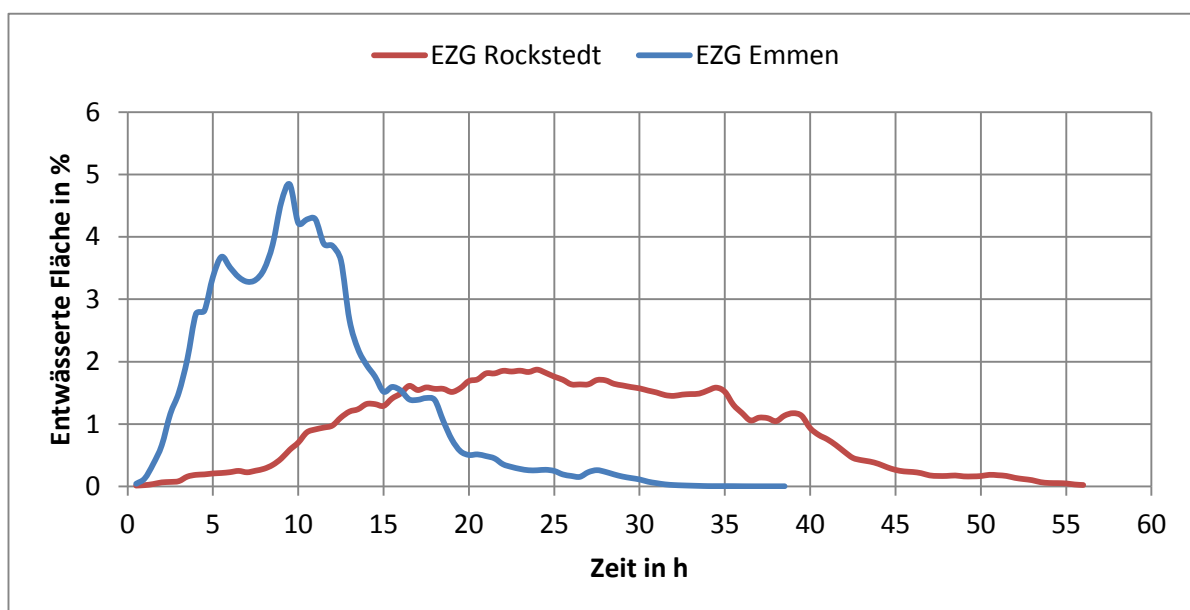


Abbildung 7 Zeit- Flächen Funktionen der beiden Einzugsgebiete

Die Zeit- Flächenfunktion für das EZG Rockstedt weist die Form einer sehr gedungenen Glockenkurve auf. Zu Beginn nimmt die entwässerte Fläche nur sehr langsam zu. Erst im Bereich zwischen 10h und 40h entwässern mehr als 1% der Flächen gleichzeitig. Das Maximum liegt bei 24 h mit knapp 2%. Die Zeit- Flächen Funktion des EZG Emmen hingegen weist die Form einer steilen Glockenkurve auf. Die entwässerte Fläche steigt sehr schnell an und erreicht nach 10h mit fast 5% gleichzeitig entwässernder Fläche ihr Maximum. In Abbildung 8 sind die Funktionen als Summenkurve aufgetragen. Man erkennt dass im EZG Emmen nach 20h bereits 95% der Flächen entwässert haben. Im EZG Rockstedt ist dieser Wert erst nach ca. 45 h erreicht. Insgesamt wird an der Auswertung der

Zeit- Flächen Funktionen deutlich, dass das EZG Emmen eine deutlich kürzere Reaktionszeit aufweist und deutlich schneller entwässert als das EZG Rockstedt. Geht man von einem gleichmäßig verteilten Einheitsregen über den beiden Gebieten aus und vernachlässigt Infiltration, Interzeption und Evapotranspiration, so würden die Hochwasserganglinien dem Verlauf der Zeit- Flächen Funktionen folgen. Entsprechend würde der Hochwasserscheitel den Pegel Emmen deutlich eher passieren als am Pegel Rockstedt.

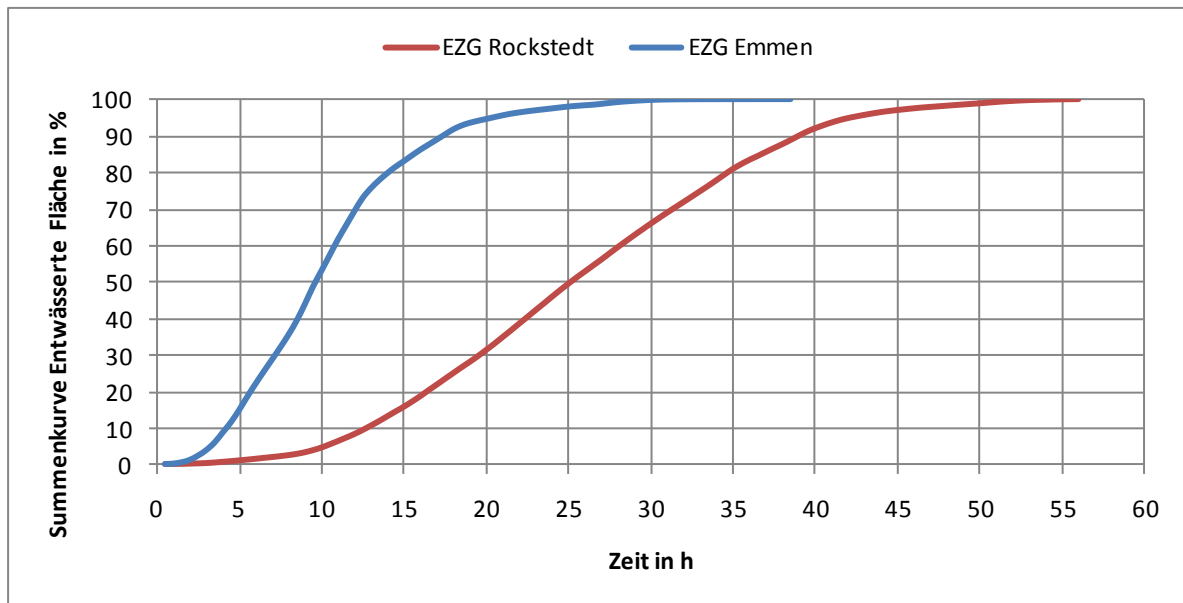


Abbildung 8: Summenkurve der Entwässerungszeiten der Einzugsgebiete

2.5 Zusammenfassung

Die differenzierte Betrachtung wesentlicher hydrologischer Eigenschaften der Einzugsgebiete Rockstedt und Emmen zeigte keine Indizien, die auf ein ähnliches Verhalten der Abflussbildung hindeuten. Beginnend bei Größe und Form bestehen auch bei weiteren Parametern wie Vegetation, versiegelter Flächen, Durchlässigkeit der Böden, Relief und daraus abgeleiteten Parametern keine wesentlichen Ähnlichkeiten. Besonders deutlich werden die unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften bei der Gegenüberstellung der Zeit-Flächen Funktionen, in denen die genannten einzelnen Eigenschaften zusammengeführt werden und als Ergebnis qualitative Aussagen zur Entwässerungszeit geben. Der Vergleich zeigt eine deutlich schnellere Entwässerung des EZG Emmen (95% der Fläche haben nach 20h entwässert) gegenüber dem EZG Rockstedt (95% der Fläche haben erst nach 45h entwässert). Anhand dieser Erkenntnisse ist nicht zu erwarten, dass aus ein und demselben Niederschlagsereignis vergleichbare Abflusskurven an den beiden Pegeln entstehen.

3 Überarbeitung der bestehenden Schließabelle

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen bei der Entwicklung von Vorschlägen für eine neue Schließabelle für das Innere Este-Sperrwerk erläutert. Zunächst erfolgt eine Aufnahme des Pegels Emmen in die Schließabelle, um eine Steuerung des Sperrwerks über diesen Pegel zu ermöglichen. Eine Verknüpfung zwischen zwei Pegeln kann grundsätzlich auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Es werden die Ergebnisse zweier Verfahren dargestellt und anhand von Messdaten validiert. Bei dem einen Verfahren werden Abflüsse gleicher Überschreitungshäufigkeiten, ermittelt aus den Dauerlinien der Pegel zwischen 2003 und 2011, in Beziehung gesetzt. Bei dem anderen wird eine Beziehung anhand statistischer Wiederkehrintervalle, ermittelt aus den Jahreshöchstabflüssen der Jahre 1961 bis 2011, hergestellt.

Das Ergebnis der Verknüpfung ist eine vorläufige neue Schließabelle, deren Eignung im Anschluss überprüft wird. Dazu wird ein vereinfachter, statischer Ansatz verwendet, um für jeden Schließfall einen Öffnungswasserstand zu bestimmen. Liegt der Öffnungswasserstand über dem Schließwasserstand oder einem definierten Wert, wird der Schließfall als potentiell kritisch eingestuft.

Im Anschluss erfolgt eine modellgestützte Analyse kritischer Schließfälle auf Basis von 4 Szenarien. Im ersten Teil der Analyse wird der Einfluss der Schöpfwerke auf den Wasserstand bei Wiederöffnung untersucht. Im zweiten Teil wird untersucht, inwieweit durch früheres Schließen des Sperrwerks eine Absenkung des Wasserstandes bei Wiederöffnung erreicht werden kann. Die gesammelten Erkenntnisse aus der Modellierung fließen anschließend in die Erarbeitung neuer optimierter Schließabellen ein. Bei der Ermittlung der Schließwasserstände wird wiederum auf den vereinfachten, statischen Ansatz zurückgegriffen. Im letzten Teil erfolgt eine Auswahl geeigneter Schließabellen aus den vorgeschlagenen Varianten. Dabei wird auf die Diskussionsergebnisse eines Aussprachetermins mit den betroffenen Institutionen der Wasserwirtschaft am 1. November 2012 im WSA Hamburg zurückgegriffen.

3.1 Übernahme des Pegels Emmen in die Schließstabelle

Als Datengrundlage stehen Aufzeichnungen der Pegel Emmen und Rockstedt zur Verfügung. Für beide Pegel liegen kontinuierliche 15-Minuten Werte vom 1.1.2003 bis zum 31.05.2011 vor. Aus den Zeitreihen wurden im Vorfeld durch den Auftraggeber Dauerlinien erzeugt, welche in Abbildung 9 dargestellt sind. Außerdem stehen Monats- und Jahreshöchstabflüsse zur Verfügung. Für den Pegel Emmen reichen die Daten bis 1957 und für den Pegel Rockstedt bis 1961 zurück. Die Zeitreihen sind somit von ausreichender Länge, um statistische Wiederkehrintervalle bis zu einem fünfzigjährigen Ereignis und darüber hinaus zu bestimmen. Für beide Zeitreihen zeigt die, in der Hydrologie oft verwendete, allgemeine Extremwertverteilung eine gute Anpassung.

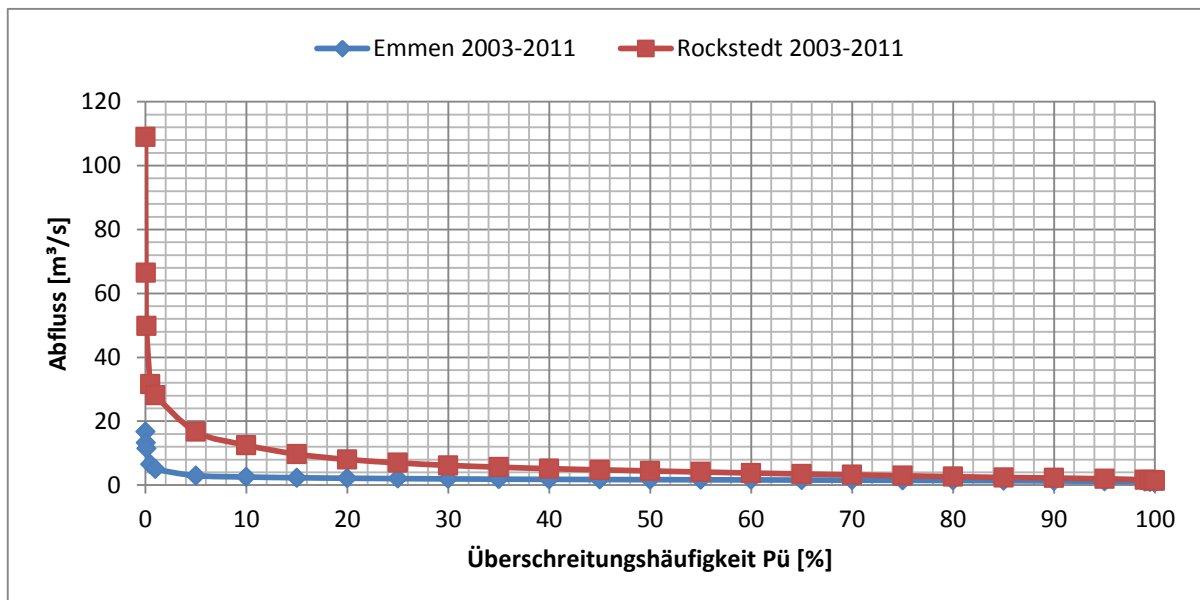


Abbildung 9: Abflussdauerlinien der Jahre 2003-2011 an den Pegeln Emmen und Rockstedt

Zur Generierung der Verknüpfungsfunktion werden die Abflüsse in Abbildung 10 als Scatterplot aufgetragen. Die dunklen Rauten stehen für Werte gleicher Überschreitungshäufigkeit, abgelesen aus den Dauerlinien. Mit Hilfe eines Polynom 4. Grades kann der Verlauf mit einem Bestimmtheitsmaß nahe 1 approximiert werden (Variante 1). Insbesondere bis zu dem Wertepaar 49,8 / 11,5 m³/s ist die Approximationsgüte sehr gut. Die hellgrauen Quadrate stehen für Wertepaare gleicher statistischer Wiederkehrintervalle. Diese können durch ein Polynom 2. Grades sehr gut approximiert werden (Variante 2). Für die Zielstellung dieser Studie sind kleinere und mittlere Abflussereignisse relevant, da hier durch richtiges Schließen des Sperrwerkes kritische Situationen eventuell vermieden werden können, während bei hohen Abflüssen ein Ausuferen bei geschlossenem Sperrwerk nur günstigenfalls zu vermeiden ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur der Wertebereich bis $Q=50$ m³/s am Pegel Rockstedt betrachtet. Dies entspricht einer

Überschreitungshäufigkeit von 0,1%, beziehungsweise einem Wiederkehrintervall von etwa 10 Jahren.

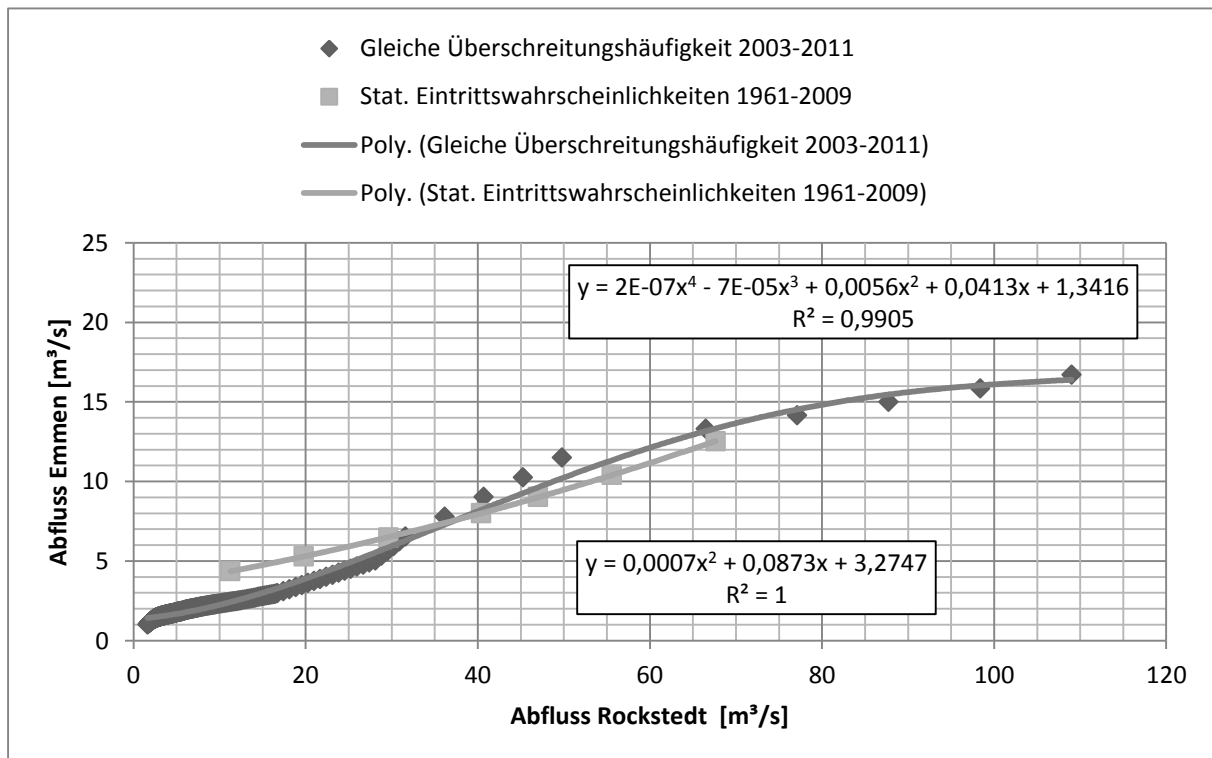


Abbildung 10: Verknüpfungsfunktionen der Methode Überschreitungshäufigkeit (Variante 1) und stat. Eintrittswahrscheinlichkeiten (Variante 2)

3.1.1 Gültigkeit der Verknüpfungsvarianten

Zur Überprüfung der Gültigkeit der gewählten Ansätze werden die monatlichen Höchstabflüsse der hydrologischen Jahre 1997 bis 2007 herangezogen. Für den Pegel Rockstedt sind diese in Tabelle 1 dargestellt. Grau hinterlegt sind die betrachteten Abflussereignisse in der festgelegten Spanne von 6,34 – 50,0 m³/s. Tabelle 2 zeigt die Abflüsse am Pegel Emmen für den gleichen Zeitraum. Mittels der Verknüpfungsvariante 1 werden nun die Abflüsse vom Pegel Rockstedt auf den Pegel Emmen umgerechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 1: Monatliche Höchstabflüsse [m³/s] am Pegel Rockstedt der hydrologischen Jahre 1997-2007 (entnommen [1])

Legende												
Hochwasserereignisse größer als MQ=6,34 m ³ /s und kleiner als Pü=0,1=49,8 m ³ /s												
Jahr	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
1997	7,50	11,40	2,94	18,80	17,10	10,40	15,50	3,12	4,49	5,83	3,05	3,07
1998	5,32	8,78	23,10	6,96	33,50	16,00	7,87	12,30	10,80	5,18	5,56	43,40
1999	34,40	32,50	26,80	38,80	36,80	7,22	5,99	4,78	3,87	2,31	2,47	2,53
2000	2,37	14,30	15,00	15,00	34,80	7,69	3,53	3,25	6,30	7,11	3,54	3,84
2001	3,96	12,40	12,60	19,70	12,90	12,20	11,80	7,99	12,40	9,24	69,80	16,40
2002	17,00	55,90	39,00	53,20	33,90	12,60	18,90	6,79	88,40	23,70	4,24	23,80
2003	26,80	19,00	29,10	15,50	17,10	5,77	9,90	4,52	4,45	2,29	2,40	3,68
2004	2,80	9,81	16,80	26,60	10,10	9,32	6,13	3,85	13,30	3,78	4,85	4,70
2005	18,60	11,80	16,80	17,30	16,70	5,58	8,25	4,45	6,84	8,14	3,42	6,48
2006	12,20	19,00	11,80	14,80	27,00	23,90	11,10	9,18	3,15	10,50	7,55	2,81
2007	10,60	8,25	35,50	20,60	31,40	5,47	6,95	12,60	19,00	12,20	14,10	15,10

Tabelle 2: Monatliche Höchstabflüsse [m³/s] am Pegel Emmen der hydrologischen Jahre 1997-2007 (entn. [1])

Jahr	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
1997	3,22	4,09	1,40	4,99	2,14	2,29	6,87	1,57	3,87	2,57	1,19	1,83
1998	2,78	2,07	4,68	2,07	4,91	5,33	2,48	2,90	2,88	3,35	2,39	10,10
1999	6,29	4,97	4,37	7,25	6,63	3,07	2,37	1,59	3,17	1,91	1,51	1,72
2000	1,73	5,00	4,92	3,71	8,27	2,10	1,78	1,83	2,84	3,21	1,68	1,75
2001	1,93	3,36	2,65	3,93	3,28	2,76	2,87	2,89	3,36	2,81	10,70	2,55
2002	5,37	9,74	11,00	11,20	6,06	3,49	5,02	3,35	24,30	14,90	2,22	5,60
2003	9,76	4,32	9,67	3,46	4,80	2,91	4,86	3,40	2,10	1,86	2,15	2,06
2004	1,96	2,88	6,12	6,12	2,89	2,23	2,57	3,18	6,12	1,94	2,70	2,66
2005	3,70	3,03	3,94	5,18	3,94	2,93	2,51	2,43	6,96	2,33	1,93	2,68
2006	2,41	4,00	2,88	3,63	5,46	3,56	2,92	5,53	1,70	3,55	2,53	1,96
2007	3,83	2,23	11,00	4,73	5,42	1,92	3,66	7,73	5,61	3,34	8,24	3,08

Tabelle 3: Monatliche Höchstabflüsse [m³/s] am Pegel Emmen der hydrologischen Jahre 1997-2007 bestimmt durch die Verknüpfungsfunktionen aus Dauerliniengegenüberstellung

Jahr	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
1997	2,08	2,46		3,55	3,22	2,36	2,95					
1998		2,21	4,74	2,03	10,32	3,03	2,12	2,55	2,40			20,60
1999	11,02	9,58	6,24	15,09	13,10	2,05						
2000		2,79	2,88	2,88	11,35	2,10				2,04		
2001		2,56	2,58	3,76	2,62	2,54	2,50	2,13	2,56	2,25		3,09
2002	3,20		15,30		10,62	2,58	3,58	2,01		4,95		4,99
2003	6,24	3,60	7,42	2,95	3,22		2,31					
2004		2,31	3,16	6,14	2,33	2,26			2,66			
2005	3,51	2,50	3,16	3,25	3,15		2,16		2,01	2,15		1,97
2006	2,54	3,60	2,50	2,85	6,33	5,03	2,43	2,25		2,37	2,09	
2007	2,38	2,16	11,94	3,99	8,82		2,02	2,58	3,60	2,54	2,76	2,89

In Tabelle 4 sind die Differenzen zwischen gemessenen und übertragenden Werten dargestellt. Angegeben sind die prozentualen Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten am Pegel Emmen. Als tolerierbare Abweichung werden $\pm 20\%$ angenommen. Diese Bereiche sind hellrot für eine leichte Überschätzung, bzw. hellgrün für eine leichte Unterschätzung eingefärbt. Bereiche außerhalb der Toleranzgrenze sind in dunkelrot bzw. dunkelgrün eingefärbt. Man erkennt sehr deutlich, dass es bei der Verwendung der gewählten Verknüpfungsfunktion in fast der Hälfte aller Fälle zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Abflusses am Pegel Emmen kommt. Insgesamt liegt die Mehrheit (60%) der berechneten Abflüsse außerhalb des Toleranzbereiches.

