



# **Flussvertiefungen contra Hochwasserschutz**

---

Auswirkungen der Flussvertiefungen auf  
die Höhe der Wasserstände in den  
Unterläufen von Elbe, Weser und Ems

**Herausgeber:** WWF Deutschland, Frankfurt am Main

**Stand:** Februar 2003, 1. Auflage

**V.i.S.d.P.:** Beatrice Claus

**Autor:** Dipl.-Ing. Peter Roberz, Beratender Ingenieur für Bauwesen

**Redaktion und Produktion:** Beatrice Claus

Gedruckt auf 100% Recycling-Papier

©2003 WWF Deutschland, Frankfurt am Main

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers

# Inhalt

|   |    |
|---|----|
| Zusammenfassung .....   | 4  |
| 1. Einleitung .....   | 6  |
| 2. Einfluss von Baumaßnahmen in und an der Elbe auf die Höhe der Wasserstände bei hohen Sturmfluten und normalen Wetterlagen .....  | 7  |
| 3. Einfluss des Oberwasserzuflusses der Elbe auf die Sturmflutwasserstände in der Unterelbe .....                                   | 11 |
| 4. Einfluss von Baumaßnahmen in und an der Weser auf die Höhe der Wasserstände bei hohen Sturmfluten und normalen Wetterlagen ..... | 12 |
| 5. Einfluss von Baumaßnahmen in und an der Ems auf die Höhe der Wasserstände bei hohen Sturmfluten und normalen Wetterlagen .....   | 17 |
| 6. Einfluss des Oberwasserzuflusses der Ems auf die Sturmflutwasserstände in der Unterems .....                                     | 19 |
| 7. Auswirkungen weiterer Vertiefungen der Flussunterläufe auf die Hochwassergefahr .....  | 19 |
| 8. Auswirkungen eines Klimawandels auf den Hochwasserschutz .....   | 20 |
| 9. Literatur .....  | 21 |
| 10. Anhang .....  | 22 |

## Zusammenfassung

Die drei großen Flüsse Elbe, Weser und Ems münden in die Nordsee. Ihre Wasserstände werden deshalb im Bereich der Flussmündungen und in den Unterläufen auch vom Nordseewasser beeinflusst, das bei Flut in die Flüsse eindringt. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurden diese Flüsse für die Schifffahrt immer weiter ausgebaut. Dies brachte zwar Vorteile für die Schifffahrt, hatte aber erhebliche Auswirkungen auf die Beschaffenheit und die Natur der Gewässer. Die Ausbaumaßnahmen waren vielfältig: Die Flüsse wurden vertieft und verbreitert, die Ufer befestigt, die Flussläufe wurden begradigt und eingedeicht, Nebenarme und Überflutungsflächen wurden abgeschnitten, Flussinseln und Untiefen beseitigt. Aus einem schmalen, flachen Fluss wurde ein breiter tiefer Fluss, in den ein Vielfaches an Wasser eindringen konnte. Die Rauheit der Flusssohle und der Ufer wurde durch die Beseitigung von „Hindernissen“ wie Inseln, Untiefen, Buchten und Kurven, aber auch durch die größere Tiefe erheblich vermindert, dem einströmenden Wasser wurde damit viel weniger Kraft genommen, wodurch sie viel weiter und höher in den Flussunterlauf einschwingen konnte. Die Menge des mit der Flut eindringenden Wassers hat sich vervielfacht. Der Einfluss der Tide wurde immer weiter flussaufwärts spürbar, der Unterschied zwischen Ebbe (Tideniedrigwasser) und Flut (Tidehochwasser), der „Tidenhub“, wurde immer größer. Diese Veränderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Anstieg des Tidehochwassers (Wasserstand bei Flut).
- Absinken des Tideniedrigwassers (Wasserstand bei Ebbe).
- Vergrößerung des Tidenhubes (Unterschied zwischen den Wasserständen bei Ebbe und Flut).
- Vergrößerung des Tidevolumens (Wassermenge, die bei Flut in die Flussmündung und den Flussunterlauf eindringt).
- Verschiebungen der Eintrittszeiten von Hoch- und Niedrigwasser.
- Erhöhung der Geschwindigkeit des Tidewellenscheitels (Der Abstand zwischen den Eintrittszeitpunkten des Tidehochwasser an verschiedenen Pegeln wird geringer).
- Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten

- Verschiebung der Tidegrenzen (des Einflusses von Ebbe und Flut) flussaufwärts.
- Erhöhung und Verschiebung der Sturmflutscheitelwasserstände (der höchsten Wasserstände bei Sturmfluten).

Im Bereich des Hamburger Hafens an der Unterelbe haben sich in den Jahren von 1950 bis 1980 die Wasserstände der hohen Sturmfluten um 50 bis 60 cm erhöht. Dieser Anstieg ist zu 20% (15 cm) auf die Fahrwasservertiefungen, zu 66% auf die Eindeichungen und zu ca. 13% auf die Inbetriebnahme von Sperrwerken an den Nebenflüssen zurückzuführen. Seit 1980 haben nach Schätzung von Experten erneute Elbausbauten zu einem Anstieg der Wasserstände um weitere 10 cm geführt. Damit beträgt der heute geschätzte Anteil der Fahrwasserausbauten und Vertiefungen am Anstieg der Sturmflutscheitelwasserstände bei Hamburg an der Elbe ca. 30% (25 cm).

Die durch den Ausbau der Unter- und Außenweser hervorgerufenen Erhöhungen der höchsten Wasserstände bei Sturmfluten an der Weser sind mindestens genauso groß wie die an der Elbe. Dies lässt sich von den Sturmflutverläufen der Vergangenheit ableiten. Bei niedrigeren Sturmflutwasserständen in Bremerhaven gab es während eines Sturmflutereignisses nach den Ausbauten signifikant erhöhte Sturmflutwasserstände im oberen Bereich der Unterweser (binnenwärts), ohne dass dies auf die aus der Mittelweser kommenden Wassermengen (Oberwasser) zurückzuführen ist. Genauere Untersuchungen zum Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände der Weser liegen nicht vor.

Eine Auswertung der an den Pegeln der Unterems gemessenen höchsten Wasserstände bei Sturmfluten hat ergeben, dass diese ebenfalls ausbaubedingt gestiegen sind.

Der Einfluss des Oberwasserzuflusses (Wasserzufluss aus der Mittelelbe) auf die Höhe der Wasserstände bei Sturmfluten im Elbe-Unterlauf bei Hamburg ist erheblich. Das Auftreten eines Jahrhundert-Hochwassers mit riesigen Oberwassermengen wie im Sommer 2002 zu Sturmflutzeiten ist nicht auszuschließen. Beim Zusammentreffen einer hohen Sturmflut mit einem Jahrhun-

dert – Oberwasserzuflusses käme es an einigen Pegeln Hamburgs zu neuen Extremwerten. Die bisherigen Bemessungsgrundlagen für die Höhe der Deiche sollten nach dem im Sommer aufgetretenen Hochwasser der Mittelelbe erneut geprüft werden.

Die bisherigen Vertiefungen und Ausbauten der Flussunterläufe haben zu einem deutlichen Anstieg der Wasserstände in den oberen Abschnitten aller drei Flussunterläufe bei Sturmfluten geführt. Als Folge weiterer Flussvertiefungen und Ausbauten werden bei Sturmfluten noch größere Wassermassen in die Flüsse eindringen können und die Tendenz der steigenden Wasserstände weiter fortgesetzt. Hinzu kommen die Folgen des voraussichtlich eintretenden Klimawandels, die eine Zunahme von Oberwassermengen in den Flüssen bewirken und den „normalen“ Meeresspiegelanstieg beschleunigen. Die Hochwassergefahr in den Flussunterläufen steigt daher im Zusammenhang mit dem Klimawandel einerseits durch das Eindringen größerer Wassermassen in die Flussunterläufe aus der Nordsee bei Sturmfluten und andererseits durch größere Wasserzuflüsse aus den Mittelläufen.

Die Bundesregierung hat ein Fünf-Punkte-Programm zum vorbeugenden Hochwasserschutz am 15. September 2002 verabschiedet. Der Erkenntnis, dass Flussausbauten Hochwasserereignisse verstärken können wird in Punkt vier „Flussausbau überprüfen – Schifffahrt

umweltfreundlich entwickeln“ Rechnung getragen. Darin heißt es: „Es ist daher erforderlich alle Ausbauplanungen und in ihren Auswirkungen vergleichbare Unterhaltungsmaßnahmen auf den Prüfstand zu stellen, um vor dem Hintergrund der aktuellen Ereignisse ihre Wirkungen auf den Hochwasserschutz neu zu bewerten. Diese Überprüfung,..., ist mit Vorlage des neuen Bundesverkehrswegeplans Anfang 2003 abzuschließen.“

Aktuell gibt es weitere Ausbaupläne für die drei Flussunterläufe von Elbe, Weser und Ems. In Anlehnung an das Fünf-Punkte-Programm der Bundesregierung ist es das Ziel dieser Studie, die vorliegenden Daten und Erkenntnisse über den Einfluss der Flussausbauten in der Vergangenheit auf die Wasserstände bei Sturmfluten zu analysieren und Hinweise auf neue Bemessungsgrundlagen zu geben, die für eine Überprüfung der Hochwassersicherheit in die Neuauflage des Bundesverkehrswegeplans einfließen sollten.

# 1. Einleitung

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurden die Flussmündungen der Elbe, Weser und Ems für die Schifffahrt immer weiter ausgebaut, vgl. Tabelle 1. Dies brachte zwar Vorteile für die Schifffahrt, hatte aber erhebliche Auswirkungen auf die Beschaffenheit und die Natur der Gewässer. Die Ausbaumaßnahmen waren vielfältig: Die Flüsse wurden vertieft und verbreitert, die Ufer befestigt, die Flussläufe wurden begradigt und eingedeicht, Nebenarme und Überflutungsflächen wurden abgeschnitten, Flusssinseln und Untiefen beseitigt. Aus einem mäandrierenden Fluss wurde ein tiefer gerader Fluss, in den ein Vielfaches an Wasser eindringen konnte. Neben den ausbaubedingten ökologischen Veränderungen haben sich auch die hydrologischen Verhältnisse durch die Flussausbauten verändert. Dazu gehören sowohl die veränderten „normalen“ Tidewasserstände als auch höhere Wasserstände bei Sturmfluten.

