

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Flöser, Götz**

## **Neues Verfahren zur Berechnung der Sielabflüsse in Ostfriesland aus dem Binnenpegel der Sielbecken**

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101498>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Flöser, Götz (2003): Neues Verfahren zur Berechnung der Sielabflüsse in Ostfriesland aus dem Binnenpegel der Sielbecken. In: Die Küste 67. Heide, Holstein: Boyens. S. 129-140.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Neues Verfahren zur Berechnung der Sielabflüsse in Ostfriesland aus dem Binnenpegel der Sielbecken

Von GÖTZ FLÖSER

## Zusammenfassung

Für die Berechnung der Abflussmengen eines ostfriesischen Sielbeckens wurde ein neues Verfahren entwickelt, das Gebrauch von der automatischen Pegelaufzeichnung macht. Dabei wird eine einfache Modellvorstellung verwendet: der Zufluss in das Sielbecken verhält sich wie ein weiteres Becken, wobei der Austausch zwischen diesen Becken proportional zur Pegeldifferenz ist. Der Vergleich dieses Modells mit den Pegeldaten erlaubt es dann, aus den Steigungen der Kurven und der Kenntnis der Oberfläche des Sielbeckens den Abfluss zu berechnen. Das Ergebnis ist übertragbar auf ähnliche Siele, bei denen ein Sielbecken vorhanden ist.

## Summary

*A new method has been developed for the calculation of the water runoff from the East Frisian sluice ponds making use of the automated recording of the sluice pond levels. A simple model is used: the supply to the pond basin is treated as a second pond, where the water exchange between the two ponds is proportional to the level difference. From the comparison of the model results with the recorded levels, the runoff can be calculated from the slope of the curves and the known surface area of the sluice pond. The result is can be transferred to similar sluices where a pond exists.*

## Inhalt

1. Einführung .....	129
2. Pegeldiagramme .....	131
3. Modell .....	134
4. Ergebnisse .....	138
5. Diskussion .....	139
6. Danksagung .....	140
7. Schriftenverzeichnis .....	140

## 1. Einführung

Der Wasser- und Stoffhaushalt des niedersächsischen Wattenmeeres wird neben den Einträgen aus der Atmosphäre und den biologischen Umsetzungen auch durch die Einleitungen der Siele beeinflusst. Um die Nährstoffeinträge aus landwirtschaftlichen Nutzflächen und kommunalen Kläranlagen über die Siele quantifizieren zu können, ist die genaue Kenntnis der Wasserabflussmengen während der Sielöffnungszeiten notwendig.

Das Wasser in den Sielbecken enthält aufgrund seiner Herkunft teilweise hohe Nährstoffkonzentrationen, die den Nährstoffhaushalt des Wattenmeers negativ beeinflussen können (Abb. 1 u. 2).

Die Fläche der Wattenmeerbucht zwischen Langeoog und Baltrum ist etwa 90 km<sup>2</sup> groß, das Einzugsgebiet des Accumersiels 140 km<sup>2</sup> und das von Bensorsiel 75 km<sup>2</sup> (NLWK, 2000).

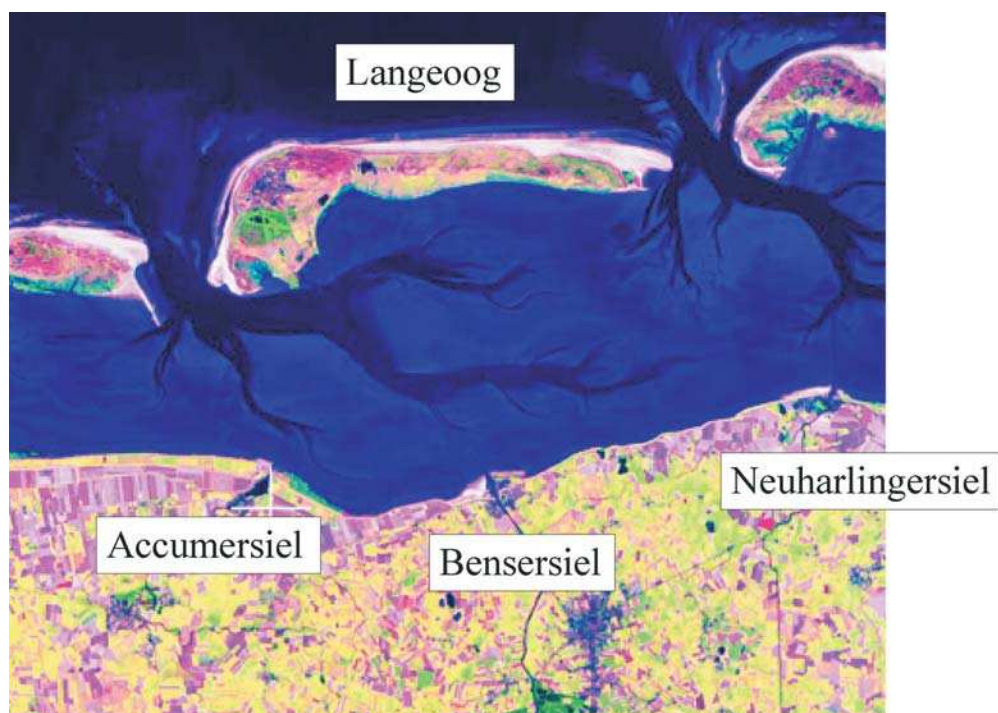


Abb. 1: Siele in Ostfriesland



Abb. 2: Sielbecken Accumersiel. Mit roten Pfeilen markiert sind die wichtigsten Zuflüsse zum Sielbecken

Selbst wenn also der (als homogen über dem betrachteten Gebiet angenommene) Niederschlag über dem Festland zur Hälfte verdunstet, sind die Einträge aus den Sielen von der Menge her vergleichbar mit der Regenmenge, die direkt über dem Wasser niedergeht.

