

Neue Siele und Schöpfwerke in Ostfriesland

Von Johann Kramer

Summary

New sluices and pumping stations have been built during the past twenty years in Ostfriesland. They are requested to improve the agricultural conditions which depend on sufficient drainage of the alluvial land along the coast of the North Sea. The basic hydraulic data about design of sluices and pumping stations are discussed and their construction described. In consequence of the reinforcement of the coastal protection with new dike lines the situation of the new plants with storage inside and channels through the shallows outside is fixed. Special problems of foundation and use of reinforced concrete are discussed. The function of the mechanical equipment, sluice gates with hydraulic drive, pumps with gear and electromotor, indexing mechanism, controlling apparatus, etc. is explained.

Inhalt

I. Einleitung	47
II. Erfordernis neuer Siele und Schöpfwerke	
1. Veranlassung	48
2. Abflußleistung der Siele	50
3. Förderleistung der Schöpfwerke	51
III. Die Mündungsbauwerke mit den dazugehörigen Anlagen	
1. Die Lage der Mündungsbauwerke	53
2. Anordnung von Siel- und Pumpenläufen	57
3. Speicherbecken oder Mahlbussen	59
4. Außentief	61
IV. Ingenieurbau	
1. Gründung	62
2. Stahlbetonbau	64
V. Maschinelle Einrichtungen der Mündungsbauwerke	
1. Sielverschlüsse	66
2. Pumpenaggregate und zugehörige Einrichtungen	69
VI. Schlußbetrachtung	73
VII. Schriftenverzeichnis	73

I. Einleitung

Entlang unserer Küste herrscht zur Zeit ein reges Baugeschehen: Deiche werden erhöht, um den Küstenschutz zu verstärken, Siele und Schöpfwerke gebaut, um die Entwässerung in den deichgeschützten Marschen und Mooren zu verbessern. Wohl nie zuvor sind im Küstengebiet derartig umfangreiche Arbeiten in so kurzer Zeit ausgeführt worden, stehen vor dem Abschluß, sind in Vorbereitung oder in der Planung. Mit sehr hohen finanziellen Beihilfen des Bundes und des Landes im Rahmen des Küstenprogrammes wird es den Deich- und Entwässerungsverbänden ermöglicht, die Küste gegen Sturmfluten zu sichern und die Binnenentwässerung so zu verbessern, daß sie den landwirtschaftlichen Erfordernissen entspricht.

Der vorliegende Beitrag beinhaltet den Neubau von Sielen und Schöpfwerken, die gewissermaßen als Bindeglied zwischen Binnenentwässerung und Küstenschutz angesehen werden

können. Die Mündungsbauwerke, wie sie auch genannt werden, sind in ihren Durchflußöffnungen nach der Abflußmenge und in ihrem Baukörper mit Verschlusseinrichtungen nach den Sturmflutwasserständen zu bemessen, um beiden Erfordernissen zu genügen.

Bei der Bauweise der Siele und Schöpfwerke ist ein technischer Fortschritt zu verzeichnen, der sich aus den Erkenntnissen vorhergehender Anlagen ergibt. Diese Darlegungen beschränken sich auf die größeren Mündungsbauwerke im ostfriesischen Raum, an deren Beispiel die planerischen, bautechnischen und betrieblichen Probleme dargelegt werden sollen. Es wird jedoch nur auf die für den Bau von Mündungsbauwerken bedeutsamen Fragen eingegangen. Die Beschreibung aller Einzelheiten verbietet der Umfang und ist auch nicht notwendig, da es sich dabei um allgemeine Probleme des Ingenieurbaues handelt.

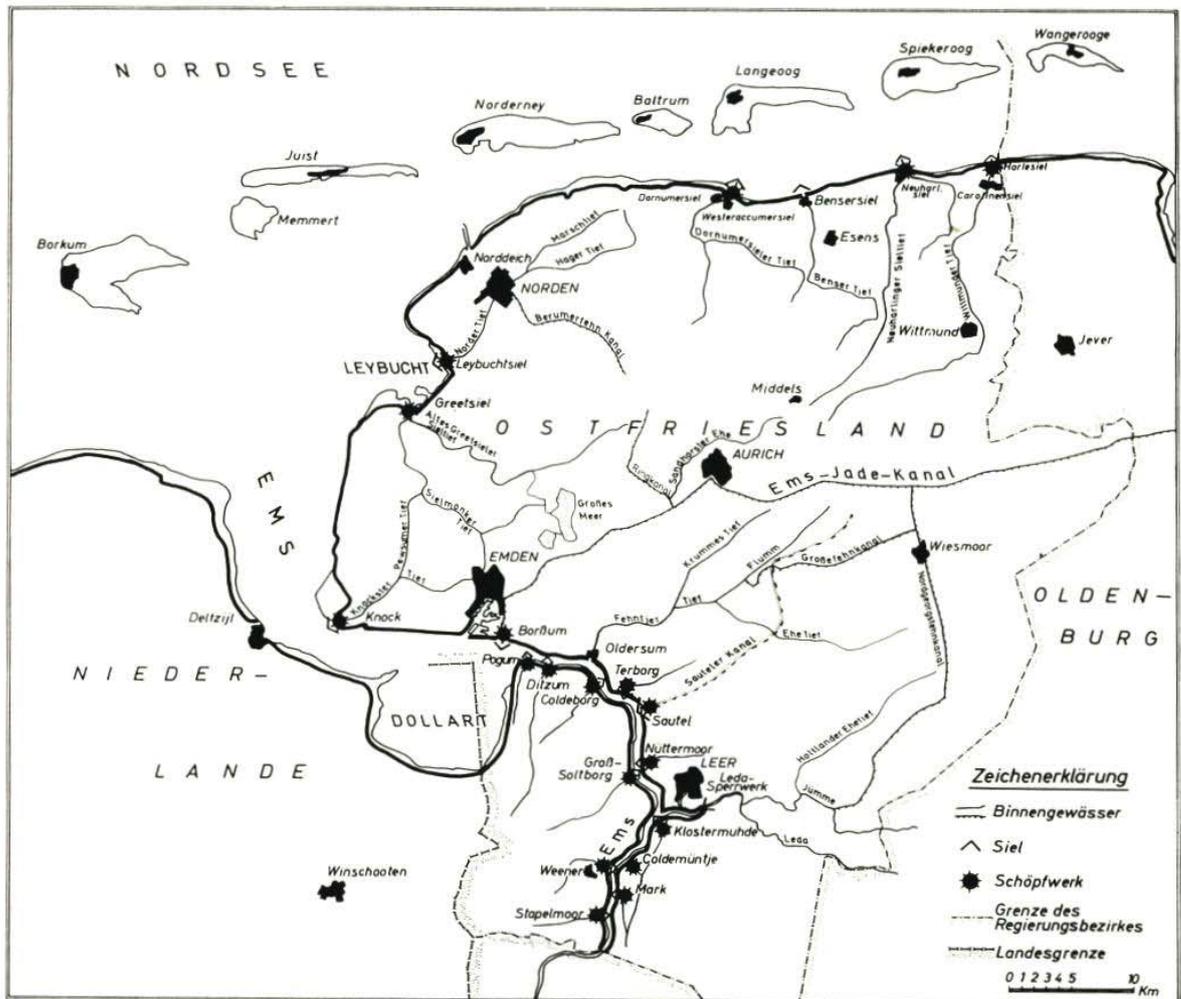


Abb. 1. Ostfriesland. Übersichtskarte mit den seit 1950 neuerbauten Sielen und Schöpfwerken

II. Erfordernis neuer Siele und Schöpfwerke

1. Veranlassung

Die Binnengewässer Ostfrieslands (Abb. 1) münden in die Nordsee, Ems oder Jade, so daß die natürliche Entwässerung von der Leistung der Siele in den Deichen abhängig ist. Ihre Einzugsgebiete liegen niedrig, beginnend mit den deichnahen Marschen mit Höhenlagen um

MThw, nach binnenwärts fallend auf NN, und an den tiefsten Stellen Ostfrieslands bis zu $-2,0$ m NN, d. h. bis mehrere Dezimeter unter MTnw. Niederungen an den Wasserläufen, oft mit Mooren bedeckt, dehnen sich bis zur Geest hin aus, die flach ansteigt und ihre höchsten Erhebungen mit $+18,0$ m NN hat. Der Binnenwasserstand muß jedoch wegen der großen tiefliegenden Flächen bis zum Geestrand unterhalb NN gehalten werden, so daß nur um Tideniedrigwasser täglich zweimal für einige Stunden durch die Siele das Wasser abfließen kann. Der größte Teil Ostfrieslands ist somit ein tidebeeinflußtes Gebiet, in dem der Binnenabfluß von den Tidewasserständen abhängig ist.

Viele der in den letzten Jahren durch Neubauten ersetzten Siele entstanden im 18. Jahrhundert. Sie wurden nach den damaligen Erfordernissen für die Binnenentwässerung bemessen, sind aber völlig ungenügend für die heutige intensive landwirtschaftliche Nutzung. Sie genügten zur Zeit ihres Baues, da sie im allgemeinen nur der Entwässerung der Marschen dienten, weil Geest und Moor noch wenig erschlossen waren und die Marschbauern sich vielfach erfolgreich dagegen wehrten, aus den Obergebieten in unbegrenzter Menge den Wasserabfluß aufzunehmen, wozu sie Schutzdeiche, sogenannte Wehrdeiche oder Sietwendungen, anlegten. Die Niederschläge



Abb. 2.
Überschwemmungen nach
starken Niederschlägen im
September 1968

aus der Marsch waren bereits durch die Siele abgeflossen, wenn die verhältnismäßig ausgeglichenen Abflüsse von der Geest und aus den Mooren die Siele erreichten. Vor allem die Moore, aber auch die in früherer Zeit ausgedehnteren Waldungen hielten das Wasser zurück und ließen es langsamer, ohne die heute kennzeichnenden Hochwasserwellen, abfließen (KRAUSE 1959).

Die im 19. Jahrhundert bis zur Gegenwart schnell fortschreitende Kultivierung der ausgedehnten Moorgebiete Ostfrieslands mußte dazu führen, daß der Wasserandrang immer größer wurde. Zusammen mit dem Abfluß aus den höherliegenden und ebenfalls intensiver genutzten Geestgebieten ergibt sich, daß in niederschlagsreichen Zeiten weite Niederungsgebiete unter übermäßigem Wasserandrang zu leiden haben und überschwemmt werden (Abb. 2).

Sielneubauten waren die Folge, bei denen — wie schon in früheren Jahrhunderten bei Neubauten — mehrere Siele zusammengelegt wurden. Die neuen Siele erhielten größere Querschnitte, wodurch sie leistungsfähiger für die Binnenentwässerung wurden. Daneben stieg die Spülkraft im Außentief infolge der größeren abfließenden Wassermenge, wodurch der natürlichen Verschlickung der Außentiefe entgegengewirkt wurde.

Fast neben jedem Siel ist heute ein Schöpfwerk notwendig (Abb. 1), so daß in den meisten Fällen neue Bauwerke errichtet werden mußten, die Siel- und Schöpfwerksanlagen zusammen-

fassen. An Stellen wo noch Siele bestanden, die erst in neuer Zeit errichtet worden waren, wie in Leybuchtziel im Jahre 1928, wurde zum Siel zusätzlich ein Schöpfwerk gebaut. Ein zusätzliches Schöpfwerk ist auch in Greetsiel errichtet worden, wo zwei Siele vorhanden sind, die jedoch beide wegen starker Verschlickung ihrer Außentiefe, die im Zusammenhang mit der Verlandung der Leybucht steht, geschlossen werden mußten. An anderer Stelle, wie in Benseriel, beschränkt sich der Neubau auf das Siel, durch dessen Zubringer ausschließlich das Niederschlagswasser von der höher gelegenen Geest mit natürlichem Gefälle abgeführt wird. Der Wasserspiegel des Binnentiefs, das zwischen Deichen geführt wird, kann so angespannt werden, daß auch bei Tidehochwasser noch anhaltender Sielzug möglich ist.

Wenn so nach wenigen Jahren fast alle alten Siele durch neue mit größeren Querschnitten ersetzt und gleichzeitig leistungsfähige Schöpfwerke errichtet sein werden, ist es — von den Mündungsbauwerken her gesehen — möglich, den Binnenwasserabfluß in Ostfriesland im Interesse der Landwirtschaft ausreichend zu beherrschen. Gleichfalls entsprechen sie dann den Anforderungen des Küstenschutzes, indem sie in stärkerer Bauweise der Deichsicherheit genügen.

Langjährige Beobachtungen zeigen, daß häufig großer Binnenwasserandrang mit Zeiten erhöhter Tidewasserstände zusammentrifft. Naturgemäß können die Siele und Schöpfwerke nicht für die Extremfälle höchsten Binnenwasserabflusses (HHQ) und höchster Sturmflutwasserstände (HHThw) bemessen werden, weil sich damit eine unwirtschaftliche Ausbaugröße nicht nur der Mündungsbauwerke, sondern auch des gesamten Vorfluternetzes ergeben würde. Durch eine sinnvolle gegenseitige Abstimmung zwischen der Durchflußleistung der Siele, Förderleistung der Schöpfwerke und Speichermöglichkeiten im Binnenvorfluternetz sowie Mahlbusen muß eine möglichst optimale Lösung gefunden werden.