Am 15. September 2002 hat die Bundesregierung ein Fünf-Punkte-Programm zum vorbeugenden Hochwasserschutz verabschiedet. Der Erkenntnis, dass Flussausbauten Hochwasserereignisse verstärken kön-

nen wird dabei in Punkt vier „Flussausbau überprüfen – Schifffahrt umweltfreundlich entwickeln“ Rechnung getragen. Darin heißt es: „Es ist daher erforderlich alle Ausbauplanungen und in ihren Auswirkungen vergleichbare Unterhaltungsmaßnahmen auf den Prüfstand zu stellen, um vor dem Hintergrund der aktuellen Ereignisse ihre Wirkungen auf den Hochwasserschutz neu zu bewerten. Diese Überprüfung, ..., ist mit Vorlage des neuen Bundesverkehrswegeplans Anfang 2003 abzuschließen.“

Aktuell gibt es weitere Ausbaupläne für die drei Flussunterläufe von Elbe, Weser und Ems. In Anlehnung an das Fünf-Punkte-Programm der Bundesregierung ist es das Ziel dieser Studie, die vorliegenden Daten und Erkenntnisse über den Einfluss der Flussausbauten in der Vergangenheit auf die Wasserstände bei Sturmfluten zu analysieren und Hinweise auf neue Bemessungsgrundlagen zu geben, die für eine Überprüfung der Hochwassersicherheit in die Neuauflage des Bundesverkehrswegeplans einfließen sollten.

Tab. 1: Wesentliche Ausbauten der Flussmündungen (Ästuar)

| ELBE                          | WESER                                 | EMS   |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|
| 1850-1868: 5,3m Ausbau der UE | Bis 1880: Begradigungen u. Buhnen UW  | 1860-1959 Begradigungen, Buhnenbau                            |
| 1936-1950: 10m Ausbau der UE  | 1887-1895: 5m Ausbau UW, 7m Ausbau AW | 1984/1990: 5,7m/6,30m Ausbau                                  |
| 1957-1962: 11m Ausbau der UE  | 1913-1916: 7m Ausbau UW               | 1992: 6,80m Ausbau  |
| 1964-1969: 12m Ausbau der UE  | 1921-1928: 10m Ausbau AW              | 1994: 7,3m Ausbau   |
| 1974-1978: 13,5m Ausbau UE/AE | 1953-1958: 8,7m Ausbau der UW         | 1999-2002: Bau des Stau- und Sperrwerkes bei Gandersum        |
| 2000- : 15,3m Ausbau UE/AE    | 1973-1978: „9“m (11m) Ausbau UW       | 1999- : LUKE – Unterhaltungsprogramm m. Baggern und Buhnenbau |
|                               | 1969-1971: 12m Ausbau AW              |   |
|                               | 1998-1999: 14m Ausbau der AW          |   |

UE=Untereibe, AE=Außenelbe; UW=Unterweser, AW=Außenweser; UEM=Unterems, Quelle: Claus, 1998; Flügel, 1987

## 2. Einfluss von Baumaßnahmen in und an der Elbe auf die Höhe der Wasserstände bei hohen Sturmfluten und normalen Wetterlagen

Die schweren Sturmfluten im Januar 1976 haben vor allem im Elbegebiet große Schäden angerichtet und in der Öffentlichkeit erneut Diskussionen über die Wirkungen von Baumaßnahmen in und an der Elbe nach 1962 entfacht. Das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) hatte daher beschlossen, dass der Bund und die Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Hamburg gemeinsam Untersuchungen in der Unterelbe in hydraulischen und mathematischen Modellen, unter Berücksichtigung früherer Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau und des Franzius-Instituts sowie des Dänischen hydraulischen Instituts durchführen lassen. Den Untersuchungen lag der topographische Zustand von 1980 zugrunde, womit

also die Fahrrinnenvertiefungen auf 13,5 m, die Absperrung der Nebenflüsse, die Abdämmung der Süderelbe sowie Eindeichungen und Spülfelder Berücksichtigung fanden. Gleichzeitig wurden praktische Möglichkeiten wie die Anlage von Poldern und der Bau eines Sperrwerkes in der Elbe zur Verminderung der Sturmfluthöhen mit erfasst.

Prof. Dr.-Ing. Siefert fasst diese Untersuchungen für den Zeitraum von 1950 bis 1983 zusammen:

*„Es ist erwiesen, dass hohe Sturmfluten in der Elbe generell erhöht wurden, und zwar bei Brokdorf um 2,5-4 dm, bei Kollmar um 3 bis 4,5 dm, bei Stadersand um 3,5 bis 5 dm, im Hamburger Hafen um 5 bis 6 dm und bei Zollenspieker um 6,5 bis 9 dm. Diese Beträge sind wesentlich größer als noch vor wenigen Jahren vermutet.“*

Einige Ergebnisse der Veröffentlichung von Siefert & Havnoe (1988) sind in Tabelle 2 dargestellt:

Tab. 2: Wirkung von Baumaßnahmen in und an der Tideelbe auf die Scheitelwasserstände sehr hoher Sturmfluten in der Elbe

| Maßnahme  | HThw-Erhöhung in dm bei |             |                |               |
|---|-------------------------|-------------|----------------|---------------|
|   | Brokdorf                | Stadersand  | Hbg.-St. Pauli | Zollenspieker |
| Absperrung von Seeve, Ilmenau und Billwerder Bucht; Vordeichung Oortkaten | 0                       | 0           | 0,5 bis 1      | 2 bis 3       |
| Neue Deichlinie Harburg bis Este; Absperrung Alte Süderelbe               | 0 bis 1                 | 0,5 bis 2   | 0,5 bis 1,5    | 0,5 bis 2     |
| Eindeichung Hahnöfer Sand; Absperrung Schwinge, Krückau und Pinnau        | 0,5 bis 1               | 1 bis 1,5   | 0,5 bis 1,5    | 1 bis 1,5     |
| Absperrung von Lühe und Stör  | 0                       | 0           | 0              | 0             |
| Eindeichung Haseldorfer Marsch  | 0 bis 1                 | 0,5 bis 1   | 0 bis 1        | 0,5 bis 1     |
| Eindeichung Krautsand   | rd. 1                   | rd. 0,5     | 0 bis 1        | 0,5 bis 1     |
| Eindeichung Nordkehdingen   | -0,5 bis 0              | -0,5 bis 0  | -1 bis 0       | -1 bis 0      |
| Fahrwasservertiefung von 10 auf 13,5 m KN                                 | -0,5 bis +1             | 0,5 bis 1,5 | 1 bis 1,5      | 0,5 bis 1,5   |
| Vergleich 1950 auf 1980   | 2 bis 4                 | 3 bis 5     | 5 bis 6        | 6,5 bis 9     |

Quelle: Siefert & Havnoe, 1988

Die Sturmflutscheitelwasserstände haben sich in Hamburg bei St. Pauli insgesamt um bis zu 60 cm erhöht,

wobei sich damit ausbaubezogen folgende Höchstsätze für die einzelnen Ausbauförmern ergeben:

|  |     |
|--|-----|
| Fahrwasservertiefungen   | 20% |
| Absperrung von Seeve, Illmenau und Billwerder Bucht; sowie die Vordeichung Oortkaten | 13% |
| Neue Deichlinie Harburg bis Este; Absperrung Alte Süderelbe                          | 20% |
| Eindeichung Hahnöfer Sand; Absperrung Schwinge, Krückau und Pinneberg                | 20% |
| Eindeichung Haseldorfer Marsch   | 13% |
| Eindeichung Krautsand  | 13% |

Somit sind 66 % der Auswirkungen auf Eindeichungen, ca. 13% auf den Bau von Sperrwerken an Elbezuflüssen zurückzuführen und 20% auf die reinen Fahrwassersvertiefungen.

Tabelle 3 zeigt die den Berechnungen in Tabelle 1 zugrunde liegenden Sturmfluttiden an der Elbe von 1949 – 1983. Tabelle 3 ergänzt die Wasserstände an der Elbe bei Extremsturmfluten ab 1990.

Tab. 3: Sturmfluttiden von 1949-1983

| Ereignis       | Thw/Tnw bzw. HThw an den Pegeln |                         |                             |                            | Q <sub>0</sub><br>m <sup>3</sup> /s |                                  |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
|                | Cuxhaven<br>cm NN-5 m           | Stadersand<br>cm NN-5 m | Hbg.-St. Pauli<br>cm NN-5 m | Zollenspieker<br>cm NN-5 m |                                     | Neu Darchau<br>m <sup>3</sup> /s |
| mittlere Tiden |                                 |                         |                             |                            |                                     |                                  |
| 1948/52        | 637/360                         | 649/396                 | 667/428                     | 696/541                    | ~565                                |                                  |
| 1975/79        | 645/346                         | 663/375                 | 696/373                     | 734/523                    | ~760                                |                                  |
| 1981/85        | 652/350                         | 674/379                 | 708/368                     | 744/518                    | ~740                                |                                  |
| Sturmfluten*   |                                 |                         |                             |                            |                                     |                                  |
| 57             | 09./10. 02. 49                  | 791                     | 861                         | 880                        | 894                                 | 348                              |
| 59             | 24. 10. 49                      | 866                     | 839                         | 841                        | 815                                 | 232                              |
| 61             | 16. 01. 54                      | 869                     | 897                         | 914                        | 904                                 | 260                              |
| 62             | 16./17. 01. 54                  | 835                     | 851                         | 870                        | 873                                 | 260                              |
| 64             | 22. 12. 54                      | 883                     | 915                         | 935                        | 934                                 | 518                              |
| 65             | 23. 12. 54                      | 787                     | 881                         | 915                        | 927                                 | 518                              |
| 66             | 23./24. 12. 54                  | 816                     | 827                         | 850                        | 864                                 | 518                              |
| 67             | 12./13. 01. 55                  | 854                     | 860                         | 883                        | 906                                 | 1700                             |
| 78a            | 16. 02. 62                      | 829                     | 859                         | 898                        | 924                                 | 952                              |
| 78             | 16./17. 02. 62                  | (995)                   | 1074                        | 1070                       | 1057                                | 952                              |
| 79             | 17. 02. 62                      | 843                     | 886                         | 912                        | 933                                 | 952                              |
| 125            | 03. 01. 76                      | 1010                    | 1106                        | 1145                       | 1134                                | 460                              |
| 126            | 03./04. 01. 76                  | 862                     | 882                         | 919                        | 945                                 | 460                              |
| 127            | 20./21. 01. 76                  | 970                     | 1015                        | 1058                       | 1076                                | 1400                             |
| 127a           | 21. 01. 76                      | 836                     | 865                         | 917                        | 951                                 | 1400                             |
| 128            | 21./22. 01. 76                  | 880                     | 936                         | 980                        | 1014                                | 1400                             |
| 131            | 14./15. 11. 77                  | 872                     | ausgefallen                 | 953                        | 972                                 | 837                              |
| 132            | 15. 11. 77                      | 829                     | ausgefallen                 | 905                        | 936                                 | 837                              |
| 133            | 24. 12. 77                      | 827                     | ausgefallen                 | 943                        | 964                                 | 847                              |
| 134            | 30./31. 12. 77                  | 890                     | ausgefallen                 | 955                        | 971                                 | 825                              |
| 146            | 23./24. 11. 81                  | 825                     | 870                         | 923                        | 959                                 | 1338                             |
| 147            | 24. 11. 81                      | 951                     | 1037                        | 1081                       | 1099                                | 1338                             |
| 148            | 24./25. 11. 81                  | 903                     | 965                         | 1012                       | 1041                                | 1338                             |
| 156            | 01. 02. 83                      | 808                     | 887                         | 938                        | 961                                 | 860                              |
| 157            | 01./02. 02. 83                  | 899                     | 978                         | 1016                       | 1032                                | 860                              |
| 158            | 02. 02. 83                      | 771                     | 817                         | 857                        | 902                                 | 860                              |

\* Die Daten für Cuxhaven, Hbg.-St. Pauli und Q<sub>0</sub> entstammen REF. HYDR. UNTERELBE (1985), wo alle Ereignisse numeriert sind; die Nummern werden im folgenden häufig verwendet.