Die Abflussmenge während einer Öffnung des Sieltors (Sielzug) ist von Ämtern vereinzelt gemessen worden (NLWK, 2000). Dabei misst man die mittlere Abflussgeschwindigkeit mit ADCP und die Fläche, durch die das Wasser abfließt. Daraus ergibt sich ein Volumenstrom (für Accumersiel:  $10,78 \text{ m}^3/\text{s}$ ; NLWK, 2003), der dann noch mit der Dauer des Sielzuges multipliziert werden muss. Zusätzlich muss noch der Wert des Abflusses bei Pumpenbetrieb bestimmt werden (d.h. dann, wenn der natürliche Abfluss bei Niedrigwasser nicht ausreicht, etwa bei Sturmflut), der sich einfach aus der spezifizierten Förderrate der Pumpen, multipliziert mit der Pumpdauer, ergibt. Abflussmessungen dieser Art sind wegen der Geräteinstallation aufwendig und werden deshalb nicht automatisiert über längere Zeit betrieben. Außerdem hängt der austretende Volumenstrom von der Pegeldifferenz zwischen dem Binnen- und dem Außenpegel ab und kann deshalb unterschiedlich sein.

Es gibt weitere experimentelle und rechnerische Verfahren zur Bestimmung von Sielabflüssen (US DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1997; NEGM, 1998; MYNETT, 1999), die jedoch alle eine Kenntnis der geometrischen Bestimmungsgrößen des Sielbauwerks voraussetzen.

Ein weiteres Verfahren ist die Berechnung des Abflusses aus der Pegeldifferenz vor und nach der Sielöffnung, multipliziert mit der Oberfläche des Sielbeckens. Dabei geht man davon aus, dass das Sielbecken keine weiteren Zu- oder Abflüsse hat als eben den Ablauf ins Wattenmeer.

Dabei ergibt sich eine Ungenauigkeit: Während das Sieltor geöffnet ist und der Pegel sinkt, steigt der Zustrom aus den Zuflüssen stark an. Deshalb wird mit diesem Verfahren ein zu kleiner Wert für die Abflussmenge bestimmt. Im Extremfall (nach starken Regenfällen) sinkt der Pegel nicht, obwohl das Sieltor geöffnet ist, d.h. dieses Verfahren ergäbe einen Abflusswert von 0.

Ein besserer Wert für die Menge des abgelaufenen Wassers während einer Sielöffnung lässt sich aus einer Analyse der aufgezeichneten Sielpegel bestimmen. Dieses Verfahren, das im Folgenden beschrieben wird, hat den Vorteil, dass es ganz ohne Beobachtungen vor Ort auskommt. Das Verfahren wird beschrieben am Beispiel von Accumersiel, lässt sich aber ohne weiteres auf ähnlich gebaute Siele übertragen.

## 2. Pegeldiagramme

Die Pegel innerhalb und außerhalb des Accumer Siels an der ostfriesischen Küste sind seit Anfang des Jahres 2002 über Internet abzufragen und werden automatisch in Sechs-Minuten-Intervallen aufgezeichnet. In Abb. 3 werden Binnen- und Außenpegel dargestellt. Der Außenpegel zeigt dabei die Tidekurve; in der Abbildung ist der Übergang von Spring- zu Nipptide (4.8.02) und zurück deutlich sichtbar.

Außerdem ist zu sehen, dass der Binnenpegel des Sielbeckens – je nach den Bedürfnissen der Bewohner des Binnenlandes – in einem Rahmen zwischen ca. 400 und 450 cm festgehalten wird. Das Sieltor wird dazu – je nach Binnenpegel – kurz vor Niedrigwasser geöffnet bzw. öffnet sich automatisch. Im Normalfall wird das Siel nur geöffnet, wenn der Binnen- über dem Außenpegel liegt, weil dann die Differenz im Wasserpegel ausreicht, um das Sielwasser abfließen zu lassen. Wenn der Binnenpegel gesenkt werden muss, obwohl der Außenpegel über dem Binnenpegel liegt (etwa bei Sturmfluten oder nach besonders starken Regenfällen), werden Pumpen eingesetzt.