Tabelle 4: Prozentuale Abweichungen bei Vergleich der gemessenen mit den nach Variante 1 berechneten monatlichen Höchstabflüssen [m^3/s] am Pegel Emmen der hydrologischen Jahre 1997-2007

Legende		Anzahl	
 	Unterschätzung um bis zu 20%	26	
 	Unterschätzung um mehr als 20%	38	
 	Überschätzung um bis zu 20%	9	
 	Überschätzung um mehr als 20%	14	

Jahr	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
1997	35,3	39,9		28,8	-50,3	-3,1	57,0					
1998		-6,7	-1,4	2,1	-110,1	43,2	14,5	12,0	16,7			-103,9
1999	-75,2	-92,8	-42,7	-108,1	-97,7	33,1						
2000		44,3	41,4	22,4	-37,2	-0,1				36,4		
2001		23,7	2,5	4,3	20,2	7,9	12,9	26,2	23,7	19,9		-21,4
2002	40,5		-39,1		-75,3	26,0	28,8	40,1		66,8		10,9
2003	36,1	16,7	23,3	14,6	33,0		52,4					
2004		19,9	48,3	-0,4	19,3	-1,3			56,5			
2005	5,1	17,5	19,7	37,2	20,2		14,1		71,1	7,9		26,4
2006	-5,4	10,1	13,2	21,4	-16,0	-41,2	16,8	59,4		33,2	17,5	
2007	37,8	3,3	-8,5	15,7	-62,8		44,7	66,6	35,9	23,9	66,5	6,0

Verfährt man in gleicher Weise mit der Verknüpfungsvariante 2 und vergleicht gemessene mit übertragenen Werten, so erhält man ein ähnlich unzureichendes Ergebnis, welches in Tabelle 5 dargestellt ist. In der Mehrheit der Fälle (65%) wird das Toleranzkriterium $\pm 20\%$ nicht eingehalten. Die Überprüfung der beiden Verfahren zur Verwendung von Verknüpfungsfunktionen bringt also keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Einen beschränkten Einfluss auf die Ergebnisse kann die Verwendung der monatlichen Höchstabflüsse haben. Es kann sein, dass Hochwasserereignisse, die zum Monatswechsel auftraten, durch zeitliche Verzögerungen in den Einzugsgebieten unterschiedlichen Monaten zugeordnet werden. Sollte jedoch ein größerer Zeitversatz von einigen Tagen bestehen, so dass es zu einer Häufung der beschriebenen Situation kommt, wäre der Ansatz der

Übertragung in Frage zu stellen. Für den weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass der geschilderte Einfluss zu vernachlässigen ist.

Tabelle 5: Prozentuale Abweichungen bei Vergleich der gemessenen mit den nach Variante 2 berechneten monatlichen Höchstabflüssen [m^3/s] am Pegel Emmen der hydrologischen Jahre 1997-2007

Jahr	Legende											
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
1997		-6,6		-3,5	-132,3		30,2					
1998			-21,0		-42,3	9,0		-53,6				17,0
1999	-13,0	-37,9	-40,0	-6,4	-12,1							
2000		6,7	3,6	-27,8	13,4							
2001		-32,9	-69,3	-34,0	-37,7	-61,0	-53,4		-32,9			-91,9
2002	7,6		29,6	11,6	-16,1	-28,5	-3,1			61,5		-2,7
2003	37,3	-20,0	33,7	-38,6	-3,6							
2004			19,3	0,5					25,5			
2005	-38,9	-45,3	-25,4	3,6	-25,1							
2006	-84,4	-29,7	-52,9	-30,0	-12,5	-61,8						
2007			34,0	-13,5	-23,7			42,0	7,6	-33,1	43,6	-54,3

3.1.2 Vorläufige neue Schließstabelle

Trotz der schlechten Ergebnisse bei der Validierung der Verknüpfungsfunktionen wird, in Abstimmung mit dem Auftraggeber, zunächst von einer Verknüpfung gemäß der Verknüpfungsvariante 1 ausgegangen. Im weiteren Verlauf werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um Aufschluss über die Sinnhaftigkeit der vorläufigen Schließstabelle, die in Tabelle 6 dargestellt ist, zu erlangen. In der Tabelle ist weiterhin der Pegel Rockstedt enthalten, um die Vergleichbarkeit zur aktuell bestehenden Schließstabelle zu erleichtern. Eine Zuordnung von Wasserstands- zu Abflussgrößen erfolgt mit Hilfe der Tabelle im Anhang 3-1.

Tabelle 6: Schließhöhen der vorläufigen neuen Schließstabelle

Aktuell: Pegel Rockstedt in cm PN	Bei einem Wasserstand am Pegel Emmen in cmPN	Bei Sturmflutwarnungen bzw. zu erwartenden Aussenwasserständen über MThw		
		50-100 cm	100-150 cm	150-200 cm
<700	<121	7,40	7,20	7,00
700-725	121-125	7,30	7,10	6,90
725-750	125-130	7,30	7,10	6,90
750-775	130-133	7,30	7,10	6,90
775-800	133-141	7,20	7,00	6,80
800-825	141-152	7,20	7,00	6,80
825-850	152-171	7,10	6,90	6,70
850-875	171-193	7,00	6,80	6,60
875-900	193-212	6,90	6,70	6,50
>900	>212	6,80	6,60	6,40

3.2 Verfahren zur Überprüfung der vorläufigen Schließstabelle

Die vorläufige Schließstabelle wird mit einem vereinfachten Verfahren überprüft. Die zu bestimmende Größe bei dem Verfahren, dessen schematischer Ablauf in Abbildung 11 dargestellt ist, ist der Öffnungswasserstand. Ausgehend von der vorläufigen Schließstabelle, welche den Schließwasserstand am Inneren Este-Sperrwerk in Abhängigkeit vom Binnenzufluss und Wasserstand über MThw angibt, kann, unter Berücksichtigung des Binnen- und Schöpfwerkszuflusses und Annahme einer Schließdauer, der Öffnungswasserstand abgeschätzt werden. Dazu wird für jeden Schließfall eine mittlere Schließdauer abgeschätzt auf deren Basis die Fülle des Binnenzuflusses bestimmt werden kann. Mit Hilfe einer Wasserstand-Volumen Beziehung für den Unterlauf kann nun unter weiteren vereinfachenden Annahmen ein maximaler Wasserstand bei Wiederöffnung des Sperrwerks bestimmt werden. Eine genauere Beschreibung des Verfahrens folgt im weiteren Verlauf des Kapitels.

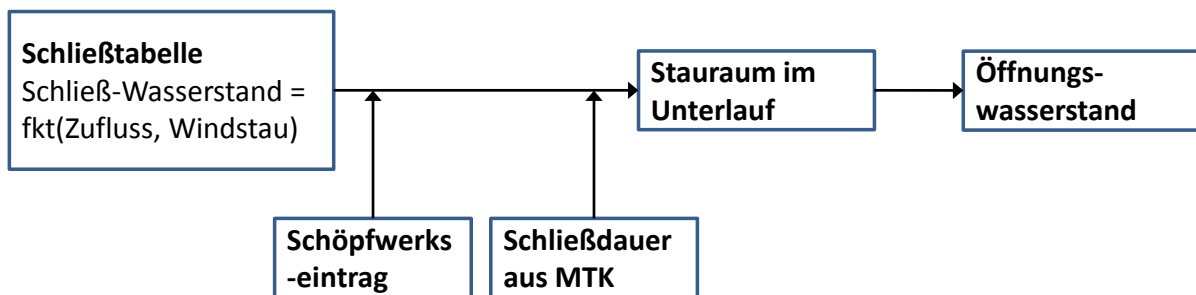


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der vereinfachten Abschätzung des Öffnungswasserstandes

3.2.1 Schöpfwerksbetrieb

Über Betriebszeiten der Schöpfwerke an der Este stehen derzeit keinerlei Aufzeichnungen zur Verfügung. Bekannt sind lediglich die maximalen Pumpleistungen sowie das Baujahr der Pumpen. Tabelle 7 gibt eine Übersicht der Schöpfwerksdaten. In der Summe ergibt sich die maximale Förderleistung zu 13,21 m³/s. Das Baujahr der Pumpen ist insofern von Bedeutung, als das Pumpen mit neuerer Technik ihre maximale Leistung weitgehend unbeeinflusst vom Außenwasserstand erbringen, während ältere Pumpen mit steigenden Außenwasserständen an Leistung verlieren. Auf Grund der überwiegend modernen Technik erscheint die Annahme der maximalen Pumpleistung, unabhängig vom Außenwasserstand, plausibel.

Tabelle 7: Technische Daten der Schöpfwerke nach Angabe des AG.

Schöpfwerk	Pumpenleistung	Baujahr der Pumpen	max. Leistung
Rübke	2x 3,0 m ³ /s	1x 2006, 1x 2008	6,00
Hove	2x 1,1 m ³ /s	2010	2,20
Leeswig	1x 0,4 m ³ /s	modernisiert 2011	0,40
	1x 0,22 m ³ /s	modernisiert 2011	0,22
Estebrügge	1x 1,2 m ³ /s	1980	1,20
	1x 0,6 m ³ /s	2005	0,60
Neuland-Vogelsang	1x 0,22 m ³ /s	2009	0,22
Neuland (Stand 2011)	2x 0,7 m ³ /s	1x 1972, 1x 2009	1,40
Neuland (geplant)	3x 0,7 m ³ /s		
Nincop	1x 0,42 m ³ /s	ca. 1950	0,42
Liedenkummer	2x 0,275 m ³ /s	ca. 1968/1970	0,55
		Summe	13,21

3.2.2 Mittlere Schließdauern

Auf Basis der bereitgestellten mittleren Tidekurve des Jahres 2010 (MTK 2010) werden mittlere Schließdauern abgeschätzt. Zur Abbildung der verschiedenen Fälle erhöhter Außenwasserstände wird die MTK 2010 um den entsprechenden Wert nach oben verschoben (siehe Abbildung 12). Unter der Annahme, dass der Öffnungswasserstand gleich dem Schließwasserstand ist, können aus den verschobenen Ganglinien Schließdauern abgeleitet werden. Diese sind in Abbildung 13 dargestellt. Durch die Annahme einer mittleren Tidekurve entsteht ein Fehler bei der Berechnung der Schließdauer, da sich die Form einer Sturmflut von der mittleren Tidekurve unterscheidet.

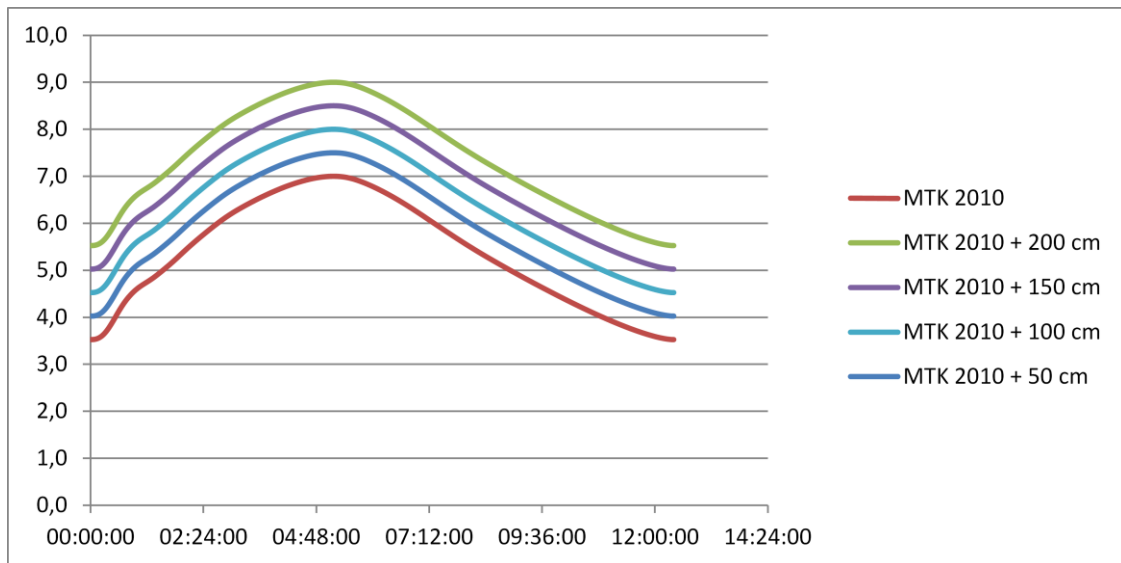


Abbildung 12: Tidekurven zur Ermittlung der Schließdauern des Inneren Sperrwerks, ausgehend von der mittleren Tidekurve (MTK) 2010.

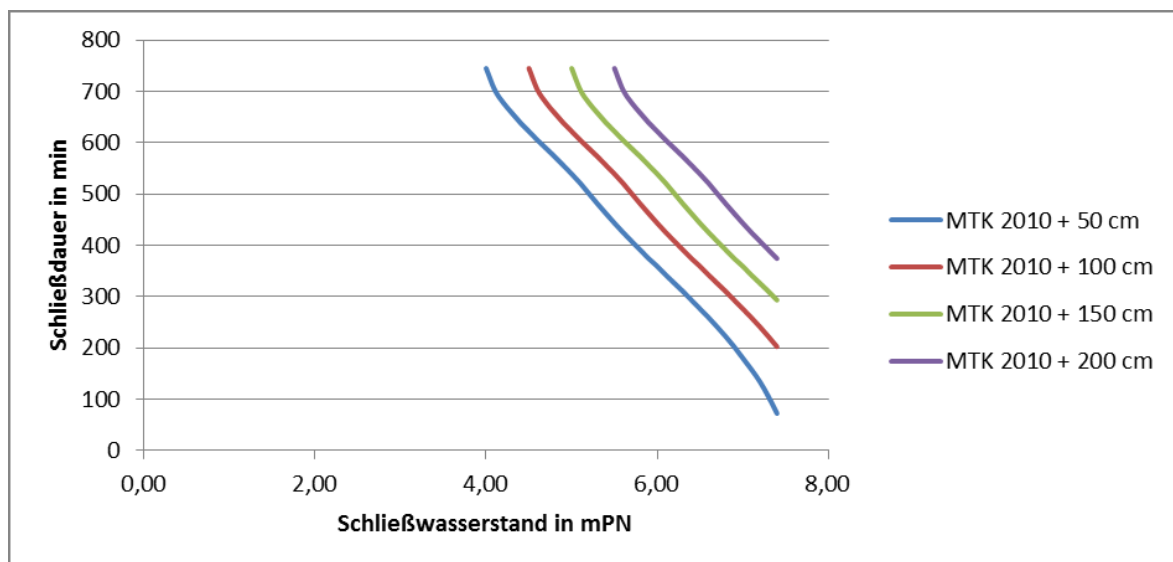


Abbildung 13: Schließdauern vereinfacht abgeleitet aus der MTK 2010. Annahme: Schließwasserstand gleich Öffnungswasserstand

3.2.3 Stauraum im Unterlauf

Der verfügbare Stauraum im Bereich zwischen dem Buxtehuder Hafen und dem Inneren Este-Sperrwerk dient als Speicher für die anfallenden Zuflüsse. Grundlage für die Ermittlung des Stauraumes sind die Knotenhöhen des FE-Modells. Die Verwendung der Modelltopographie hat den Vorteil, dass die Unterwassertopographie bereits integriert ist. Diese stammt im Gewässerbereich aus den Vermessungsdaten der TUHH vom Mai 2009. Die Verwendung anderer Unterwassertopographien, die durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden, erbrachte keine wesentlichen Unterschiede. Im Vorlandbereich stammen die Höhen aus dem DGM 5 (Stand 2009). Im Übergangsbereich der Datensätze, der in etwa bei einer Geländehöhe von 5,5 mPN liegt, wurden die Werte im Rahmen der

Modellerstellung linear interpoliert. Durch die grobe Auflösung des Geländemodells und folglich auch des FE-Modells sind vorhandene Uferrehnen, die zumindest in einigen Gewässerabschnitten ein früheres Ausuferen verhindern, nicht erfasst wodurch Ungenauigkeiten entstehen können.

Abbildung 14 zeigt den Verlauf der Wasserstand-Volumen Beziehung sowie die Steigung des Graphen, der die Änderung des Volumens bei Änderung des Wasserstandes (dV/dW) angibt. Man erkennt den Steigungswechsel ab einem Wasserstand von etwa 6,75 mPN sehr gut. Ab hier führt ein geringer Anstieg des Wasserstandes zu einer deutlichen Zunahme des Stauvolumens. Daraus lässt sich schließen, dass ab hier das Ausuferen beginnt. Bei Betrachtung des Geländemodells (Anhang 3-2) erkennt man, dass Geländehöhen zwischen 6,75 mPN bis 7,0 mPN insbesondere im Bereich Neuland, nördlich von Buxtehude, und im Bereich zwischen Groß Hove und dem Inneren Este-Sperrwerk vorkommen. Flächen mit Geländehöhen zwischen 7,0 mPN und 7,25 mPN liegen überwiegend im Bereich südlich von Moorende und wiederum im Abschnitt zwischen Groß Hove und dem Inneren Este-Sperrwerk.

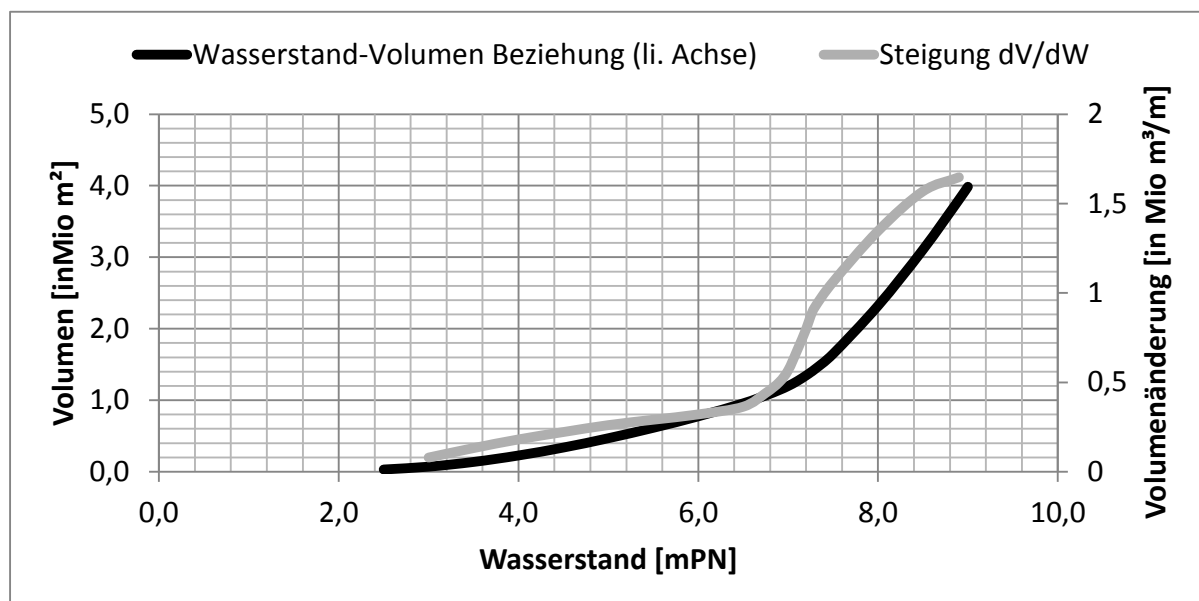


Abbildung 14: Wasserstand-Volumen Beziehung des Unterlaufes zwischen Buxtehude Hafen und Innerem Este-Sperrwerk sowie deren Steigung

Um einen Eindruck über die betroffenen Gebäudeflächen zu erlangen, werden verschiedene Wasserspiegellagen mit der ALK Folie 1300 Wohnbauflächen (Stand 2009) verschnitten. Abbildung 15 zeigt die betroffene Wohnbaufläche in Abhängigkeit vom Wasserstand. Man erkennt den deutlich schnelleren Anstieg der benetzten Gebäudefläche ab einem Wasserstand von 7,0 mPN. Von einer detaillierteren Betrachtung des Bereiches zwischen

7,00 mPN und 7,5 mPN wird auf Grund der erwähnten Ungenauigkeiten durch Nicht-Berücksichtigung der Uferreihen abgesehen. Zudem kann auch aus der ALK Folie nicht abgelesen werden, ob sich auf der deklarierten Wohnbaufläche auch wirklich ein Gebäude befindet. Aus Erfahrungen des Sperrwerksbetreibers beginnt der kritische Bereich ab einem Wasserstand von 7,2 mPN am Inneren Este-Sperrwerk. Der Wasserspiegelgradient in Richtung stromauf beträgt bei geschlossenem Sperrwerk nach Abklingen der Sunkwelle je nach Binnenzufluss 2-5 cm bis zum Hafen Buxtehude.