Quelle: Siefert & Havnoe, 1988

Tab. 4: Wasserstände an der Elbe bei Extremsturmfluten ab 1990

| Auswahl von Extremsturmfluten an der Elbe |                         |                 |                |                    |                     |  |
|---|-------------------------|-----------------|----------------|--------------------|---------------------|--|
| Datum                                     | CUX<br>Steubenhöft<br>m | Stadersand<br>m | St. Pauli<br>m | Zollenspieker<br>m | Neu<br>Darchau<br>m | Oberwasserzu-fluß gemessen in Neu Darchau in<br>Q(m <sup>3</sup> /s) |
| 27./28.2.1990                             | 9,46                    | 10,18           | 10,75          | 10,70              | 3,07                | 674  |
| 23.1.1993                                 | 9,36                    | 10,18           | 10,76          | 10,70              | 3,24                | 731  |
| 28.1.1994                                 | 9,51                    | 10,54           | 11,02          | 11,27              | 4,67                | 1360   |
| 5.2.1999                                  | 9,36                    | 10,26           | 10,74          | 10,85              | 3,77                | 937  |
| 3./4.12.1999                              | 9,55                    | 10,39           | 10,95          | 10,70              | 1,65                | 353  |

Quelle: Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher Elbe, 1994;1999; ergänzt durch mündliche Mitteilung NLWK Lüneburg und Herrn Rölwer WSA Lauenburg vom 17.12.2002

Mit den ergänzenden Sturmflutscheitelwerten wird deutlich, dass die Sturmflut vom 3.1.1976 in der Elbe an allen hier aufgezeichneten Pegeln die höchsten Werte erbracht hat.

Die astronomischen Gezeiten, die an der deutschen Nordseeküste für rd. 700 Tidehochwasser pro Jahr sorgen sind deterministisch bestimmt. Es ist möglich, diese Wasserstände abhängig von der Mondphase (Spring- und Nipptide) vorzuberechnen und in Gezeitentafeln niederzulegen. Hierbei wird auch der sekuläre Meeresspiegelanstieg berücksichtigt.

Aus den Gezeitentafeln für Elbe, Weser und Ems ist zu entnehmen, dass der Eintrittszeitpunkt für das Tidehochwasser und – niedrigwasser im oberen Bereich (binnenwärts) der Flussmündung deutlich später als an der Küste ist. Wie groß diese Unterschiede sind, hängt von der Morphologie des Flussbettes ab. Der Flussausbau hat die zeitliche Verzögerung verkürzt. Ein größerer Fließquerschnitt lässt größere Wassermengen, mit größerer Fließgeschwindigkeit einschwingen. Die Energieumwandlung durch Sohlreibung ist bei größeren Wassertiefen erheblich geringer. D.h., je stärker die Flussunterläufe ausgebaut sind, desto ungehinderter können die Wassermassen aus der Nordsee in den Fluss eindringen und desto geringer ist der Unterschied zwischen dem Zeitpunkt des Tidehochwassers an der Küste und den Zeitpunkten für das Auftreten des Tidehochwassers flussaufwärts. Indikator für das schnellere Eindringen der Wassermassen und damit auch für größere Wassermassen aus der Nordsee ist die Fortschrittsgeschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels:

#### 1962 (11 m-Ausbauzustand der Unterelbe)

von Cuxhaven (Fluss-km 724) nach St. Pauli (Fluss-km 623) benötigte der Tidewellen-Scheitel (Zeitdifferenz zwischen dem Eintreten des mittleren Tidehochwassers in Cuxhaven und dem Eintreten des Tidehochwassers in St. Pauli (Hamburg) auf einer Flussstrecke von 101 km) im Mittel 4 Std. 13 min.;

von St. Pauli bis Zollenspieker (Fluss-km 598) 1 Std. 10 min..

#### 1999 (13,5 m-Ausbauzustand der Unterelbe)

Von Cuxhaven nach St. Pauli benötigte der Tidewellen-Scheitel im Mittel 3 Std. 29 min.;

von St. Pauli bis Zollenspieker 48 min..

Zwischen Cuxhaven und St. Pauli ergibt sich damit eine Erhöhung der Fortschrittsgeschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels von 1962 bis 1999 um 21% von 6,65 m/s auf 8,05 m/s.

Zwischen St. Pauli und Zollenspieker erhöht sich die Fortschrittsgeschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels von 1962 bis 1999 um 46% von 5,95 m/s auf 8,68 m/s.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits bei mittleren Tiden 1999 bei einem 13,5 m- Ausbauzustand der Elbe mehr Wasser aus der Nordsee in die Flussmündung eindringt als 1962 bei einem 11 m-Ausbauzustand. Da es sich um einen Vergleich der mittleren Tidewasserstände handelt, spielen die Auswirkungen von Vordeichungen hierbei keine und die der Sperrwerksbauten an den Nebenflüssen eine zu vernachlässigende Rolle

Neben diesen Erhöhungen der Fortschrittsgeschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels sind die Erhöhungen des mittleren Tidehochwasser (Mthw) in den Jahren von 1940 und 1999 ein weiterer Indikator dafür, dass beim Ausbauzustand von 13,5m bereits bei „normalen“ Wetterlagen (mittleren Tidewasserständen) erheblich größere Wassermassen aus der Nordsee in die Flussmündung einschwingen als 1940 beim 10 m-Ausbauzustand. Die auf Abbildung 1 dargestellten Grafiken, die die Entwicklung des MThw, des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) und des mittleren Tidehubs (MThb, Unterschied der Wasserstände zwischen Tidehochwasser und Tideniedrigwasser) für die Jahre 1940 bis 1999 wiedergeben, sprechen für sich. Das MThw steigt bei St. Pauli in Hamburg in den Jahren 1940 bis 1999 von ca. PNP +6,70 m auf ca. PNP + 7,20 m, also rund 50 cm.

Der Mittlere Tidehub (MThb) steigt zwischen 1963 und 1978 in Hamburg St. Pauli fast linear von 2,60 m auf 3,35 m, um 75 cm. Dies wird vor allem auf die drei großen Ausbauten des Elbefahrwassers von 10 m unter KN (Kartennull) bis 13,5 m SKN (Seekartennull) zurückgeführt. Die vorgenannten Ausbauten begannen 1957 und wurden 1978 beendet.

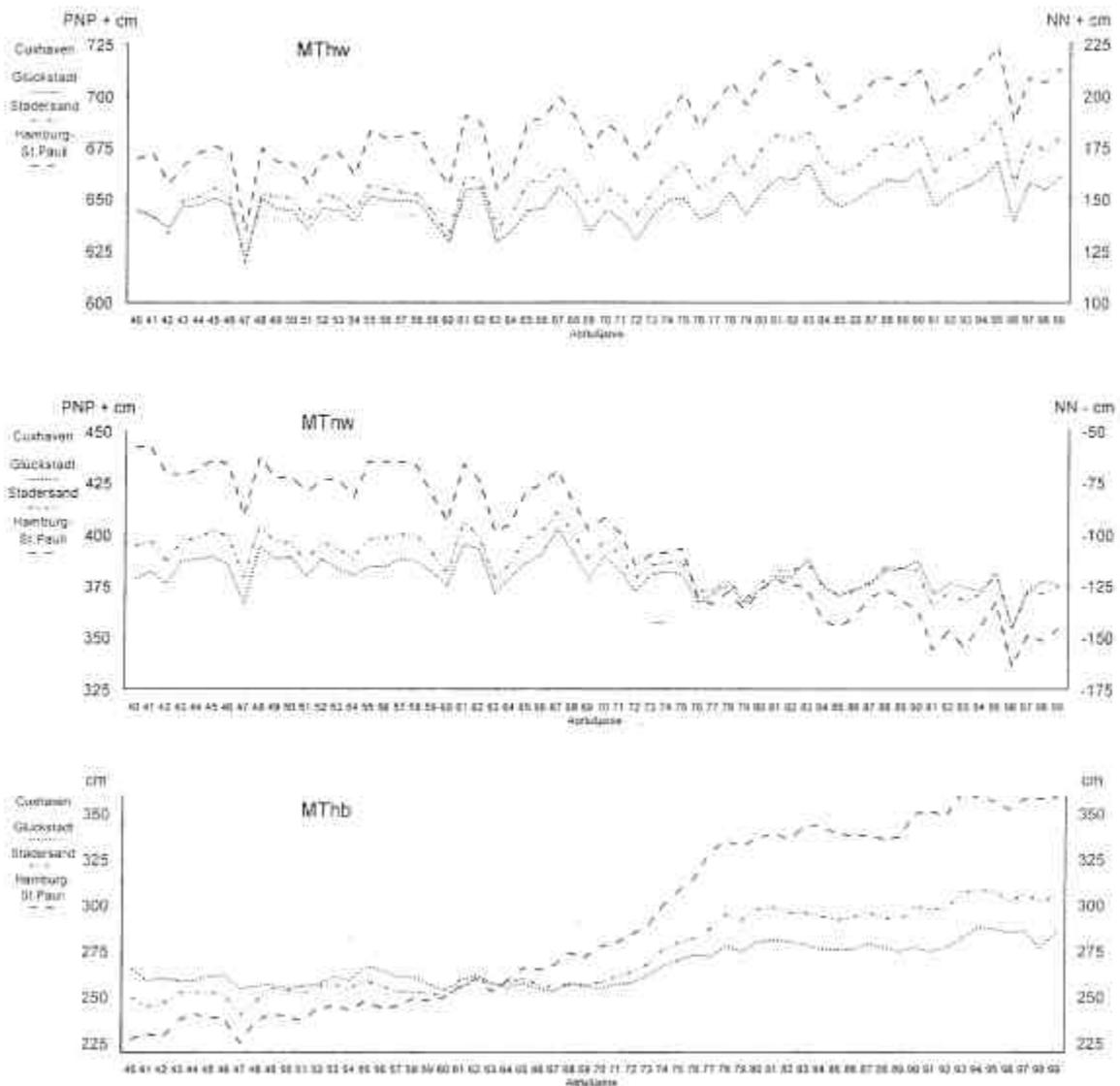


Abb. 1: Entwicklung der mittleren Tidehoch- und Niedrigwasserstände und der Tidenhöhe von 1940-1999, Quelle: Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafenausbau: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Elbegebiet Teil III, 1999

Die täglichen tidebeeinflussten Wasserspiegelschwankungen werden bei Sturmfluten überlagert durch meteorologisch bedingte Wasserstandserhöhungen. Diese Wasserstandserhöhung wird mit Windstau bezeichnet. Hier gehen u.a. neben der Windrichtung, die Windstärke und Dauer ein. Weiterhin kann das vorausberechnete Hochwasser auch durch so genannte Fernwellen überlagert werden, die mit der regionalen Wetterlage nichts zu tun haben. Eine Fernwelle kann in das Nordseebecken einlaufen (Sturmflut vom 16./17.2.1962), und zu einem zusätzlichen, wesentlichen Anstieg des Wasserspiegels führen. Die Erhöhung der Fortschrittsgeschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels und des mittleren Hochwassers sind

ein Indikator für die Gefahr höher auflaufender hoher Sturmfluten.