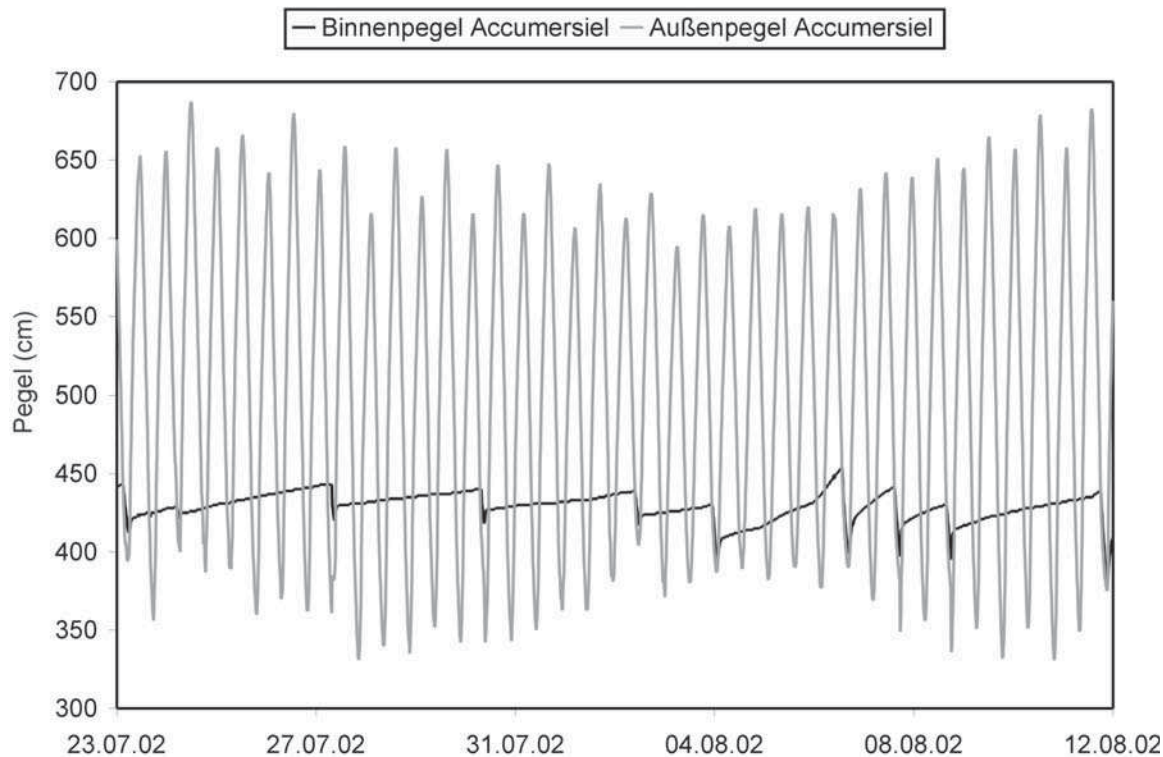


Abb. 3: Außen- und Binnenpegel Accumersiel

Die Pegelkurve hat bei einem Sielzug eine typische Form (Abb. 4): Vor dem Sielzug steigt der Pegel im Allgemeinen wegen des dauernden Zustroms aus Grund- und/oder Oberflächenwasser fast linear an. Während des Sielzugs fällt der Pegel stark ab, um nach Schließung des Tors zunächst schnell und dann langsam wieder anzusteigen. Diese Vorgänge lassen sich folgendermaßen erklären:

1. Vor dem Sielzug herrscht ein Fließgleichgewicht zwischen dem Zustrom aus dem Einzugsgebiet des Sielbeckens und dem Anstieg des Pegels: der Pegel steigt entsprechend dem Zustrom etwa linear an; die Strömungsgeschwindigkeiten sind klein.
2. Unmittelbar nach der Sielöffnung sinkt der Pegel fast linear ab; der Abfluss betrifft zunächst nur das Sielbecken.
3. Später reagiert auch das Einzugsgebiet durch verstärkten Zustrom; das Absinken des Pegels flacht ab.
4. Unmittelbar nach dem Schließen des Tors ist der erhöhte Zustrom aus dem Einzugsgebiet noch unverändert. Daher ist der Zustrom in das Sielbecken noch hoch, und der Pegel steigt schnell an.
5. Später wird der Fließgleichgewichts-Zustand zwischen Zufluss und Sielbecken allmählich wieder erreicht; der Zustand wie vor der Sielöffnung ist wieder hergestellt.

Aus Abb. 4 ist außerdem zu entnehmen, dass während des Sielzugs die Sielpegel innerhalb und außerhalb des Sieltores etwa gleichmäßig fallen, so dass man auch hier mit einem Quasi-Gleichgewicht (auf der Außenseite des Siels) und einer konstanten Abflussrate rechnen kann. Unmittelbar nach dem Schließen des Sieltores stellt sich durch Abfluss des ausgelaufenen Wassers der „natürliche“ Außenpegel wieder ein.

Aus der Analyse des Pegel-Profiles können Parameter des Wasseraustauschs zwischen den Zuflüssen und dem Sielbecken entnommen werden.

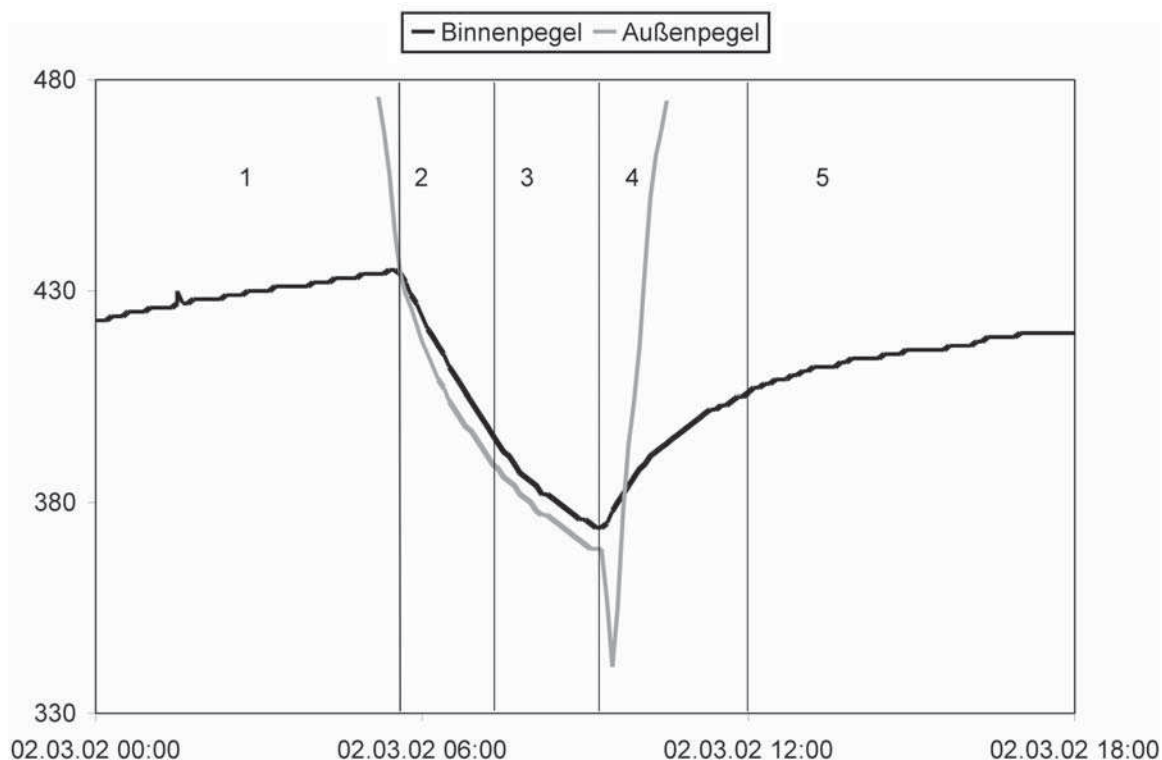


Abb. 4: Pegel Accumersiel während des Sielzugs. Der Außenpegel wird unmittelbar auf der Seeseite des Siels genommen und zeigt deshalb auch das ablaufende Wasser während der Sielöffnung an, weicht also leicht ab vom normalen Niedrigwasserstand des Wattenmeers. Die Zahlen beziehen sich auf die im Text erwähnten Phasen der Sielöffnung