2. Abflußleistung der Siele

Die Bestimmung der Durchflußquerschnitte von Sielöffnungen ist seit jeher nach Erfahrungswerten vorgenommen worden. Den Bemessungswerten neuer Anlagen liegt meistens nur die Erfahrung zugrunde, daß die bisherige Sielentwässerung nicht ausreicht, um das Binnenwasser abzuführen (Abb. 3). Die Gründe dafür waren nicht so sehr die Fehlschätzung des Abflusses, sondern vielmehr bedingten die fortschreitende Kultivierung und die wachsenden Ansprüche auf niedrigere Wasserstände in den Vorflutern landwirtschaftlich genutzter Flächen, besonders solcher mit Dränung oder Tiefumbruch, größere Entwässerungsleistungen. Eine Abschätzung, wie sich diese Faktoren auf den Binnenwasserandrang auswirken, ist nicht möglich, wie auch die Zusammenhänge zwischen Niederschlag, Verdunstung sowie oberirdischem und unterirdischem Abfluß in den Marschen und Mooren bis heute zu wenig bekannt sind.

Die Durchflußquerschnitte von Sielöffnungen werden daher in Abhängigkeit von dem einzuhaltenden mittleren Binnenwasserstand und der Größe des Einzugsgebietes ermittelt. Dieser mittlere Binnenwasserstand (MiBiSt), der häufig dem Sommer-Wasserstand (SoW) entspricht, richtet sich nach der Höhenlage des jeweiligen Niederschlagsgebietes und liegt zwischen — 0,5 m NN und — 1,2 m NN. Angewandt wird die Beziehung:

$$\begin{aligned} & \text{Durchflußquerschnitt bei MiBiSt (m}^2\text{)} \\ & = \text{Einzugsgebiet (km}^2\text{)} \cdot 0,1 \text{ bis } 0,2. \end{aligned}$$

Ein mittlerer Wert von 0,15 bis 0,20 erscheint für Ostfriesland den natürlichen Bedingungen angemessen. Vermissen läßt die Faustformel für die Sielbemessung jede funktionelle Abhängigkeit vom Tideniedrigwasserstand oder von der Tidekurve, deren Höhenlage bzw. Form doch für die Sielzugmenge oder Sielzugdauer maßgebend ist. In Sielzugberechnungen (LIESE 1960, MÜLLER und MÜLLER-SPÄTH 1965, 1968) werden die den Sielzug beeinflussenden Faktoren im einzelnen berücksichtigt. Die Schwierigkeit, den Sielzug in Abhängigkeit vom

Abfluß während der Tide, von der während der Sielschlußzeit gespeicherten Wassermenge, vom Speicherraum im Binnengewässernetz, von den tidebedingten Strömungsgeschwindigkeiten im Siel sowie der Größe und baulichen Gestaltung des Sielquerschnittes zu bestimmen, ist sehr groß, so daß bisherige Berechnungsverfahren, wie auch das vorgenannte, weitgehend auf Annahmen angewiesen sind, um rechnerisch durchführbar zu sein. Auf die Problematik der Sielzugberechnung soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden.

Die Kennwerte für die Sielneubauten (Tabelle 1) zeigen, daß sie die jeweiligen örtlichen Bedingungen, das Verhältnis der Höhenlage vom Sommerwasserstand binnen zu den Tidewasserständen, ausdrücken. So reicht in Sautelersiel der Faktor 0,16 aus, weil der Sommerwasserstand ($-0,10$ m NN) hoch im Verhältnis zum Tideniedrigwasser (MTnw $-1,20$ m

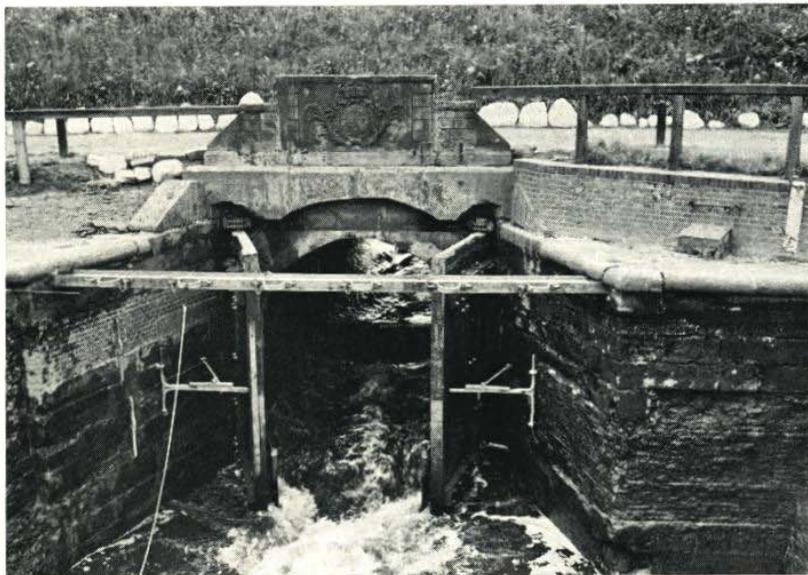


Abb. 3.
Altes Steinsiel mit Sielzug.
Erkennbar ist der starke Gefälleverlust und die Einengung des Querschnittes durch die geöffneten Fluttore, die durch Abstandhalter festgehalten werden

NN) liegt, woraus sich eine längere Sielzugdauer als am Knocksiel (Faktor 0,22) ergibt, wo der Sommerwasserstand $-1,20$ m NN und das Tideniedrigwasser MTnw $-1,50$ m NN betragen. In Harlesiel (Faktor 0,15) werden bei großem Wasserandrang zusätzlich die Tore der Schiffschleuse geöffnet, wodurch sich der Kennwert etwa verdoppelt.

Die hohe Abflußleistung der neuen Siele prägt sich auch in dem geringen Gefälleverlust von 7–8 cm bei einer Durchflußgeschwindigkeit von 1,0 m/s und 15–18 cm bei 1,5 m/s aus, der erheblich geringer als in den früheren Sielen ist, in denen er wie in Neuharlingersiel bis zu 50 cm betrug. Neben den im Vergleich zu früher (Abb. 3) sehr viel größeren Durchflußquerschnitten werden die Sielläufe hydraulisch günstiger gestaltet, indem scharfe Ecken und Kanten vermieden werden. Sielläufe mit Ein- und Auslauf sind in hydraulischen Modellen untersucht worden (FRANZIUS-INSTITUT 1965), nach denen ihre Durchflußleistung erhöht wurde. Die Stemmtore, soweit sie nicht, wie im Sautelersiel und Knocksiel durch Hubtore ersetzt worden sind, geben den Sielquerschnitt völlig frei, wenn sie in Tornischen liegen, wie z. B. in Accumersiel. Die betriebliche Voraussetzung ist dann allerdings die anderweitige Steuerung des Öffnungs- und Schließvorganges, worauf noch eingegangen wird.

3. Förderleistung der Schöpfwerke

Der erforderlichen Pumpleistung der Schöpfwerke wird ein Abfluß zugrunde gelegt, der beherrscht werden soll. Ausgegangen wird heute von Abflußmengen zwischen 100 und 200 l/s \cdot km²,

Tabelle 1

1	2	3	4	5	6	7
Name der Mündungsbauwerke	In Betrieb seit	Niederschlagsgebiet	Anzahl der Sielöffnung u. Durchflußquerschnitt bei MThw	Art und Anzahl der Verschlüsse je Sielöffnung	Durchflußquerschnitt bei Mi Bi St je km ²	Anzahl u. Anordnung der Pumpen
		[ha]	[m ²]		[m ² /km ²]	
Harlesiel	1958	22 000	1 Siellauf je 9,6 m ² 1 Schleuse je 7,2 m ²	1 Stemmtorpaar 1 Hubtor 2 Stemmtorpaare	ohne Schleuse 0,15 0,19	3 vertikal
Neuharlingersiel	1961	11 000	2 Sielläufe je 11,9 m ²	1 Stemmtorpaar 1 Hubtor	0,19	2 schräg
Bensersiel	1967	9 000	2 Sielläufe je 8,5 m ²	1 Stemmtorpaar 1 Hubtor	0,19	—
Accumersiel	1965	13 300	2 Sielläufe je 16,1 m ²	1 Stemmtorpaar 1 Hubtor	0,2	3 schräg
Leybuchsiel	1962	23 600	Keine Sielöffnung	—	—	3 schräg
Greetsiel	1957	10 000	Keine Sielöffnung	—	—	3 vertikal
Knocksiel	(1968)	34 000	2 Sielläufe je 33 m ²	2 Hubtore	0,22	4 schräg
Sautelersiel	(1970)	20 070	2 Sielläufe je 7,15 m ²	2 Hubtore	0,16	4 vertikal

wobei die Werte im Laufe der Zeit gestiegen sind. Für die Wahl des Abflußmengenwertes ist das Gefälle im Einzugsgebiet und seine Form maßgebend, wovon abhängt, ob das Wasser langsam oder schnell dem Schöpfwerk zufließt. Wenn somit die Schöpfwerksleistung ausschließlich nach Erfahrungswerten bemessen wird, so liegt ihnen doch die langjährige Erkenntnis zugrunde, daß mit niedrigen Leistungswerten der Wasserandrang bei starken Niederschlägen nicht beherrscht werden kann. Hinzu kommt, daß im Gegensatz zu früher heute die Landwirtschaft von der Zeit der Bestellung bis zur Ernte ständig wechselnde, dem jeweiligen Stand der Kulturen angepaßte Wasserstände in den Gräben fordert, denen nur durch Schöpfbetrieb entsprochen werden kann.

Für Ostfriesland erscheint eine Förderleistung der Schöpfwerke von im Mittel 150 l/s · km² ausreichend (Tabelle 1), wobei diese Rechnungswerte für eine geodätische Förderhöhe von etwa 2,0 bis 2,5 m gelten. Im Pumpbetrieb werden in Abhängigkeit von den Tidewasserständen geodätische Förderhöhen von 0,0 bis 4,5 m und in Einzelfällen bis zu 5,0 m auftreten. Während es früher für ausreichend gehalten wurde, bis zu einem Wasserstand von MThw + 0,5 m zu fördern, wird heute verlangt, daß bis zu einem Wasserstand von (MThw + HHThw) · 1/2 mit entsprechend geringerer Leistung gepumpt werden kann (DIN 1184 — Schöpfwerke). An der ostfriesischen Küste ist das ein Tidewasserstand von etwa 2,0 m über MThw (WOLTER 1967), gegen den noch mit einer ausreichenden Pumpenleistung geschöpft werden muß. Da die Pumpenleistung vor allem von der geodätischen Förderhöhe abhängig ist, wird durch Veränderung der Drehzahl mittels Getriebe oder regelbarer Elektromotoren sowie Verstellpropeller

8	9	10	11	12	13
Pumpen bemessen für Abfluß q	Pumpenleistung bei geodätischer Förderhöhe	Schaufelrad starr oder verstellbar	Pumpen-durchmesser NW	Art und Leistung der Antriebsmotoren	Art der Pumpen-verschlüsse
[l/s km ²]	[m ³ /s] [m]		[mm]		
60	14,8 bei 1,5 10,6 bei 2,8 7,0 bei 4,0	Hgeod. verstellbar	1400	1 Dieselmotor 187 PS 2 Elektromotoren 150 kW	Keilflachschieber Heber
150	22,0 bei 0,5 19,0 bei 1,5 9,0 bei 4,0	verstellbar	1700	Elektromotoren 275 kW, 217 Upm	Jalousieklappen hydr. Drehklapp.
(Siel) 150	—	—	—	—	—
200	28,5 bei 1,0 24,0 bei 2,0 19,5 bei 3,0 13,5 bei 4,0	verstellbar	1800	6 kV Drehstrommotor, Schleifringläufer, Asynchron 315 kW, 983 Upm	Jalousieklappen hydr. Drehklapp.
130	39 bei 2,4 24 bei 4,0	verstellbar	2000	Drehstrommotor, Schräggugellager, 520 kW, 985 Upm	Jalousieklappen hydr. Drehklapp.
150	13,5 bei 1,0 13,5 bei 1,7 12 bei 3,0	verstellbar	1530	6 kV Drehstrommotor, Asynchron 200 kW, 980 Upm, 380 V	hydr. Rückschlag- klappen, Keilflachschieber
150	60 bei 1,0 50 bei 2,87 36 bei 4,0	Hgeod. verstellbar	2000	6 kV Drehstrommotor, Asynchron, Schleifringläufer 600 kW, D. B., 940 Upm	Schnellschluß- schütze, hydr. Drehklappen
150	40 bei 1,00 32 bei 2,85 28 bei 3,6	starr	1800	6 kV Drehstrommotor, Asynchron, Schleifringläufer 385 kW, 210 Upm	Jalousieklappen hydr. Drehklapp.

erreicht, daß in einem bestimmten Förderhöhenbereich noch mit ausreichendem Pumpenwirkungsgrad gearbeitet wird.

Wenn die zu beherrschende Abflußmenge für das Schöpfwerk Harlesiel mit 60 l/s · km² angesetzt worden ist (Tabelle 1), so liegt die Erklärung sowohl im Erfahrungsstand zur Zeit des Baues wie in der Form des langgestreckten Einzugsgebietes, aus dem durch ein Haupttief das Wasser langsam zuläuft. Dem Accumersiel, mit seinem in Nord-Süd-Richtung verlaufenden kurzen Einzugsgebiet, strömt das Wasser durch zwei Zubringer schneller zu, so daß hier die Förderleistung mit 200 l/s · km² bemessen werden muß.