Bis 1980 konnte nachgewiesen werden, dass der Ausbau der Unterelbe von 10 m auf 13,5 m zu einer Erhöhung der höchsten Sturmflutwasserstände in Hamburg St. Pauli von 15 cm geführt hat. Heute im Jahre 2003 wird der Anstieg der Sturmflutwasserstände noch größer sein, da bei den obigen Berechnungen der morphologische Nachlauf der Elbevertiefungen bis 1978 noch nicht abgeschlossen war und somit nicht berechnet werden konnte. Die Vertiefung der Unterelbe um weitere 1,8 m in den Jahren 1998 – 2000 fand ebenfalls keine Berücksichtigung. Der weitere ausbaubedingte

Anstieg wird auf ca. 10 cm geschätzt. Damit beträgt der heute geschätzte Anteil der Fahrwasserausbauten und Vertiefungen am Anstieg der Sturmflutscheitelwasserstände der Elbe ca. 30% (25 cm).

### 3. Einfluss des Oberwasserzuflusses der Elbe auf die Sturmflutwasserstände in der Unterelbe

Die Oberwassermenge aus der Mittel- und Unterelbe fließt in die Berechnung der Bemessungswasserstände für die Deiche an der Unterelbe mit ein: Bis 1988 wurde in Niedersachsen mit einem maßgebenden Abfluss von 2150 m<sup>3</sup>/s (Ing.-Kommission 1973, S.33), gemessen in Neu Darchau, gerechnet. 1988 wurde ein gerundeter Wert von 2200 m<sup>3</sup>/s eingeführt. Es wurde nicht angenommen, dass ein höherer Abflusswert mit einer Sturmflut zusammentrifft. Das HHQ (Höchster Hochwasserabfluß) bei einer Sturmflut lag am 24.2.1946 mit 2600 m<sup>3</sup>/s am höchsten.

Der Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Scheitelwasserstände der Elbe wurde vom Dänischen Hydraulischen Institut im Modell untersucht. Eine Steigerung des Oberwasserzuflusses Q<sub>0</sub> um 1000 m<sup>3</sup>/s ergab dabei für sehr hohe Sturmfluten folgende maximale Wasserstandsdifferenzen an den Pegeln (Länderarbeitsgruppe 1988):

|               |                                |
|---------------|--------------------------------|
| Stadersand    | +0,5 dm/1000 m <sup>3</sup> /s |
| St. Pauli     | +1 dm/1000 m <sup>3</sup> /s   |
| Zollenspieker | +2,5 dm/1000 m <sup>3</sup> /s |
| Altengamme    | +3 dm/1000 m <sup>3</sup> /s   |
| Geesthacht    | +2 dm/1000 m <sup>3</sup> /s   |

Für die Sturmflutwasserstände in Hamburg bei St. Pauli würde eine Steigerung des Oberwasserzuflusses um 1000 m<sup>3</sup>/s eine Erhöhung um 10 cm bedeuten.

Was passiert, wenn eine Jahrhundert - Sturmflut mit einem Jahrhundert - Hochwasser zusammentrifft?

Diese Frage ist nicht von vorn herein als spektakulär abzutun, denn es gibt viele Stufen zwischen dem „22.8.2002(Elbe-Hochwasser) + 17.2.1962 (Sturmflut-

katastrophe)- Szenario“ und zwischen bisher zusammengetroffenen Ereignissen. Tabelle 5 zeigt die Pegel- und Abflusswerte bei Zollenspieker (etwa 10 km unterhalb des Wehres Geesthacht) mit deren Überlagerung mit Sturmfluten im Zeitraum von 1962 – 1994.

Tab. 5: Pegel- und Abflusswerte Zollenspieker und deren Überlagerung mit den Sturmfluten 1962 und 1994

| Datum/Uhrzeit   | HW vor-aus | NW vor-aus | HHW gemessen | Q m <sup>3</sup> /s | Fiktiv + Q <sub>max</sub> |
|-----------------|------------|------------|--------------|---------------------|---------------------------|
| 22.8.2002/18.20 | 7,6        | 4,4        | 8,82         | 3380                |                           |
| 23.8.2002/2.45  | 7,6        | 4,4        | 8,74         | 3410                |                           |
| 17.2.1962/17.32 |            |            | 10,57        | 952                 |                           |
| 28.1.1994       |            |            | 11,27        | 1360                | <b>11,95</b>              |

HW=Hochwasser, NW=Niedrigwasser, HHW=Höchstes hochwasser, Q=Oberwasserzufluß, Quelle NLWK Lüneburg

Die gemessene Durchflussmenge laut Angabe der GKSS Geesthacht lag am 22./23.8.2002 in Neu Darchau bei 4300 m<sup>3</sup>/s (Q<sub>m</sub>~700 m<sup>3</sup>/s). Der bereinigte Höchstwert lag nach der Monatsliste des WSA Lauenburg am 23.8.2002 bei 3410 m<sup>3</sup>/s und am 22.8.2002 bei 3380 m<sup>3</sup>/s. Davon ausgehend, dass am 23.8. der tatsächliche astronomisch bedingte Hochwasserstand am Pegel Zollenspieker bei 7,6 m lag, so betrug die Erhöhung durch den Oberwasserzufluss 1,14 m, das entspricht 3,3 dm/1000 m<sup>3</sup>/s und übertrifft damit noch den durch das Dänische hydraulische Institut (DHI) ermittelten Wert von 2,5 dm (s.o.). Nur für Zollenspieker wird damit für ein Zusammentreffen des Elbehochwassers vom 23.8.2002 und der Sturmflut vom 28.1.1994 ein fiktiver Höchstwasserstand von  $0,33 \times (3410 - 1360) / 1000 + 11,27 = 11,95$  m errechnet was einem neuen Maximum entspräche!, vgl. Tabelle 5.

Am Beispiel einiger Sturmflutscheitelwasserstände wird in Tabelle 6 deren fiktive Erhöhung nach dem Modell des DHI in Klammern aufgelistet.

Tab.6: Sturmflutscheitelwerte mit in Klammern gesetzten fiktiven durch Oberwasserzufluss erhöhten Extremwerten nach den Werten des dänischen hydraulischen Institutes

| Datum         | CUX<br>m | Stadersand<br>m | St. Pauli<br>m | Zollenspieker<br>m | Neu Darchau<br>m | Zugeh.<br>Q(m <sup>3</sup> /s) |
|---------------|----------|-----------------|----------------|--------------------|------------------|--------------------------------|
| 16./17.2.1962 | 9,96     | 10,74(10,86)    | 10,70(10,93)   | 10,58(11,17)       | 4,02             | 1050                           |
| 3.1.1976      | 10,12    | 11,07(10,22)    | 11,45(11,74)   | 11,35(12,08)       | 2,43             | 492                            |
| 24.11.1981    | 9,53     | 10,37(10,47)    | 10,81(11,02)   | 11,00(11,52)       |                  | 1338                           |
| 27./28.2.1990 | 9,46     | 10,18(10,32)    | 10,75(11,02)   | 10,70(11,38)       | 3,07             | 674                            |
| 23.1.1993     | 9,36     | 10,18(10,32)    | 10,76(11,03)   | 10,70(11,36)       | 3,24             | 731                            |
| 28.1.1994     | 9,51     | 10,54(10,64)    | 11,02(11,22)   | 11,27(11,78)       | 4,67             | 1360                           |
| 5.2.1999      | 9,36     | 10,26(10,38)    | 10,74(10,99)   | 10,85(11,47)       | 3,77             | 937                            |
| 3./4.12.1999  | 9,55     | 10,39(10,55)    | 10,95(11,26)   | 10,70(11,46)       | 1,65             | 353                            |

Quelle: Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher

Aus den in Neu Darchau am 13.1.2003 gemessenen Oberwassermengen 3033 m<sup>3</sup>/s (Quelle: WSA Lauenburg, mündliche Mitteilung Frau Rieger) lässt sich ableiten, dass ein Auftreten eines Elbehochwasser zu Sturmflutzeiten nicht auszuschließen ist. Am 3.1.1976 hätte dieser Oberwasserzufluss (3033 m<sup>3</sup>/s) schon zu neuen höchsten Sturmflutscheitelwerten geführt! (Beispiel Zollenspieker:  $HHTW_{\text{fiktiv 1976 } Q_{3003}} = 0,25 \times (3033 - 492) / 1000 + 11,35 = 11,98\text{m}$ ).

Auf der Basis der Erkenntnis, dass die in der Elbe auftretenden Oberwassermengen deutlich über der Oberwassermenge liegen können, die in die Bemessungsgrundlagen für die Deiche an der Unterelbe eingeflossen sind, ist es notwendig die Bemessungsgrundlagen für die Deiche an der Unterelbe einer kritischen Betrachtung zu unterziehen.

#### 4. Einfluss von Baumaßnahmen in und an der Weser auf die Höhe der Wasserstände bei hohen Sturmfluten und normalen Wetterlagen

Die Weser-Ausbauten haben die Tidedynamik des Weser-Ästuars (Flussmündung der Weser) wesentlich verändert.

Ende des 19. Jahrhunderts begann der 5 m-Ausbau der Unterweser. Vor diesem ersten grundlegenden Ausbau der Unterweser konnten nur Schiffe mit einem Tiefgang von zwei Metern Bremen erreichen.