Nimmt man zunächst einen konstanten Zulauf  $a$  an, so errechnet sich dieser – bei rechteckigem Querschnitt des Beckens – einfach aus der Oberfläche des Sielbeckens  $f$  und der Pegeldifferenz pro Zeiteinheit  $\dot{h}$ :

$$a = f \dot{h}$$

Die Annahme des rechteckigen Querschnitts erscheint gerechtfertigt, weil der Pegel des Sielbeckens in einem engen Rahmen konstant gehalten wird. Die Fläche  $f$  des Sielbeckens in Accumersiel ist aus Satellitenaufnahmen (s. Abb. 2) zu  $117\,000\text{ m}^2$  bestimmt worden.

In Abb. 5 ist die so errechnete Größe des Zulaufs zusammen mit dem Niederschlag und dem Binnenpegel Accumersiel dargestellt. Der Niederschlag wurde mit einer automatischen Pfahlstation im Wattenmeer in der Nähe des Seegatts Accumer Ee gemessen.

Natürlich werden die errechneten Zuflusswerte während des Sielzüge negativ, weil der Pegel abnimmt. Daher sind die Werte während und bis zwei Stunden nach dem Sielzug in der Abbildung weggelassen worden.

Deutlich ist zu erkennen, dass der Zulauf im regenarmen September 2002 einen Minimalwert von ca.  $2000\text{ m}^3/\text{Tag}$  erreicht, um dann mit Einsetzen der Regenfälle Mitte Oktober bis auf max.  $200.000\text{ m}^3/\text{Tag}$  anzusteigen.

Mit dieser einfachen Modellvorstellung lässt sich jedoch der Abfluss aus dem Sielbecken nicht berechnen. Deshalb wird eine erweiterte Modellvorstellung verwendet, wie sie im Folgenden beschrieben wird.

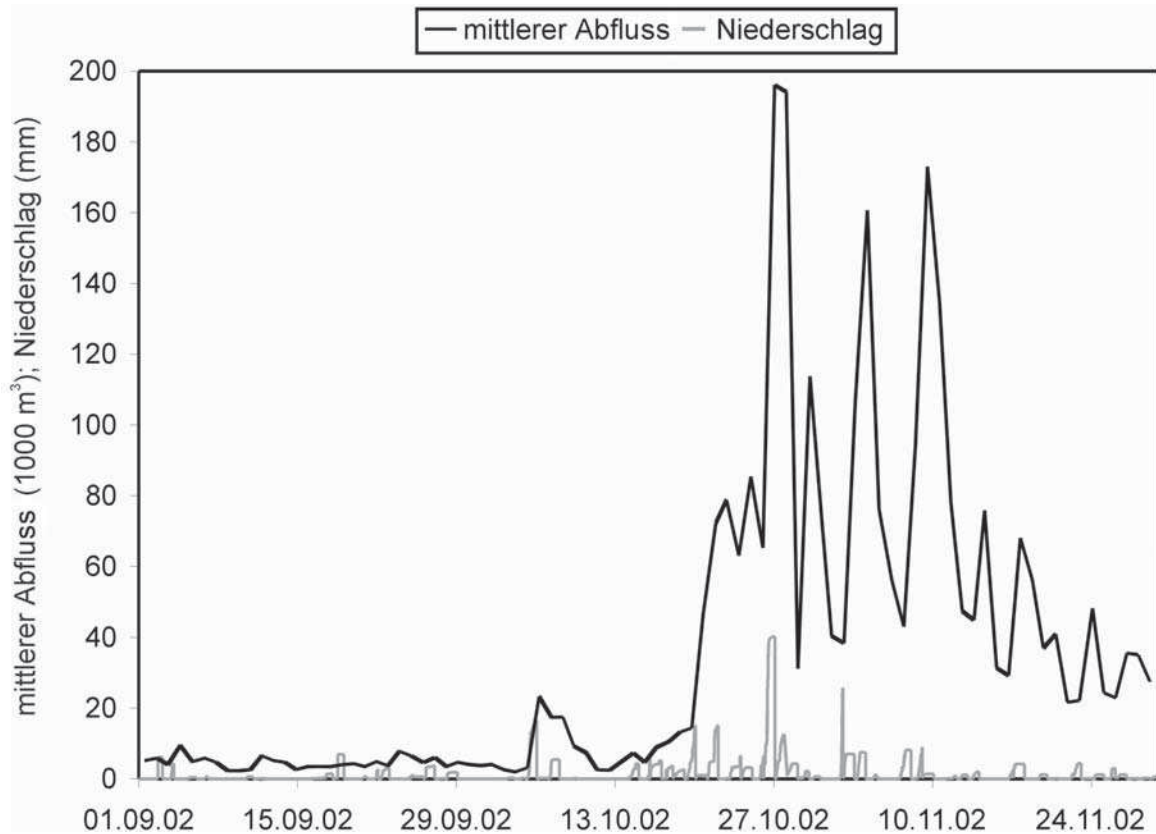


Abb. 5: Niederschlag und nach der „einfachen“ Formel berechneter mittlerer Abfluss

### 3. Modell

Man nimmt an, dass die Kanäle, die dem Sielbecken (Becken 2) das Wasser zuführen, sich wie ein weiteres Becken (Becken 1) verhalten. Man betrachtet also zwei miteinander verbundene Becken (Abb. 6) mit den Wassertiefen  $h_1$  und  $h_2$  und den Oberflächen  $f_1$  und  $f_2$ . In Becken 1 tritt dauernd der Volumenstrom  $a$  ein, bei geöffnetem Sieltor tritt der Volumenstrom  $c$  aus Becken 2 aus.