III. Die Mündungsbauwerke mit den dazugehörigen Anlagen

1. Die Lage der Mündungsbauwerke

Die Lage der Mündungsbauwerke ist meistens durch die Kreuzung des Binnentiefs mit dem Deich bestimmt. Örtliche Gegebenheiten können bedingen, daß das Tief oder der Deich verlegt werden muß. Das erweist sich dann als notwendig, wenn die Bebauung innerhalb eines Sielortes eine Verbreiterung des Tiefs nicht zuläßt oder eine Verstärkung und Erhöhung des Deiches innerhalb der engen Ortslage nicht möglich ist. Aus dem Bestreben heraus, ein möglichst kurzes Außentief außerhalb des Mündungsbauwerkes zu haben, kann dessen Bau mit der

Deichvorverlegung verbunden sein, die auch eine Verkürzung der Deichlinie bringt, wie es beim Bau der Siele und Schöpfwerke Harlesiel und Accumersiel (Abb. 4) erreicht werden konnte, für deren Lage die vorerwähnten Gesichtspunkte maßgebend waren. Besteht jedoch nicht die Möglichkeit auszuweichen, so ist der Abbruch von Gebäuden und die Verlegung von Straßen not-

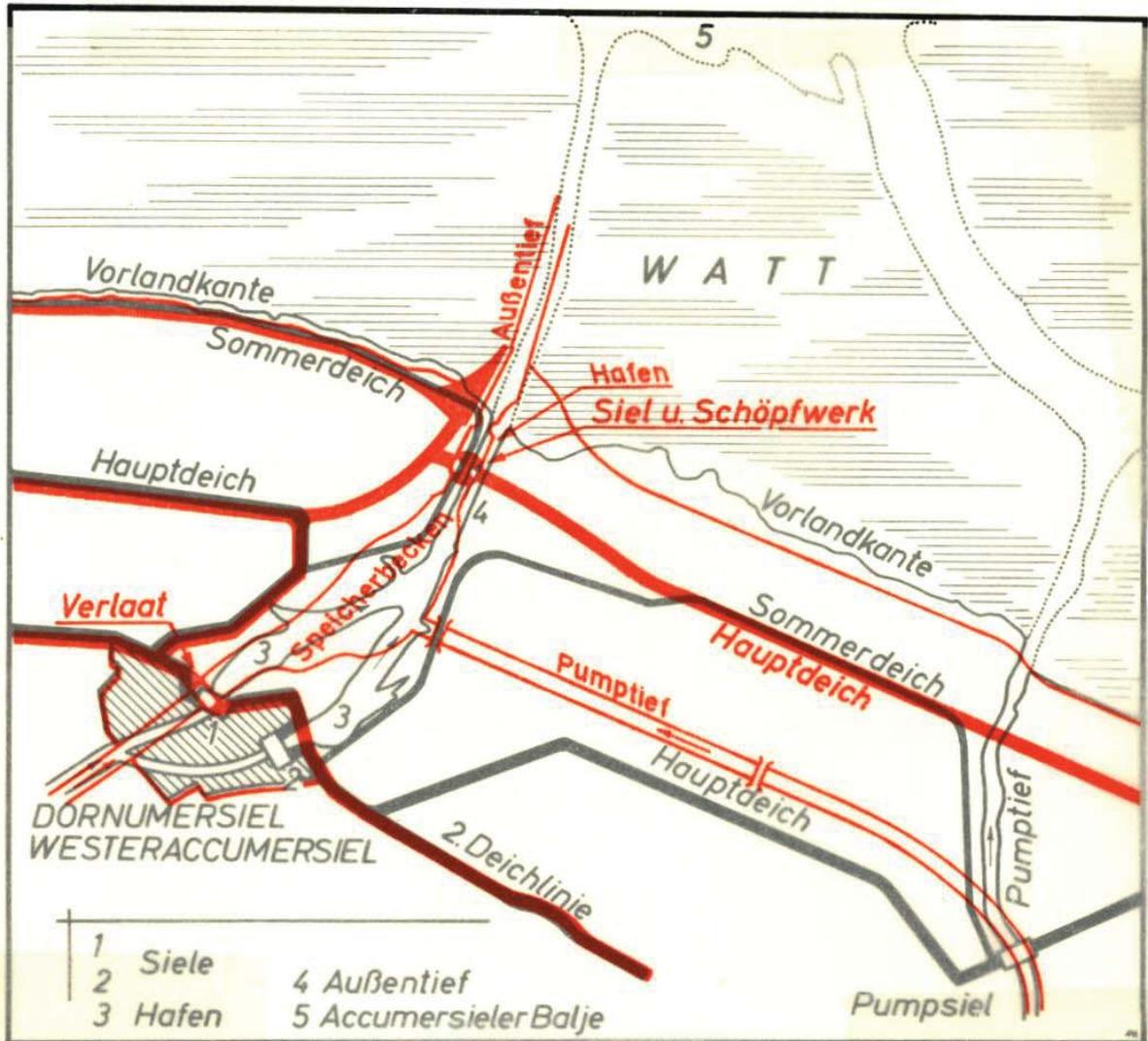


Abb. 4. Vorverlegung des Sieles und Schöpfwerkes Accumersiel mit Vordeichung

wendig. Das kann sich durchaus vorteilhaft auf das Ortsbild auswirken, wenn die Verkehrsverhältnisse verbessert werden und an die Stelle alter, unansehnlicher Häuser moderne Bauten treten, wie es in Neuharlingsiel der Fall war (Abb. 5).

Ein Mündungsbauwerk — ob Siel, Schöpfwerk oder beide in einem Bauwerk vereinigt — ist nach dem Deichgesetz immer ein Bestandteil der Deichlinie oder Anlage im Deich; seine schon erwähnte Doppelfunktion für die Entwässerung und für den Küstenschutz ist dadurch gegeben. Aus der Lage dieser Bauwerke im Deich wird unterschieden zwischen der „Blockbauweise“ in Bengersiel, Accumersiel und Knocksiel sowie der „halb aufgelösten Bauweise“ in Harlesiel, Neuharlingsiel, Leybuchtsiel, Greetsiel und Sautelersiel.

Die „halb aufgelöste Bauweise“ (Abb. 6) ist die ältere, die oft gewählt wurde, weil es unzulässig erschien, den Deich durch ein Bauwerk völlig zu unterbrechen. In Greetsiel wurde

diese Bauweise gewählt, weil unmittelbar neben dem bereits bestehenden Siel wenig Platz war und der Deichkörper nicht geschwächt werden sollte. Der Einlauf und das Maschinenhaus wurden binnenseits und das Auslaufbauwerk außenseits des Deiches in getrennten Baukörpern hergestellt. Als Pumpenläufe wurden Stahlrohre durch den Deich gepreßt. In Leybucht siel und Sautelersiel mußte wegen des schlechten Untergrundes die „halb aufgelöste Bauweise“ gewählt werden, um die Auflast aus dem Deich und dem Schöpfwerk auf eine größere Fläche zu ver-

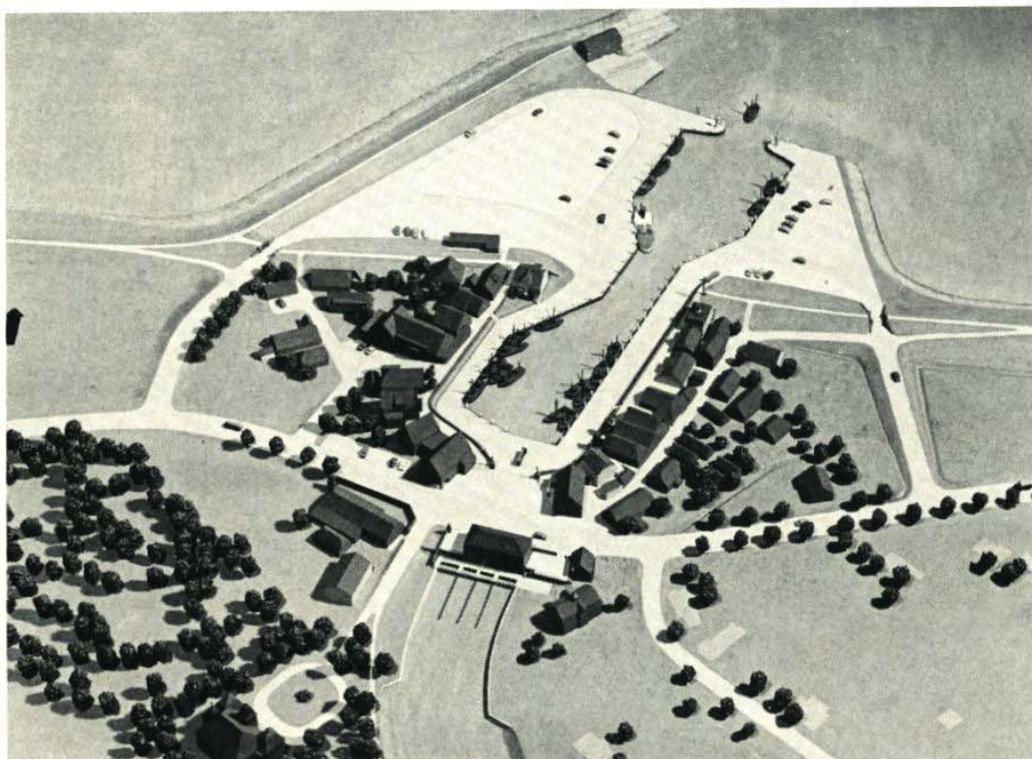


Abb. 5. Neuharlingersiel. Modell vom Siel und Schöpfwerk mit Hafen sowie damit verbundener Neugestaltung der Verkehrswege und des Ortsbildes

teilen. Durch Fugen zwischen Maschinenhaus, Siel- und Pumpenläufen oder Ein- und Auslaufbauwerken werden unterschiedliche Setzungen der Bauteile aufgefangen. Die längeren Sielläufe und Druckrohre dieser Bauweise führen zwar zu größeren hydraulischen Verlusten, die jedoch hingenommen werden, wie auch die höheren Baukosten.

Die „Blockbauweise“ (Abb. 7) erfordert die geringste Gründungsfläche, was wie in Benersiel, Accumersiel und Knocksiel die Baukosten vermindert. Auch für die Durchflußleistung ist diese Lösung am günstigsten, da die Siel- und Pumpenläufe kürzer und die hydraulischen Verluste geringer sind. Verschlüsse und Pumpen sind im Maschinenhaus vereinigt und mit Ein- und Auslauf in einem Block zusammengefaßt, wodurch die betriebliche Übersicht verbessert wird. Voraussetzung dieser Bauweise ist, daß von der Gründung die horizontalen Druckkräfte auf das Bauwerk bei höchsten Sturmflutwasserständen und niedrigsten Binnenwasserständen aufgenommen werden können. Die seitlichen Deichanschlüsse sind so herzustellen, daß Umläufigkeit verhindert wird, wozu Spundwände seitlich des Bauwerkes und die Linienführung der Flügelwände am Ein- und Auslauf beitragen. Wenn möglich, sollte dieser Bauweise der Vorzug gegeben werden.

Straßen oder Deichverteidigungswege müssen über die Mündungsbauwerke hinweggeführt werden. In Accumersiel und an der Knock verlaufen sie auf der Deichkrone an der Außen-

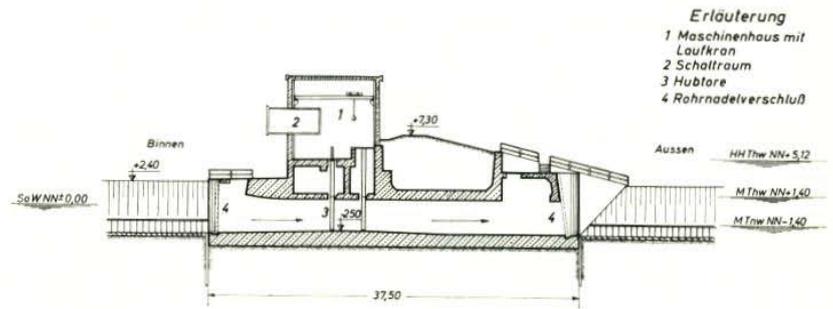


Abb. 6. Längsschnitt des Siellaufes in Sautelsiel

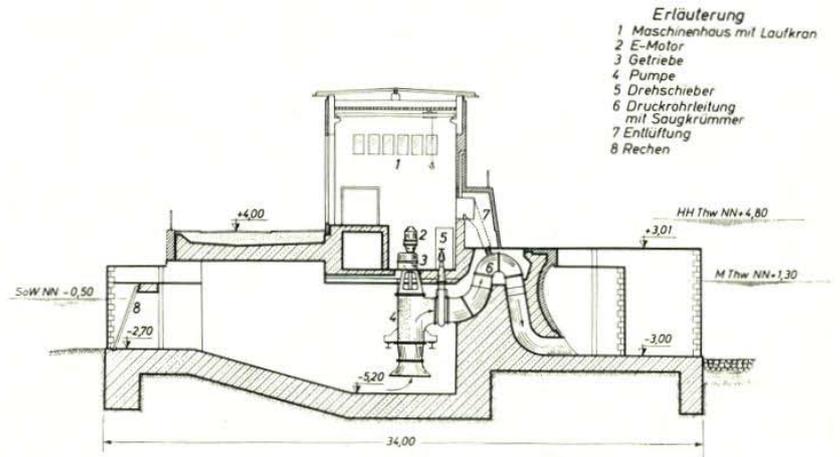


Abb. 7. Längsschnitt des Pumpenlaufs in Harlesiel. Das Druckrohr ist als Heber ausgebildet, um ohne äußeren Verschluss auszukommen



Abb. 8. Aufnahme des Sieles und Schöpfwerkes Harlesiel mit geöffneter Kammerschleuse. Im Vordergrund ein KÖSTERSches Räumboot

seite des Maschinenhauses, in Harlesiel und Leybuchsiel dagegen entlang der Binnenseite des Bauwerkes.