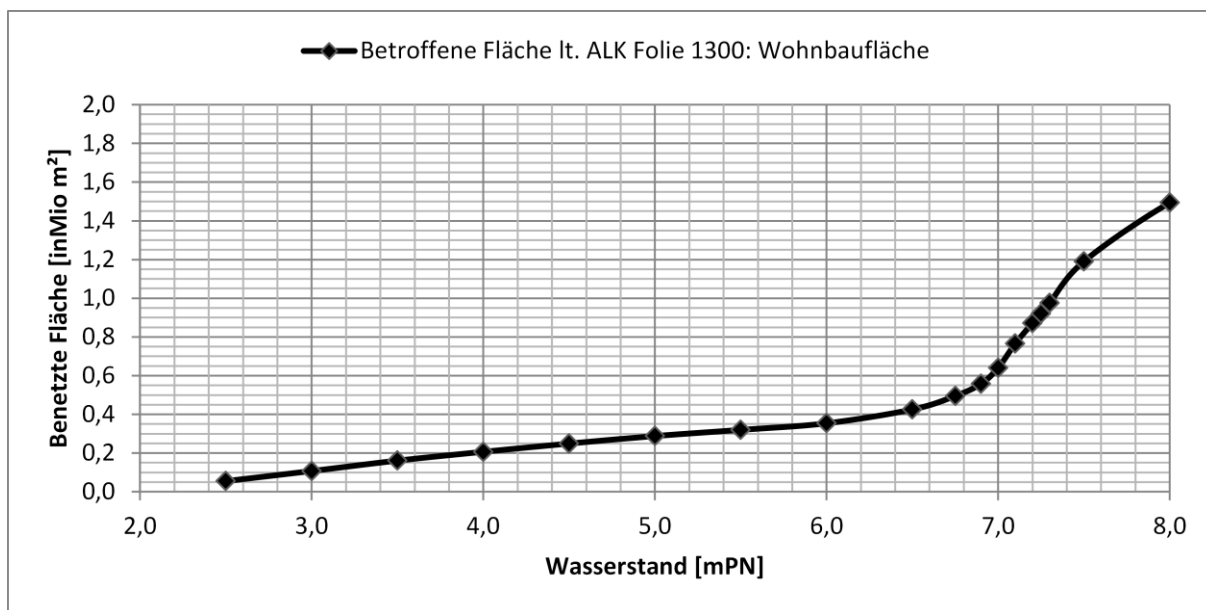


Abbildung 15: Betroffene Wohnbaufläche (gemäß ALK Folie 1300 Wohnbaufläche) in Abhängigkeit vom Wasserstand

3.2.4 Kritische Schließfälle

Zur Ermittlung des maximalen Öffnungswasserstandes wird zunächst der Schließwasserstand am Binnenpegel des Sperrwerks in einen mittleren Wasserstand im Unterlauf der Este zwischen Buxtehude und Sperrwerk umgerechnet. Dies geschieht auf Basis der Erkenntnisse einer Modellsimulation bei der als untere Randbedingung die MTK2010, um 1,00 m nach oben verschoben (vgl. Abbildung 12), in Kombination mit einem sehr geringen Oberwasserzufluss von ca. 1 m³/s angesetzt wurde. Die Schließung bei 7,20 mPN ergab etwa eine Stunde später einen nahezu ausgespiegelten Wasserstand von ca. 7,0 mPN im gesamten Bereich hinter dem Sperrwerk. In erster Näherung kann also eine Umrechnung des Schließwasserstandes in einen ausgespiegelten Wasserstand durch Subtraktion von 0,2 m erfolgen.

Zur Überprüfung der einzelnen Schließfälle wird für den Oberwasserzufluss der zum Wasserstand korrespondierende Abfluss am Pegel Emmen angenommen. Dieser erfährt eine Multiplikation mit dem Faktor 1,64, der aus dem Verhältnis der Einzugsgebietsflächen stammt. Da der tatsächliche Eintrag über die Schöpfwerke zurzeit nicht bekannt ist, deren Betrieb im Fall der Sperrwerksschließung jedoch zulässig ist, erfolgt eine Grenzwertbetrachtung. Zunächst wird der Schöpfwerkeintrag vernachlässigt und in einem zweiten Fall als maximal angenommen. Basierend auf diesen Annahmen wird anhand der Wasserstand-Volumen Beziehung (Abbildung 14) für jeden Schließfall der neuen Schließstabelle ein maximaler Öffnungswasserstand abgeschätzt. Dieser ist in Tabelle 8 (nur Binnenzufluss) und Tabelle 9 (Binnenzufluss + max. Schöpfwerkeintrag) dargestellt. Gekennzeichnet sind in den Tabellen die Öffnungswasserstände, die über den Schließwasserständen und/oder über 7,2 mPN liegen und somit potentiell zu kritischen Wasserständen stromauf des Sperrwerks führen können.

Ohne Schöpfwerkeintrag führen nur wenige Kombinationen, die sich durch hohe Abflüsse und hohe Außenwasserstände auszeichnen, zu höheren Öffnungswasserständen. Es fällt zudem auf, dass auch zwei Schließfälle bei niedrigem Oberwasser und einer Prognose von MThw +50 bis 100cm zu Öffnungswasserständen über 7,2 mPN führen. Diese Tatsache ist auf hohe Schließwasserstände zurückzuführen und sollte bei der folgenden Optimierung der Schließstabelle Beachtung finden. Berücksichtigt man die maximale Schöpfwerksleistung, so liegt in nahezu allen Schließfällen der Öffnungswasserstand über dem Schließwasserstand. Zudem liegen sämtliche Öffnungswasserstände über 7,2 mPN. Hierdurch wird der große Einfluss der Schöpfwerke deutlich. Eine detaillierte Betrachtung des Schöpfwerkeinflusses erfolgt in Abschnitt 3.3.2.

Tabelle 8: Neue Schließabelle mit überschläglich ermittelten maximalen Öffnungswasserständen, ohne Berücksichtigung des Schöpfwerkseintrages

Schließabelle Winterhalbjahr, ohne Schöpfwerkseintrag							
W Rockstedt [cmPN]	W Emmen** [cmPN]	MThw + 50bis100 cm		MThw + 100bis150 cm		MThw + 150bis200 cm	
		Schließwas- serstand *	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)	Schließwas- serstand	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)	Schließwas- serstand	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)
<700*	<121	7,40	7,24	7,20	7,08	7,00	6,92
700-725*	121-125	7,30	7,24	7,10	7,08	6,90	6,92
725-750*	125-130	7,30	7,16	7,10	7,02	6,90	6,86
750-775*	130-133	7,30	7,16	7,10	7,03	6,90	6,88
775-800	133-141	7,20	7,16	7,00	7,03	6,80	6,88
800-825	141-152	7,20	7,11	7,00	7,02	6,80	6,87
825-850	152-171	7,10	7,11	6,90	7,02	6,70	6,90
850-875	171-193	7,00	7,11	6,80	7,09	6,60	7,00
875-900	193-212	6,90	7,18	6,70	7,21	6,50	7,16

*) vom 1.4. bis 31.10.: Schließhöhe bei max 7,20mPN

**) Ermittelt aus Übertragung anhand der Dauerliniengegenüberstellung (Pü)

Tabelle 9: Neue Schließabelle mit überschläglich ermittelten maximalen Öffnungswasserständen, mit Berücksichtigung des maximalen Schöpfwerkseintrages

Schließabelle Winterhalbjahr, max. Schöpfwerkseintrag							
W Rockstedt [cmPN]	W Emmen** [cmPN]	MThw + 50bis100 cm		MThw + 100bis150 cm		MThw + 150bis200 cm	
		Schließwas- serstand *	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)	Schließwas- serstand	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)	Schließwas- serstand	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)
<700*	<121	7,40	7,40	7,20	7,37	7,00	7,30
700-725*	121-125	7,30	7,40	7,10	7,37	6,90	7,30
725-750*	125-130	7,30	7,35	7,10	7,35	6,90	7,28
750-775*	130-133	7,30	7,35	7,10	7,35	6,90	7,29
775-800	133-141	7,20	7,35	7,00	7,35	6,80	7,29
800-825	141-152	7,20	7,33	7,00	7,36	6,80	7,30
825-850	152-171	7,10	7,33	6,90	7,37	6,70	7,33
850-875	171-193	7,00	7,35	6,80	7,43	6,60	7,40
875-900	193-212	6,90	7,42	6,70	7,52	6,50	7,51

*) vom 1.4. bis 31.10.: Schließhöhe bei max 7,20mPN

**) Ermittelt aus Übertragung anhand der Dauerliniengegenüberstellung (Pü)

3.3 Modellgestützte Optimierung der Schließstabelle

Mit Hilfe der zweidimensionalen hydronumerischen Modellierung können detaillierte Aussagen über Strömungen und Wasserstände getroffen werden. Mit dem Modell der Este wird zunächst eine Systemstudie durchgeführt, in der der Einfluss der Schöpfwerke auf den Öffnungswasserstand analysiert wird. Anschließend wird untersucht, welche Vorteile durch vorausschauendes früheres Schließen erreicht werden können. Beides erfolgt durch Simulation von Szenarien, die auf einem beobachteten Zeitraum aufbauen, der sich durch die Überlagerung mehrerer höher auflaufender Tiden mit einem Binnenhochwasser auszeichnet. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Simulationen fließen anschließend in die Optimierung der vorläufigen Schließstabelle ein.

3.3.1 Das hydronumerische Modell der Este

Die Untersuchungen werden mit einem zweidimensionalen, hydrodynamisch-numerischen Modell, das am Institut für Wasserbau der TUHH im Modellsystem Kalypso erstellt wurde, durchgeführt. Das verwendete Modul Kalypso-1D/2D aus diesem Modellsystem dient der Erstellung, Bearbeitung und der Simulation von eindimensionalen, zweidimensionalen sowie von hybriden 1D/2D hydrodynamischen Strömungsmodellen. Mit diesem Modul sind sowohl stationäre als auch instationäre Berechnungen möglich. Die erzeugten Fließzustände und Wasserstandsfelder können nach einer Simulation direkt in Form von Draufsichten, Längsschnitten und Zeitreihen visualisiert und ausgewertet werden. Ein Export der Ergebnisse in ein Geoinformationssystem (GIS) ist für eine weitere Bearbeitung der gewonnenen Ergebnisse ebenfalls möglich. Die mathematische Grundlage des hydrodynamisch-numerischen Modells bilden die zweidimensionalen, tiefengemittelten Flachwassergleichungen. Die Finite-Elemente-Methode wird als numerisches Lösungsverfahren für das Modell verwendet. Als Zeitschrittverfahren wird ein modifiziertes Crank-Nicholson-Verfahren eingesetzt.

Für die Diskretisierung von zweidimensionalen Modellabschnitten dienen Dreiecke und Vierecke, die in unstrukturierten Netzen beliebig vermascht werden können. Neben grundlegenden Zeichenfunktionen sind halb- und vollautomatische Modellierungsalgorithmen in Kalypso 1D/2D integriert. Die hydraulische Wirkungsbeschreibung erfolgt über die Einordnung jedes finiten Elements in Fließwiderstandsklassen. Die Zuweisung erfolgt komfortabel über die Definition flächenhafter Gebietsklassifizierung (z.B. aus ATKIS-Datensätzen).

Innovative Ansätze sind in den Bereichen Rauheitsmodellierung und Turbulenz enthalten. Die Rauheitsmodellierung erfolgt über das Colebrook-White'sche Widerstandsgesetz und

beinhaltet die Modellierung von Fließverlusten infolge von überströmtem und durchströmtem Bewuchs. Für die Simulation stehen verschiedene Turbulenzmodelle zur Verfügung (z.B.: ein konstantes Wirbelviskositätsmodell, ein bodeninduziertes Turbulenz-Modell, der Prandtl'sche Mischungswegansatz und das Smagorinsky Modell).

Das im Rahmen dieses Projektes verwendete 2D-Modell erstreckt sich vom Mühlenteich in Buxtehude bis zu Äußeres Este-Sperwerk (vgl. Abbildung 16).

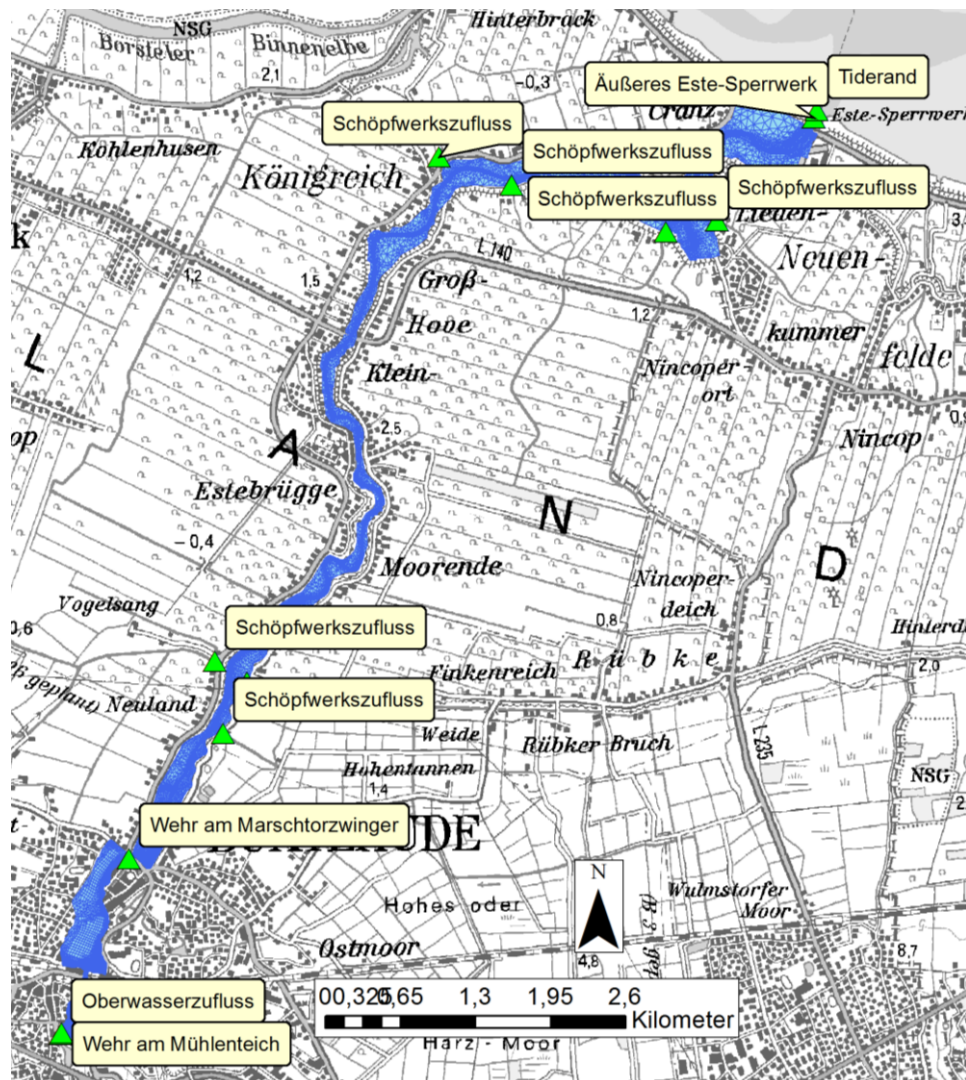


Abbildung 16: Übersicht des 2D-Modells der Este

Bei der Aufstellung des FE-Netzes für die 2D-Strömungsberechnung wurden die topographischen und alle hydraulisch relevanten Strukturen im Modellgebiet integriert. Der Modellrand wurde auf Basis der Ausdehnung des maximalen Hochwasserereignisses (hier HQ100) festgelegt. Die Diskretisierung erfolgte auf Basis von Topographie, Geländebruchkanten und Rauheitszonen. Klassischerweise wurde der Flussschlauch mit Vierecken vernetzt, während Böschungen, Vorländer und Hafenbecken vorwiegend über Dreieckselemente abgebildet wurden. Nach der Erstellung des 2D-Netzes wurden die Höheninformationen und Rauheiten dem FE-Modell zugewiesen. Die Höhen im Gewässer stammen im Bereich des schiffbaren Unterlaufs der Fächerlotmessung der TUHH im Mai 2009. Im Bereich des städtischen Gewässerabschnitts stammen die Höhen aus der vom NLWKN beauftragten Vermessung im Jahre 2006. Die Höhen im Vorlandbereich entstammen dem DGM 5 (Stand 2009). Insgesamt enthält das Modell 4 Bauwerke: die beiden Wehre in Buxtehude sowie das Innere und das Äußere Este-Sperrwerk. Die beiden Wehre werden im Rahmen dieses Projektes als starr in geöffneter Stellung angenommen. Die Sperrwerke operieren gemäß der ihnen vorgegebenen Schließordnung und schließen wasserstandsgesteuert. Am oberen Modellrand ist ein Zuflussrand angeordnet, über die der Oberwasserzufluss per Zeitreihe eingesteuert wird. Am unteren Modellrand, elbseitig des Äußeren Este-Sperrwerks, befindet sich ein Wasserstandsrand über den die Tide eingesteuert wird. Im Bereich der größeren Schöpfwerke befinden sich seitliche Zuflussränder über die der Schöpfwerkszufluss eingesteuert wird.

Die Kalibrierung der hydraulischen Parameter Rauheit und Wirbelviskosität erfolgte an einem Hoch- und einem Niedrigwasserereignis. Nach einer ersten Simulation mit abgeschätzten hydraulischen Parametern wurden die berechneten Wasserstände gemessenen Pegelwerten gegenübergestellt und die gewählten hydraulischen Parameter so lange angepasst, bis die berechneten und gemessenen Wasserstände übereinstimmen. Die Wasserstände des Kalibrierungsereignisses werden vom Modell sehr gut abgebildet (Abbildung 17). Dies gilt auch für den Fall der Sperrwerksschließung. Anhand mehrerer unabhängiger Hoch- und Niedrigwasserereignisse erfolgte im Anschluss eine Validierung des Modells.

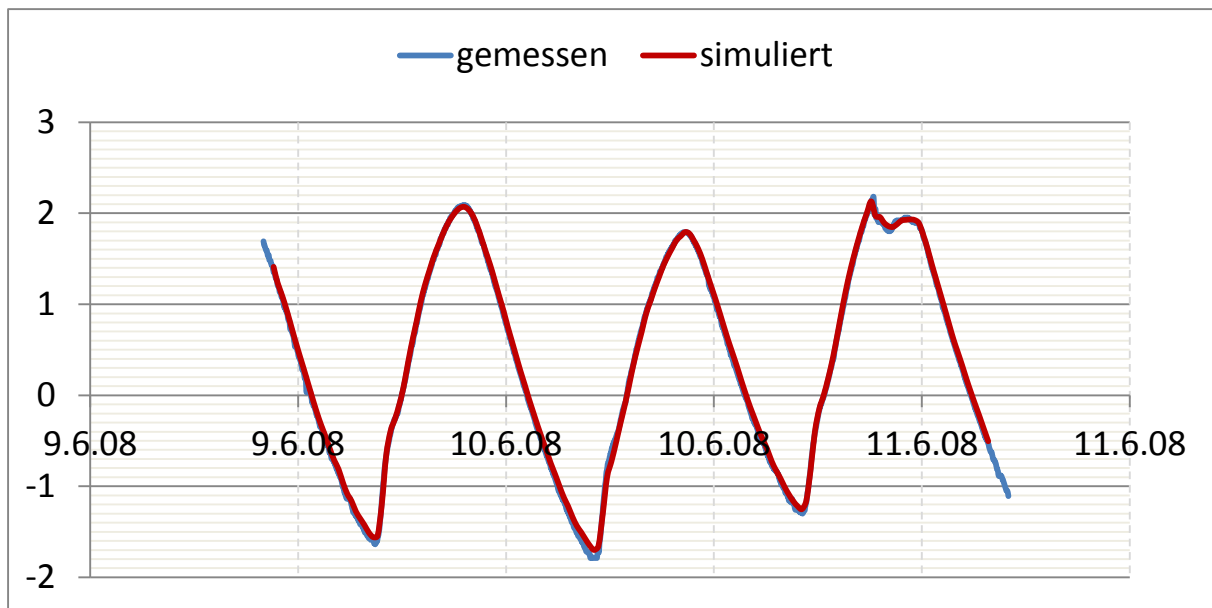


Abbildung 17: Kalibrierungsergebnisse am Binnenpegel des Inneren Este-Sperrwerks

3.3.2 Modellgestützte Systemanalyse (Szenarien 1-4)

Ziel der Systemanalyse ist es, einerseits Rückschlüsse hinsichtlich des Einflusses der Schöpfwerke auf den Wasserstand bei geschlossenem Sperrwerk zu ermitteln und andererseits die Auswirkungen einer früheren Schließung darzulegen. Hierzu werden jeweils zwei Szenarien erzeugt und mit dem Modell simuliert. Als Grundlage für die Erstellung der Szenarien wird der Zeitraum vom 03.02.2011 bis zum 09.02.2011 herangezogen in dem insgesamt 11 Thw auftraten, die allesamt höher als das MThw aufliefen. Abbildung 18 zeigt die an Messstationen des WSA Hamburg und des NLWKN aufgezeichneten Zeitreihen für Wasserstand und Abfluss. Die im Modell erzeugten Szenarien sind in Tabelle 10 dargestellt. Das Sperrwerk wird in den beiden ersten Szenarien gesteuert wie es in der Realität geschehen ist. Da keine Informationen zum Schöpfwerksbetrieb vorliegen, wird der Zufluss über die Schöpfwerke im ersten Szenario vernachlässigt, während im zweiten Szenario die volle Schöpfwerksleistung angesetzt wird. Im dritten und vierten Szenario wird streng nach

Schließordnung geschlossen, wobei im dritten Szenario keine und im vierten Szenario die volle Schöpfwerksleistung angesetzt wird.