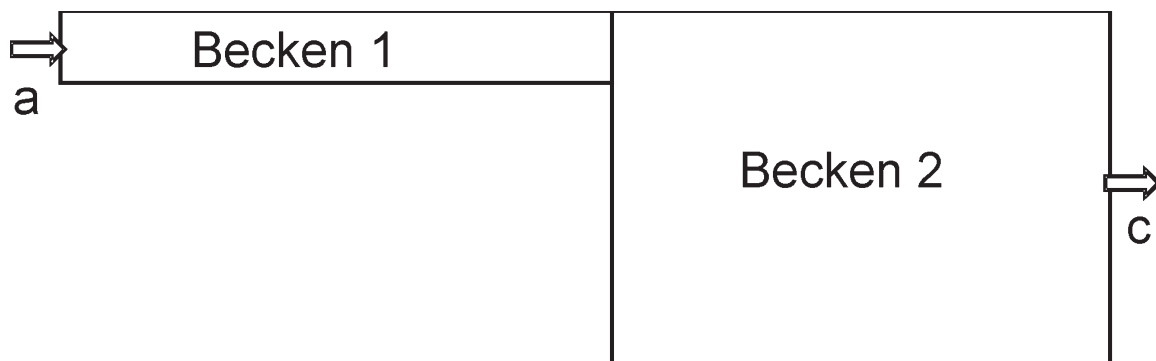


Abb. 6: Modell

Bei ungleichem Pegelstand soll ein Übertritt von Wasser von Becken 1 in Becken 2 proportional zur Pegeldifferenz erfolgen. Die zeitliche Änderung der Beckenvolumina ist dann

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= a - \alpha(h_1 - h_2) \\ \dot{V}_2 &= c + \alpha(h_1 - h_2)\end{aligned}$$

mit der Proportionalitätskonstanten  $\alpha$ , die die Dimension  $m^2/s$  hat. Die Pegeländerungen ergeben sich über die Oberflächen  $f_1$  zu

$$\begin{aligned}\dot{h}_1 &= a/f_1 - \alpha(h_1 - h_2)/f_1 \\ \dot{h}_2 &= -c/f_2 + \alpha(h_1 - h_2)/f_2.\end{aligned}$$

Die Differenz der beiden Pegeländerungen ( $\Delta h = h_1 - h_2$ ) ist

$$\Delta \dot{h} = a/f_1 + c/f_2 - \alpha \Delta h \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right).$$

Die zeitliche Änderung der Pegelstände ist also proportional zu den Pegelständen selbst; also muss die Lösung eine Exponentialfunktion sein.

Mit den Definitionen  $1/rfl = 1/f_1 + 1/f_2$  (rfl: reduzierte Fläche) und  $q = a/f_1 + c/f_2$  (zur Vereinfachung der Formeln) ist

$$\Delta \dot{h} = \text{const.} \exp\left(-\frac{\alpha t}{rfl}\right) + \frac{q \text{ rfl}}{\alpha}$$

die Lösung der Differentialgleichung. Eine einmal (z.B. durch Sielauslass) entstandene Pegeldifferenz klingt also exponentiell ab, wobei die Abklingzeit durch die Flächen der beiden Becken und die Kopplungskonstante  $\alpha$  bestimmt wird. Eine konstante Pegeldifferenz kann dann bestehen bleiben, wenn Zufluss oder Abfluss ungleich 0 sind bzw. sich nicht gegenseitig aufheben.

Bei abgeklungener Exponentialfunktion (nachdem nach einem Sielzug genug Zeit vergangen ist) ist also die Pegeldifferenz konstant (Fließgleichgewicht), wobei diese Konstante von Ablauf  $c$  und Zulauf  $a$  abhängt.

$\dot{h}_2$  war proportional zur Pegeldifferenz

$$\Delta \dot{h} = a/f_1 + c/f_2 - \alpha \Delta h \left( \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right).$$

Bei bekanntem  $\Delta h$  (s.o.) lässt sich diese Gleichung integrieren zu

$$h_2 = (q \text{ rfl} - c) t/f_2 + \left( \frac{q \text{ rfl}^2}{\alpha f_2} - \frac{q \text{ rfl} \Delta h_0}{f_2} \right) \exp\left(-\frac{\alpha t}{rfl}\right) + \text{const.}$$

Das ist eine Überlagerung einer Exponentialfunktion mit einer linearen Funktion, wobei die Amplituden (neben den geometrischen Gegebenheiten) wiederum von Ablauf und Zulauf abhängen. Dieses Verhalten ist auch unmittelbar aus Abb. 4 abzulesen: Sowohl vor dem Sielzug als auch in angemessener Zeit danach ist ein linearer Anstieg zu beobachten.



Um nun einen Bezug herzustellen zwischen dem theoretischen Modell und dem konkreten Abflussereignis, müssen aus der aufgezeichneten Pegelkurve Messgrößen abgeleitet werden, die mit dem Modell in Beziehung stehen. Dazu bieten sich die Steigungen der Kurve in den verschiedenen Phasen des Sielzugs an. Aus der obigen Formel müssen dazu die Steigungen der Pegelkurve errechnet werden, und zwar vor der Sielöffnung (Phase 1), unmittelbar nach der Sielöffnung (Phase 2) und unmittelbar nach Schließung des Sieltores (Phase 4), indem von der Exponentialfunktion jeweils nur der lineare Term berücksichtigt wird.