Eine Schleuse für Fischkutter, kleine Frachtschiffe und Sportboote ist nur in Harlesiel (Abb. 8) angelegt worden. Diese Kammerschleuse läßt die Schifffahrt unabhängig von den Wasserständen innen und außen passieren und kann gleichzeitig für die Sielentwässerung genutzt werden, indem beide Torpaare geöffnet werden, wodurch der Durchflußquerschnitt für die Entwässerung vergrößert wird. Das bereits 1928/29 erbaute Leybuchsiel ist ein offenes Siel, das als Dockschleuse die Zufahrt zum Norder Hafen für kleinere Küstenschiffe freigibt. Alle anderen Siele sind überdeckt.

Die Trennung zwischen Siel und Schöpfwerk mit Zwischenschaltung eines Speicherbeckens ist bei keiner der hier behandelten Anlagen ausgeführt worden. Eine derartige Lösung, bei der die Betriebskosten des Schöpfwerkes gesenkt werden können, weil nicht gegen wechselnde Tidewasserstände, sondern nur gegen im Mittel niedrigere im Speicherbecken gepumpt werden muß, bot sich nirgendwo an, da Flächen für ein entsprechend bemessenes Speicherbecken fehlten.

2. Anordnung von Siel- und Pumpenläufen

Die hier beschriebenen Mündungsbauwerke enthalten meistens außer zwei Sielläufen noch zwei bis vier Pumpenläufe. Ihre gegenseitige Zuordnung ist vor allem von den Betriebsbedingungen abhängig, aber auch durch bauliche Gesichtspunkte, wie Art und Nutzung der Außenmuhde*) oder des Vorhafens, bestimmt. Auch ist zu berücksichtigen, welche Anteile des abzuführenden Binnenwassers auf Sielzug oder Pumpenförderung entfallen, damit im Außentief der Durchflußquerschnitt möglichst günstig ist.

Das Siel und Schöpfwerk Accumersiel hat im Grundriß (Abb. 9) drei Pumpen zwischen zwei Sielöffnungen. Diese Anordnung soll dazu führen, daß durch den Sielzug der Vorhafen — besonders entlang der Hafenkajungen — freigespült wird, wozu die Pumpen wenig beitragen, da sie nur bei höheren Wasserständen laufen. In Neuharlingersiel ist die gleiche Anordnung aus baulichen Gründen getroffen worden, denn zunächst mußte das vorhandene Siel durch einen Neubau ersetzt werden, damit nach dessen Abbruch Platz für den zweiten Siellauf vorhanden war.

Die umgekehrte Anordnung, Sielläufe in der Mitte und Pumpenläufe außen, wurde am Mündungsbauwerk Sautelersiel getroffen (Abb. 10). Hier war die Überlegung maßgebend, daß auf Grund der hohen Wasserstände im Binnentief, das als Randkanal das Wasser von der höher als die Marsch liegenden Geest heranhöhrt, der überwiegende Teil des Binnenwassers gesielt und für die Räumung der Mitte des Außentiefs genutzt werden kann, um dort ausreichende Tiefe zu erhalten. Dagegen sind die Pumpen, deren Betrieb nach den Voruntersuchungen während rund 200 Stunden notwendig sein wird, paarweise beiderseits der Sielläufe angeordnet. Die Druckkanäle haben eine größere Sohlenhöhe, so daß seitliche Verschlickungen im Außentief ihren Ausstrom nicht behindern.

Im Mündungsbauwerk Knocksiel sind zwei Sielläufe und vier Pumpenläufe in getrennten Baublöcken zusammengefaßt (Abb. 11). Für diese Lösung waren auch konstruktive Überlegungen maßgebend, beide Blöcke durch eine Setzungsfuge zu trennen. Ein gleichmäßiger Durchflußquerschnitt im Außentief wird erwartet, weil etwa gleiche Wassermengen gesielt und gepumpt werden und seine Länge gering ist.

Erfahrungen über die hydraulische Auswirkung der Anordnung von Siel- und Pumpenläufen liegen bisher nur in Accumersiel vor, wo sich die Tiefen im Hafen erwartungsgemäß

* Außenmuhde = Außentief.

halten. Für die Außenmüden in Sautersiel und Knocksiel können Angaben erst nach der Inbetriebnahme gemacht werden. Zu erwähnen ist, daß in Leybuchsiel und Greetsiel nach Arbeitsbeginn der dortigen Schöpfwerke die Verschlickung vor den Sielen stark zugenommen hat, während sich dagegen vor den seitlich angelegten Schöpfwerken eine ausreichende Rinne

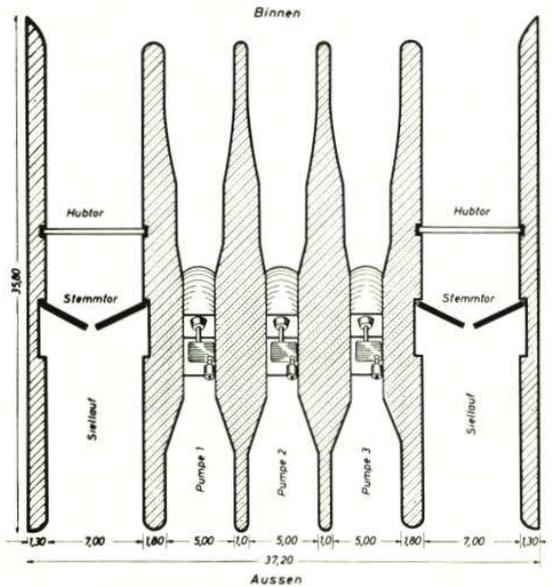


Abb. 9. Grundriß des Sieles und Schöpfwerkes Accumersiel mit mittlerer Lage der Pumpenläufe und seitlicher Lage der Sielläufe

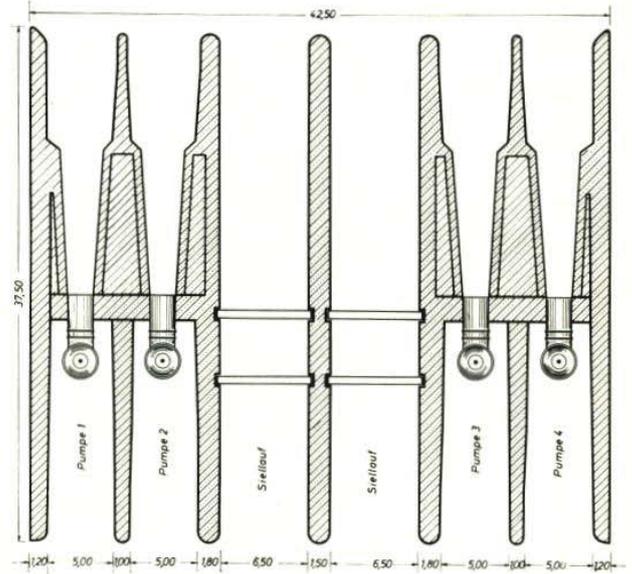


Abb. 10. Grundriß des Sieles und Schöpfwerkes Sautersiel mit mittlerer Lage der Sielläufe und seitlicher Anordnung der Pumpen

hält. In Greetsiel wurde 1954/55 der Sielbetrieb völlig eingestellt, da das MThw am Siel mit $-1,18$ m NN rd. $0,1$ m höher als der Sommerpeil liegt. In Leybuchsiel kann nur noch mit häufigem Einsatz des Räumbootes das Außentief offengehalten werden.

An der Binnenseite des Mündungsbauwerkes sind günstige Einlaufbedingungen zu schaffen, da ein schlechter Zustrom den Gesamtwirkungsgrad der Anlage erheblich vermindert. Trennwände in Verlängerung der binnenseitigen Pfeilerköpfe (Abb. 5), wie sie in Neuharlingersiel zur Teilung des Zustromes zu den Pumpen hergestellt worden sind, wirken sich nur nachteilig aus. Die Wirbelbildung im zuströmenden Wasser setzt dann schon früher ein, fächert weiter aus und beeinträchtigt den Durchfluß (LUCK 1965).

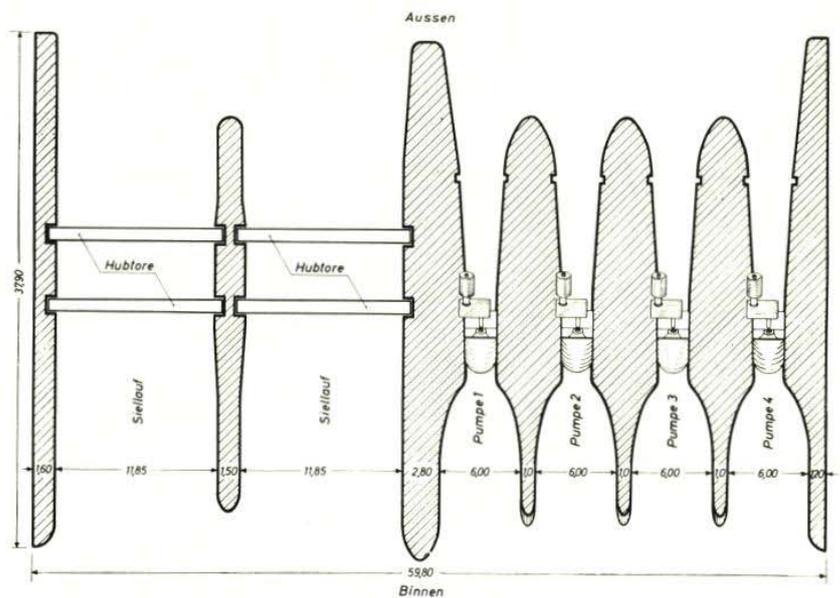


Abb. 11. Grundriß des Sieles und Schöpfwerkes Knocksiel mit getrennten Sielöffnungen und Pumpen, die jeweils in einem Baublock zusammengefaßt sind

3. Speicherbecken oder Mahlbusen

Die Entwässerungsleistung der Mündungsbauwerke wird neben ihrer Sielweite und Pumpenleistung erheblich von den Zu- und Abflußverhältnissen bestimmt. Auf der Landseite sind gut ausgebaute Binnenvorfluter erforderlich, deren Abfluß- und Speichervermögen durch ein Speicherbecken oder einen Mahlbusen ergänzt wird, wenn die räumlichen Voraussetzungen gegeben sind. An den Mündungsbauwerken Harlesiel, Accumersiel (Abb. 4), Leybuchtziel, Greetsiel, Knocksiel und Sautelersiel bestehen daher Speicherbecken unterschiedlicher Größe.

Für die Sielentwässerung ist das Speicherbecken insofern günstig, als der Speicherraum für das Binnenwasser während der Sielschlußzeit erhöht wird. Für den Sielzug selbst ist es weniger von Bedeutung, da mit Öffnen der Sieltore dieser mit geringer Fließgeschwindigkeit beginnt, die sich langsam steigert, so daß sich die Zuflußgeschwindigkeit im Binnentief entsprechend anpassen kann. Exakte Untersuchungen über den Wert eines Speicherbeckens für die Vergrößerung der Sielzugmenge liegen nicht vor.

Für die Schöpfentwässerung hat jedoch das Speicherbecken oder der Mahlbusen den Vorteil, daß es beim schnellen Anlaufen der Pumpen auf Vollast nicht zu einem starken Absinken des Binnenwassers kommt. Wenn nur das Binnentief vorhanden ist, wird durch die volle Pumpenleistung der Wasserstand darin zunächst stark abgesenkt, bis sich der Fließzustand im Binnentief eingestellt hat. Dadurch wird die geodätische Förderhöhe der Pumpen vergrößert und deren Förderstrom vermindert, bis der Zustrom zum Schöpfwerk gleichmäßig einsetzt. Von weiterem Wert für den Pumpbetrieb ist das Speicherbecken dadurch, daß das Wasser angestaut werden kann, damit während der Sperrstunden mit hohen Stromkosten für die elektrischen Antriebsmotoren nicht gepumpt zu werden braucht oder auch ein günstiger Nachtstromtarif ausgenutzt werden kann.

Die Anlagekosten eines Mahlbusens würden zu hoch sein, wenn er allein zur Verbilligung des Pumpbetriebes geschaffen wird. Er entsteht meistens zwangsläufig, indem entweder mit dem Bau des Schöpfwerkes Priele durch Vordeichung abgetrennt wurden, wie es in Leybuchtziel und Harlesiel der Fall war, oder wie in Accumersiel und Knocksiel eine Bodenentnahme für den Deichbau notwendig war. In der engen Ortslage von Neuharlingersiel (Abb. 5) mußte auf die Anlage eines Speicherbeckens verzichtet werden, jedoch wurde das Binnentief so breit wie möglich ausgebaut.