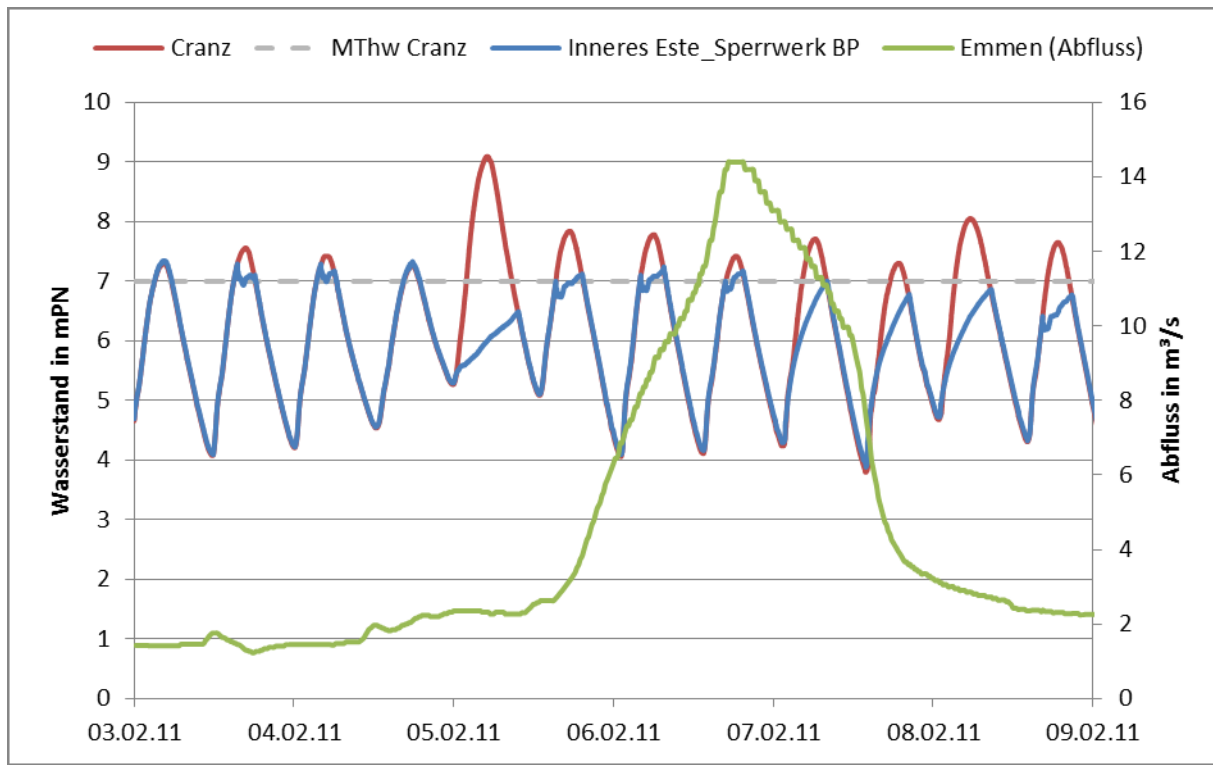


Abbildung 18: Ganglinien (Messwerte) im zu Grunde gelegten Simulationszeitraum vom 03.02.11 bis zum 09.02.11

Tabelle 10: Übersicht der Szenarien 1 bis 4

Szenario	Sperrwerksbetrieb	Schöpfwerksleistung in m³/s
1	Wie real gesteuert	0
2	Wie real gesteuert	13,2
3	Gemäß gültiger Schließstabelle	0
4	Gemäß gültiger Schließstabelle	13,2

Die Berechnungsergebnisse der Szenarien 1 und 2 sind in Abbildung 19 dargestellt. Man sieht, dass zwischen den Tiden 4 bis 11 der real aufgetretene Wasserstand bei Vernachlässigung des Schöpfwerkseintrags unterschätzt wird, es also real einen Zufluss über die Schöpfwerke gegeben haben muss. Unter Annahme der vollen Leistung werden einige Wasserstände gut getroffen und einige überschätzt. Die Aufzeichnung der Niederschlagsmengen an der DWD-Station Jork, zeigen hohe Niederschläge während der Tiden 3 bis 8 (4.2.-6.2.11). Da die Reaktionszeit durch das ausgebaute Gewässernetz in der Marsch sehr kurz ist, kann man davon ausgehen, dass die Schöpfwerke wenige Stunden nach Beginn der Niederschläge ihre Arbeit aufgenommen haben und zumindest größtenteils bis nach Ende der Niederschläge in Betrieb waren. Dies wird dadurch bestätigt, dass die Wasserstände der Tiden 5 bis 7 im Szenario 2 gut getroffen werden. Tide 8 und 9 werden dagegen überschätzt, so dass man hier von einer reduzierten Schöpfwerksleistung ausgehen kann. Der Scheitel der Hochwasserwelle erreicht etwa einen Tag nach dem Niederschlagsmaximum den Unterlauf, was sich sehr gut mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2.4 deckt. Die Ergebnisse für die Szenarien 3 und 4 können in Anhang 3-3 eingesehen werden.

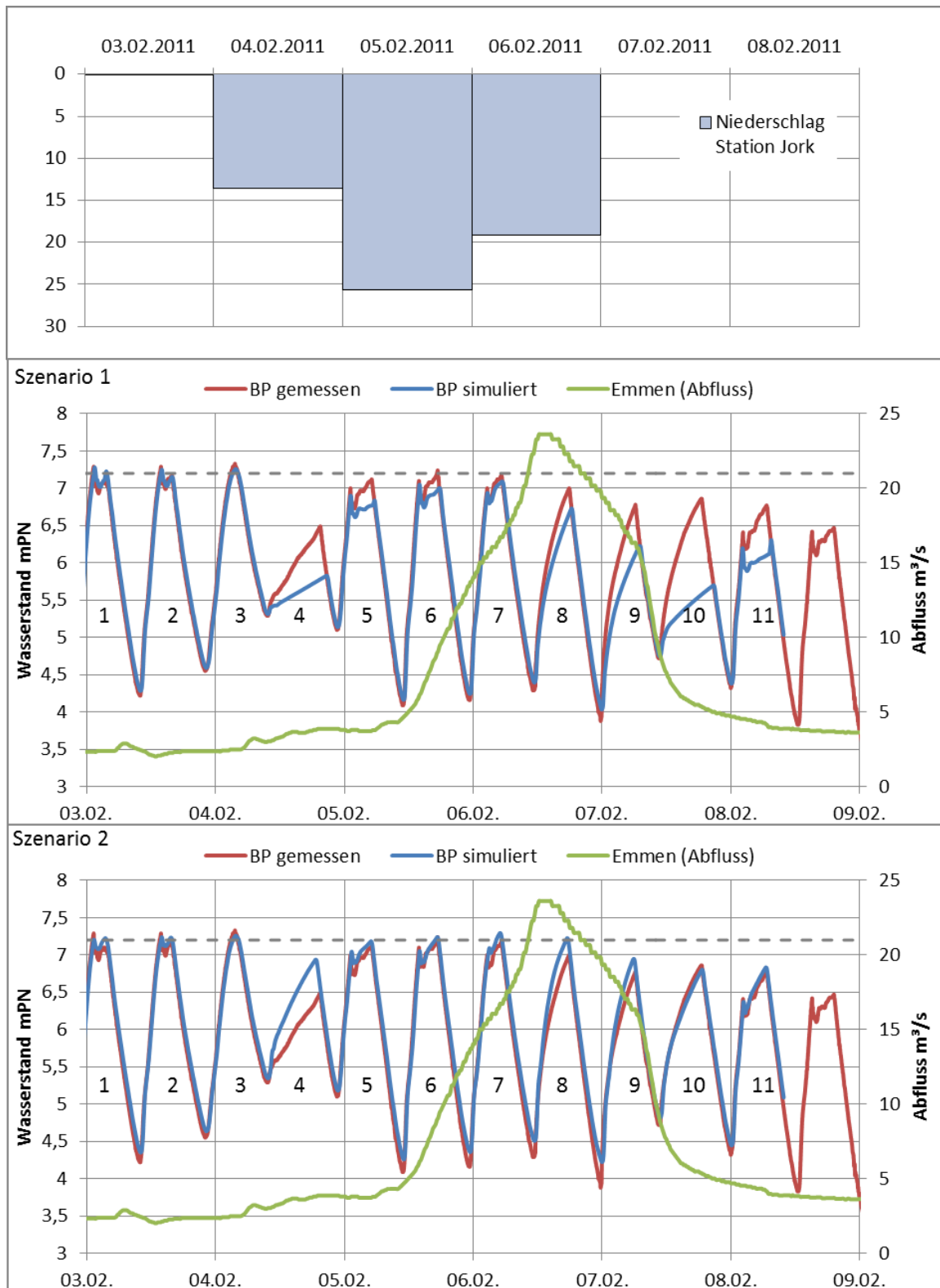


Abbildung 19: Gemessener Niederschlag an der Station Jork (oben), gemessene und simulierte Wasserstände am Inneren Este-Sperrwerk ohne Schöpfwerkseintrag: Szenario 1 (Mitte) und mit vollem Schöpfwerkseintrag: Szenario 2 (unten), gestrichelt dargestellt ist der Wert 7,20 mPN

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien 1 bis 4 ist in Tabelle 11 gegeben. Angegeben sind die maximalen Wasserstände unmittelbar hinter dem Sperrwerk. Wasserstände über 7,2 mPN sind gekennzeichnet. Es fällt bei Betrachtung der ersten beiden Tiden auf, dass bei niedrigen Oberwasserzuflüssen und leicht erhöhten Tidewasserständen die maximalen Wasserstände über 7,2 mPN liegen. Dieses Verhalten der betreffenden Schließfälle wurde bereits bei der vereinfachten Überprüfung in Abschnitt 3.2.4 deutlich. Insgesamt unterscheiden sich die Öffnungswasserstände der Tiden 1 und 2 in allen Szenarien nur geringfügig. Die Tatsache, dass der Wasserstand bei Annahme der vollen Schöpfwerksleistung (Szenarien 2,4) sogar unter den anderen liegen, ist der Zeitschrittweite des Modells von 10 Minuten geschuldet. Der Schöpfwerkseintrag führt in den beiden Szenarien dazu, dass die Schließung 10 Minuten eher erfolgt als in den anderen beiden Szenarien. Bei Tide 8 zeigt sich sehr deutlich, dass der Öffnungswasserstand durch vorausschauendes Schließen signifikant reduziert werden kann. Bei den Szenarien mit voller Schöpfwerksleistung bedeutet dies eine Reduktion um 10 cm (7,21 mPN statt 7,31 mPN). Auch bei Tide 6 kann eine Reduktion um 3 cm (7,22 statt 7,25 mPN) erzielt werden.

Tabelle 11: Maximale Wasserstände der Tiden des Simulationszeitraumes für die 4 Szenarien, rot markiert sind Wasserstände über 7,2 mPN.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Dif 3-1 (ohne SW)	Dif 4-2 (max SW)	Sturmflut- warnung in m	Bemerkung
Thw 1	7,26	7,21	7,26	7,24	0,00	0,03	0,5	
Thw 2	7,23	7,22	7,23	7,24	0,00	0,02	0,5	
Thw 3	7,24	7,24	7,24	7,25	0,00	0,01	keine	keine Schließung
Thw 4	5,81	6,92	6,79	7,20	0,98	0,28	2	
Thw 5	6,88	7,16	6,88	7,09	0,00	-0,07	1	
Thw 6	7,03	7,22	7,13	7,25	0,10	0,03	0,75	
Thw 7	7,07	7,21	7,07	7,20	0,00	-0,01	0,75	
Thw 8	6,71	7,21	7,14	7,31	0,43	0,10	0,75	Schließung bei NW angefordert
Thw 9	6,21	6,93	6,22	6,92	0,02	0,00	0,75	Schließung bei NW angefordert
Thw 10	5,68	6,78	6,59	7,06	0,91	0,28	1	Schließung bei NW angefordert
Thw 11	6,29	6,81	6,82	7,00	0,53	0,19	0,75	
Mittelwert	6,67	7,08	6,94	7,16				

Der große Einfluss der Schöpfwerke wird ebenfalls bei der Betrachtung der Mittelwerte deutlich. Über die 11 Tiden erhöht sich der Wasserstand im Mittel um 41 cm (Vergleich Szenario 1 und 2) bzw. 22 cm (Szenario 3 und 4). Es zeigt sich auch, dass der mittlere Öffnungswasserstand durch vorausschauendes Schließen um 17 cm (Vergleich Szenario 1 und 3) bzw. 8 cm (Vergleich Szenario 2 und 4) reduziert werden kann.

3.3.3 Vorschläge für optimierte Schließstabellen

Die gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um eine Optimierung der neuen Schließstabelle durchzuführen. Die neue Fassung berücksichtigt auch den Wunsch des Auftraggebers (= Sperrwerksbetreibers) nach einer geringeren Anzahl von Schließfällen, so dass eine bessere Übersichtlichkeit für das steuernde Personal gegeben ist. Die Vereinfachung erfolgt durch Zusammenlegung von Klassen des Oberwasserindikators. Bei der Festlegung der Schließwasserstände kommt das gleiche Verfahren wie in Kapitel 3.2 zum Einsatz, allerdings wird diesmal in umgekehrter Ablafrichtung verfahren. Ausgegangen wird von einem maximal tolerierbaren Öffnungswasserstand, von dem aus dann auf den Schließwasserstand rückgerechnet wird. Als tolerierbarer Öffnungswasserstand wird 7,2 mPN am Inneren Este-Sperrwerk angenommen. Zusätzlich wird ein Stauraum zur Aufnahme von 25% (Variante A), 50% (Variante B) und des maximalen Schöpfwerkseintrags (Variante C) berücksichtigt. Die Vorschläge sind in Tabelle 12 bis Tabelle 14 dargestellt. In gleicher Weise sind 3 Tabellen unter der Annahme von 7,3 mPN als tolerierbaren Wasserstand entstanden (siehe Anhang 3-4). In allen Fällen liegt der ermittelte Öffnungswasserstand in der überwiegenden Zahl der Fälle unterhalb des tolerierbaren Wasserstands. Lediglich bei langen Sperrzeiten und/oder hohen Zuflüssen wird diese Marke überschritten.

Tabelle 12: Vorgeschlagene Schließstabelle A: Maximal tolerierbarer Wasserstand = 7,20 mPN, Schöpfwerkseintrag = 3,3 m³/s (entspricht ¼ der max. Leistung)

Schließstabelle Variante A: Tolerierbarer Wasserstand BP: 7,2 mPN, 25% SW							
W Rockstedt [cmPN]	W Emmen** [cmPN]	MThw + 20bis100 cm		MThw + 100bis150 cm		MThw + 150bis200 cm	
		Schließwas- serstand	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)		max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)		max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)
< 720	<125	7,30	7,20	7,20	7,17	7,10	7,15
720-822	125-150	7,20	7,20	7,10	7,17	7,00	7,16
822-861	150-180	7,10	7,18	7,00	7,20	6,80	7,20
861-910	180-220	6,50	7,20	5,30	7,20	Tnw	>7,20
910+	>220	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20

***) Ermittelt aus Übertragung anhand der Dauerliniengegenüberstellung (Pü)

Tabelle 13: Vorgeschlagene Schließstabelle B: Maximal tolerierbarer Wasserstand = 7,20 mPN, Schöpfwerkseintrag = 6,6 m³/s (entspricht ½ der max. Leistung)

Schließstabelle Variante B: Tolerierbarer Wasserstand BP: 7,2 mPN, 50% SW							
W Rockstedt [cmPN]	W Emmen** [cmPN]	MThw + 20bis100 cm		MThw + 100bis150 cm		MThw + 150bis200 cm	
		Schließwasserstand	max. Öffnungswasserstand (geschätzt)		max. Öffnungswasserstand (geschätzt)		max. Öffnungswasserstand (geschätzt)
< 720	<125	7,20	7,19	7,10	7,19	7,00	7,20
720-822	125-150	7,10	7,19	7,00	7,20	6,70	7,20
822-861	150-180	7,00	7,20	6,70	7,20	6,30	7,19
861-910	180-220	5,00	7,20	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20
910+	>220	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20

**) Ermittelt aus Übertragung anhand der Dauerliniengegenüberstellung (Pü)

Tabelle 14: Vorgeschlagene Schließstabelle C: Maximal tolerierbarer Wasserstand = 7,20 mPN, Schöpfwerkseintrag = 13,2 m³/s (entspricht der max. Leistung)

Schließstabelle Winterhalbjahr: Tolerierbarer Wasserstand BP: 7,2 mPN							
W Rockstedt [cmPN]	W Emmen** [cmPN]	MThw + 50bis100 cm		MThw + 100bis150 cm		MThw + 150bis200 cm	
		Schließwasserstand	max. Öffnungswasserstand (geschätzt)		max. Öffnungswasserstand		max. Öffnungswasserstand
< 720	<125	6,90	7,18	6,60	7,18	6,20	7,20
720-822	125-150	6,80	7,20	6,30	7,20	5,80	7,23
822-861	150-180	6,40	7,20	5,20	7,21	Tnw	7,23
861-910	180-220	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20
910+	>220	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20	Tnw	>7,20

**) Ermittelt aus Übertragung anhand der Dauerliniengegenüberstellung (Pü)

3.3.4 Auswahl der optimierten Schließstabellen

Am 1.11.2012 fand ein gemeinsamer Aussprachetermin statt, bei dem die Zwischenergebnisse präsentiert wurden. Anwesend waren Vertreter des WSA Hamburg und betroffener Institutionen der Wasserwirtschaft. Diese lauten im Einzelnen:

- Landkreis Stade, Abteilung Wasserwirtschaft
- NLWKN – Betriebsstelle Stade
- NLWKN Direktion Lüneburg
- Hamburg Port Authority

In der anschließenden Diskussion wurden die vorgeschlagenen Varianten A und B von den Beteiligten als grundsätzlich geeignet für den Einsatz als neue Schließstabelle eingestuft. Neben der jeweiligen ganzjährigen Verwendung wurde zudem angeregt, eine Kombination aus Variante A im hydrologischen Sommerhalbjahr und Variante B im Winterhalbjahr zu bilden. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Schöpfwerke in den niederschlagsreichen Wintermonaten häufiger arbeiten als in den Sommermonaten. Dem könnte mit der angesprochenen Kombination Rechnung getragen werden. Variante C, die

zu einer deutlichen Zunahme der Sperrwerksschließungen führen würde, wurde in Anbetracht der Erfahrung, dass die Schöpfwerke nur nach starken Niederschlägen unter Vollast gefahren werden, als unverhältnismäßig eingestuft. Ebenfalls verworfen wurden alle Varianten, die 7,3 mPN als tolerierbaren Wasserstand zu Grunde legen, da durch sie keine signifikante Verbesserung gegenüber des Betriebs nach bestehender Schließtabelle erwartet wird.

Seitens des Auftraggebers WSA Hamburg wurde auf dem Termin klargestellt, dass von WSV-Seite mit Einführung einer überarbeiteten optimierten Schließtabelle zunächst vorrangig eine rechtliche Absicherung des Sperrwerkspersonals und eine Reduzierung von Personalkosten erreicht werden soll. Haftungsrisiken der WSV bei Hochwasserschäden von Anliegern sollen verringert und kurzfristig durchzuführende Personaleinsätze außerhalb der regelmäßigen Arbeitszeit aufgrund von nicht in der Schließordnung geregelten „Spezialfällen“ reduziert werden. Von WSV-Seite wurde die Erwartung geäußert, dass darüber hinaus seitens des Landes eine Optimierung des Schöpfwerksbetriebes veranlasst bzw. auf die veränderten wasserwirtschaftlichen Randbedingungen oberhalb des Inneren Este-Sperrwerks reagiert wird (höherer Versiegelungsgrad, erhöhte Pumpleistungen von Schöpfwerken, Veränderungen im Hochwasserschutz insb. im Stadtbereich Buxtehude). Die Anzahl der jährlich notwendigen Sperrwerksschließung solle nach WSV-Auftrag mit Einführung einer neuen Schließtabelle nach Möglichkeit nahezu konstant bleiben bzw. nur geringfügig ansteigen, Zunahmen der Schließungen mit Zielrichtung mehr Stauraum oberhalb des Sperrwerkes vorzuhalten, vermieden werden.

3.4 Zusammenfassung

Zunächst erfolgte die Aufnahme des Pegels Emmen in die Schließtabelle, um eine Steuerung des Sperrwerks über diesen Pegel zu ermöglichen. Die zu diesem Zweck ermittelten Verknüpfungsvarianten zwischen dem Pegel Rockstedt und dem Pegel Emmen zeigen bei der Überprüfung anhand von beobachteten Monatshöchstabflüssen keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Trotzdem wurde in erster Näherung die Variante, die eine Verknüpfung der Pegel anhand gleicher Überschreitungshäufigkeiten, abgelesen aus den Dauerlinien vorsieht, genutzt, um eine vorläufige neue Schließtabelle zu erzeugen. Mit Hilfe eines vereinfachten Verfahrens erfolgte eine Überprüfung der vorläufigen Schließtabelle. Das Prüfkriterium wurde so definiert, dass alle Schließfälle bei denen der berechnete Öffnungswasserstand über dem Schließwasserstand liegt und/oder eine Höhe von 7,2 mPN

überschreitet als potentiell kritisch eingestuft werden. Die Ergebnisse zeigen einen großen Einfluss des Schöpfwerkseintrags, der bei vollständiger Berücksichtigung dazu führt, dass alle Schließfälle der vorläufigen Schließstabelle als potentiell kritisch einzustufen sind, während ohne Schöpfwerkseinträge nur etwa die Hälfte aller Schließfälle als potentiell kritisch zu beurteilen ist.