Phase 1: Vor der Sielöffnung ist der Abfluss  $c$  aus Becken 2 gleich null, und wir nehmen an, dass zwischen den beiden Becken ein Fließgleichgewicht besteht: Die Exponentialfunktionen sind auf Null abgeklungen. Dann ist die konstante Pegeldifferenz

$$\Delta h(t \rightarrow \infty) = \frac{q_{\text{rfl}}}{\alpha} = \frac{a_{\text{rfl}}}{f_1 \alpha},$$

und die Pegel steigen linear an:

$$h_2 = (q_{\text{rfl}} - c) t / f_2 = \frac{a}{f_1 + f_2} t.$$

Phase 2: Wenn das Siel geöffnet wird, ist die Anfangssteigung

$$h_2(t \rightarrow 0) = \left( \frac{a}{f_1 + f_2} - \frac{c}{f_2} \right) t.$$

Phase 4: Nach der Schließung des Siels gilt die Anfangssteigung

$$h_2(t \rightarrow 0) = \frac{\Delta h_0 \alpha t}{f_2},$$

wobei  $\Delta h_0$  die während der Sielöffnung gewachsene Pegeldifferenz bedeutet. Diese lässt sich aus der vollständigen Lösung berechnen. Daraus ergibt sich

$$h_2 = \frac{a}{f_1 + f_2} t + \frac{c_{\text{rfl}}}{f_2^2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\alpha T}{\text{rfl}}\right) \right) t.$$

Die vier beobachtbaren Größen – Steigung vor der Sielöffnung, Anfangssteigung in Phase 2 und Phase 3 und Zeitkonstante der Abklingkurve – hängen also mit den Parametern des Modells wie folgt zusammen:

Steigung vor Sielöffnung:

$$st_1 = \frac{a}{f_1 + f_2} t.$$

Anfangssteigung nach Sielöffnung:

$$st_2 = \frac{a}{f_1 + f_2} - \frac{c}{f_2} t.$$

Anfangssteigung nach Schließung des Tores:

$$st_3 = \frac{a}{f_1 + f_2} t + \frac{c \text{ rfl}}{f_2^2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\alpha T}{\text{rfl}}\right) \right) t.$$

Zeitkonstante der Exponentialfunktion:

$$zk = \frac{\alpha}{\text{rfl}}.$$

Die vier Unbekannten Abflussrate  $c$ , Austauschkonstante  $a$ , Fläche des ersten Beckens  $f_1$  und Zuflussrate  $a$  ergeben sich, bei bekannter Fläche des Sielbeckens  $f_2$ , aus den Messgrößen

$$c = (st_1 - st_2) f_2$$

$$\text{rfl} = \frac{st_3 - st_1}{1 - \exp(-zk T)} \frac{f_2^2}{c}$$

$$f_1 = \frac{1}{\frac{1}{\text{rfl}} - \frac{1}{f_2}}$$

$$\alpha = zk \text{ rfl}$$

$$a = st_1 (f_1 + f_2).$$

Die Gesamtmenge des ausgetretenen Wassers ergibt sich einfach aus der beobachteten Dauer des Sielzugs und der Abflussrate  $c$ . Diese wichtigste Größe hängt nur von der (als bekannt vorausgesetzten) Fläche des Sielbeckens und den Steigungen der Kurve vor und nach dem Öffnen des Sieltores ab. Diese Steigungen lassen sich wesentlich zuverlässiger bestimmen als die Zeitkonstante des Wiederanstiegs  $zk$  und die Steigung  $st_3$ .

Als Beispiel sei nochmals die Abb. 4 betrachtet. Benötigt werden zur Berechnung des Abflusses die Steigungen des Binnenpegels vor und nach dem Öffnen des Sieltores und die Dauer des Sielzugs. Man beobachtet: Vor dem Sielzug steigt der Pegel um ca. 52 cm/Tag, zu Beginn des Sielzugs sinkt er um ca. 23 cm pro Stunde, also 545 cm/Tag, und die Dauer des Sielzugs lässt sich bestimmen zu 3 h 42 min. Daraus ergibt sich

$$c = (st_1 - st_2) f_2 = 8,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

als Abflussrate. Während des Sielzuges fließen also  $8,1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 3 \text{ h } 42 \text{ min} = 108\,000 \text{ m}^3$  ab.

## 4. Ergebnisse

Die errechneten Werte der Abflussrate und -menge für das Jahr 2002 sind in Abb. 7 dargestellt. Die Sprünge zwischen den Abflussraten sind darauf zurückzuführen, dass die Sielpegel nur im Abstand von ganzen cm gemessen werden können.

Die höheren Niederschläge in den Wintermonaten zeigen sich im Diagramm in häufigeren Sielöffnungen und höheren Abflussmengen. Im Sommer bleibt die abgelaufene Wassermenge pro Sielöffnung meist unter  $100.000 \text{ m}^3$ , während im Winter über  $300.000 \text{ m}^3$  erreicht werden können.