Die Böschungen des Mahlbusens werden zweckmäßig durch Lebendverbau befestigt und nur binnenseits des Mündungsbauwerkes, wo mit höheren Fließgeschwindigkeiten gerechnet werden muß, durch Steinschüttungen oder Beton- und Asphaltmatten gesichert. Sonst kann einer stärkeren Uferbefestigung durch flachere Böschungsgestaltung begegnet werden.

Durch Verlaatbauwerke in Harlesiel und Accumersiel (Abb. 4) ist auch die Möglichkeit gegeben, Wasser im Mahlbusen anzustauen und bei Tiefebbe durch das Siel abzulassen, um damit das Außentief zu spülen und auf der erforderlichen Tiefe zu halten. Es kann zu diesem Zweck bei Tidehochwasser auch Seewasser eingelassen werden, das dann bei Tide-niedrigwasser wieder abfließt. Sinkstoffhaltiges Seewasser fördert jedoch die Verschlickung des Speicherbeckens. Die Spülwirkung erstreckt sich nur auf einen kurzen Abschnitt des Außentiefs. Es liegen noch keine Erfahrungen über den Wert einer systematischen Spülung vor, weil sich bisher aus baulichen Gründen ihre Anwendung verbot oder nicht konsequent ausgeführt wurde. Von den Entwässerungsverbänden wird immer angestrebt, möglichst viel, vor allem aber tief zu sielen, um bei Niederschlägen Speicherraum in den Binnengewässern verfügbar zu haben, und um Pumpkosten zu sparen.

Auf die am Dangaster Siel am Jadebusen und besonders in Schleswig-Holstein häufigen

Speicherbecken zwischen Siel und Schöpfwerk soll hier nur insofern eingegangen werden, als sich diese Möglichkeit — wie bereits erwähnt — beim Bau eines neuen Leybuchsiesels im Zusammenhang mit der Leybuchteindeichung anbietet (Abb. 12). Dann können die im letzten Jahrzehnt neu errichteten Tideschöpfwerke Greetsiel und Leybuchsiel als Binnenschöpfwerke beibehalten und auch bei Sturmfluten wirtschaftlicher mit verhältnismäßig geringen Förderhöhen betrieben werden, da dann das Wasser nur auf den Wasserstand des Speicherbeckens und

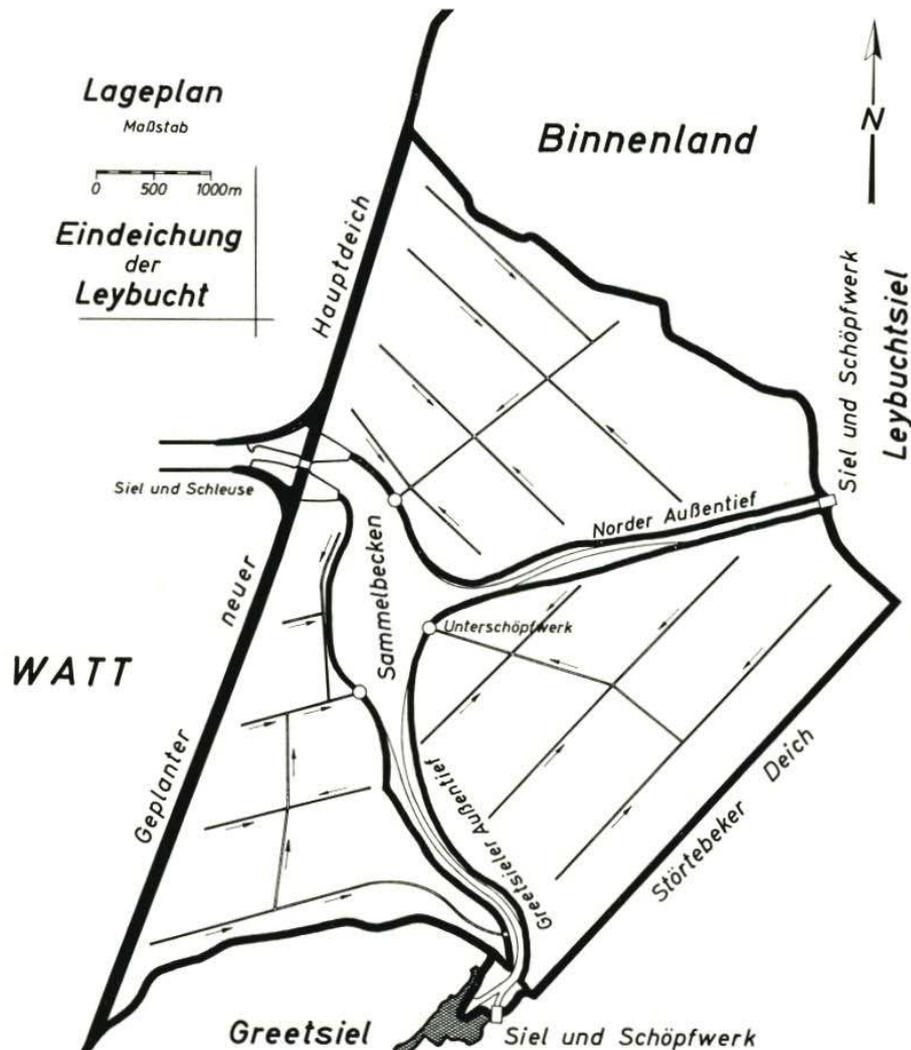


Abb. 12. Plan einer Eindeichung der Leybucht mit neuem Siel, Speicherbecken sowie den beiden bestehenden Sielen und Schöpfwerken Greetsiel und Leybuchsiel

nicht wie jetzt auf den im Mittel höheren Tidewasserstand gehoben zu werden braucht. Bei einer Leybuchteindeichung würde sich aus den Prielen, dem tiefgelegenen Watt und den Bodenentnahmestellen ein Becken mit einer Fläche von rund 700 ha ergeben. Die gegenwärtig wegen vollständiger Verschlickung in Greetsiel nicht mehr oder in Leybuchsiel nur noch sehr wenig betriebenen Siele wären dann wieder voll leistungsfähig, würden in das Speicherbecken entwässern und zusammen mit dem neuen Leybuchsiel die Schöpfentwässerung zugunsten der Sielentwässerung erheblich einschränken.

4. Außentief

Das Außentief ist mit seinem Querschnitt und vor allem seiner Sohllentiefe für die Sielzugdauer und damit für die Sielzugmenge je Tide sowie die Absenkung der Binnenwasserstände maßgebend. Die Außentiefe der hier behandelten Mündungsbauwerke sind von sehr unterschiedlicher Länge. Am Sautelersiel und Knocksiel sind sie sehr kurz, in Accumersiel, Bensorsiel, Neuharlingersiel und Harlesiel zwischen 0,7 km und 2 km und in Leybuchsiel und Greetsiel bis zu 6 km lang.

In den nur einige hundert Meter langen Außentiefen genügt die Räumkraft des Sielzuges, um den Querschnitt offenzuhalten. In längeren Außentiefen, wie z. B. in Neuharlingersiel, läßt sich im Längsschnitt deutlich ein Bereich erkennen (KÖRITZ 1956), bis zu dem sich die Räumkraft des Sielzuges günstig auf die Sohllentiefe auswirkt, während darüber hinaus die Räumung des Tiefes von dem seitlich vom Watt her zuströmenden Wasser abhängt. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, daß das Wattwasser Sinkstoffe in das Tief bringt, wobei allerdings angenommen werden kann, daß diese Sinkstoffe infolge der Zunahme der Fließgeschwindigkeit im Außentief sich dort nicht ablagern. Der Pumpbetrieb hat für die Räumung nur wenig Bedeutung, da meistens bei höheren Wasserständen gepumpt wird, wenn nicht nur das Tief gefüllt ist, sondern auch die angrenzenden Watten überströmt sind, so daß die Geschwindigkeitszunahme im Außentief infolge des Pumpens unbedeutend ist.

Aus der Forderung, einen ausreichenden Querschnitt im Außentief zu erhalten und eine möglichst gerade Linienführung zu erreichen, werden neben dem Außentief einseitig oder auch beidseitig Leitdämme angelegt. Wenn sie beidseitig am Knocksiel bestehen, so sollen sie den seitlichen Sandeintrieb durch die starke Tideströmung der Ems verhindern, aber auch gleichzeitig als Uferschutz dienen. In Bensorsiel sind ebenfalls beiderseits des Außentiefs Leitdämme vorhanden, die auf den Hafenausbau in der Vorkriegszeit zurückgehen und die tideunabhängige Ein- und Ausfahrt ermöglichen sollen. Das Beispiel eines einseitigen Leitdamms ist dagegen in Harlesiel und in Neuharlingersiel vorhanden, wo sich der Leitdamm als Schöpfbühne auswirkt, indem er das bei Ebbe vom Watt abströmende Wasser am Leitdamm entlangführt und zur Räumung des Außentiefs beitragen läßt. Aus diesem Grunde und auch zur Erhaltung eines gestreckten Laufes wird am Accumersiel Außentief noch ein Leitdamm errichtet werden müssen.

Die Bauweise der Leitdämme ist ein Steinkörper auf Sinkstück-Unterlage. Verwendet werden Natursteine, die seewasserbeständig sind und mit Asphalt oder Colcrete-Mörtel an der Oberfläche vergossen werden können, um widerstandsfähiger gegen die mechanischen Beanspruchungen zu sein. Ein Kern des Leitdamms aus Sand mit einer wasserundurchlässigen Abdeckung aus Asphaltbeton oder Betonformsteinen mit untergelegter Dichtungsfolie ist ebenfalls möglich.

Für die Sielentwässerung ungenügend sind dagegen die Querschnitte der Außentiefe in der Leybucht, die auf Grund ihrer großen Länge sehr stark verlanden (KRAMER 1955). Nachdem die Siele in Greetsiel infolge völliger Verschlickung geschlossen worden sind, wird eine natürliche Räumung nur durch das von den Watten abströmende Wasser bewirkt. Wenn möglich, wird der Pumpbetrieb so eingerichtet, daß er in die Niedrigwasserzeit fällt, in der das Watt trockenfällt. In Leybuchsiel, wo die Sieltore noch geöffnet werden können, sind die Bedingungen etwas günstiger. Jedoch trägt das sehr sinkstoffhaltige Wasser, das in den Landgewinnungsfeldern zu großflächigen Verlandungen führt, dazu bei, daß auch die Außentiefe durch Ablagerungen an Querschnitt verlieren. Der Widerspruch zwischen erwünschter Landgewinnung und möglichst großer Fahrwassertiefe unmittelbar nebeneinander wird hier besonders deutlich. In den Außentiefen werden deshalb Räumboote eingesetzt, die den abgelagerten Schlick wäh-

rend der Ebbe aufwirbeln, damit er mit dem Ebbstrom nach außen befördert wird. Infolge der großen Länge der Außentiefe in der Leybucht reicht jedoch der Transportweg der Strömung nicht aus, um die Sinkstoffe bis in das tiefere Wasser zu bringen, so daß sie sich im Unterlauf des Außentiefs wieder absetzen. Der gegenwärtige Zustand der Außentiefe von Leybuchtziel und Greetsiel ist unbefriedigend. Eine Baggerung kann diesen wohl vorübergehend verbessern, während auf die Dauer die Schwierigkeiten für die Entwässerung und Schifffahrt nur durch eine Eindeichung der Leybucht beseitigt werden können (Abb. 12).

An den Mündungsbauwerken sind meistens Vorhäfen wie in Harlesiel, Neuharlingersiel (Abb. 5), Bensorsiel, Accumersiel und Greetsiel vorhanden. Die Häfen dienen dem Fischereibetrieb wie auch der örtlichen Versorgung und vor allem der Verbindung zu den Inseln. Die Ein- und Ausfahrt der Schiffe durch das Außentief wirkt sich darauf insofern aus, als durch die Schraubenbewegung Ablagerungen aufgewirbelt und durch die Strömung transportiert werden. Insgesamt können jedoch nur Umlagerungen erwartet werden, da sowohl bei Ebbe- wie auch Flutströmung ein- und ausgelaufen wird. Von den Fischkuttern und noch mehr von den Fahrzeugen des Inselverkehrs werden Sohltiefen in den Außentiefen verlangt, die sie bei Ein- und Ausfahrt unabhängig von der Tide machen. Das erfordert für die verkehrenden Schiffsgrößen eine Tiefe von 1,5 m bei Tideniedrigwasser und mehr, die sich vor keinem Mündungsbauwerk durch den Binnenwasserabfluß erhalten läßt, so daß zusätzlich geräumt oder gebaggert werden muß.