Die morphologischen und hydrologischen Folgen dieser und der weiteren Ausbauten gehen aus den Abbildungen 2 und 3 hervor:

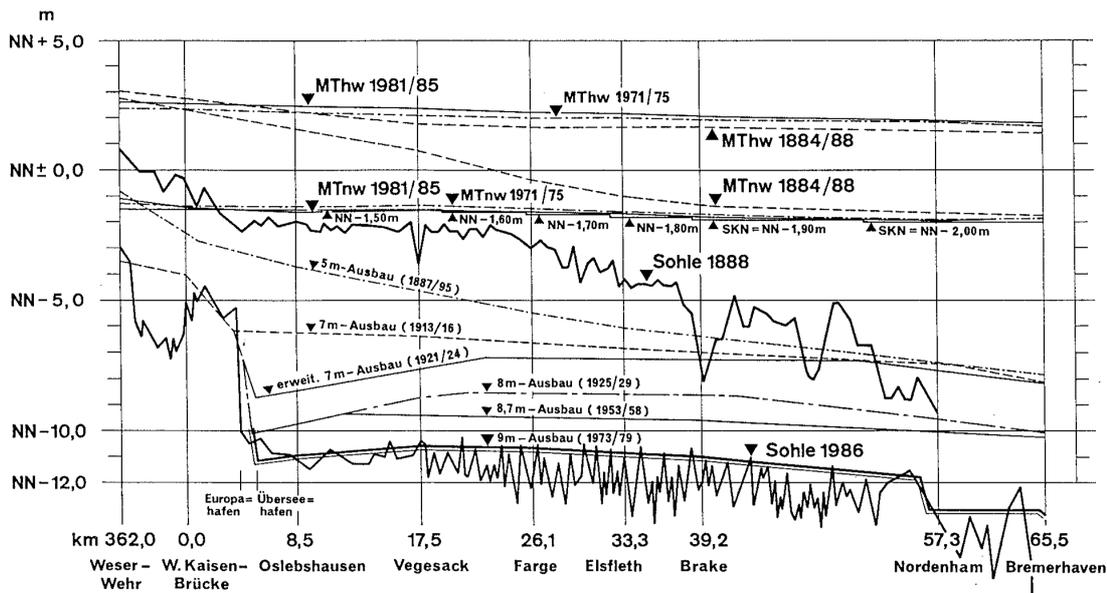


Abb. 2: Längsschnitt der Unterweser mit Lage der Flusssohle für die Ausbauzustände, Quelle: Wetzels, 1988

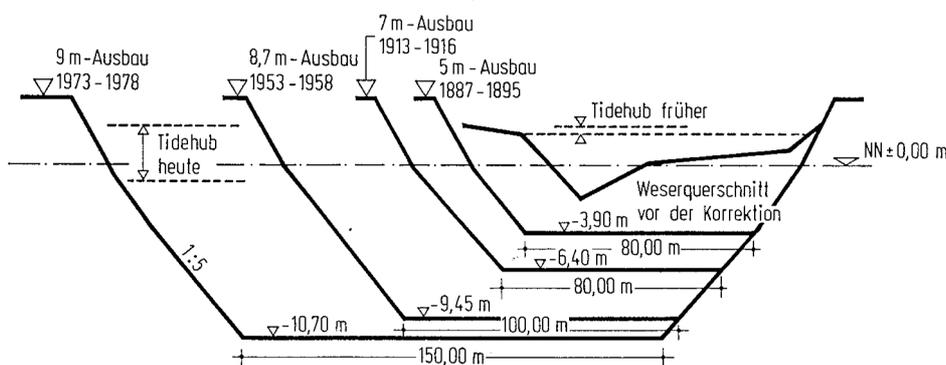


Abb. 3: Entwicklung der Ausbaquerschnitte der Weser bei Hasenbüren, Weser - km 11, Quelle: Wetzels, 1988

In der Abbildung 3 wird deutlich, wie stark das Querprofil der Weser verändert wurde. Sehr häufig wird der letzte große Unterweserausbau in seiner Dimension verkannt. Während sich die früheren 5 m-, 7 m-, 8 m-, 8,7 m-Ausbauten auf die zulässigen Schiffstiefgänge unter Ausnutzung der Tide bezogen, bedeutete der „9 m-Ausbau“ eine Vertiefung auf 9 m unter SKN (See-kartennull), dessen Ziel es war Schiffe mit 10,5 m Tiefgang in Bremen einfahren zu lassen. Es handelt sich hier also bei km 11 um eine Vertiefung von rd. 1,5 m bezogen auf NN und nicht um 30 cm! (8,7m Ausbau/9m Ausbau).

In Abbildung 2 sind die Veränderungen der mittleren Hoch- und Niedrigwasserstände durch die Ausbauten dargestellt. Diese werden in den nächsten beiden Grafiken, die ebenfalls den gleichen Zeitraum betreffen verdeutlicht: Der Tidenhub am Weserwehr hat sich zum größten deutschen Tidenhub entwickelt, und das an einer Stelle, wo es früher vor den Weserkorrekturen mit 12 cm fast keinen Tidenhub gab. Der mittlere Tidenhub lag 1980 bei 3,90 m am Weserwehr, heute liegt er bei 4,10 m.

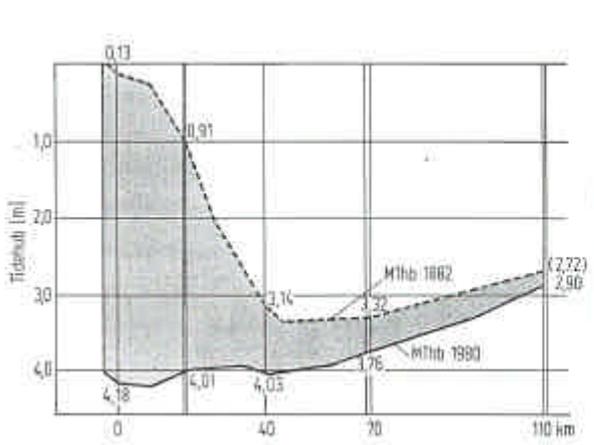


Abb. 4 Entwicklung des Tidehubs an der Weser

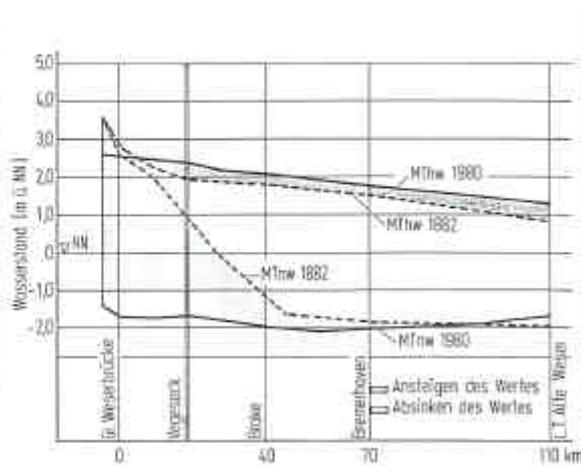


Abb. 5: Entwicklung der Tidewasserstände in der Weser, Quelle: Wetzel, 1988

Zum Vergleich wird die Änderung des Tidehubs noch einmal in Abbildung 6 bis zum Jahr 1999 fortgeschrieben. Die „normalen“ Tiden, die sich im Jahresmittel der Tidehoch- und -niedrigwasserstände (MThw und MTnw) und des daraus resultierenden mittleren Tidehubs (MTH) niederschlagen geben Hinweise auf ausbaubedingte Veränderungen der Tidedynamik. In ihrer Funktion als Indikatoren werden sie hier betrachtet. Die Systemänderung durch den Flussausbau im Fluss wird vor allem daran deutlich, dass sich die Relation der

Tidehübe in den sechziger und siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts grundsätzlich geändert hat. Diese ausbaubedingt erhöhten Tiden werden bei Sturmfluten vom Windstau überlagert und durch die ausbaubedingte ohnehin vorhandene „Grundhöhe“ (MThw) steigen gleichstarke Windstauereignisse im Innern der Ästuar höher an. Durch das innere sehr komplizierte „Kräftespiel“ der Sturmflutwelle fällt die ausbaubedingte Erhöhung der Sturmflutscheitel jedoch im Verhältnis zur Erhöhung des MThw nicht so groß aus.

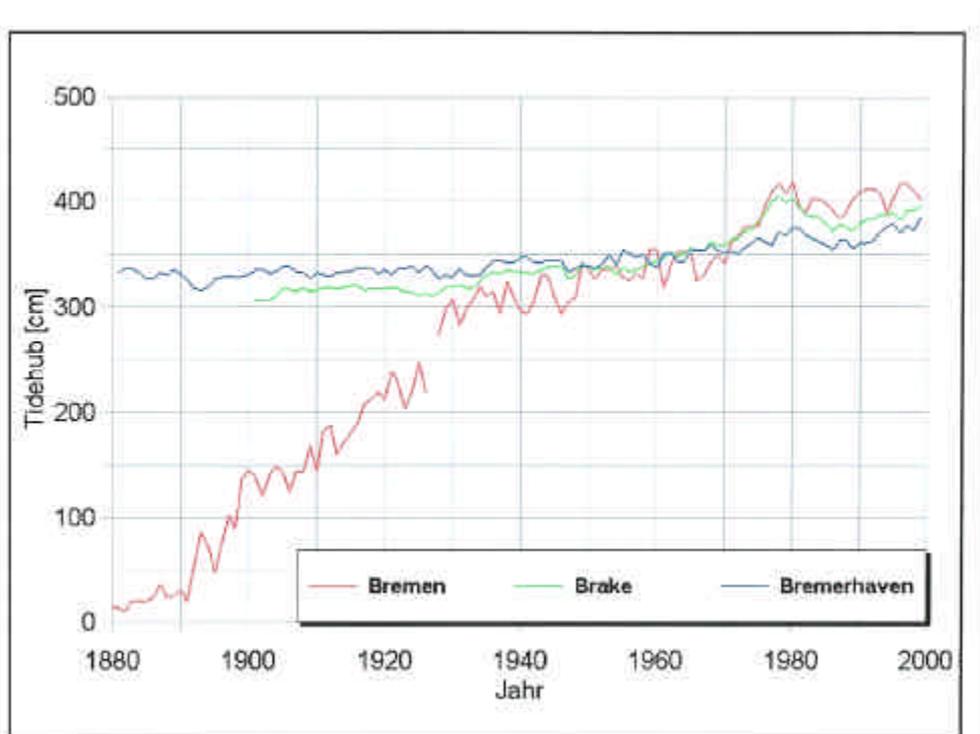


Abb. 6: Änderungen des Tidehubs (Jahresmittel) in der Unterweser von 1880-1999, Quelle: Niemeier, 2000

Anhand des in Abbildung 7 aufgetragenen Sturmflutgeschehens sind signifikante Änderungen des Sturmflutverhaltens in der Unterweser zu erkennen, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass sie mit den Weserausbauten, vor allem mit der Vertiefung und Verbreiterung zwischen 1973 und 1978 in ursächlichem Zusammenhang stehen. Der Verlauf

der Sturmfluten hat sich geändert: Die Scheitelwasserstände 1994 und 1995 liegen im Mündungsbereich deutlich niedriger als 1962 und 1976, im oberen Bereich des Ästuars liegen sie aber zum Teil deutlich höher, ohne dass dies auf einen gravierenden Oberwassereinfluß zu rückzuführen wäre.