Mit Hilfe eines hydrodynamisch numerischen 2D-Modells der Este wurde der Einfluss der Schöpfwerke anhand der Simulation von Szenarien, die auf einem beobachteten Zeitraum basieren, tiefergehend analysiert. Zusammenfassend bleibt diesbezüglich festzuhalten:

1. Der Schöpfwerkseintrag hat einen signifikanten Einfluss auf den Wasserstand im Fall eines geschlossenen Sperrwerks
2. Im Einzelfall kann durch eine Schließung des Sperrwerks bei einem Wasserstand, der unterhalb des laut Schließordnung festgelegten Wertes liegt, ein kritischer Öffnungswasserstand vermieden werden.

Unter Verwendung des entwickelten vereinfachten Verfahrens und Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Modellierung wurden Vorschläge für neue Schließstabellen entwickelt. Diese unterscheiden sich in der Annahme des Schöpfwerkseintrags (25%, 50%, 100%) sowie in dem angesetzten maximal tolerierbaren Öffnungswasserstand (7,2 mPN, 7,3mPN). Eine Auswahl erfolgte unter Berücksichtigung der Diskussionsergebnisse eines gemeinsamen Aussprachetermins mit den beteiligten Institutionen der Wasserwirtschaft. Hier wurden zwei Vorschläge (Variante A: 25% Schöpfwerkseintrag, 7,2 mPN tolerierbarer Wasserstand, Variante B: 50% Schöpfwerkseintrag, 7,2 mPN tolerierbarer Wasserstand) sowie eine Kombination (Variante A im Sommerhalbjahr, Variante B im Winterhalbjahr) als potentiell geeignet eingestuft. Die weiteren Varianten wurden verworfen.

4 Auswirkungen auf den Schließbetrieb

Nachdem die vorgeschlagenen Schließ Tabellen, Varianten A und B sowie deren Kombination, als grundsätzlich geeignet eingestuft worden sind, soll die Entscheidungsgrundlage erweitert werden (Grundlage: Nachtrag AG nach Aussprachetermin am 1.11.2012, vgl. Kapitel 3.3.4). Dies geschieht, indem die Auswirkungen auf den Schließbetrieb abgeschätzt werden. In einem ersten Schritt werden die Änderungen der Schließhäufigkeiten anhand von Pegelaufzeichnungen der vergangenen Jahre sowie dem Schließprotokoll, mit dem jeder Schließvorgang belegt werden kann, untersucht. In einem zweiten Schritt werden die Schließdauern im gleichen Zeitraum betrachtet. Abschließend erfolgt ein Testbetrieb mit dem hydronumerischen Modell der Este. Dieser sieht die Simulation vier weiterer Szenarien vor, die auf beobachteten Zeiträumen aufbauen.

4.1 Schließhäufigkeit und Schließdauer

Als Zeitraum zur Abschätzung der zu erwartenden Änderung der Schließhäufigkeit werden die Jahre 2003 bis 2010 herangezogen. Ausgewertet werden die Pegeldaten Cranz (Wasserstand) und Emmen (Abfluss). Zudem wird der Windstau am Pegel Cranz als Differenz von aufgetretenem Wasserstand und MThw = 7,0 mPN herangezogen. Anhand dieser drei Indikatoren ist es möglich, mit Hilfe einer Routine die Zeitreihen zu durchlaufen und auf Kombinationen, die zu einer Sperrwerksschließung führen, zu untersuchen.

4.1.1 Verfahren zur Simulation der Sperrwerksschließungen

Die Eingangsdaten sind beispielhaft in Abbildung 20 dargestellt. Die Zeitschrittweite wird durch die Abflussdaten vom Pegel Emmen zu 15 Minuten vorgegeben. In diesem Intervall wird der Abfluss als konstant angenommen. Die Umrechnung der Abflussgröße vom Pegel Emmen auf Buxtehude erfolgt wie zuvor durch Multiplikation mit dem Verhältnis der Einzugsgebietsgrößen. Die höher aufgelöste Wasserstandszeitreihe am Pegel Cranz wird auf 15 Minuten ausgedünnt. Es wird angenommen, dass der Wasserstand in gleicher Höhe und ohne Zeitversatz am Inneren Este-Sperrwerk eintritt. Eine Umrechnung, beispielsweise auf Basis von Messwerten wäre mit einem großen Aufwand verbunden und würde die Aussagekraft der Untersuchung nicht nennenswert erhöhen, da die Differenz der Schließungen und nicht der absolute Wert von Interesse ist. Der Windstau wird zum Zeitpunkt des Thw berechnet und für den Zeitraum zwischen dem betrachteten Thw und dem davor liegenden Tnw als konstant angesetzt. Diese Annahme ist dem Realfall

nachempfunden, bei dem etwa bei T_{nw} eine gute Prognose für das folgende Th_w vorliegt. Der Unterschied liegt darin, dass im Realfall die Prognosen nicht zutreffen können, in der Modellannahme aber stets exakt sind.

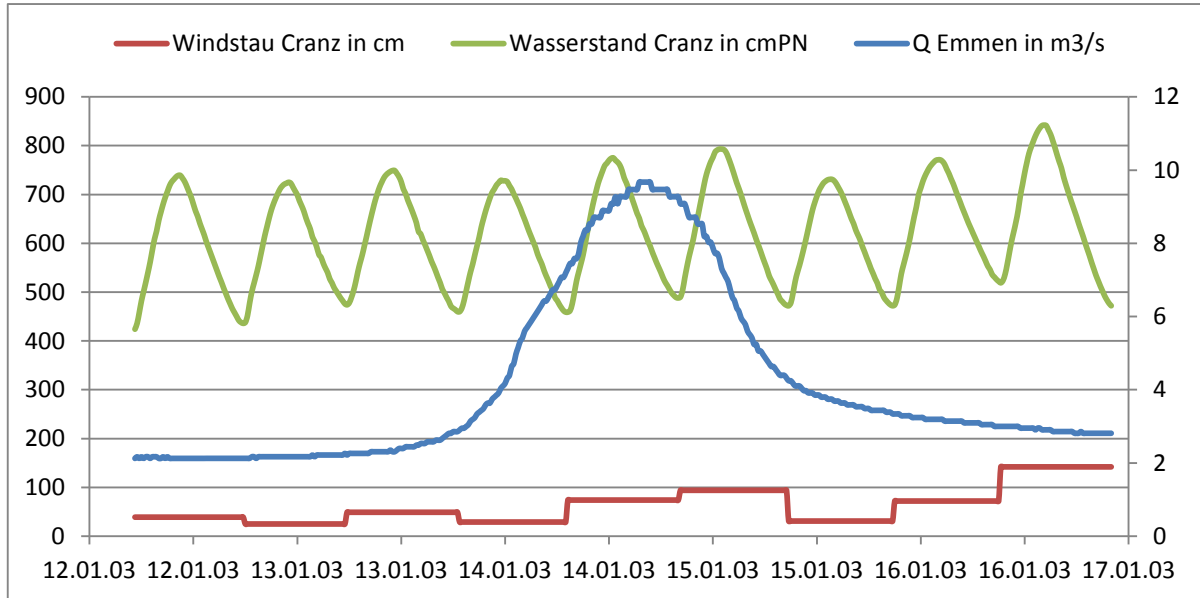


Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung der 3 Parameter zur Simulation der Sperrwerksschließungen

Die entwickelte Routine entscheidet beim Durchlaufen der Zeitreihen, ob gemäß der vorgegebenen Schließetabelle geschlossen werden muss und wann wieder geöffnet werden kann. Der binnenseitige Wasserstand berechnet sich im Fall einer Schließung, wie in Abschnitt 3.2 ermittelt, aus dem Schließwasserstand abzüglich 20cm. Während der Zeit der Schließung führt der Binnen- und Schöpfwerkszufluss zu einem Anstieg des Wasserstandes. Es wird angenommen, dass kein Zeitversatz zwischen Emmen und Buxtehude besteht, d.h. das zufließende Volumen berechnet sich zu

$$V = (Q_E + Q_{SW}) * \Delta t \quad (0.1)$$

Mit:

Q_E = Binnenzufluss am Pegel Emmen in m³/s

Q_{SW} = Schöpfwerkszufluss in m³/s

$$F_{EZG} = \frac{A_{Emmen}}{A_{Buxtehude}} = 1,64 = \text{Verhältnis der Einzugsgebietsgrößen}$$

Δt = Zeitschrittweite

Anhand der Wasserstands-Volumen Beziehung aus Kapitel 3.2.3 wird die Änderung des Wasserstands pro Zeitschritt ermittelt. Anschließend wird geprüft, ob der Binnenwasserstand

über dem Außenwasserstand liegt und somit die Öffnung erfolgen kann. Ist dies nicht der Fall, wird zum nächsten Zeitschritt übergegangen. Andernfalls wird das Schließereignis beendet und die zugehörigen Parameter Schließwasserstand, Öffnungswasserstand, Schließzeit, Öffnungszeit und Dauer der Schließung abgespeichert.

4.1.2 Schließhäufigkeit bei Verwendung der aktuell gültigen Schließtabelle

Unter Verwendung der momentan gültigen Schließtabelle werden, gemäß dem erläuterten Verfahren, die Schließungen für die Jahre 2003 bis 2010 errechnet. Die Ergebnisse werden zur Validierung des Modells herangezogen. Die ermittelten Häufigkeiten sind in Abbildung 21 dargestellt und in Tabelle 15 zusammengefasst. Man erkennt die gute Übereinstimmung der tatsächlich aufgetretenen Schließungen mit den simulierten Schließungen für den saisonalen Wechsel. Im Mittel wurde das Sperrwerk im betrachteten Zeitraum 177 Mal pro Jahr geschlossen. Dem gegenüber stehen 183 Schließungen aus der Simulation. Die größte Differenz tritt im Jahr 2007 auf, bei der 22 Schließungen mehr simuliert werden, als real aufgetreten sind. Für den gesamten Zeitraum werden insgesamt 1460 Schließungen simuliert während 1415 Schließungen protokolliert wurden. Erklärungen für die Differenzen sind in den erläuterten Annahmen (Abschnitt 4.1.1) zu finden. Für die weiteren Untersuchungen wird das Verfahren als ausreichend genau betrachtet. In Abbildung 21 sind zu Vergleichszwecken die simulierten Schließhäufigkeiten dargestellt, die ganzjährig die aktuelle Sommer- bzw. Winterschließtabelle zu Grunde legen. Da im Winterhalbjahr allgemein höhere Schließwasserstände vorgegeben sind, ergeben sich für den ganzjährigen Betrieb, nach der Winterschließtabelle, entsprechend weniger Schließungen gegenüber der durchgehenden Verwendung der Sommerschließtabelle.

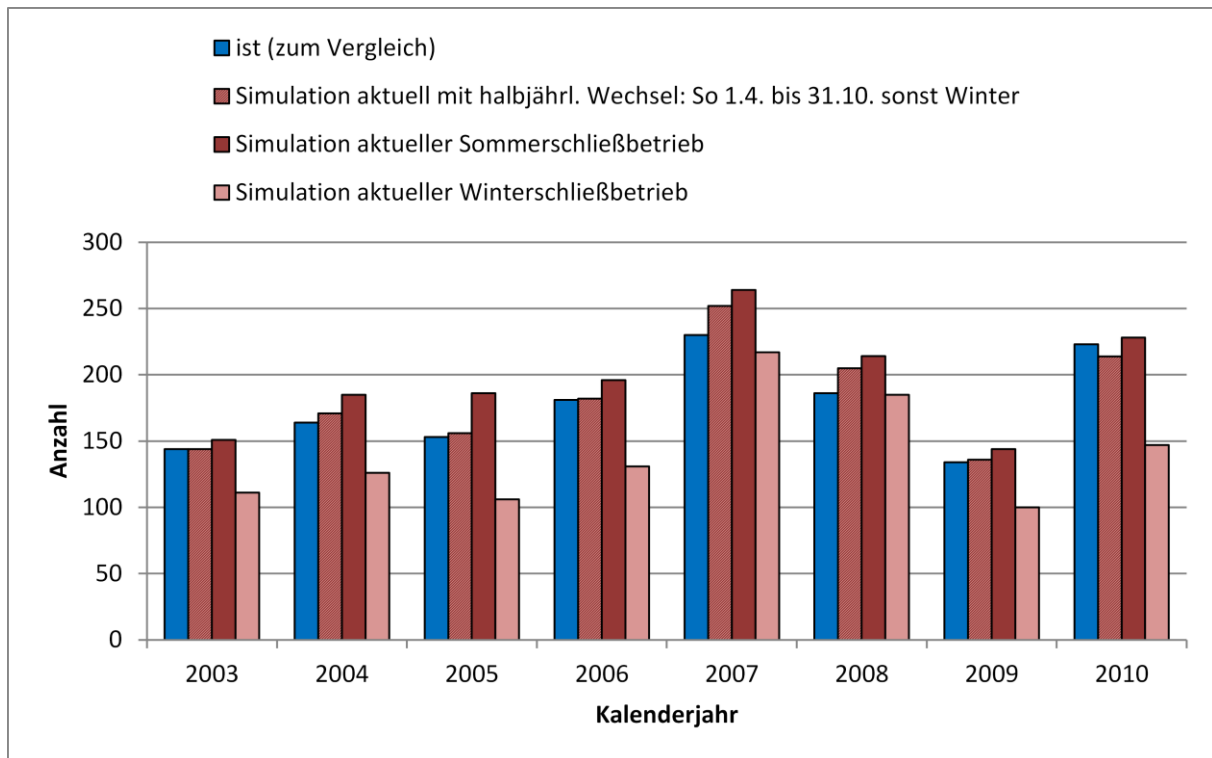


Abbildung 21: Aufgetretene und simulierte Schließhäufigkeiten des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010

Tabelle 15: Zusammenfassung der simulierten und aufgetretenen Schließhäufigkeiten des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010

	Mittelwert 2003-2010 [-]	Summe 2003- 2010 [-]	Max. Jährliche Abweichung	Min. Jährliche Abweichung
Ist	177	1415	-	-
Simuliert	183	1460	+22 im Jahr 2007	-9 im Jahr 2010

4.1.3 Schließhäufigkeit bei Verwendung der neuen Schließtabelle

In gleicher Weise wie zuvor werden für den gleichen Zeitraum die Schließungen unter Verwendung der vorgeschlagenen Varianten A und B sowie deren Kombination (vgl. Abschnitt 3.3.4) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt und Tabelle 16 zusammengefasst. Als Vergleichswert werden die simulierten Schließhäufigkeiten für die aktuell gültige Schließtabelle herangezogen. Die ganzjährige Steuerung nach Variante A führt mit 168 Schließungen pro Jahr und 1346 im gesamten Zeitraum zu weniger Schließungen als real aufgetreten sind. Die ganzjährige Steuerung nach Variante B hingegen führt mit 233 Schließungen pro Jahr und insgesamt 1866 zu deutlich mehr Schließungen. Die Kombination aus beiden (Variante A im Sommer und Variante B im Winter) ergibt im Mittel 196 Schließungen pro Jahr und 1566 Schließungen insgesamt. Verglichen mit den Schließungen, die unter Anwendung der bestehenden Schließtabelle berechnet wurden, bedeutet dies eine Zunahme von 13 Schließungen pro Jahr und 104 Schließungen für den gesamten Zeitraum 2003-2011.

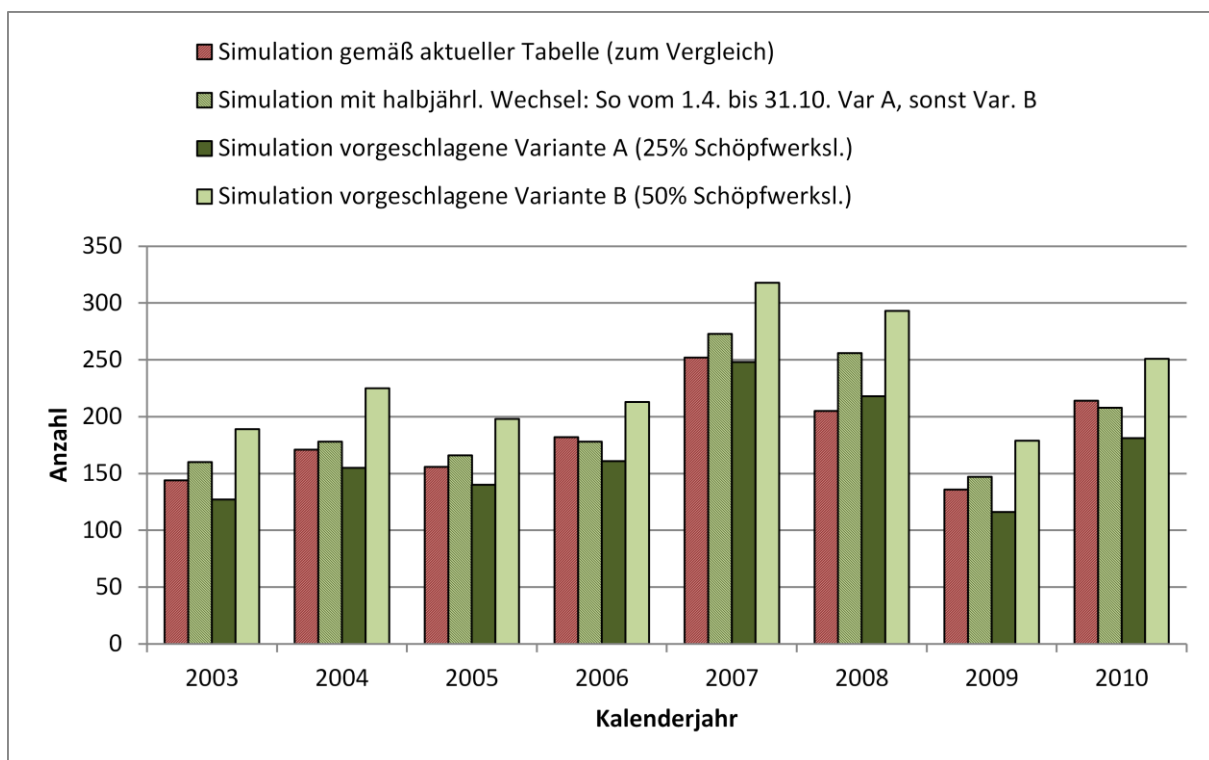


Abbildung 22: Fiktive Schließhäufigkeiten des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010 für die vorgeschlagenen Schließstabellen (Varianten A und B)

Tabelle 16: Berechnete Schließhäufigkeiten für den Zeitraum 2003 bis 2010

	Mittelwert 2003-2010 [-]	Abw. Mittelwert zu Ist [-]	Summe 2003-2010 [-]	Abw. Summe zu Ist [-]
Akt. Schließabelle	183	-	1460	-
Variante A	168	-9	1346	-69
Variante B	233	56	1866	451
Variante A im Sommer/ Variante B im Winter	82+139 = 196	19	1566	151

4.1.4 Schließdauer bei Verwendung der aktuell gültigen Schließabelle

Wie die Schließhäufigkeiten werden auch die Schließdauern des Sperrwerks im Simulationszeitraum von 2003 bis 2010 betrachtet. Die ermittelten Dauern sind in Abbildung 23 dargestellt und in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Übereinstimmung der Dauer zwischen den simulierten Schließungen für den saisonalen Wechsel mit den tatsächlich aufgetretenen Schließungen ist nicht so gut wie die Häufigkeiten. Im Mittel war das Sperrwerk in dem Zeitraum laut Protokoll für 464 h pro Jahr geschlossen. Dem gegenüber stehen 415 Stunden aus der Simulation. Für den gesamten Zeitraum werden insgesamt 3319 Stunden simuliert, wobei 3708 Stunden protokolliert wurden. Die größte Differenz von 126 h tritt im Jahr 2006 auf. Die Hauptursache für die Abweichungen ist in der Annahme einer mittleren Tidekurve bei der Ermittlung der Schließdauer zu finden. Die Form der mittleren Tidekurve kann erhebliche Unterschiede zur Form von Sturmflutkurven aufweisen. Weitere Erklärungen für die Differenzen sind einerseits in den in Kapitel 4.1.1 erläuterten Annahmen und andererseits in außerplanmäßigen Schließungen, z.B. zu Spül- und Wartungszwecken, zu finden.