Die Erhaltung ausreichender Außentiefquerschnitte ist immer ein schwieriges Problem. Bei der Planung von Mündungsbauwerken muß deshalb versucht werden, möglichst viele Binnentiefe mit großer Abflußmenge an einer Stelle ausmünden zu lassen, um eine möglichst starke Räumkraft im Außentief zu erreichen. Ein Beispiel für die Zusammenfassung ist das Mündungsbauwerk Accumersiel, in dem drei frühere Siele (Abb. 4) zusammengefaßt sind, ohne aber damit allein schon ein allen Ansprüchen genügendes Außentief erhalten zu haben. Auf diese Weise läßt sich die verminderte Spülung, die eine Folge der Beherrschung der Binnenwasserstände durch Schöpfwerke ist, teilweise durch Sielzug ausgleichen. Das Binnenwasser kann zwar bei hohen Tidewasserständen nicht mehr auf die früheren, wenn auch unerwünschten Wasserstände ansteigen, die jedoch bei späterem Sielzug anhaltende, kräftige Binnenwasserwellen ausströmen lassen, durch die auch längere Außentiefe geräumt und offengehalten werden. Der Schöpfbetrieb fördert die Verschlickung der Außentiefe. Der durch viele Pumpstunden mögliche, tiefe Binnenpeil mit nur noch kurzen Sielzügen bedeutet dann das Ende der natürlichen Entwässerung.

IV. Ingenieurbau

1. Gründung

Auf eine sichere Gründung der Mündungsbauwerke ist wegen ihrer doppelten Aufgabe als Bestandteil der Deichlinie und als technische Betriebsanlage besonders zu achten. Die Horizontalkräfte bei höchstem Außenwasserstand und niedrigem Binnenwasserstand müssen auf die Gründungssohle sicher übertragen werden können. Außerdem hat der Baukörper genügend verwindungsfest zu sein, um eine gegeneinander unverschiebliche Lagerung von Pumpen, Getrieben und Motoren sowie die einwandfreie Bewegung der Verschlüsse und die Dichtigkeit der Toranschlüge und Torführungen zu gewährleisten.

Je nach Tiefenlage des tragfähigen Untergrundes sind die Mündungsbauwerke als Flach- oder Pfahlgründungen ausgebildet worden, nachdem durch Bohrungen und Drucksondierungen

die Bodenschichten und deren Belastbarkeit bestimmt worden sind. Für die Tiefe des tragfähigen Untergrundes ist oft maßgebend, daß die Bauwerke im früheren Lauf verlandeter Priele liegen, woraus sich Gründungstiefen bis zu rund 20 m unter NN ergeben können.

Flachgründungen konnten in Sautelersiel, Accumersiel (Abb. 13), Harlesiel ausgeführt werden, wo tragfähiger Boden in Tiefen von $-5,0$ bis $-7,0$ m NN anstand. In Accumersiel und Harlesiel wurde dabei eine Kleischicht durch Sand über der tragfähigen Sandschicht ausgetauscht, was sich in beiden Fällen als wirtschaftlich anbot.

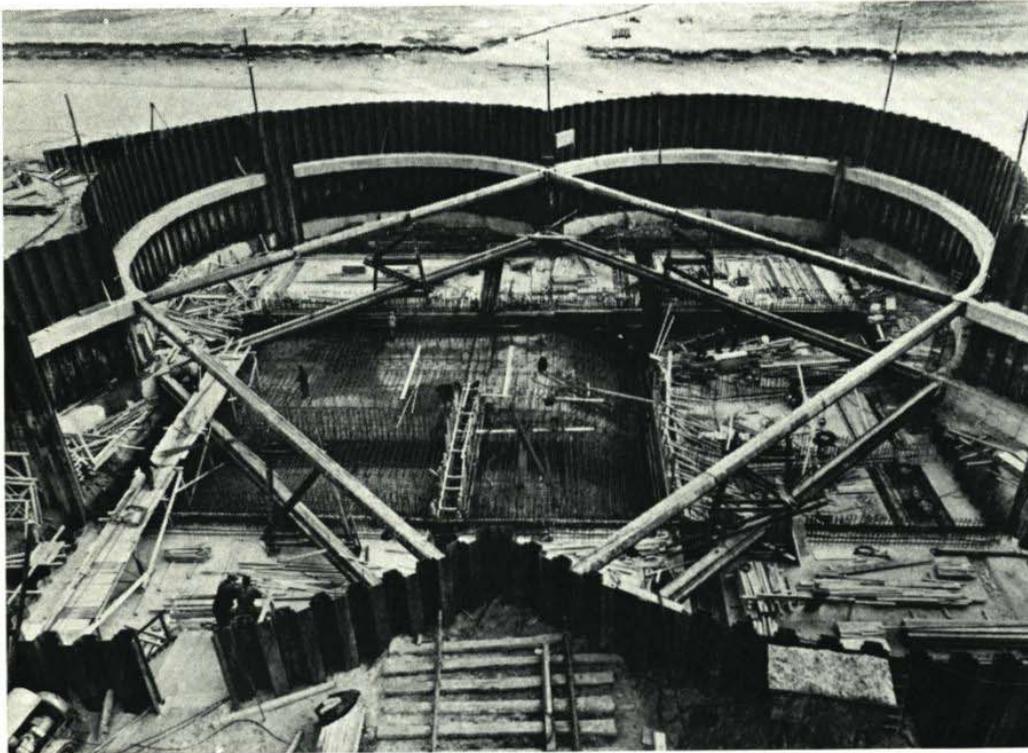


Abb. 13. Baugrube des Sieles und Schöpfwerkes Accumersiel. Die halbkreisförmigen Umspundungen ermöglichen es, die Baugrube ohne große Hindernisse durch Aussteifungen herzustellen

Die Flachgründung ist so zu bemessen, daß ungleichmäßige Setzungen ohne Verformung der Sohle ausgeglichen werden. Über die Verteilung des Sohldruckes sagen in Accumersiel und Sautelersiel Meßdosen aus (RAGUTZKI 1966), die über die Gründungsfläche verteilt sind. Die Meßergebnisse zeigen eine für starre Baukörper kennzeichnende Sohldruckverteilung, bei der in Sautelersiel auch die mittragenden Umschließungswände sich ausprägen. Die für die Bemessung der Gründung angenommene, gleichmäßig verteilte Sohlpressung kann nach den Meßergebnissen als zulässige, wenn auch nicht voll zutreffende Annahme angesehen werden.

Die Pfahlgründungen sind entsprechend der Tiefe der tragfähigen Bodenschicht nach unterschiedlichen Verfahren ausgeführt worden, um möglichst wirtschaftliche Lösungen zu erreichen. In Greetsiel, Leybuchtziel und Knockziel wurden Ort beton-Rammpfähle geschlagen. In Leybuchtziel liegt die tragfähige Schicht in einer Hauptrinne der früheren Leybucht so tief, daß nur eine schwimmende Gründung möglich war. Bei der Gründung des Bauwerkes Knockziel wurde von den Ort beton-Rammpfählen eine rund 7 m mächtige Kleischicht durchstoßen. Das Grundwasser unterhalb dieser Kleischicht ist gespannt, so daß sorgfältig vorgegangen werden mußte, damit bei der Durchrammung dieser wasserdichten Schicht das Grundwasser nicht oben austrat, denn bei Sturmfluten mußte mit einem Wasserüberdruck von 10 m Wassersäule gerechnet wer-

den. In der Baugrube mit einer Gründungstiefe von rund $-6,5$ m NN konnte dann ohne Grundwasserabsenkung gearbeitet werden.

Das Mündungsbauwerk Neuharlingersiel ist auf Tiefpfeilern von je $1,30$ m ϕ mit Fußverbreiterung auf $1,60$ m ϕ gegründet, die innerhalb von später gezogenen Mantelrohren hergestellt wurden. Hier ließ die nahe Bebauung mit älteren Häusern keine Rammerschüttungen zu. Das Sielbauwerk Bensorsiel steht auf Stahlpfählen und das Verlaat in Accumersiel auf Stahlbeton-Rammpfählen mit verstärktem Fuß, die für den Bauzustand als Zugpfähle für die unter Wasser eingebrachte Stahlbetonsohle, Colcrete-Vermörtelung eines Kiesgerüsts mit dazwischenliegender Bewehrung, dienen. Zusammen mit der umschließenden Stahlspundwand entstand eine Baugrube ohne Grundwasserabsenkung, in der das Bauwerk erstellt werden konnte.

Die großen Baukörper der Mündungsbauwerke mit Abmessungen von bis zu rund 40 m \times 60 m in Knocksiel müssen durch Fugen unterteilt werden, um gegenseitige Bewegungen zuzulassen. Bei Flachgründungen sind diese von unten bis oben durchzuführen, während sie bei Pfahlgründungen oberhalb der Sohlplatte ansetzen. Die im vorhergehenden Abschnitt angegebene Aufteilung der Mündungsbauwerke in Siel- und Pumpenteil bietet die Möglichkeit, diese Baublöcke zu trennen. Die Dichtung der Fugen, besonders im Tiefbauteil, ist sorgfältig mittels Fugenband auszuführen, denn nachträgliche Dichtungen gegen den äußeren Wasserdruck sind sehr schwierig. Beim Betoniervorgang darf die Fugenfüllung nicht verschoben oder versetzt werden, um eine unerwünschte Verzahnung der zu trennenden Baukörper zu vermeiden.

2. Stahlbetonbau

Vor ungefähr 200 Jahren begannen die Steinsiele die Holzsiele zu verdrängen und bis heute zu überdauern. Wie sich bei deren Abbruch zeigte, als sie wie in Westeraccumersiel in den letzten Jahren ersetzt wurden, waren sie trotz ihres Alters in einem festen Zustand. Zwar war die Oberfläche meist angegriffen und in der Zwischenzeit neu verblendet, ihr Mauerwerkskern war jedoch gesund.

Die nunmehr großen Siele und Schöpfwerke (Abb. 14) werden entsprechend dem heutigen Stand der Bautechnik in Stahlbeton hergestellt, auch aus dem Grunde, um größere Durchflußweiten und den Einbau großer Pumpenanlagen zu ermöglichen. Es erhebt sich die Frage, ob diese Bauweise die gleiche Lebensdauer wie die der Ziegelbauwerke erwarten läßt, und welche Vorkehrungen zu treffen sind, um sie über Jahrhunderte zu erhalten. Die Diskussion, ob der Beton aggressivem Wasser ausgesetzt werden kann, ohne daß er durch eine Klinkerverblendung geschützt wird, hat bis in die jüngste Zeit andauert. Davon zeugt das Vormauerwerk in Harlesiel (Abb. 8), durch das allerdings auch die Ansicht des Bauwerks verbessert werden sollte.

Nach den heutigen Erkenntnissen und Erfahrungen sowie deren Anwendung bei der Herstellung kann dem Stahlbeton eine hohe Lebensdauer im Wasserbau, auch wenn er dem als betonschädlich geltenden Meer- und Moorwasser ausgesetzt wird, zugesprochen werden. Deshalb sind alle hier besprochenen Mündungsbauwerke, nur in Harlesiel sind — wie vorerwähnt — Teilflächen verblendet, in Stahlbeton ausgeführt. Im hochbaulichen Teil ist Ziegelmauerwerk zur Ausfüllung der Stahlbetonskelette benutzt worden, um eine architektonisch gute Wirkung zu erhalten. Die Grundsätze des Stahlbetonbaues sollen hier nicht wiederholt werden; auf einige Erfahrungen beim Bau der Siele und Schöpfwerke, die erwähnenswert erscheinen, wird hier jedoch eingegangen.

Die Bauwerksteile sind in ihren Abmessungen nicht allein nach statischen Gesichtspunkten zu bemessen, sondern stärker auszubilden, was besonders für den Bereich gilt, der dem Wasser

ausgesetzt ist. Von der Bauwerksmasse müssen Erschütterungen beim Schlagen der Sieltore und Pumpenverschlüsse sowie Schwingungen aus dem Maschinenbetrieb aufgenommen werden können, ohne Risse zu verursachen. So wird gleichzeitig erreicht, daß die Bewehrung nicht zu dicht innerhalb des Betons liegt und dieser genügend durch Innenrüttler verdichtet werden kann, um einen dichten Beton zu erhalten. Siele und Schöpfwerke haben aus statischen Gründen im Vergleich zu manchen anderen Bauten im Seewasser eine kräftige Bewehrung. Die Betondeckung der Bewehrung im Wasserbereich hat nach den Vorschriften mindestens 5 cm zu betragen. Sie sollte keineswegs geringer sein, auch wenn es vom Statiker gewünscht werden sollte, um nach

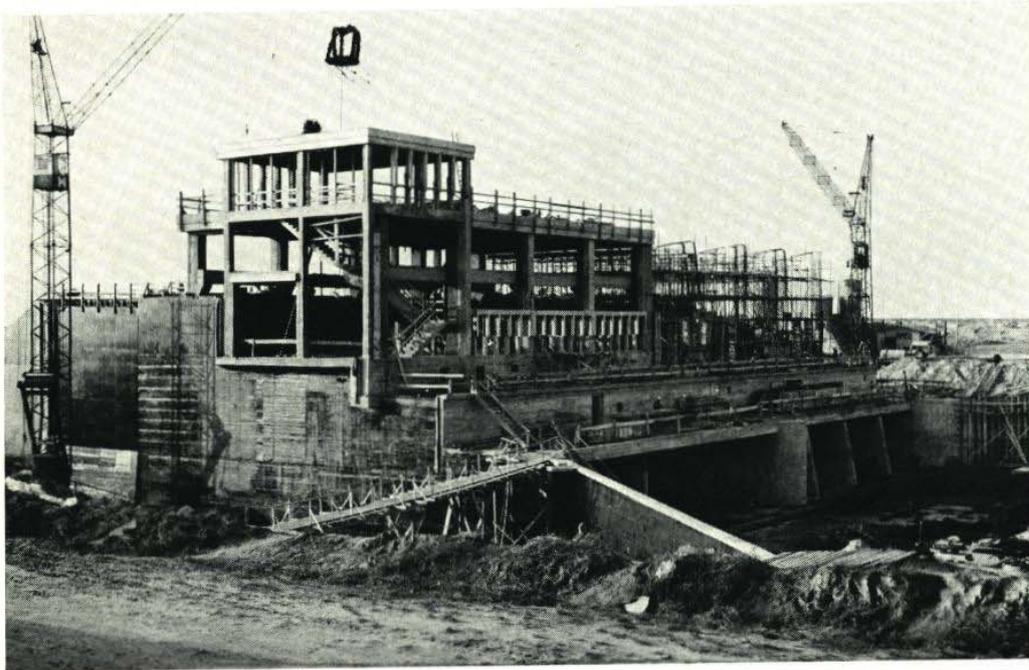


Abb. 14. Stahlbetonbau des Sieles und Schöpfwerkes Knocksiel. Erkennbar sind an der Einlaufseite die beiden Sielläufe und die vier Pumpenöffnungen

Beschädigung oder Abnutzung der Oberfläche eindringendes Wasser von der Bewehrung fernzuhalten und die lange Lebensdauer des Betons zu sichern, denn Rosten der Bewehrung bedeutet Abplatzen des überdeckenden Betons. Auf die Dichtigkeit von Arbeitsfugen ist besonders zu achten. In Neuharlingersiel und Greetsiel sind Fugenbänder eingelegt worden, was jedoch bei den anderen Bauwerken nicht mehr erforderlich erschien und auch keine nachteiligen Folgen gezeigt hat. Der dichte Anschluß des Betons in den Arbeitsfugen ist hier durch sorgfältige Vorbereitung der erhärteten Fläche, Abstemmen und Reinigung mit Druckwasser, erreicht worden.