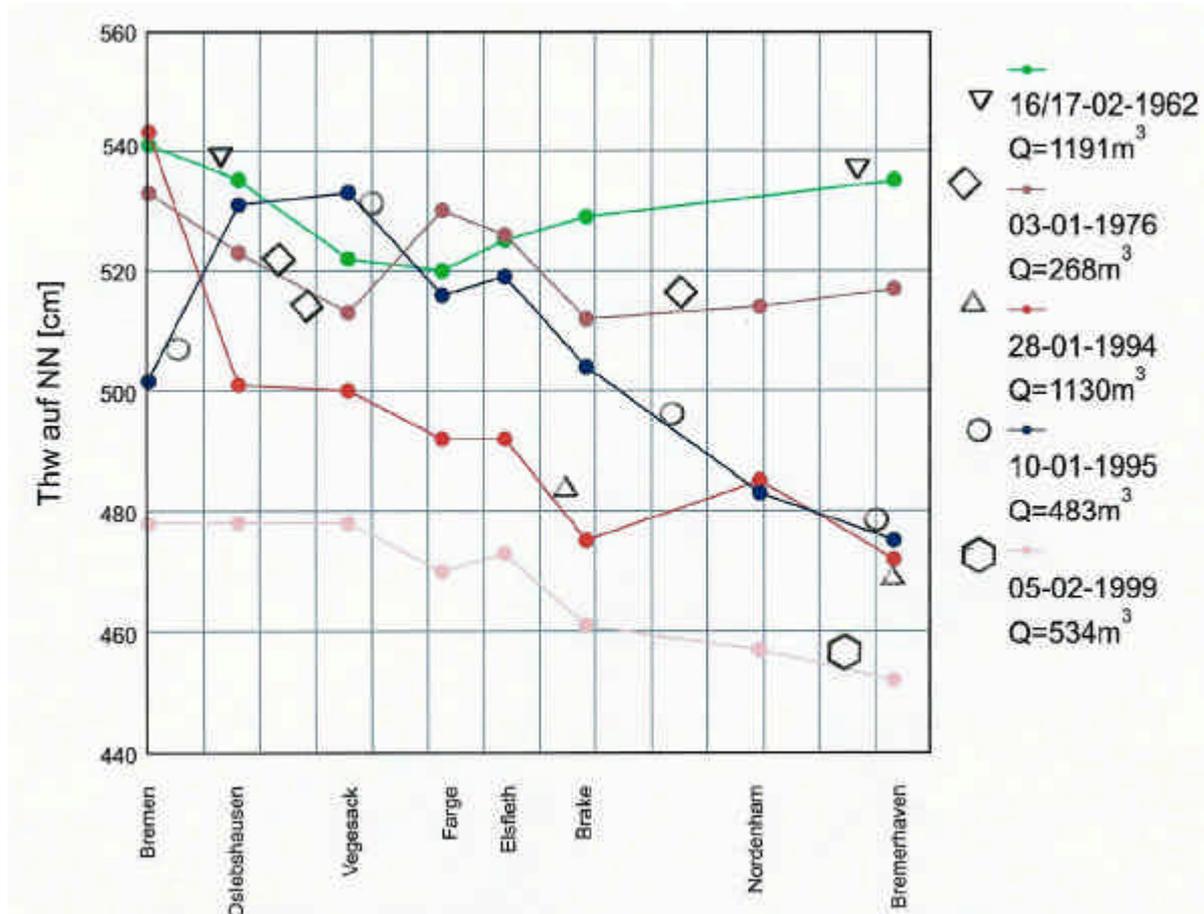


Abb. 7: Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Weser vom 16.2.1962 bis 5.2.1999, Quelle: Niemeier, 2000

Tabelle 7 zeigt 33 Sturmfluttiden mit deren Pegelständen und dem zugehörigen Oberwasserzufluß, gemessen in Intschede. Die aufgetragenen Sturmflutwasserstände zeigen die Veränderung des Verlaufes der Sturmfluten durch Baumaßnahmen, vor allem durch die umfangreiche Vertiefung und Verbreiterung der Unterweser zwischen 1973 und 1978:

Bei einer Betrachtung der Pegelwerte flussaufwärts von Bremerhaven ist zu erkennen, dass die Differenz zu Bremerhaven immer größer wird. Die Differenz des jeweiligen Pegelwertes zum Pegel Bremerhaven wird hier mit  $\Delta H$  bezeichnet, vgl. Tabelle 7. Die Ermittlung erfolgte in der Tabelle 1 (Anhang).

Tab. 7: Höchste Sturmflutscheitelwasserstände an der Unterweser 1941-1999

| Datum/Pegel    | HB`Haven   | Brake | Farge | Vege sack | HB-<br>Gr.Brücke | Intschede Q |
|----------------|--|-------|-------|-----------|------------------|-------------|
| km             | 66,7   | 39,2  | 26,3  | 17,9      | 0                |             |
| 18.10.1941     | 9,18   | 9,08  | 8,91  | 8,96      | 9,27             | 154         |
| 06.11.1952     | 8,57   | 8,57  | 8,61  | 8,71      | 8,82             | 399         |
| 22.12.1954     | 9,28   | 9,2   | 9,11  | 9,22      | 9,34             | 399         |
| 1953-1958      | 8,7m Ausbau:Vertiefung und Verbreiterung der Weser           |       |       |           |                  |             |
| 28/29.6.1960   | 7,98   | 8,06  | 8,05  | 8,17      | 8,28             | 116         |
| 21.03.1961     | 8,78   | 8,73  | 8,82  | 8,86      | 9,02             | 359         |
| 16./17.2.1962  | 10,35  | 10,31 | 10,22 | 10,23     | 10,42            | 1191        |
| 22.11.1963     | 8,4  | 8,57  | 8,68  | 8,75      | 8,88             | 119         |
| 24.02.1967     | 9,14   | 9,04  | 9,09  | 9,1       | 9,22             | 691         |
| 29.09.1969     | 8,3  | 8,37  | 8,41  | 8,52      | 8,64             | 171         |
|                | 10,5m Ausbau Vertiefung und Verbreiterung der Weser bis 1978 |       |       |           |                  |             |
| 19.11.1973     | 9,66   | 9,44  | 9,36  | 9,52      | 9,6              | 154         |
| 06.12.1973     | 9,72   | 9,48  | 9,46  | 9,55      | 9,6              | 310         |
| 14.12.1973     | 9,57   | 8,44  | 8,45  | 9,58      | 9,65             | 444         |
| 12.12.1974     | 8,49   | 8,74  | 8,92  | 9,02      | 9,24             | 965         |
| 29.12.1974     | 8,49   | 8,6   | 8,91  | 9,04      | 9,26             | 1095        |
| 03.01.1976     | 10,17  | 10,14 | 10,32 | 10,14     | 10,34            | 268         |
| 21.01.1976     | 9,88   | 9,89  | 9,96  | 9,95      | 10,12            | 704         |
| 31.12.1977     | 9,36   | 9,48  | 9,38  | 9,68      | 9,81             | 458         |
| 1973-1978      | 10,5m m Ausbau:Vertiefung und Verbreiterung der Weser        |       |       |           |                  |             |
| 24.11.1981     | 9,35   | 9,47  | 9,6   | 9,73      | 9,83             | 530         |
| 24./25.11.1981 | 9,32   | 9,45  | 9,72  | 9,75      | 9,81             | 529         |
| 02.02.1983     | 9,14   | 9,36  | 9,64  | 9,75      | 9,8              | 755         |
| 27.02.1990     | 9,42   | 9,6   | 9,74  | 9,8       | 9,87             | 451         |
| 28.02.1990     | 9,47   | 9,65  | 9,84  | 9,97      | 10,05            | 507         |
| 09.01.1991     | 8,35   | 8,6   | 8,9   | 9,12      | 9,36             | 914         |
| 20.12.1991     | 8,61   | 8,91  | 9,09  | 9,25      | 9,34             | 277         |
| 19.03.1992     | 8,04   | 8,39  | 8,63  | 8,86      | 9,06             | 582         |
| 19.11.1992     | 8,34   | 8,71  | 8,82  | 8,93      | 8,99             | 396         |
| 23.01.1993     | 9,65   | 9,58  | 9,75  | 9,85      | 9,93             | 734         |
| 07.01.1994     | 7  | 7,42  | 7,59  | 7,73      | 8,17             | 1890        |
| 28.01.1994     | 9,75   | 10,04 | 10,16 | 10,33     | 10,43            | 1130        |
| 10.01.1995     | 9,72   | 9,75  | 9,92  | 10        | 10,02            | 483         |
| 30.10.1996     | 8,83   | 9,11  | 9,35  | 9,4       | 9,55             | 253         |
| 02.10.1997     | 8,39   | 8,7   | 8,89  | 9,05      | 9,23             | 126         |
| 25./26.10.1998 | 8,4  | 8,72  | 8,98  | 9,14      | 9,24             | 624         |
| 05.02.1999     | 9,52   | 9,61  | 9,72  | 9,78      | 9,83             | 534         |

Anmerkung: die Sturmflutscheitelwerte von 1973 sind durch die auf Wunsch Bremens vorgezogenen und massiv auf 1973 konzentrierten Vertiefungsbaggerungen als gestörte Werte zu bezeichnen werden daher nicht weiter verfolgt, Quelle: Gewässerkundliche Jahrbücher, 1941-1999

Tab. 8: Differenzen der mittleren Sturmflutscheitelwasserstände gegenüber Bremerhaven

|           | Bremerhaven | Brake     | Farge     | Veogesack | Bremen gr. Weserbrücke |
|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| Jahre     | m? H (cm)   | m? H (cm) | m? H (cm) | m? H (cm) | m? H (cm)              |
| 1941-1954 | 0           | -6        | -13       | -5        | 13                     |
| 1960-1969 | 0           | 2         | 5         | 11        | 25                     |
| 1973      | 0           | -53       | -56       | 10        | -3                     |
| 1974-1977 | 0           | 9         | 22        | 29        | 46                     |
| 1981-1999 | 0           | 22        | 41        | 54        | 66                     |

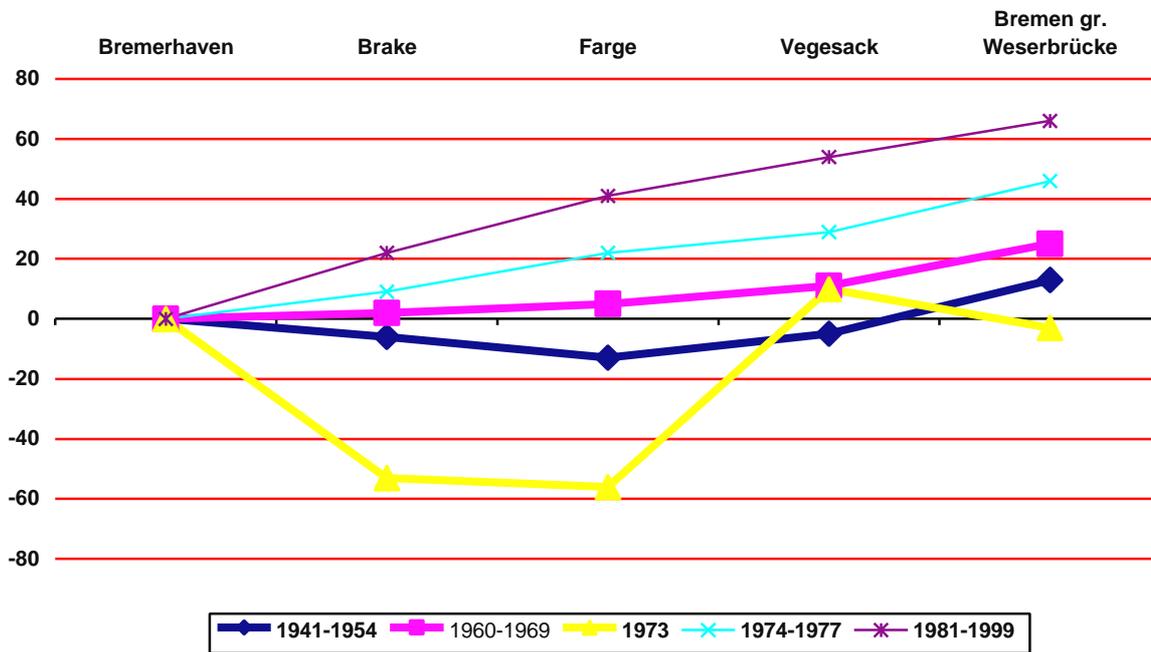


Abb. 8: Mittlere Sturmflutscheiteldifferenzen ?H aus den Sturmflutscheitelwasserständen der Tab. 6