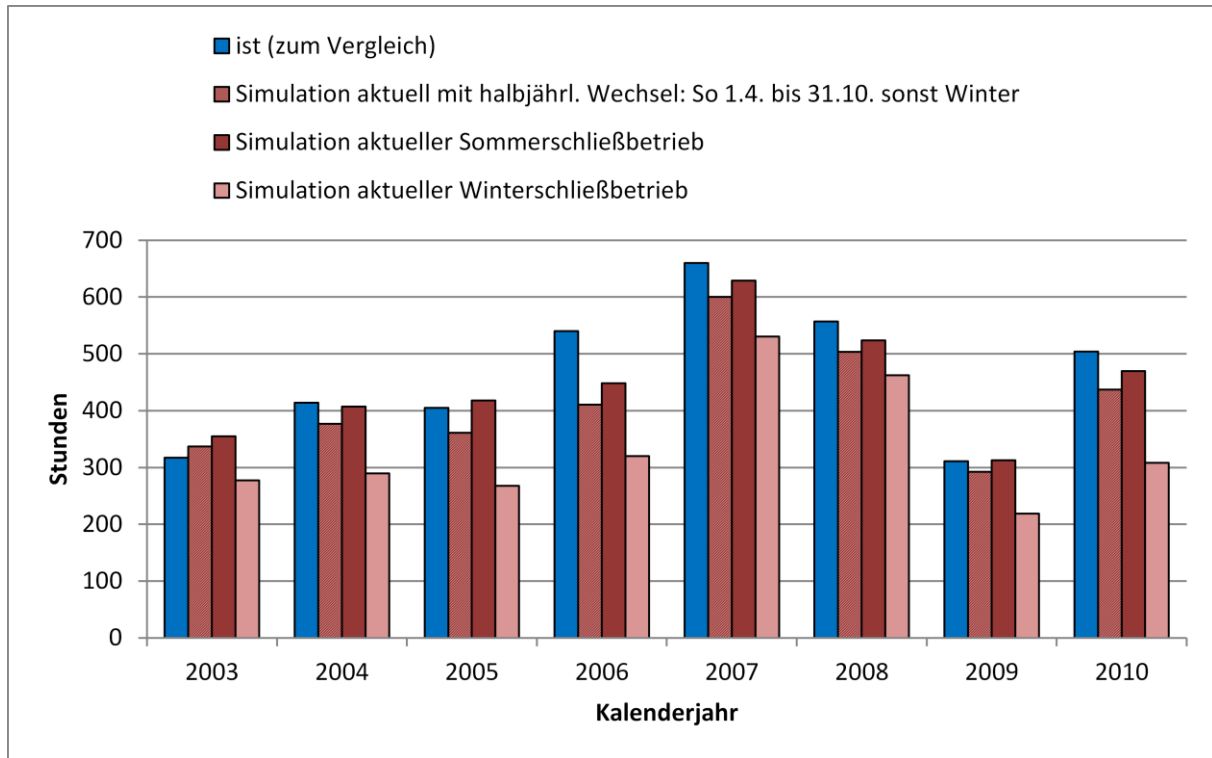


Abbildung 23: Aufgetretene und simulierte Schließdauern des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010

Tabelle 17: Zusammenfassung der simulierten und aufgetretenen Schließdauern des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010

	Mittelwert 2003-2010 [h]	Summe 2003-2010 [h]	Max. Jährliche Abweichung	Min. Jährliche Abweichung
Ist	464	3708	-	-
Simuliert	415	3319	+20 im Jahr 2003	-129 im Jahr 2006

4.1.5 Schließdauer bei Verwendung der neuen Schließabelle

Die Auswertung der Schließdauern für die Varianten A und B sowie deren Kombination (vgl. Abschnitt 3.3.4) sind in Abbildung 24 dargestellt und in Tabelle 18 zusammengefasst. Als Vergleichswert wird auf Grund der zuvor geschilderten Abweichungen der Schließdauer die simulierte statt der tatsächlichen Schließdauer herangezogen. Aus der Steuerung nach der vorgeschlagenen Variante A folgen eine Schließdauer von 394 h pro Jahr und 3149 h im gesamten Zeitraum. Die Steuerung nach Variante B ergibt 542 h pro Jahr und insgesamt 4334 h. Die Kombination aus beiden ergibt im Mittel 468 h pro Jahr und insgesamt 3720 h. Verglichen mit der simulierten Schließdauer auf Basis der aktuell gültigen Schließabelle führt die Kombination aus Variante A und B zu einer Verlängerung der mittleren Schließdauer von 53h pro Jahr und 401 h für den gesamten Zeitraum.

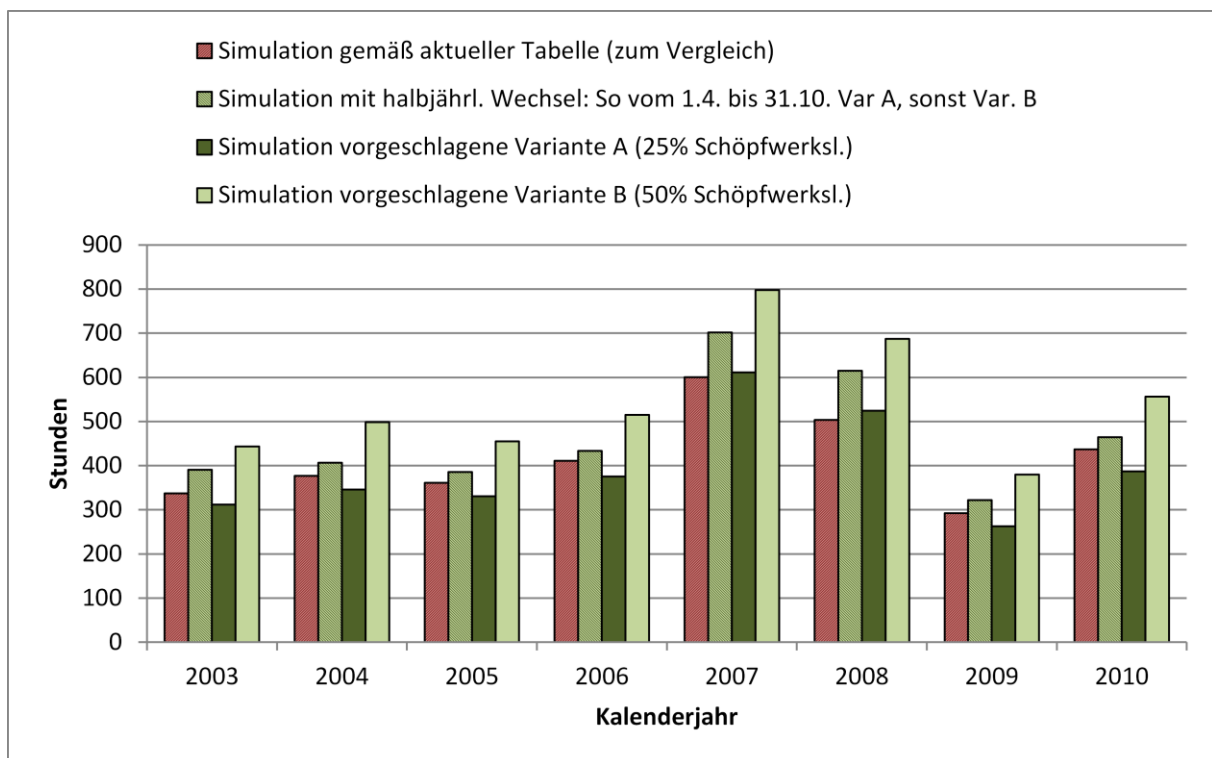


Abbildung 24: Fiktive Schließhäufigkeiten des Inneren Este-Sperrwerks für die Jahre 2003 bis 2010 für die vorgeschlagenen Schließabellen (Varianten A und B)

Tabelle 18: Berechnete Schließdauern für den Zeitraum 2003 bis 2010

	Mittelwert 2003-2010 [h]	Summe 2003-2010 [-]
Sim. Gem. akt. Tabelle	415	3319
Variante A	394	3149
Variante B	542	4334
Variante A im Sommer/ Variante B im Winter	175+293 = 468	3720

4.2 Testbetrieb im numerischen Modell

Eine weitere Überprüfung der vorgeschlagenen Schließ Tabellen erfolgt mit Hilfe des numerischen Strömungsmodells. Der Testbetrieb erfolgt anhand von 4 Szenarien, die so ausgelegt sind, dass während der Simulation verschiedene Schließfälle der beiden Schließ Tabellen abgedeckt sind.

4.2.1 Szenarien

Simuliert werden zwei beobachtete Zeiträume, die sich jeweils durch mehrere höher auflaufende Tiden auszeichnen. Zur Simulation des Winterschließbetriebs wird, wie schon in Kapitel 3.3.2, der Zeitraum vom 3.2.2011 bis zum 9.2.2011 zu Grunde gelegt. Zur Simulation des Sommerschließbetriebs wird der Zeitraum vom 07.08.2011 12:00 Uhr bis zum 12.08.2011 20:00 Uhr (siehe Abbildung 25) zu Grunde gelegt. Für beide Zeiträumen wird die Tideganglinie am Pegel Cranz als untere Randbedingung in Modell eingesteuert.

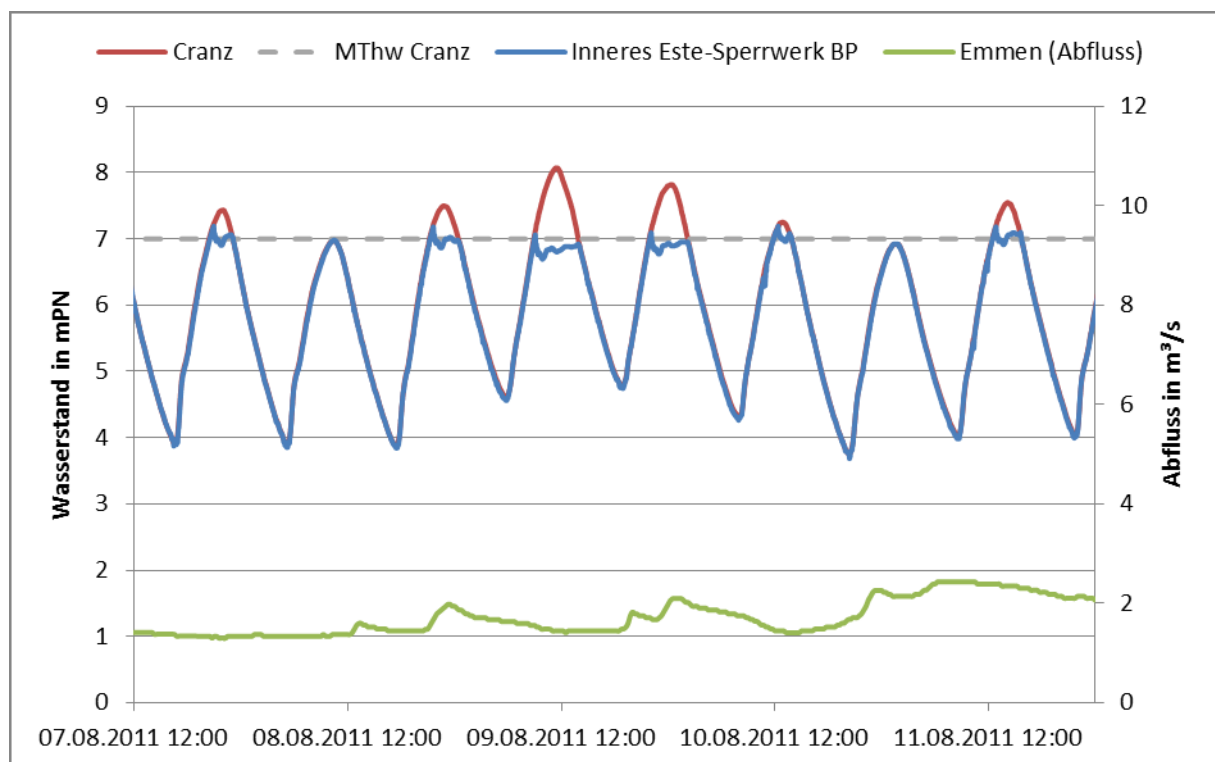


Abbildung 25: Ganglinien (Messwerte) im Simulationszeitraum vom 08.08.11 bis zum 12.08.11

Als obere Randbedingung werden konstante Abflüsse eingesteuert. Diese sind so gewählt, dass sie am oberen Rand der jeweiligen Spanne, die die Schließ Tabelle vorgibt, liegen. Anhand von Tabelle 12 (vorgeschlagene Variante A) auf Seite 43 soll dies verdeutlicht werden. In der zweiten Zeile ist das Wasserstandsintervall am Pegel Emmen definiert zu 125-150 cmPN. Folglich wird der Abfluss in dem Szenario entsprechend zu 150 cmPN

gewählt und stellt somit den ungünstigsten Fall dar. Die nachfolgende Tabelle 19 gibt eine Übersicht über die insgesamt generierten vier Szenarien.

Tabelle 19: Übersicht der Szenarien 5 bis 8

Szenario	Simulations-Zeitraum	Variante Schließ-tabelle	Zufluss Schöpfwerke	Zufluss Buxtehude	Korrespondierende Werte am Pegel Emmen
5	03.02.11 06:00 - 08.02.11 23:00	B	6,7 m ³ /s (50% der max. Leistung)	Q = 5,2m ³ /s	Q = 3,2m ³ /s W =150 cmPN Pü = 5%
6	03.02.11 06:00 - 08.02.11 23:00	B	6,7 m ³ /s (50% der max. Leistung)	Q = 8,6m ³ /s	Q = 5,2m ³ /s W =180 cmPN Pü = 1%
7	08.08.11 12:00 - 12.08.11 20:00	A	3,3 m ³ /s (25% der max. Leistung)	Q = 5,2m ³ /s	Q = 3,2m ³ /s W =150 cmPN Pü = 5%
8	08.08.11 12:00 - 12.08.11 20:00	A	3,3 m ³ /s (25% der max. Leistung)	Q = 8,6m ³ /s	Q = 5,2m ³ /s W =180 cmPN Pü = 1%

4.2.2 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse in Form von Längsschnitten dargestellt. Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen die Ergebnisse der 4 simulierten Szenarien, Abbildung 28 gibt eine Zusammenfassung aller 4 Szenarien. In allen Abbildungen entspricht die Abszisse der, durch das WSA festgelegten, Kilometrierung und beginnt im Buxtehuder Hafen mit km 0 und endet bei km 12,4 an der Mündung in die Elbe. Das Innere Este-Sperrwerk befindet sich etwa bei km 11,4. Auf der Ordinate ist der Wasserstand in mPN (bezogen auf den BP des Inneren Este-Sperrwerks) aufgetragen. Als Graphen dargestellt sind Minima, Maxima sowie der Mittelwert von allen gesperrten Tiden.

Der Verlauf des Maximums in Abbildung 28 zeigt, dass der Wasserstand im Hafen von Buxtehude 7,26 mPN beträgt und in Richtung Inneres Este-Sperrwerk auf 7,23 mPN abfällt. Die Überschreitung der tolerierbaren Höhe von 7,2 mPN am Inneren Este-Sperrwerk resultiert aus einer Tide im Szenario 8. Hierzu sei angemerkt, dass die entsprechende Tide um etwas mehr als ein Meter über dem MThw aufgelaufen ist. Korrekterweise würde dies eine Einordnung in die zweite Spalte (1,0 bis 1,5 m über MThw) der Schließabelle bedeuten. Für den Nachweis auf der sicheren Seite liegend, erfolgt jedoch die Einordnung im Rahmen des Testbetriebs in die erste Spalte der Schließabelle, deren Intervall von 0,2 bis 1,0 m über MThw definiert ist. Der Verlauf des Mittelwertes in Abbildung 28 zeigt, dass der mittlere Wasserstand aller gesperrten Tiden im Buxtehuder Hafen 7,18 mPN beträgt und in Richtung Inneres Este-Sperrwerk auf 7,1 mPN abfällt. Damit liegt der Wert deutlich unter dem tolerierbaren Wasserstand von 7,2 mPN am Inneren Este-Sperrwerk. In den Sommer-Szenarien 7 und 8 liegen die Mittelwerte leicht über denen der Winter-Szenarien was allerdings auf die gewählten Tide-Randbedingungen zurückzuführen ist und daher nicht als repräsentativ angesehen werden sollte.

Der Verlauf des Minimums in Abbildung 28 zeigt, dass der Wasserstand aller gesperrten Tiden im Buxtehuder Hafen 7,09 mPN beträgt und in Richtung Inneres Este-Sperrwerk auf 7,02 mPN abfällt. In den Sommer-Szenarien 7 und 8 liegen die Minima leicht über denen der Winter-Szenarien was allerdings auf die gewählten Tide-Randbedingungen zurückzuführen ist und daher wie zuvor erwähnt nicht als repräsentativ angesehen werden sollte.

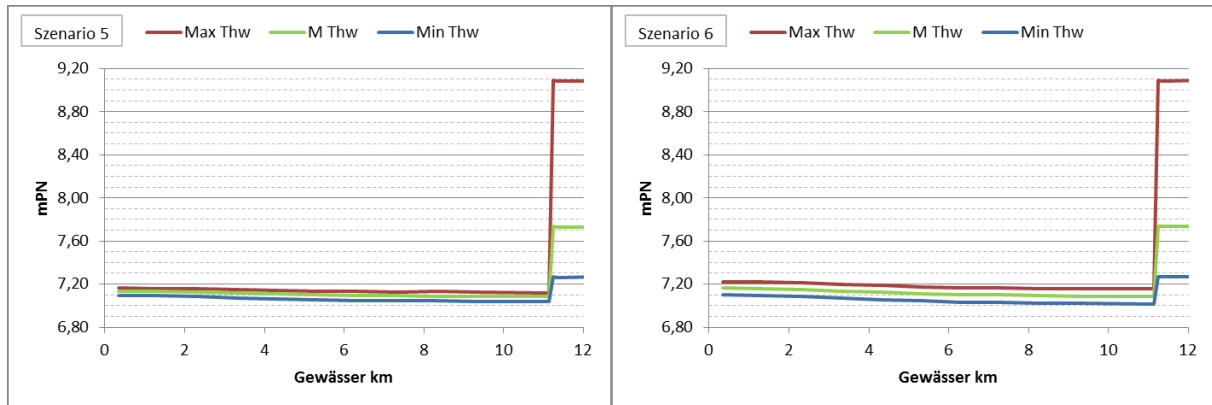


Abbildung 26: Ergebnisse der Simulation der Szenarien 5 und 6, Wasserstände im Längsschnitt, berücksichtigt wurden nur gesperrte Tiden (hier alle 9)

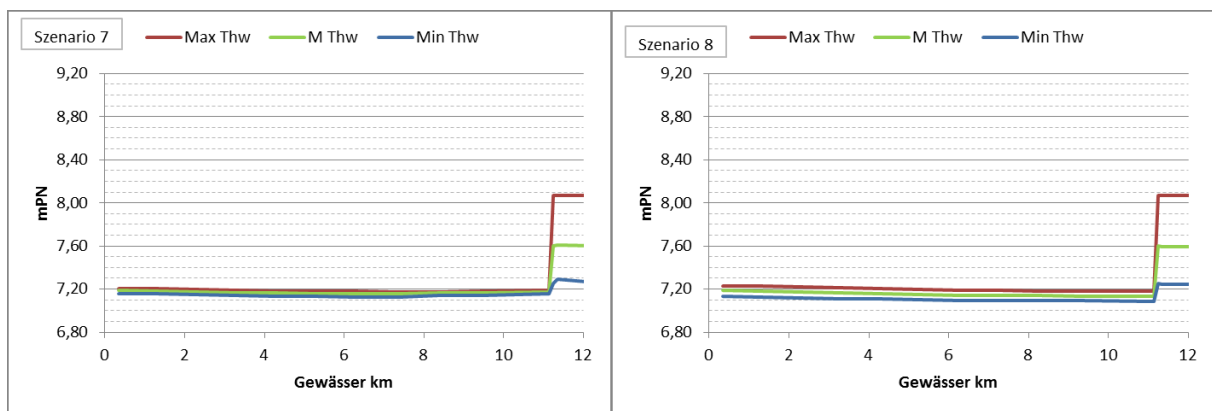


Abbildung 27: Ergebnisse der Simulation der Szenarien 7 und 8, Wasserstände im Längsschnitt, berücksichtigt wurden nur gesperrte Tiden (6 von 8)

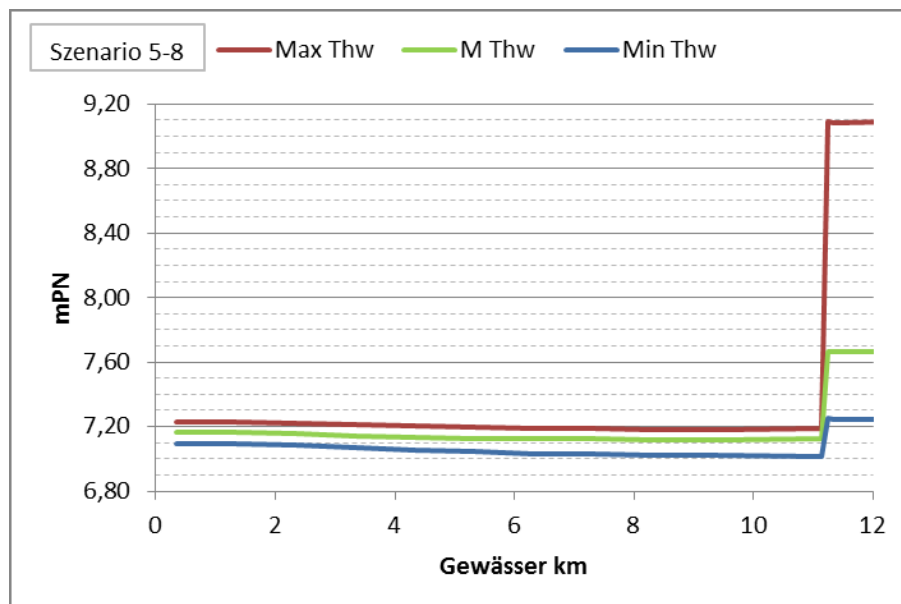


Abbildung 28: Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulation der Szenarien 5-8, Wasserstände im Längsschnitt, berücksichtigt wurden nur gesperrte Tiden

Die dargestellten Berechnungsergebnisse der Szenarien 5 bis 8 zeigen, dass der Wasserstand am Inneren Este-Sperrwerk den Grenzwert von 7,2 mPN im Mittel um 10 cm unterschreitet. Lediglich der Öffnungswasserstand einer Sperrtide lag wenige Zentimeter darüber. Hieraus lässt sich schließen, dass mit dem vereinfachten statischen Verfahren (siehe Abschnitt 3.2), mit dem die beiden neuen Schließ Tabellen ermittelt wurden, die betreffenden Schließwasserstände grundsätzlich korrekt ermittelt werden.

4.3 Zusammenfassung

Die Eignung des entwickelten Verfahrens zur Berechnung der Schließhäufigkeit aus aufgezeichneten Pegelzeitreihen wurde anhand der Simulation des gewählten Referenzzeitraumes 2003-2010 nachgewiesen. Die Berechnung der Schließdauern mit dem gleichen Verfahren zeigte etwas größere Abweichungen gegenüber der protokollierten Schließdauer, was vor allem auf die Annahme der Form der mittleren Tidekurve zurückzuführen ist. Das Verfahren wurde als ausreichend genau für die Abschätzung der Auswirkungen der vorgeschlagenen Schließ Tabellen eingeschätzt, da einerseits die Schließhäufigkeit, die gut wiedergegeben wird, für die Beurteilung von übergeordneter Bedeutung ist. Andererseits ist vor allem die Änderung der Schließhäufigkeit und -dauer gegenüber der Verwendung der bestehenden Schließ Tabelle von Interesse. In dieser Hinsicht ist das Modell auch bei der Schließdauer aussagekräftig, da in allen Fällen die Form der MTK vorgegeben wird. Die Auswirkungen der vorgeschlagenen Schließ Tabellen auf Schließhäufigkeit und Schließdauer wurden ebenfalls anhand der Simulation des Referenzzeitraumes bestimmt.