Für den Beton sind kalkarme oder kalkfreie Hochofenzemente wegen ihrer Beständigkeit gegen aggressive Wässer verwendet worden. Auf die sorgfältige Verdichtung durch Rüttelarbeit, die bei der Verarbeitung eines Betons mit niedrigem Wasserzementfaktor besonders wichtig ist, wurde überall großer Wert gelegt, um die Porenbildung zu vermindern. In einigen Bauwerken ist dem Beton Traß zugesetzt worden, um seine Dichtigkeit und Verarbeitbarkeit zu verbessern. In anderen ist dagegen darauf verzichtet worden, weil der notwendige Feinstkornanteil durch größere Zementzugabe oder durch Zuschlagstoffe abgedeckt war. Vor- und Nachteile des Traßzusatzes können nach den wenigen Jahren jedoch nicht erkannt werden, jedoch muß nach den sonstigen Erfahrungen im Wasserbau angenommen werden, daß der Feinstkornanteil unabhängig von seiner Herkunft entscheidend ist. Betonzusatzmittel anderer Art sind nirgendwo benutzt worden. Jedoch erfordern die großen Betonmassen der hier be-

schriebenen Mündungsbauwerke, die zwischen 3000 m³ und 15 000 m³ betragen, den Zusatz von Verzögerungsmitteln, um beim Betonieren zu vermeiden, daß Fugen durch Aufbringen von frischem auf bereits abgebindenem Beton entstehen.

Bemerkenswert erscheint, daß für die Betonherstellung am Siel und Schöpfwerk Knocksiel ein mineralisches Feinstmehl als Füller zugegeben worden ist. Dieses Material (EFA-Füller) wird aus einer schnell gekühlten Gesteinschmelze hergestellt. Es ist feiner als die handelsüblichen Zemente und besteht aus mikroskopisch kleinen Kugeln. Im Frischbeton kann eine bestimmte Menge des Wassers im Zementleim durch diesen Füller ersetzt werden, wodurch sein Wasseranspruch vermindert wird, so daß mit einem niedrigeren Wasserzementfaktor gearbeitet werden kann. Die Gefahr der Entmischung und das Bluten des Frischbetons werden verhindert. Hinzu kommt, daß dieser Füller ein sehr dichtes Betongefüge ergibt und die Betonfestigkeit erhöht, was vorteilhaft für die Lebensdauer des Betons im Wasser ist.

Nach den in Knocksiel gewonnenen Erfahrungen läßt sich ein Beton, der mit 270 kg/m³ Zement und Zusatz von 80 kg/m³ mineralischem Füller hergestellt wird, sehr gut verarbeiten. Der Transport des Betons mittels Betonpumpe ist auch bei niedrigem Wasserzementfaktor von 0,40—0,45 ohne Schwierigkeiten möglich. Die Abbindewärme ist ebenfalls geringer, was sich im Massenbeton günstig auswirkt und Schwindrisse vermindert. Naturgemäß wird sich erst im Laufe der Jahre herausstellen, wie dieser mit Ausfallkörnung von 0—3 mm und 15—30 mm hergestellte Beton sich bewährt, jedoch lassen die bisherigen Untersuchungen am erhärteten Beton eine hohe Beständigkeit erwarten.

Die Sielwände und Pumpenläufe sind als Sichtbeton hergestellt worden, um eine hydraulisch glatte Oberfläche zu erhalten. Ob diese auch in den Sielläufen notwendig ist, kann in Frage gestellt werden, da innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit sich dort an den Wandungen eine Schlamm- und auch Bewuchsschicht festsetzen, die eine hydraulisch gleichartige Oberfläche ergeben. In den Pumpenläufen, durch die das Wasser mit hohen Geschwindigkeiten strömt, ist dagegen eine glatte Oberfläche erforderlich, um die hydraulischen Wandreibungsverluste klein zu halten.

Oberflächenanstriche verschiedener Art tragen dazu bei, die Poren im Beton zu schließen und ihn zu schützen. Sie sind nicht in allen Fällen hergestellt worden, da die Notwendigkeit des Betonanstrichs umstritten ist. Vergleichbare Erfahrungen über die Eignung von Schutzanstrichen auf Bitumen- oder Kunstharzbasis liegen noch nicht vor. Zu berücksichtigen ist, daß auch eine Schlamm- oder Bewuchsschicht einen Schutz der Betonoberfläche darstellt.

V. Maschinelle Einrichtungen der Mündungsbauwerke

1. Sielverschlüsse

Gegen das Außenwasser wird von jeher eine doppelte Sicherheit durch zwei hintereinander angeordnete Verschlüsse gefordert, so daß schon die Holzsiel- und späterhin die Steinsiele mit zweifachen Stemm- oder Schlagtorpaaren ausgerüstet waren. Auf der Binnenseite kam ein Ebbtorpaar hinzu, das bei den noch zahlreich vorhandenen Sielen dieser Bauart normalerweise offen steht und nur geschlossen wird, um einen festgesetzten Binnenwasserstand während Trockenzeiten zu halten.

Die Stemm- oder Schlagtore älterer Bauart schließen und öffnen sich bekanntlich in direkter Abhängigkeit von den wechselnden Außen- und Binnenwasserständen. Erforderlich ist ein statischer Überdruck aus einer Wasserstanddifferenz zwischen außen und binnen oder

umgekehrt, die bis zu 20 cm betragen kann, um den Bewegungsvorgang des Schließens oder Öffnens der Tore einzuleiten. Das bringt bei einsetzendem Flutstrom den Einstrom von sinkstoffhaltigem Außenwasser mit sich, was zu unerwünschten Schlickablagerungen im Binnentief führen kann. Wenn der Ebbeast vor Tideniedrigwasser sehr flach ist, strömt bereits, während an der Oberfläche noch Stauwasser ist, unten schlickhaltiges Seewasser ein. Bis zu lichten Weiten von rund 7 m (WOLTER 1967) erfüllen diese selbsttätig arbeitenden Tore voll ihre Aufgabe. Bei größeren Abmessungen besteht jedoch die Gefahr, daß beim Schließvorgang der Tore Schläge übertragen werden, die im Laufe der Zeit zu Schäden am Sielbauwerk führen können.

Diese Gefahr und die verzögerte Einstellung auf den Flut- und Ebbestrom, die auch zu einer Minderung der Sielzugleistung führt, haben dazu geführt, daß bei den neuen Anlagen die Bewegungsvorgänge elektrisch-hydraulisch gesteuert werden. Mit einsetzender Flut wird durch den Einstrom ein Staupendel ausgelenkt, das die Hydraulik des Torantriebes betätigt, wodurch die Torbewegung gebremst wird, so daß ein Schlagen unterbleibt.

Umgekehrt ist für die Öffnung der Tore zunächst ein Wasserüberdruck binnenseits notwendig, der die Schlagtore etwas aufdrückt. Auf den dann einsetzenden Sielzug spricht das Pendel an und regelt die weitere Torbewegung hydraulisch so, daß sich die Tore weich in die Nischen legen und Stöße auf das Bauwerk unterbleiben.

In Neuharlingersiel wird der Schließvorgang der außen liegenden Schlagtore noch durch Düker'sche Steuerklappen verbessert (KERSTING 1959). Die Stellung der Tore wird durch eine Automatik überwacht, die das in geöffneter Stellung stehende Hubtor betätigt, falls der Schließvorgang der Schlagtore behindert wird. Das Hubtor dient bei dieser Verschlußanordnung sowohl als zweites Fluttor wie als Ebbetor, wofür es nach beiden Seiten dichtend ausgeführt ist.

Der weitere Schritt liegt in der Auslösung des Schließvorganges allein durch das in der Strömung hängende Staupendel. In Accumersiel und Bensorsiel (Abb. 15) sind Schlagtore eingebaut, die völlig in Wandnischen liegen und, da sie nicht durch Abstandshalter von der Wand abstehen, nicht von der einlaufenden Flutströmung erfaßt werden können. Die Verzögerungen beim Schließvorgang mit ihrem unerwünschten Einstrom von schlickhaltigem Wasser fallen hier weg, da das Pendel sehr schnell anspricht und die Schließkontakte auslöst. Durch die Lage der geöffneten Schlagtore in Nischen wird der Sielquerschnitt nicht eingengt und die Durchflußleistung erhöht.

Aus der Steuerungsmöglichkeit der Torbewegungen ergibt sich die in Knocksiel und Sautelersiel (Abb. 6) gewählte Lösung, bei der jede Sielöffnung mit zwei hintereinander liegenden Hubtoren ausgerüstet ist. Das ist für die Unterhaltung sehr günstig, da die Hubtore in hochgefahrner Stellung jederzeit zugänglich sind. Der Schließvorgang wird hier ebenfalls durch die Kontaktgabe des Staupendels bewirkt, während die Öffnungsbewegung durch Differenzbildung zwischen Außen- und Binnenpegel über ein Schaltgalvanometer ausgelöst wird.

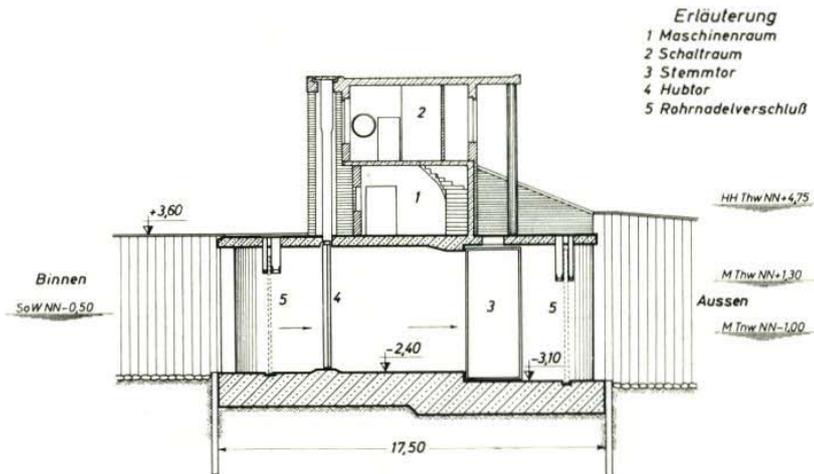


Abb. 15. Längsschnitt des Sieles Bensorsiel

Ein Wechselbetrieb der beiden Hubtore kann geschaltet werden, die demgemäß auch beidseitig dichtend sind, um nach außen oder innen das Wasser zu kehren.

Da jede elektrische Steuerung und hydraulische Betätigung gestört werden kann, wenn auch, wie die Erfahrung zeigt, die Betriebssicherheit außerordentlich groß ist, so muß doch durch ausreichend vorhandene und erprobte Warn- und Signalanlagen vorgesorgt werden, um bei etwaigem Versagen den Sielwärter zu alarmieren. Eine Signalanlage spricht schon bei Stauwendelauslenkung, d. h. bei einsetzendem Flutstrom an, unabhängig davon, wie der Schließvorgang verläuft. Bei einer Unterbrechung des elektrischen Stromes tritt selbsttätig ein Notstromaggregat in Tätigkeit. Wenn auch dieses versagt, schließt das Tor sich selbsttätig, wobei die Sperren durch einen Schwachstrom-Batteriesatz gelöst werden. Kann das normalerweise betriebene äußere Tor infolge eines Hindernisses im Siellauf nicht geschlossen werden, so wird über ein Zeitrelais das andere in Wartstellung stehende Tor geschlossen.