Die Änderung der Verläufe der Sturmflutscheitelwasserstände nach den Ausbaumaßnahmen 1953-1958 und während bzw. nach den Ausbauten 1973-1978 sind eindeutig aus den geänderten Tideverläufen ablesbar. Modelluntersuchungen, wie sie für die Elbe vom DHI durchgeführt wurden, würden bei der Gefahrenabschätzung für spätere Sturmfluten und Ausbauten an der Weser hilfreich sein.

Welchen Einfluß ein extremer Oberwasserzufluß auf die Sturmflutscheitelwasserstände hätte lässt sich hier leider nicht ablesen, da außer den Oberwasserzuflussmengen auch die Steuerung des Weser-Wehres eine Rolle spielt.

## 5. Einfluss von Baumaßnahmen in und an der Ems auf die Höhe der Wasserstände bei hohen Sturmfluten und normalen Wetterlagen

Die Ausbauten der Ems, vor allem zwischen Emden und Papenburg haben zu einer deutlichen Änderung der Tidedynamik geführt.

Die Unterems wurde in den Jahren von 1981 bis 1994 viermal vertieft. Die Veränderungen Fortschrittsge-  
schwindigkeit des Tidewellen-Scheitels und damit der Eintrittszeitpunkte der Extremwasserstände bei Sturmfluten in den Jahren von 1981 bis 2003 sind in der nachfolgenden Tabelle 8 dargestellt. Aus den Daten ist

zu entnehmen, dass sich die Fortschrittsgeschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels in diesem Zeitraum signifikant erhöht hat: Zwischen Emden und Herbrum beträgt diese Geschwindigkeitserhöhung 75% und zwischen Leer und Papenburg beträgt sie sogar 250%. Sie

liegt heute also bei dem 3,5 – fachen des Wertes von 1981 in diesem Emsabschnitt. Wenn ein Tidescheitelwasserstand Leer erreicht, so dauert es nur noch 7 Minuten bis der Extremwert in Papenburg abzulesen ist! Vor den Ausbauten (bis 1981) lagen hier 35 Min dazwischen!

Tab. 9: Veränderung der mittleren Geschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels nach den aml. Gezeitenkalendern 1981-2003 zwischen Emden und Herbrum

| Fortschrittsgeschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels | m/s        | m/s            | m/s               | m/s           |
|--|------------|----------------|-------------------|---------------|
|  | Emden-Leer | Leer-Papenburg | Papenburg-Herbrum | Emden-Herbrum |
| Flut 1981  | 7,2        | 7              | 7,4               | 7,1           |
| Flut 2003  | 11,3       | 24,5           | 9,3               | 12,4          |
| Ebbe 1981  | 3,8        | 4,3            | 4,1               | 3,9           |
| Ebbe 2003  | 4,4        | 5,1            | 3,6               | 4,3           |

Im gleichen Zeitraum von 1981 bis 2003 stieg der Tidenhub stark an, vgl. Tabelle 10:

Tab. 10: Signifikante Veränderungen des mittleren Hoch- und Niedrigwassers und des Tidenhubes 1981 bis 2001 (nach den amtlichen Gezeitenkalendern)

| Ort       | MTH  |      |         | MHW  |      |         | MNW  |      |         |
|-----------|------|------|---------|------|------|---------|------|------|---------|
|           | 1981 | 2001 | Zunahme | 1981 | 2001 | Zunahme | 1981 | 2001 | Abnahme |
| Emden     | 3,1  | 3,3  | +20 cm  | 1,3  | 1,4  | 10 cm   | -2,0 | -1,9 | -10 cm  |
| Pogum     | 3,0  | 3,3  | +30 cm  | 1,4  | 1,5  | 10 cm   | -1,6 | -1,8 | -20 cm  |
| Leerort   | 2,8  | 3,3  | +50 cm  | 1,5  | 1,7  | 20 cm   | -1,3 | -1,6 | -30 cm  |
| Weener    | 2,7  | 3,4  | +70 cm  | 1,6  | 1,8  | 20 cm   | -1,1 | -1,6 | -50 cm  |
| Papenburg | 2,5  | 3,4  | +90 cm  | 1,6  | 1,8  | 20 cm   | -0,9 | -1,6 | -70 cm  |
| Herbrum   | 2,3  | 2,8  | +50 cm  | 1,8  | 2,0  | 20 cm   | -0,5 | -0,8 | -30 cm  |

Quelle: Roberz, 2002

Nach der Sturmflut vom 28.1.1994 wurde deutlich, dass die Veränderung der Tidedynamik auch Einfluss auf den Ablauf und die Höhe der Sturmfluten und damit auf die Bemessungswasserstände für die Deiche an der Unterems hatte. Erste Fallstudien (Niemeyer 1997) ergaben eindeutige Anzeichen für einen veränderten Ablauf von Sturmfluten. An den Pegeln Herbrum, Rheede, Papenburg und Weener traten die höchsten je gemessenen Scheitelwasserstände auf, während in Emden und Borkum die Scheitelwasserstände vom 28.1.1994 deutlich niedriger waren als am 13.3.1906 und am 16.2.1962. Dort erreichten sie in etwa die Scheitel vom 3./4.1.1976.

Aus Abbildung 9 wird der unterschiedliche Verlauf der Sturmfluttiden vor und nach den Emsausbauten sichtbar. Die Sturmfluten vor den Ausbauten (1962 und 1976) lagen bei Borkum deutlich niedriger als die beiden anderen, die nach den Ausbauten aufliefen. Der ausbaubedingte Anstieg der Fluten von 1994 und 1995 ab Pogum bis Leerort ist deutlich steiler, als der der Fluten vor dem Ausbau. Die bei Borkum gegenüber der 1962er Flut deutlich niedrigere 1994er Flut erreicht schon in Leerort den Wert vom 17.2.1962. Im weiteren Verlauf ist die 1994er Flut in Papenburg und Herbrum deutlich höher als die 1962er und führt dort zu neuen Höchstwasserständen, unabhängig vom damals zugehö-

rigen Oberwasserzufluß (nur 347 Kubikmeter pro Sekunde) der Ems.

Wie schon in den Kapiteln über die Elbe und Weser dargestellt geben die „normalen“ Tiden, die sich im Jahresmittel der Tidehoch- und -niedrigwasserstände und des daraus resultierenden mittleren Tidenhubs im Zusammenhang mit der mittleren Veränderung der Geschwindigkeit des Tidewellen-Scheitels deutlich Auskunft über ausbaubedingte Veränderungen der Ti-

dedynamik. Diese ausbaubedingt erhöhten Tiden werden bei Sturmfluten vom Windstau überlagert und steigen durch die ausbaubedingt ohnehin vorhandene „Grundhöhe“ (MThw) bei gleichstarken Windstauereignissen im Innern der Ästuar höher an. Durch das innere „Kräftespiel“ der Sturmflutwelle fällt die ausbaubedingte Erhöhung der Sturmflutscheitel jedoch im Verhältnis zur Erhöhung des MThw nicht so groß aus.

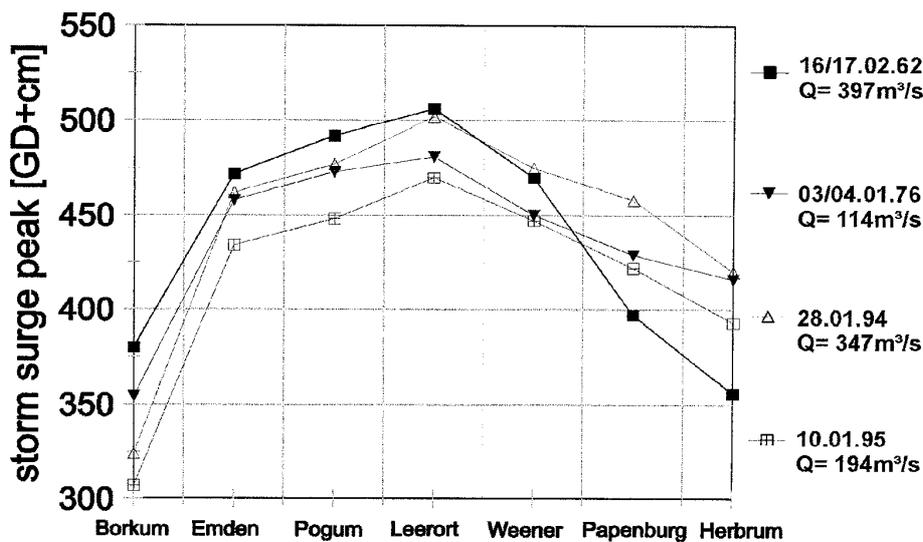


Abb. 9: Sturmflutscheitelwasserstände mit zugeordneten Oberwasserabflüssen am Pegel Versen (storm surge peak = Sturmflutscheitelwasserstand), Quelle: Niemeier & Kaise, 2000

## 6. Einfluss des Oberwasserzuflusses der Ems auf die Sturmflutwasserstände in der Unterems

Abschließend bleibt für die Ems noch der Blick auf die Oberwasserzuflüsse am Pegel Versen vgl. Abb. 9. Der maximale gemessene Durchfluss lag am 12.2.1946 mit einem Pegelstand von 5,46 m bei 1200 m<sup>3</sup>/s.

Ein solcher höchster Abfluss der Ems würde den Sturmflutscheitel der Ems abwärts bis Leer deutlich erhöhen. Da ein solches Zusammentreffen von höchstem Oberwasserzufluß (12.2.1946) und höchstem Sturmflutwasserstand (28.1.1994) jahreszeitlich bedingt nicht auszuschließen ist, sollten hier weitere Untersuchungen zur Überprüfung der Bemessungswerte für die Deiche eingeleitet werden. Allerdings sind hier die

Funktion und die Auswirkungen des Emssperrwerks zu berücksichtigen.