Variante A:

Die ganzjährige Steuerung nach Variante A führt zu weniger Schließungen (-15 pro Jahr) und einer kürzeren Schließdauer (-19h pro Jahr) als die Steuerung nach der aktuellen Schließ Tabelle.

Variante B:

Die ganzjährige Steuerung nach Variante B führt zu deutlich mehr Schließungen (+50 pro Jahr) und einer deutlich längeren Schließdauer (+127h pro Jahr) als die Steuerung nach der aktuellen Schließ Tabelle.

Kombination A+B:

Die Kombination aus Variante A im Sommer und Variante B im Winter führt zu mehr Schließungen (+13 pro Jahr) und einer längeren Schließdauer (+53h pro Jahr) als die Steuerung nach der aktuellen Schließstabelle.

Ein Testbetrieb erfolgte mit einem numerischen Model. Insgesamt wurden 4 Szenarien, je eine beobachtete Tideganglinie stellvertretend für den Winter- und ein Sommerzeitraum kombiniert mit 2 verschiedenen Oberwasser- und Schöpfwerkszuflüssen, simuliert. Dabei zeigte sich, dass bei einer Steuerung nach den beiden neuen Schließstabellen (Variante A im Sommer, Variante B im Winter) ein Öffnungswasserstand am Sperrwerk oberhalb der als tolerierbar angenommenen Grenze von 7,2 mPN nur in einem Fall überschritten wird. In diesem Fall kommt es zu der maximalen Kombination aus Binnenzufluss und Wasserstand über MThw für den betreffenden Schließfall in der Schließstabelle. Das vereinfachte, statische Verfahren, mit dem die Schließstabellen entwickelt wurden, berechnete für den gleichen Schließfall einen maximalen Öffnungswasserstand von 7,2 mPN. Bei Vernachlässigung der minimalen Abweichung bestätigte der Testbetrieb, der stichprobenartig einzelne Schließfälle abdeckt, die Güte des vereinfachten Verfahrens und damit auch die Güte der vorgeschlagenen Schließstabellen.

5 Abschließende Zusammenfassung

Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamts Hamburg wurde vom Institut für Wasserbau der TUHH eine Überprüfung der Schließordnung des Inneren Este-Sperrwerks durchgeführt.

Im Rahmen der Arbeiten wurde zunächst der Pegel Rockstedt als Oberwasser-Indikator durch den Pegel Emmen in der aktuellen Schließabelle ersetzt. Dabei erwies sich die der bestehenden Schließabelle zugrunde liegende Annahme, die von einem ähnlichen Abflussverhalten an beiden Pegeln ausgeht, als falsch. Ein Vergleich wesentlicher hydrologischer Einzugsgebietscharakteristika zeigte keine Indizien, die auf ein ähnliches Verhalten der Abflussbildung hindeuten. Diese Erkenntnis verfestigte sich bei der Überprüfung der angedachten Verknüpfungsvarianten zwischen den Pegeln. Beide Varianten sehen vor, aus Messdaten der vergangenen Jahre statistische Kenngrößen zu ermitteln, diese in Beziehung zueinander zu setzen und daraus einen funktionalen Zusammenhang zu ermitteln. Die Vergleiche der aus dem funktionalen Zusammenhang berechneten Werte mit Messwerten zeigten große Abweichungen. Trotzdem wurde eine Verknüpfungsvariante ausgewählt und auf dieser Grundlage eine vorläufige neue Schließabelle, in der der Pegel Emmen als Oberwasser-Indikator dient, erstellt. Sie diene als Grundlage für die weitere Bearbeitung und sollte zunächst der sinnvollen Umstellung auf den Pegel Emmen als Oberwasser-Indikator in einer neuen Schließabelle dienen.

Ein im Zuge der weiteren Bearbeitung neu entwickeltes und vereinfachtes Verfahren, welches den Öffnungswasserstand am Inneren Este-Sperrwerk in Abhängigkeit von Oberwasserzufluss und Schöpfwerkseintrag bestimmt, hob potentiell kritische Schließfälle hervor und zeigte zudem die Sensibilität des Öffnungswasserstandes gegenüber dem Schöpfwerkseintrag. Hierauf aufbauend erfolgte die genauere Analyse einiger real aufgetretener Schließfälle auf der Grundlage eines hydronumerischen 2D Modells der Este. Die gesammelten Erkenntnisse und das entwickelte Verfahren wurden zur Optimierung der vorläufigen Schließabelle genutzt. Hieraus gingen 6 Vorschläge für neue Schließabellen hervor, von denen bei einem Aussprachetermin mit dem WSA Hamburg und den im Einzugsgebiet der Este zuständigen Institutionen der Wasserwirtschaft zwei (Variante A und Variante B) als potentiell geeignet eingestuft wurden. Ergänzend zu diesen können von Landesseite weitere wasserwirtschaftlichen Maßnahmen (z.B. Optimierung des Schöpfwerksbetriebes) veranlasst werden. Einigkeit bestand bei der Wahl der Varianten zwischen WSA Hamburg und wasserwirtschaftlichen Institutionen darin, dass Anzahl der

Schließungen und Schließdauern mit Einführung einer neuen Schließordnung höchstens geringfügig ansteigen sollten.

Entsprechend wurde als weitere Entscheidungsgrundlage zur Wahl einer geeigneten Schließabelle eine Analyse der zu erwartenden Auswirkungen der modifizierten Schließabellen auf den Schließbetrieb durchgeführt. Hierzu wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die Schließhäufigkeit und Schließdauer des Inneren Este-Sperrwerks unter Anwendung verschiedener Schließabellen bestimmt werden kann. Als Referenzzeitraum wurden die Jahre 2003-2010 herangezogen und die Auswirkungen der beiden ausgewählten Schließabellen sowie die Kombination der beiden untersucht. Es zeigte sich, dass von der Variante A im Mittel weniger Schließungen als bisher erwartet werden können, während von Variante B, die mehr Stauraum für den Schöpfwerkszufluss vorsieht, deutlich mehr Schließungen zu erwarten sind.

Zu empfehlen ist eine Kombination aus beiden Schließabellen, die in Tabelle 20 nochmals abschließend dargestellt ist. Diese ist insofern sinnvoll, da die Erfahrung zeigt, dass die Schöpfwerke im niederschlagsreicheren Winterhalbjahr deutlich häufiger in Betrieb sind als im Sommerhalbjahr. Dementsprechend bietet es sich an im Winter die vorgeschlagene Variante B anzusetzen und im Sommer die Variante A. Damit würde neben der Anpassung an die wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine begrenzte Zunahme der Schließungen von etwa 13 pro Jahr erreicht. Abschließend erfolgte hierzu ein Testbetrieb mit dem numerischen Model, bei dem stichprobenartig einzelne Schließfälle untersucht wurden. Es zeigte sich, dass die vorgeschlagenen Schließabellen wie erwartet dazu führen, dass ein noch tolerierbarer Öffnungswasserstand am Inneren Este-Sperrwerk von 7,2 mPN nur im Extremfall überschritten wird.

Tabelle 20: Empfohlene Schließhöhen des Inneren Este-Sperrwerks in mPN

Bei einem Wasserstand am Pegel Emmen	Bei Sturmflutwarnungen bzw. zu erwartenden Außenwasserständen über MThw						
	0,2 bis 1,0 m		1,0 bis 1,5 m		1,5 bis 2,0 m		> 2,0 m
cmPN	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	
<125	7,20	7,30	7,10	7,20	7,00	7,10	Tnw
125 – 150	7,10	7,20	7,00	7,10	6,70	7,00	Tnw
150 – 180	7,00	7,10	6,70	7,00	6,30	6,80	Tnw
180 – 220	5,00	6,50	Tnw	5,30	Tnw	Tnw	Tnw
> 220	Tnw	Tnw	Tnw	Tnw	Tnw	Tnw	Tnw

Anmerkungen

1. Sommer vom 01.04. bis 31.10., sonst Winter
2. Falls angegebene Schließhöhe unterhalb des vorhergehenden Tnw, Schließung bei Tnw

Hamburg, 26.08.2013

(Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle)

(Dipl.-Ing. Edgar Nehlsen)

Schrifttum

- [1] Deutsches gewässerkundliches Jahrbuch. Hamburg 2007.
- [2] Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung 2009.
- [3] *Boess, J.*: Erläuterungsheft zur digitalen nutzungsdifferenzierten bodenkundlichen Übersichtskarte 1:50.000 (BÜK50n) von Niedersachsen. Hannover, Stuttgart: NLFb; Schweizerbart 2004.
- [4] *Dyck, S., Peschke, G.*: Grundlagen der Hydrologie. Berlin: Verlag für Bauwesen 1995.

Anhang

Anhang 2-1: Landnutzung in den EZGs Rockstedt und Emmen, abgeleitet aus der ALK

Anhang 2-2: kf-Werte in den EZGs Rockstedt und Emmen, ermittelt aus der BÜK50

Anhang 2-3: Geländehöhen in den EZGs Rockstedt und Emmen

Anhang 2-4: Fließweglängen in den EZGs Rockstedt und Emmen

Anhang 2-5: Gefälle in den EZGs Rockstedt und Emmen

Anhang 2-6: Entwässerungszeiten in den EZGs Rockstedt und Emmen

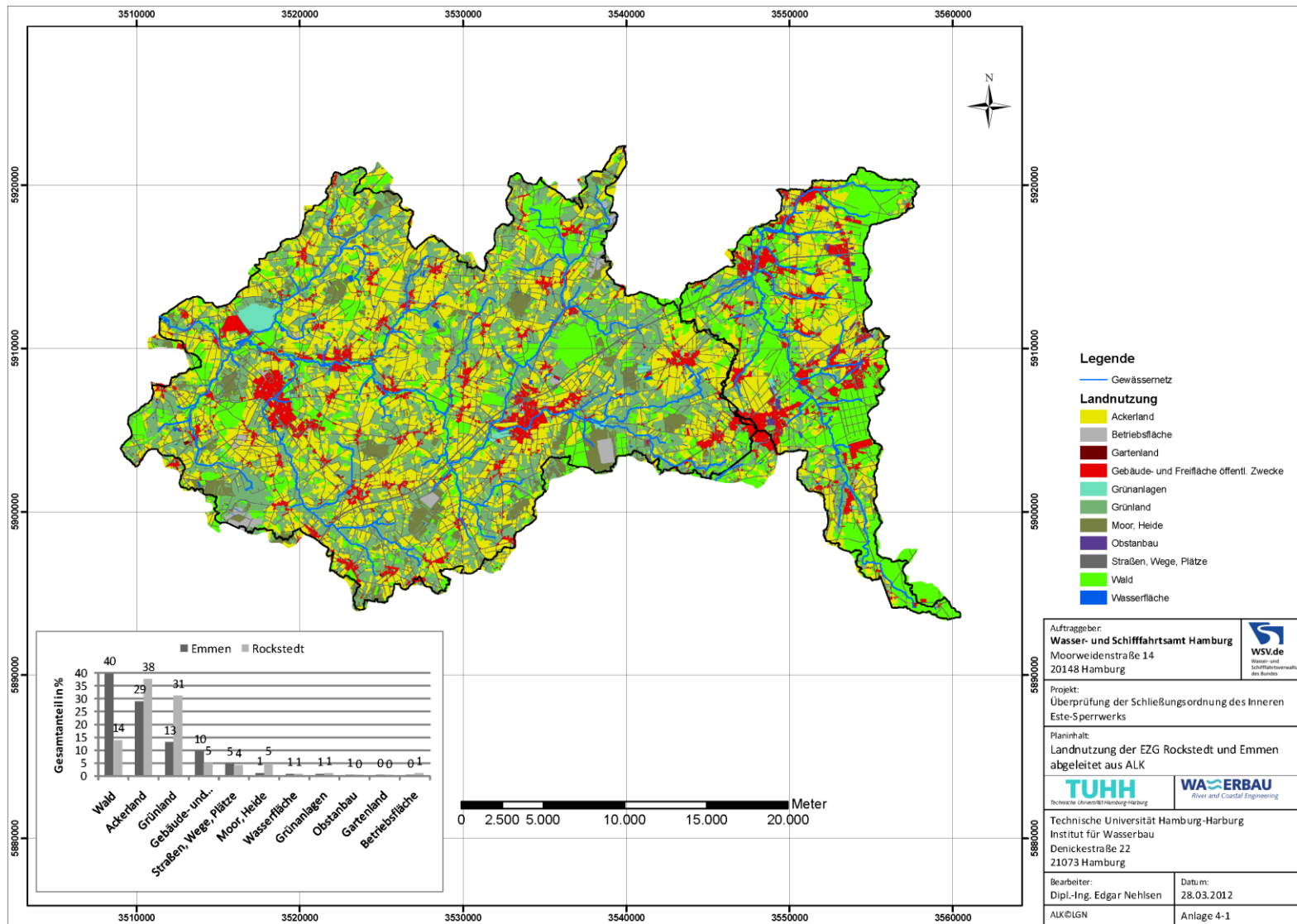
Anhang 3-1: Zusammenhang zwischen Wasserstand und Abfluss an den Pegeln Emmen und Rockstedt

Anhang 3-2: Geländehöhe im Unterlauf der Este

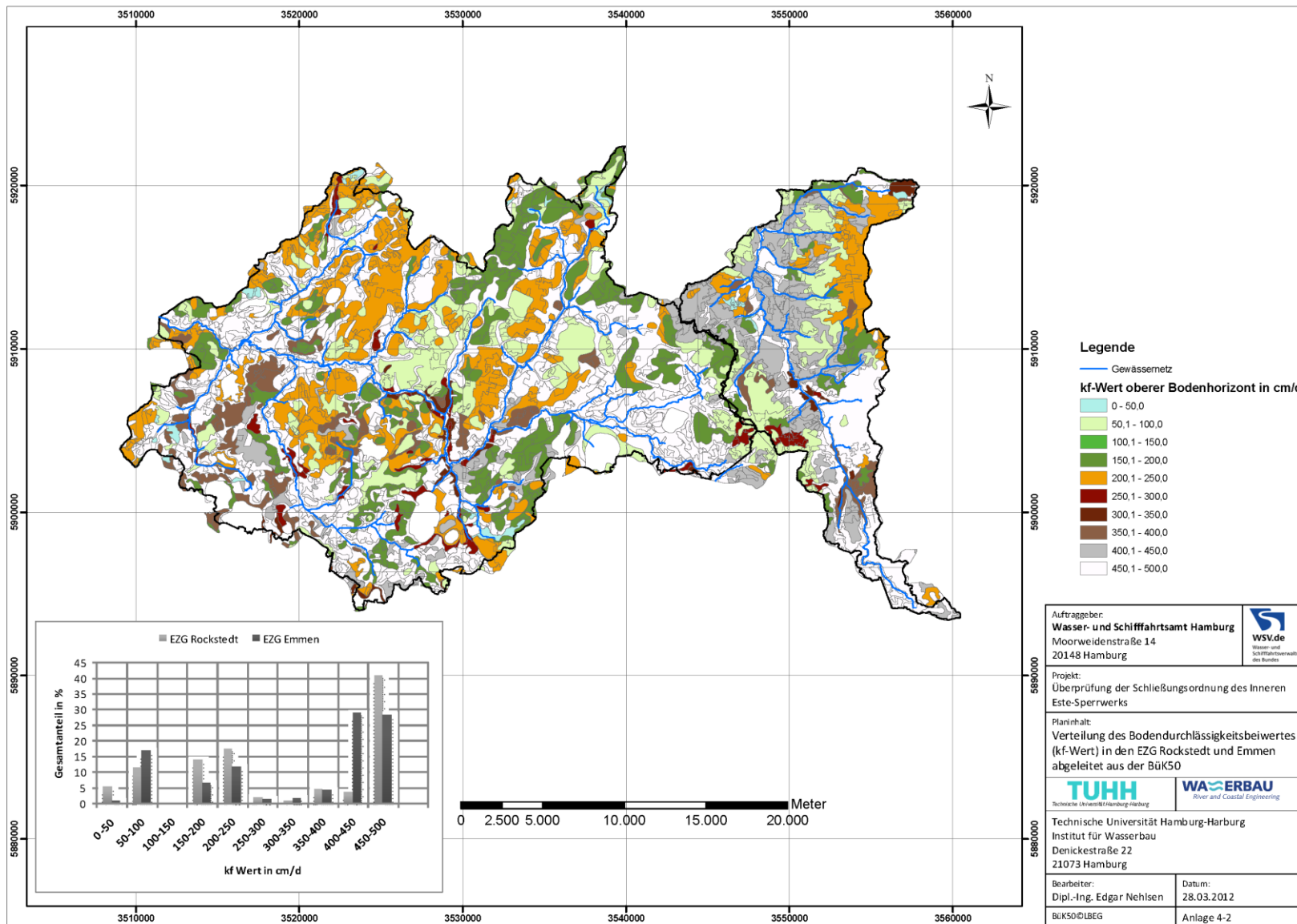
Anhang 3-3: Berechnungsergebnisse der Szenarien 3 und 4

Anhang 3-4: Vorgeschlagene Schließstabellen D bis E

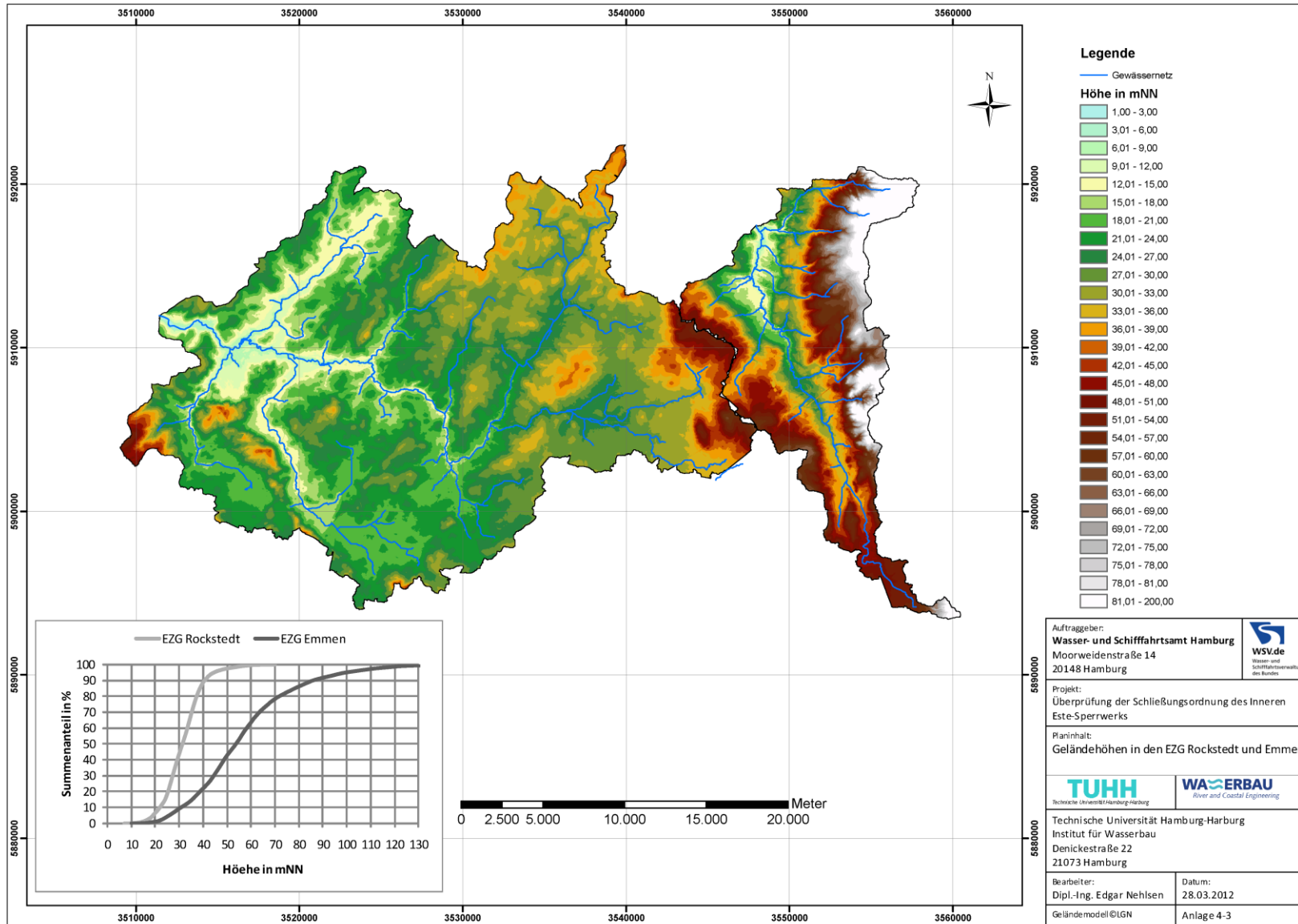
Anhang 2-1: Landnutzung in den EZGs Rockstedt und Emmen, abgeleitet aus der ALK