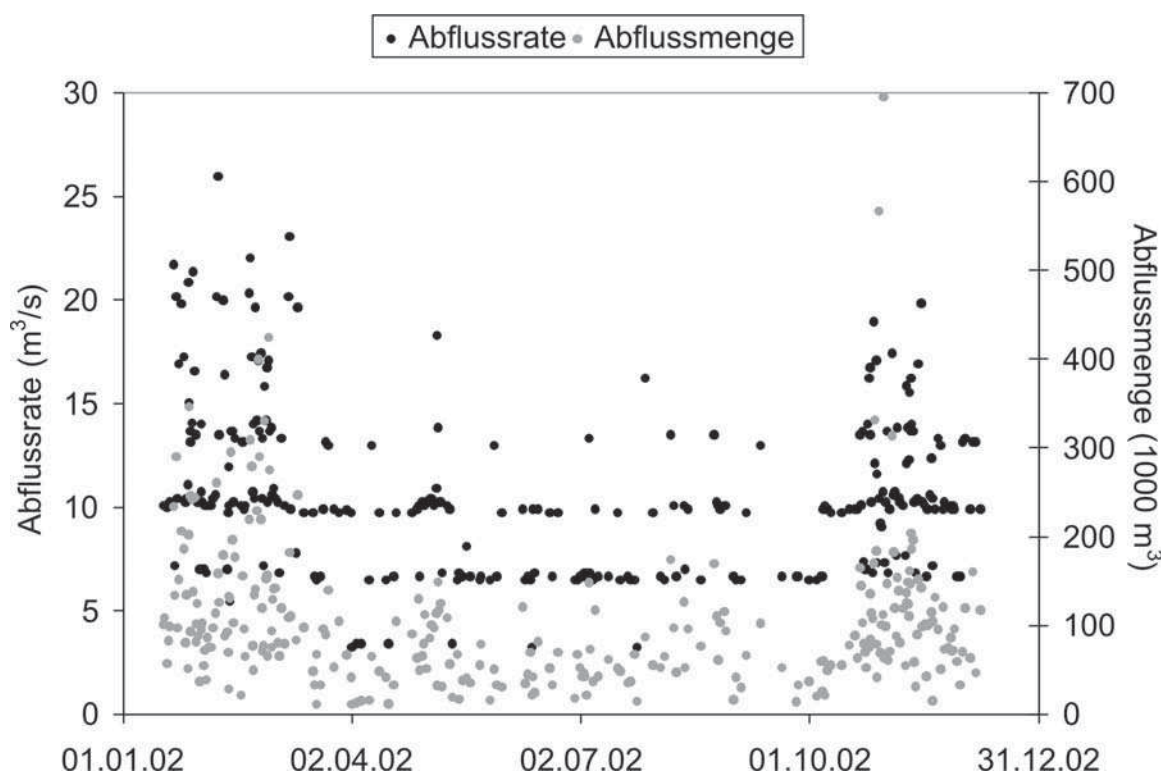


Abb. 7: Berechnete Abflussrate und Abflussmenge aus dem Sielbecken Accumersiel

Die starke Streuung ist sowohl auf Ungenauigkeiten in der Berechnung als auch auf reale Schwankungen zurückzuführen. Wenn etwa zwei Sielöffnungen unmittelbar hintereinander erfolgen oder Daten für eine gewisse Zeit ausfallen, ist eine zuverlässige Berechnung der Steigungen schwierig. Der Sielabfluss schwankt aber auch deshalb, weil die Abflussrate z.B. von der Differenz zwischen Binnen- und Außenpegel abhängt; diese Größen können unterschiedlich sein.

Auch andere Parameter des Modells gehen aus der Analyse hervor:

In Abb. 8 sind die Zuflussrate  $a$  und die Niederschlagsmenge dargestellt. Die Zuflussrate  $a$  in Becken 1 reflektiert direkt den Niederschlag; in der Abbildung ist zu sehen, dass die Zuflussrate innerhalb eines Tages auf erhöhten Niederschlag reagiert und in trockeneren Zeiten auf minimal  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  abfällt.

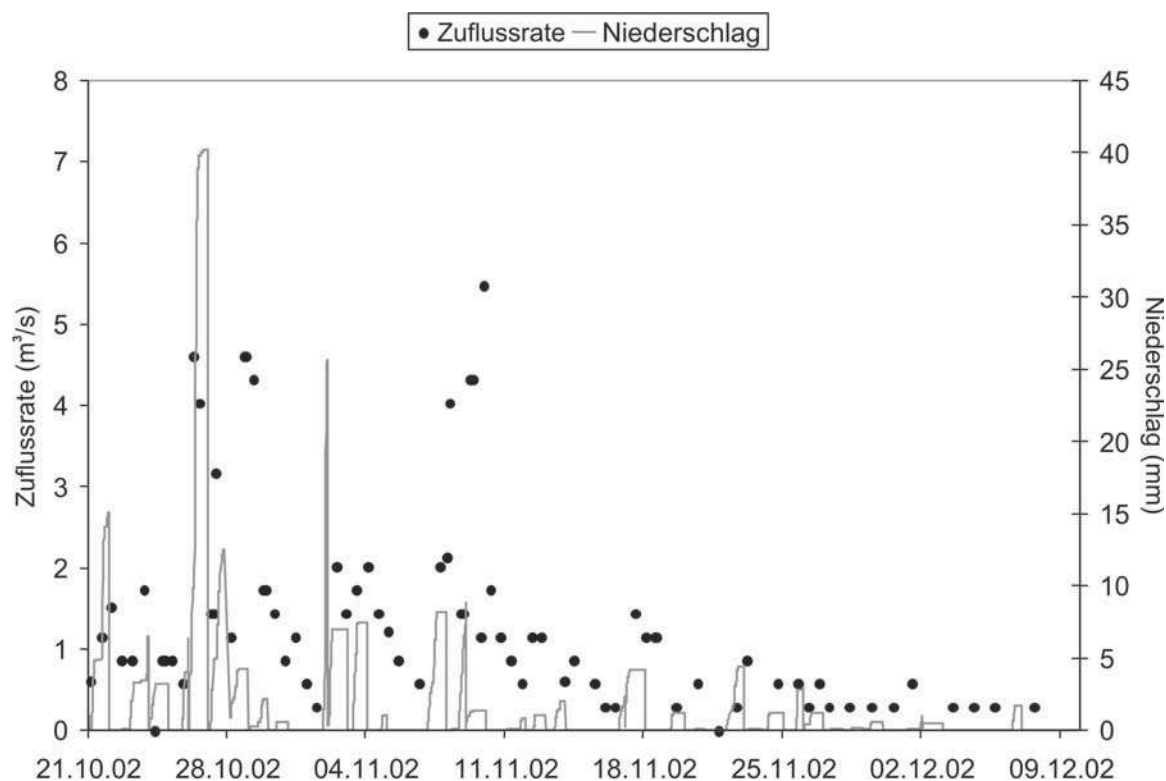


Abb. 8: Berechnete Zuflussraten und Niederschlag

## 5. Diskussion

Die errechneten Abflussmengen müssten mit Messungen einzelner Abflussereignisse im Accumersiel verglichen werden. Leider ist ein solcher detaillierter Vergleich mit Messdaten nicht möglich, weil die Pegeldata erst seit dem Anfang des Jahres 2002 zur Verfügung stehen und seitdem unseres Wissens nach keine Abflussmessungen aus Accumersiel veröffentlicht worden sind.