## 7. Auswirkungen weiterer Vertiefungen der Flussunterläufe auf die Hochwassergefahr

Die bisherigen Vertiefungen und Ausbauten der Flussunterläufe haben zu einem deutlichen Anstieg der Wasserstände in den oberen Abschnitten der Ästuar bei Sturmfluten geführt. Weitere Flussvertiefungen und Ausbauten werden dazu führen, dass bei Sturmfluten noch größere Wassermassen in Flüsse eindringen können und die Wasserstände erneut angehoben werden. Seit den Erfahrungen mit der Hochwasserwelle an der Elbe im Sommer 2002 ist eine Überprüfung der Bemessungsgrundlagen, d.h. insbesondere die zu berücksichtigende Oberwassermenge, für die Deiche dringend

erforderlich. Erste Berechnungen zeigen, dass ein Zusammentreffen einer derartigen Oberwassermenge, wie angenommenen höchsten Wasserstände deutlich erhöhen werden.

## **8. Auswirkungen eines Klimawandels auf den Hochwasserschutz**

Die Folgen eines Klimawandels werden insbesondere für den Hochwasserschutz an den Flussunterläufen eine wichtige Rolle spielen. Zu diesen Folgen gehören vor-

am 23.03.2002, mit einer großen Sturmflut die bisher aussichtlich eine Zunahme von Oberwassermengen in den Flüssen sowie ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg. D.h., an den Hochwasserschutz in den Flussunterläufen werden sowohl erhöhte Anforderungen durch das Eindringen größerer Wassermassen aus der Nordsee bei Sturmfluten und andererseits durch größere Oberwasserzuflüsse gestellt.

## 9. Literatur

- Claus, B. (1998): WWF/BUND, Länderübergreifendes Schutzkonzept für die Ästuarie Elbe, Weser und Ems, Bremen.
- Flügel, H. (1976): Die Entwicklung der Zufahrtswege zu den bremischen Häfen 1960-1976, Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft 1975/76 Bd. 35, Berlin.
- Flügel, H. (1988): 100 Jahre Korrektur der Unterweser und Hafenbau in Bremen, Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft 1987 Bd. 42, Berlin.
- Führböter, A. (1976): Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste, Mitteilungen des Leichtweiss Institutes für Wasserbau TU Braunschweig Heft 51.
- Führböter, A. & Jensen J. (1985): Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der deutschen Bucht, Die Küste, Sonderdruck aus Heft 42.
- Deutsches Hydrographisches Institut Hamburg (BSH) (1990-2003): Gezeitentafeln 1962-1989.
- Freie – und Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafenbau und NLÖ (1941-1999): Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher Elbe-, Weser- und Emsgebiet, Jahrgänge 1941-1999
- Dirksen, J. & Reiner, W. (1988): Planung des neuen Weserwehres in Bremen, Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft 1987 Bd. 42, Berlin.
- Ing.-Kommission (1979): Erfahrungen und Folgerungen aus den Januarsturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen, Die Küste, H33.
- Jensen, J. (1984): Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste, Mitteilungen des Leichtweiss Institutes für Wasserbau TU Braunschweig Heft 83.
- Länderarbeitsgruppe (1988): Bemessungswasserstände entlang der Elbe, Die Küste Heft 47.
- Niemeyer, H. (1997): Überprüfung der Bestickhöhen von Deichstrecken an der Unterems, Dienstbericht 5/97, unveröffentlicht, Norderney.
- Niemeyer, H. & Kaiser, R. (2000): Evaluation of design water levels and design run-up for estuarine coastal protection master plan, Intern. Conf. o. coast. Eng.(ICCE).
- Niemeyer, H. (2000): Prüfung der Sturmflutsicherheit in Brake zwischen Weserlust und Haus Linne, unveröffentlicht, Norderney.
- Siefert, W. & Havnoe, K. (1988): Einfluß von Baumaßnahmen in und an der Tideelbe auf die Höhen hoher Sturmfluten, Die Küste Heft 47.
- Siefert, W. (1995): Das Sturmflutgeschehen in der Tideelbe und der Einfluß von Fahrrinnenvertiefungen, Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft 1994 Bd. 49, Hamburg.
- Wetzel, V. (1988): Der Ausbau des Weserfahrwassers von 1921 bis heute, Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft 1987 Bd. 42, Berlin.
- Roberz, P. (2002): Auswirkungen der Emsausbauten seit 1980, unveröffentlicht Belm

## 10. Anhang

Tab. 1: Anlage Sturmflutschwellewasserstände an der Unterweser mit Höhenunterschieden  $\Delta H$  gegenüber Bremerhaven

| Datum/Pegel    | HB' Haven | $\Delta H$      | Brake | $\Delta H$      | Farge | $\Delta H$       | Vege sack | $\Delta H$       | HB-Gr.Brücke | Intschede |
|----------------|-----------|-----------------|-------|-----------------|-------|------------------|-----------|------------------|--------------|-----------|
| Km             | 66,7      | Brake/Hb' haven | 39,2  | Farge/HB' haven | 26,3  | Vege s/Hb' haven | 17,9      | Gr.Brü/HB' Haven | 0            | Q (m3/s)  |
| 18.10.1941     | 9,18      | -0,1            | 9,08  | -0,27           | 8,91  | -0,22            | 8,96      | 0,09             | 9,27         | 154       |
| 06.11.1952     | 8,57      | 0               | 8,57  | 0,04            | 8,61  | 0,14             | 8,71      | 0,25             | 8,82         | 399       |
| 22.12.1954     | 9,28      | -0,08           | 9,2   | -0,17           | 9,11  | -0,06            | 9,22      | 0,06             | 9,34         | 399       |
| 28/29.6.1960   | 7,98      | 0,08            | 8,06  | 0,07            | 8,05  | 0,19             | 8,17      | 0,3              | 8,28         | 116       |
| 21.03.1961     | 8,78      | -0,05           | 8,73  | 0,04            | 8,82  | 0,08             | 8,86      | 0,24             | 9,02         | 359       |
| 16./17.2.1962  | 10,35     | -0,04           | 10,31 | -0,13           | 10,22 | -0,12            | 10,23     | 0,07             | 10,42        | 1191      |
| 22.11.1963     | 8,4       | 0,17            | 8,57  | 0,28            | 8,68  | 0,35             | 8,75      | 0,48             | 8,88         | 119       |
| 24.02.1967     | 9,14      | -0,1            | 9,04  | -0,05           | 9,09  | -0,04            | 9,1       | 0,08             | 9,22         | 691       |
| 29.09.1969     | 8,3       | 0,07            | 8,37  | 0,11            | 8,41  | 0,22             | 8,52      | 0,34             | 8,64         | 171       |
| 19.11.1973     | 9,66      | -0,22           | 9,44  | -0,3            | 9,36  | -0,14            | 9,52      | -0,06            | 9,6          | 154       |
| 06.12.1973     | 9,72      | -0,24           | 9,48  | -0,26           | 9,46  | -0,17            | 9,55      | -0,12            | 9,6          | 310       |
| 14.12.1973     | 9,57      | -1,13           | 8,44  | -1,12           | 8,45  | 0,01             | 9,58      | 0,08             | 9,65         | 444       |
| 12.12.1974     | 8,49      | 0,25            | 8,74  | 0,43            | 8,92  | 0,53             | 9,02      | 0,75             | 9,24         | 965       |
| 29.12.1974     | 8,49      | 0,11            | 8,6   | 0,42            | 8,91  | 0,55             | 9,04      | 0,77             | 9,26         | 1095      |
| 03.01.1976     | 10,17     | -0,03           | 10,14 | 0,15            | 10,32 | -0,03            | 10,14     | 0,17             | 10,34        | 268       |
| 21.01.1976     | 9,88      | 0,01            | 9,89  | 0,08            | 9,96  | 0,07             | 9,95      | 0,24             | 10,12        | 704       |
| 31.12.1977     | 9,36      | 0,12            | 9,48  | 0,02            | 9,38  | 0,32             | 9,68      | 0,45             | 9,81         | 458       |
| 24.11.1981     | 9,35      | 0,12            | 9,47  | 0,25            | 9,6   | 0,38             | 9,73      | 0,48             | 9,83         | 530       |
| 24./25.11.1981 | 9,32      | 0,13            | 9,45  | 0,4             | 9,72  | 0,43             | 9,75      | 0,49             | 9,81         | 529       |
| 02.02.1983     | 9,14      | 0,22            | 9,36  | 0,5             | 9,64  | 0,61             | 9,75      | 0,66             | 9,8          | 755       |
| 27.02.1990     | 9,42      | 0,18            | 9,6   | 0,32            | 9,74  | 0,38             | 9,8       | 0,45             | 9,87         | 451       |
| 28.02.1990     | 9,47      | 0,18            | 9,65  | 0,37            | 9,84  | 0,5              | 9,97      | 0,58             | 10,05        | 507       |
| 09.01.1991     | 8,35      | 0,25            | 8,6   | 0,55            | 8,9   | 0,77             | 9,12      | 1,01             | 9,36         | 914       |
| 20.12.1991     | 8,61      | 0,3             | 8,91  | 0,48            | 9,09  | 0,64             | 9,25      | 0,73             | 9,34         | 277       |
| 19.03.1992     | 8,04      | 0,35            | 8,39  | 0,59            | 8,63  | 0,82             | 8,86      | 1,02             | 9,06         | 582       |
| 19.11.1992     | 8,34      | 0,37            | 8,71  | 0,48            | 8,82  | 0,59             | 8,93      | 0,65             | 8,99         | 396       |
| 23.01.1993     | 9,65      | -0,07           | 9,58  | 0,1             | 9,75  | 0,2              | 9,85      | 0,28             | 9,93         | 734       |
| 07.01.1994     | 7         | 0,42            | 7,42  | 0,59            | 7,59  | 0,73             | 7,73      | 1,17             | 8,17         | 1890      |
| 28.01.1994     | 9,75      | 0,29            | 10,04 | 0,41            | 10,16 | 0,58             | 10,33     | 0,68             | 10,43        | 1130      |
| 10.01.1995     | 9,72      | 0,03            | 9,75  | 0,2             | 9,92  | 0,28             | 10        | 0,3              | 10,02        | 483       |
| 30.10.1996     | 8,83      | 0,28            | 9,11  | 0,52            | 9,35  | 0,57             | 9,4       | 0,72             | 9,55         | 253       |
| 02.10.1997     | 8,39      | 0,31            | 8,7   | 0,5             | 8,89  | 0,66             | 9,05      | 0,84             | 9,23         | 126       |
| 25./26.10.1998 | 8,4       | 0,32            | 8,72  | 0,58            | 8,98  | 0,74             | 9,14      | 0,84             | 9,24         | 624       |
| 05.02.1999     | 9,52      | 0,09            | 9,61  | 0,2             | 9,72  | 0,26             | 9,78      | 0,31             | 9,83         | 534       |