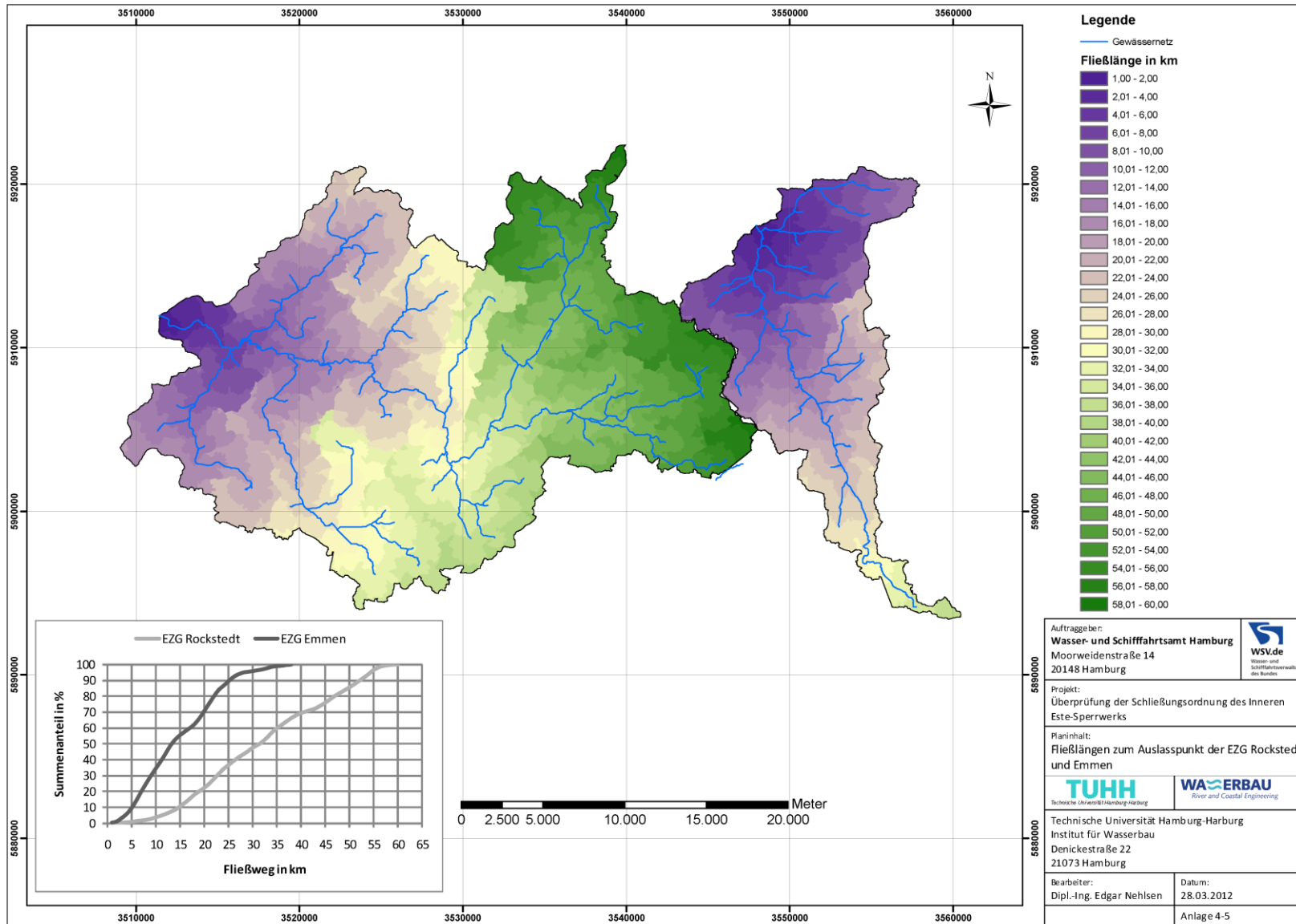
Anhang 2-2: kf-Werte in den EZGs Rockstedt und Emmen, ermittelt aus der BÜK50



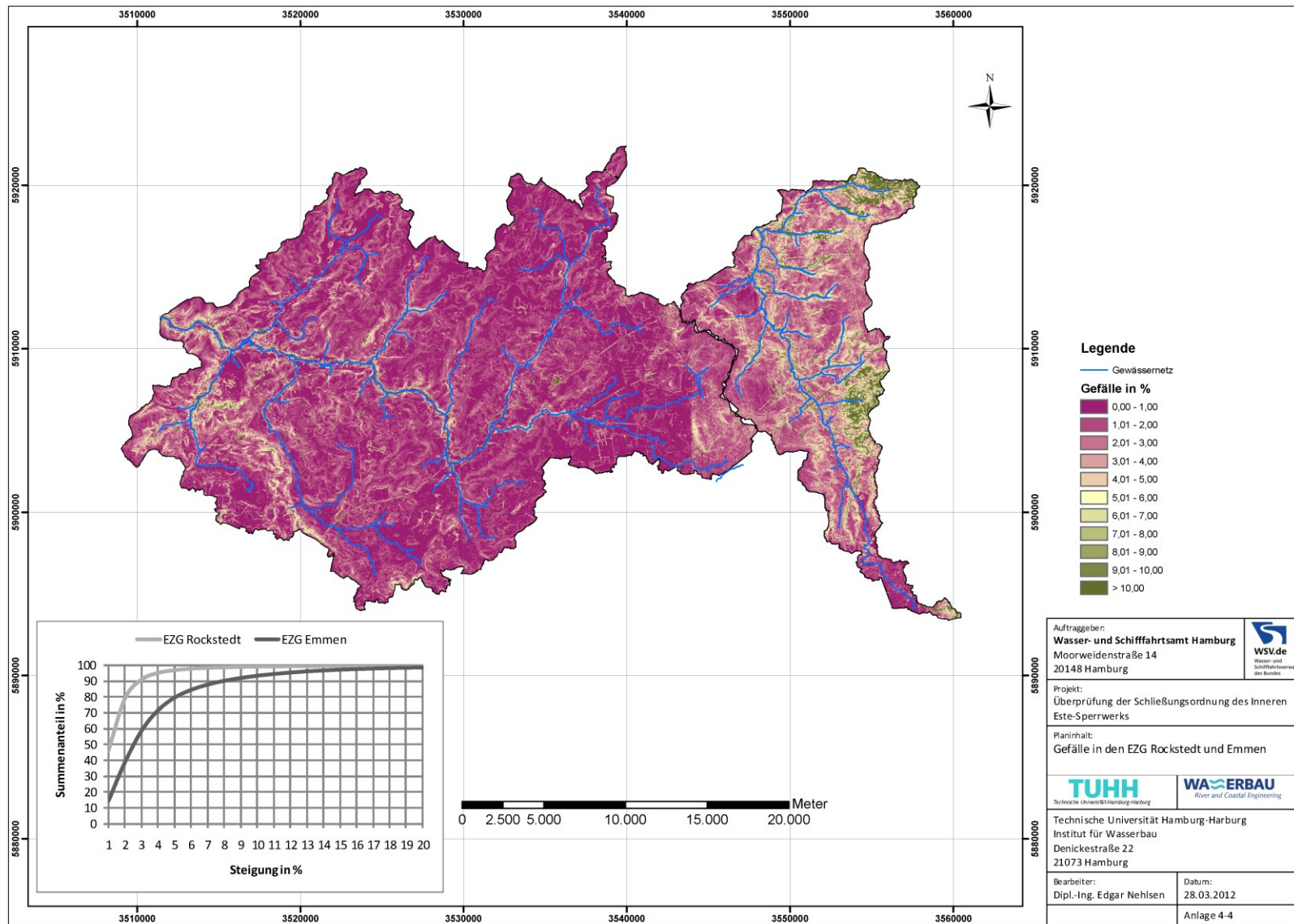
Anhang 2-3: Geländehöhen in den EZGs Rockstedt und Emmen



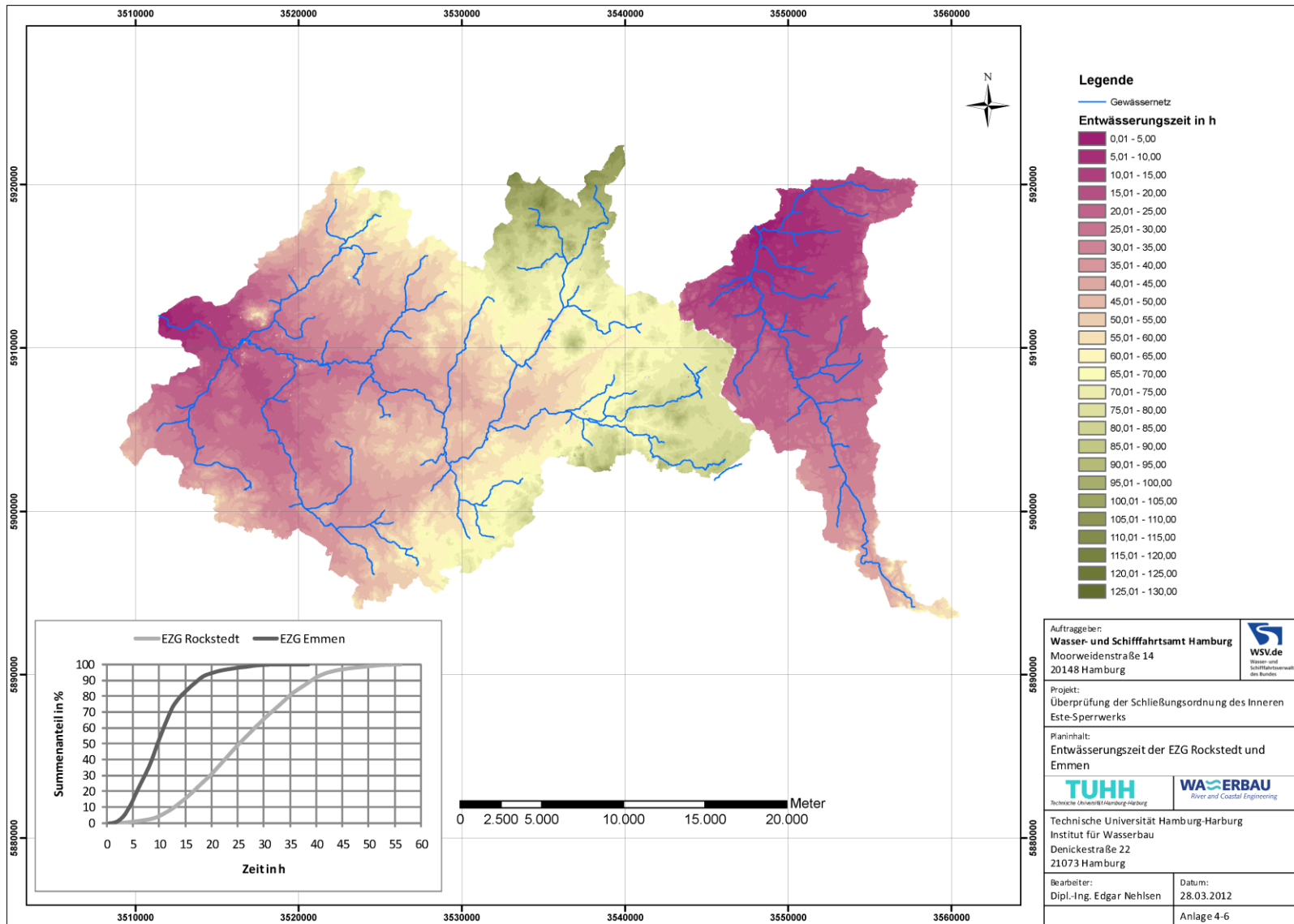
Anhang 2-4: Fließweglängen in den EZGs Rockstedt und Emmen



Anhang 2-5: Gefälle in den EZGs Rockstedt und Emmen



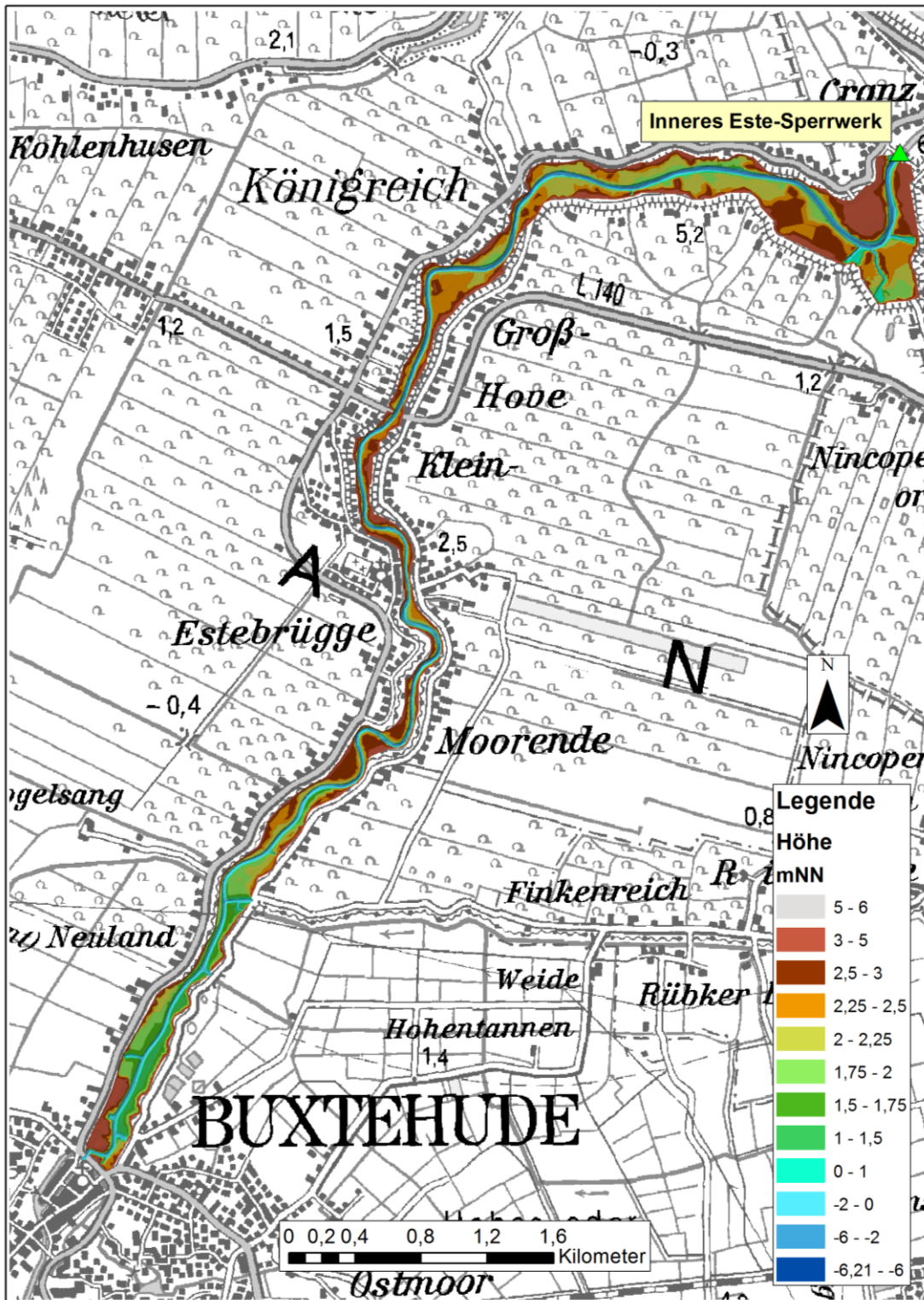
Anhang 2-6: Entwässerungszeiten in den EZGs Rockstedt und Emmen



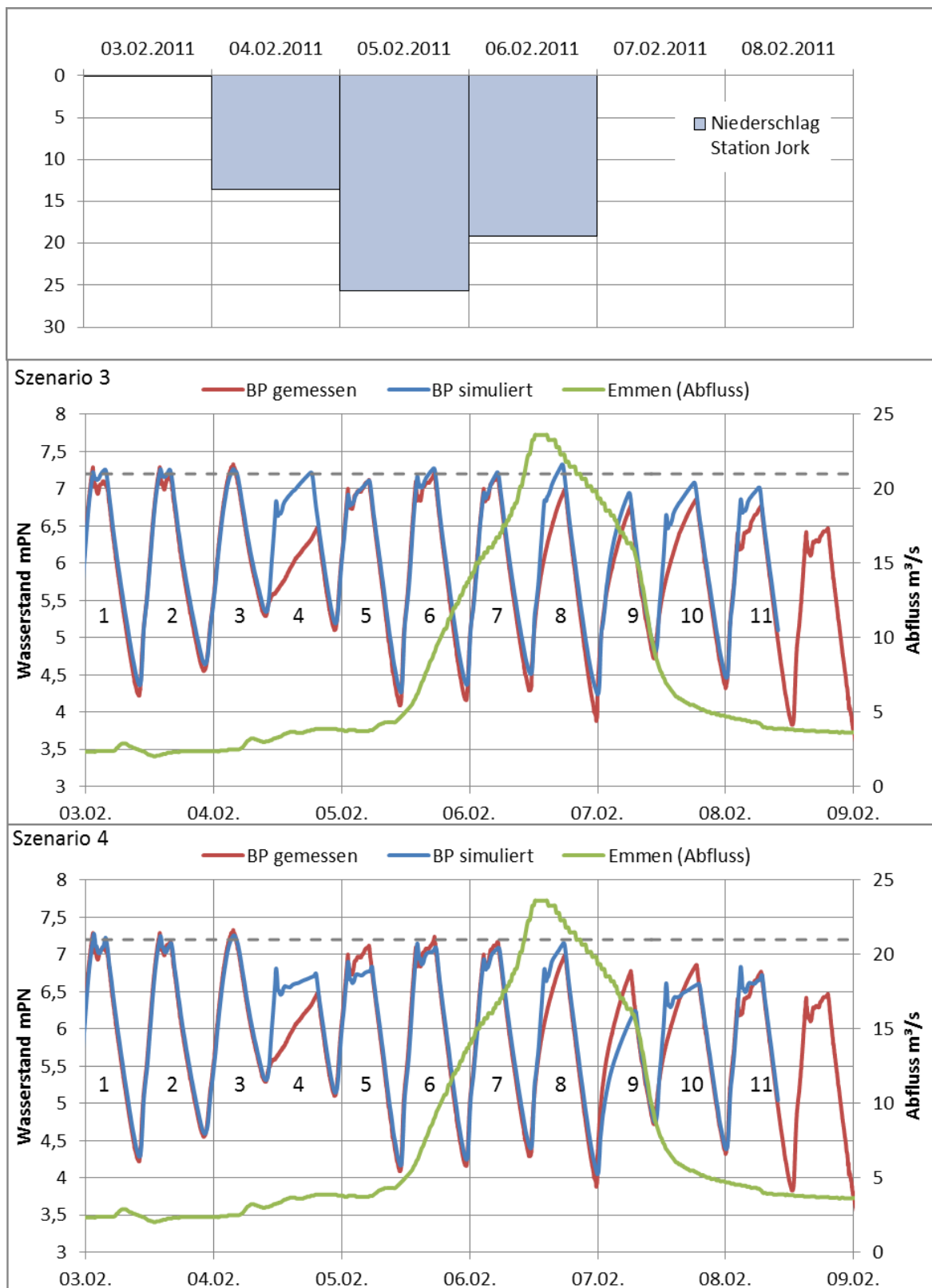
Anhang 3-1: Zusammenhang zwischen Wasserstand und Abfluss an den Pegeln Emmen und Rockstedt

W Rockstedt [cmPN]	Q Rockstedt [m ³ /s]	W Emmen [cmPN]	Q Emmen [m ³ /s]	Q Buxtehude inkl. Schöpfwerk [m ³ /s]
700	4,2	121	1,7	3,4
725	5,7	125	1,9	3,8
750	7,4	130	2,1	4,2
775	9,8	133	2,3	4,7
800	13,7	141	2,7	5,4
825	18,6	152	3,3	6,8
850	25,6	171	4,6	9,3
875	32,1	193	6,7	13,6
900	43,7	212	9,8	20,1

Anhang 3-2: Geländehöhe im Unterlauf der Este



Anhang 3-3: Berechnungsergebnisse der Szenarien 3 und 4



Gemessener Niederschlag an der Station Jork (oben), gemessene und simulierte Wasserstände am Inneren Este-Sperrwerk ohne Schöpfwerkseintrag: Szenario 3 (mitte) und mit vollem Schöpfwerkseintrag: Szenario 4 (unten), gestrichelt dargestellt ist der Wert 7,20 mPN.

Anhang 3-4: Vorgeschlagene Schließ Tabellen D bis E

Schließ tabelle Variante D : Tolerierbarer Wasserstand BP: 7,3 mPN, 25% SW							
W Rockstedt [cmPN]	W Emmen** [cmPN]	MThw + 50bis100 cm		MThw + 100bis150 cm		MThw + 150bis200 cm	
		Schließ was- serstand	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)		max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)		max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)
< 720	<125	7,40	7,29	7,30	7,24	7,30	7,28
720-822	125-150	7,30	7,29	7,20	7,24	7,20	7,28
822-861	150-180	7,20	7,24	7,10	7,25	7,00	7,27
861-910	180-220	6,90	7,29	6,20	7,29	Tnw	7,27
910+	>220	Tnw	>7,30	Tnw	>7,30	Tnw	>7,30

**) Ermittelt aus Übertragung anhand der Dauerliniengegenüberstellung (Pü)

Schließ tabelle Variante E: Tolerierbarer Wasserstand BP: 7,3 mPN, 50% SW							
W Rockstedt [cmPN]	W Emmen** [cmPN]	MThw + 20bis100 cm		MThw + 100bis150 cm		MThw + 150bis200 cm	
		Schließ was- serstand	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)		max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)		max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)
< 720	<125	7,30	7,26	7,20	7,25	7,10	7,25
720-822	125-150	7,30	7,29	7,10	7,25	7,00	7,27
822-861	150-180	7,20	7,29	7,00	7,28	6,70	7,28
861-910	180-220	6,60	7,29	Tnw	>7,30	Tnw	>7,30
910+	>220	Tnw	>7,30	Tnw	>7,30	Tnw	>7,30

**) Ermittelt aus Übertragung anhand der Dauerliniengegenüberstellung (Pü)

Schließ tabelle Variante F: Tolerierbarer Wasserstand BP: 7,3 mPN, 100% SW							
W Rockstedt [cmPN]	W Emmen** [cmPN]	MThw bis+100 cm		MThw + 100bis150 cm		MThw + 150bis200 cm	
		Schließ was- serstand	max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)		max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)		max. Öffnungs- wasserstand (geschätzt)
< 720	<125	7,20	7,30	7,00	7,31	6,60	7,29
720-822	125-150	7,10	7,30	6,80	7,31	6,30	7,31
822-861	150-180	6,90	7,29	6,30	7,31	Tnw	7,31
861-910	180-220	Tnw	7,29	Tnw	>7,30	Tnw	>7,30
910+	>220	Tnw	7,29	Tnw	>7,30	Tnw	>7,30

**) Ermittelt aus Übertragung anhand der Dauerliniengegenüberstellung (Pü)