Eine Möglichkeit, das entwickelte Verfahren auf Plausibilität zu prüfen, ist ein Vergleich der mittleren Abflussmengen. Das NLWK Aurich (NLWK, 2000) gibt aus Messungen der Strömungsgeschwindigkeit und geometrischer Parameter eine – konstante – mittlere Abflussrate von ca.  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  an. Dies stimmt mit den mittleren Werten in Abb. 7 etwa überein. Die vorliegende Analyse erlaubt allerdings verschiedene Werte der Abflusskonstanten  $c$ ; sie wird bei jeder Sielöffnung erneut berechnet.

Eine weitere Möglichkeit des Vergleichs ist folgende: Es lässt sich eine grobe Beziehung herstellen zwischen der Niederschlagsmenge pro Jahr und dem gesamten Sielabfluss im selben Zeitraum (Abb. 9).

Die Daten sind vom NLWK für die Jahre 1996–2000 erhoben worden. Der Messpunkt, der sich aus den errechneten Daten für das erste Halbjahr 2003 und den gemittelten Niederschlägen über Baltrum, Langeoog und Bengersiel für den denselben Zeitraum ergibt, liegt auf der Geraden durch die früheren Messungen und stimmt insoweit mit den bekannten Beziehungen überein.

Bemerkenswert ist, dass in dieser Analyse keine Annahmen über die Art und Weise des Sielabflusses getroffen wurden. Ob das Wasser durch Sielöffnung oder Pumpenbetrieb abläuft, hat dieselben Folgen für den Sielpegel, vorausgesetzt dass der Betrieb so lange auf-

140

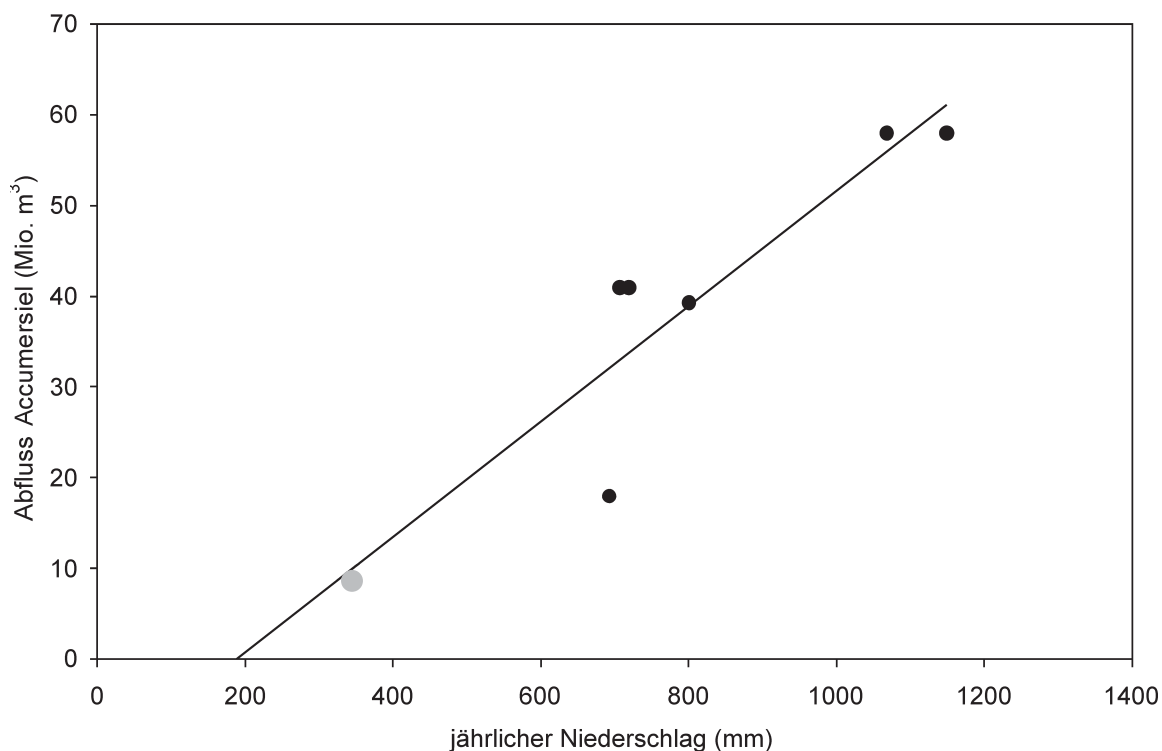


Abb. 9: Korrelation zwischen jährlichem Niederschlag und jährlicher Abflussmenge für Accumersiel für die Jahre 1996–2000. Der größere graue Punkt links unten steht für die berechneten Werte des 1. Halbjahres 2003

rechterhalten wird, dass die Exponentialfunktionen so weit abklingen können, dass eine Analyse wie oben möglich wird.

Die vorliegende Analyse ist übertragbar auf andere Siele, bei denen ebenfalls ein Sielbecken existiert, etwa den Knock, der mit 340 km<sup>2</sup> das größte Einzugsgebiet in Ostfriesland entwässert.

## 6. Danksagung

Wir bedanken uns bei Herrn Edzards von der Deich- und Sielacht Esens, der uns den Zugang zu den Sielpegeln gestattet hat. Rolf Riethmüller hat mich bei der kritischen Durchsicht des Manuskripts unterstützt.

## 7. Schriftenverzeichnis

- MYNETT, A. E.: Hydroinformatics and its Applications at Delft Hydraulics. *Journal of Hydroinformatics* 01.2, pp. 83–102, 1999.
- NEGM, A. M.; ALHAMID, A. A.; EL-SAIAD, A. A.: Submerged Flow Below Sluice Gate With Sill. *Proceedings of the 3rd International Conference on Hydro-Science and -Engineering*, Brandenburg University of Technology at Cottbus, Cottbus/Berlin, Germany, August 31–September 3, 1998.
- NLWK: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz, Betriebsstelle Aurich. *Nährstoffeinträge in die Nordsee*, Bericht, 2000.
- NLWK: persönliche Mitteilung von H. Rupert, NLWK Aurich, 2003.
- US DEPARTMENT OF THE INTERIOR, Bureau of Reclamation: *Water Measurement Manual*. Washington, D.C., 1997.