Die Tore der hier behandelten Sielbauwerke sind ausschließlich aus Stahl hergestellt worden, da sie wegen ihrer großen Abmessungen (Tabelle 1) in Holzbauweise zu schwer sind. Durch Verzinkung und mehrschichtige Kunstharzanstriche, die sich bewährt haben, wird ein hoher Rostschutz erreicht. Der große Vorteil der Hubtore ist – wie bereits erwähnt – ihre einfache Unterhaltung, denn sie brauchen nur hochgefahren zu werden, um von allen Seiten zugänglich zu sein. Die Herausnahme der Schlagtore ist erheblich schwieriger, da die oberen Lager ausgebaut werden müssen, um sie mittels eines Kranes anheben zu können. Wenn das Maschinenhaus den Siel- und Schöpfwerksteil gemeinsam überdeckt, kann hierfür der Deckenkran benutzt werden, der für Montage und Unterhaltung von Toren und vor allem Pumpen notwendig ist. Das Gebäude hat den Vorteil, alle Einrichtungen unter einem Dach zu haben (Abb. 16). Seine Innenraumhöhe ist so zu bemessen, daß der Ausbau der Schlagtore und im Falle eines Versagens auch ein Herausheben der Hubtore möglich ist. Zweckmäßig ist der Einbau von Krananlagen mit elektrischem Katzaufzug, da ein Ausbau der tonnenschweren Maschinenteile mit einem Kran, der nur von Hand betrieben wird, sehr schwierig und zeitaufwendig ist.

Der hydraulische Torantrieb bewährt sich vor allem in vom Maschinenhaus überdeckten Sielläufen, in denen sich auch bei tiefen Temperaturen die Tore bewegen lassen, da die Wärme des Gebäudes ein Einfrieren der Torantriebe verhindert. Die Betriebssicherheit der hydraulischen Antriebe ist heute so groß, daß auf andere Bewegungsarten, wie in Harlesiel auf einen Seilzug für Hubtore, verzichtet werden kann. Um eine lange Haltbarkeit der Kolbenstangen in den Hydraulikzylindern zu gewährleisten, sind sie aus Remanit zu fertigen, denn solche mit Chromauflage haben sich im Seewasser nicht bewährt. Außerdem sind Schmutzabstreifer und automatische Schmiereinrichtungen für die Kolbenstangen an den Hydraulikzylindern anzubringen.

Auch Hubtore mit ungünstigen Abmessungen, d. h. eine große Breite im Verhältnis zur Höhe, sind nur mit einem Hubzylinder ausgerüstet. Zwei Hubzylinder und damit zwei Angriffspunkte am Hubtor setzen eine Gleichlaufeinrichtung voraus, die störanfällig sein kann, so daß Verklemmungen der Tore eintreten. Alle Hubtore, auch die in Knocksiel mit 11,5 m Breite und 4,0 m Höhe, sind daher an einem Zylinder aufgehängt.

Erwähnt sei hier, daß bei Zahnstangenantrieben für Schlagtore herkömmlicher Bauart wie in Leybuchtziel darauf zu achten ist, daß sie nicht von Hochwasser oder nur sehr selten benetzt werden, weil sie sonst sehr viel Pflege und Unterhaltung erfordern. Nach sorgfältiger Auswahl und konstruktiver Gestaltung dürften auch andere Antriebsarten für Sielverschlüsse wie Seilzüge mit Trommelauflage, Kettenantriebe, wobei Ketten gewöhnlicher Fertigung oder GALLSche Ketten in Spezialfertigung als Druck- und Zugorgan und andere Systeme verwendet werden können, genügend betriebssichere Sielverschlüsse ergeben. Jedoch werden der Bauauf-

wand und die Unterhaltung größer als bei hydraulischen Antrieben sein, so daß diese die insgesamt günstigste Lösung beim heutigen Stand der Technik darstellen dürften.

Für Instandsetzungsarbeiten im Siellauf und Ausbau der Tore sind Notverschlüsse außen und binnen erforderlich. Bewährt haben sich bei den großen Abmessungen Rohrnadeln, die

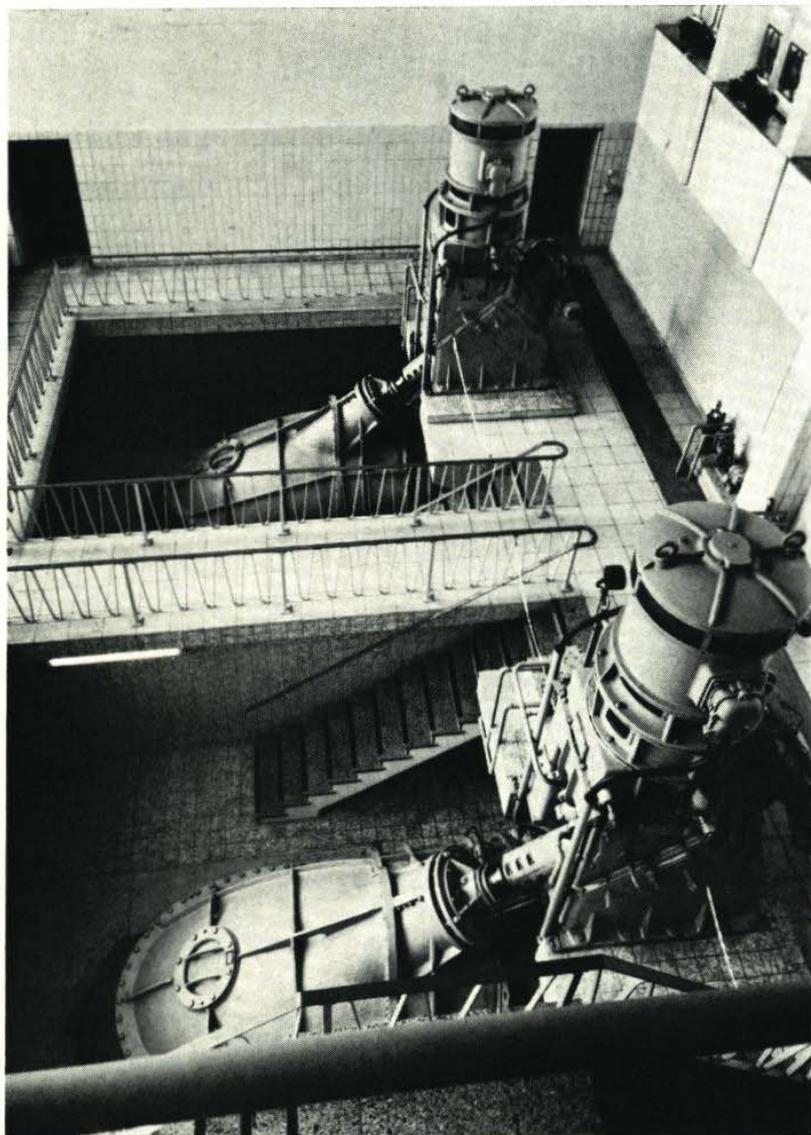


Abb. 16. Innenaufnahme des Sieles und Schöpfwerkes Neu-harlingersiel. Die Schrägpumpen sind über Winkelgetriebe mit senkrechtstehenden Antriebsmotoren verbunden

aus Stahl oder seewasserbeständigem Leichtmetall hergestellt werden. Um die Rohrnadeln leichter handhaben zu können, sind sie an den Enden zu schließen, so daß sie im Wasser einen gewissen Auftrieb haben. Doppel-T-förmige Leichtmetall-Profile, die mit Profilnasen ineinander fassen, für Notverschlüsse zu verwenden, haben sich als ungünstig erwiesen, da sich damit eine ausreichende Dichtigkeit nur schwer erreichen läßt.

2. Pumpenaggregate und zugehörige Einrichtungen

Die Förderleistung der Schöpfwerke beträgt bis zu 50 m³/s bei mittlerer geodätischer Förderhöhe (Tabelle 1), wobei die einzelne Pumpe 12,5 m³/s leistet. Die Schöpfwerkspumpen stehen vertikal (Abb. 7) oder liegen schräg (Abb. 17). Für die Wahl der Pumpenart sind vor

allem bauliche Gesichtspunkte maßgebend. Schrägpumpen erfordern ein breiteres Maschinenhaus als Vertikalpumpen; die Gründungstiefe ist ebenfalls unterschiedlich. Die Platzfrage ist wie im Schöpfwerk Greetsiel, wo nur wenig Raum binnenseits des Deiches verfügbar war, wesentlich.

Die Anzahl der Pumpen und ihre Anordnung in den Schöpfwerken geht aus der Zusammenstellung (Tabelle 1) hervor. Ebenfalls sind dort die Leistungen bei verschiedenen Förderhöhen angegeben, wie auch die Pumpendurchmesser. Bei der Auswahl der Pumpentypen und -größen sollten Bau- und Beschaffungskosten der Maschineneinrichtung sowie die Betriebskosten in Vergleich gesetzt werden. Je höher die Betriebsstundenzahl der Pumpen ist, um so mehr schlagen die Betriebskosten gegenüber den Anlagekosten zu Buch.

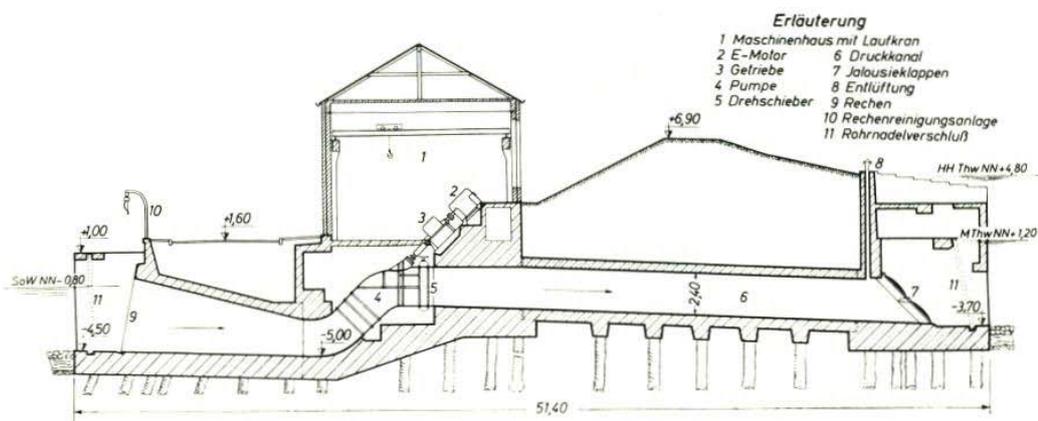


Abb. 17. Längsschnitt des Pumpenlaufes Leybuchtziel mit schrägliegender Pumpenaggregat

Den günstigsten Wirkungsgrad hat jede Pumpentype nur bei einer bestimmten Schaufelstellung und Drehzahl, so daß zur Anpassung an die wechselnden geodätischen Förderhöhen Schaltgetriebe vorgesetzt und die Pumpen mit Verstellpropellern ausgerüstet sind. Die Schaufelradverstellung von flach auf steil und umgekehrt ermöglicht während des Pumpbetriebes neben einem weichen Anlaufen des Pumpenaggregates auch eine gute Anpassung an die Förderhöhe. Der Pumpenbetrieb ist dadurch im optimalen Wirkungsbereich möglich, wozu ebenfalls über das Schaltgetriebe regelbare Drehzahlen beitragen. Im Schöpfwerk Sautelersiel wird die Pumpendrehzahl ohne Zwischenschaltung von Getrieben mittels drehzahlveränderlicher, langsamlaufender Asynchron-Schleifringläufermotoren verändert. Im Schöpfwerk Harlesiel waren ursprünglich feste Propeller eingebaut, deren Ersatz durch Verstellpropeller dann zu höheren Förderleistungen führte.

Schrägliegende Pumpen erfordern ausreichend bemessene Wellenlager und eine zuverlässige Lagerschmierung, da die unteren Lagerschalen am stärksten belastet sind. Während die Pumpengehäuse aus Stahlguß bestehen, können die Propellerschaufeln auch aus Bronze hergestellt werden, jedoch dürfte nach den vorliegenden Erfahrungen V2A-Stahl oder Stahlguß vorzuziehen sein.

Die Pumpen werden in allen Schöpfwerken von Elektromotoren angetrieben; lediglich eine der drei Pumpen des Schöpfwerkes Harlesiel hat einen Dieselantrieb, der als Sicherheit bei Stromausfall dienen soll. Durch Stromeinspeisung über zwei oder auch drei unabhängige Zuleitungen, wie sie in allen Schöpfwerken vorhanden ist, bleibt bei Ausfall einer Leitung der Pumpbetrieb erhalten. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß damit die Stromzuleitung allen Betriebsanforderungen genügt und auf den mit höheren Betriebs- und Unterhaltungskosten belasteten Dieselantrieb verzichtet werden kann.

Als Antriebsmotoren werden ausschließlich asynchrone Drehstrom-Motoren verwendet, bei denen es sich, mit wenigen Ausnahmen in Neuharlingersiel und Greetsiel, um Hochspannungsmotoren mit 6 kV handelt. Um bei den großen elektrischen Leistungen von bis zu 2400 kW in Knocksiel unliebsame Stromstöße im Versorgungsnetz zu vermeiden, werden Schleifringläufer bevorzugt. Da jedoch auch diese Motorenart Stromstöße beim Anlaufen eines Schöpfwerkes nicht ganz verhindert, verlangt der Stromlieferant eine schalttechnische Verblockung der Motoren, so daß sie nur nacheinander angefahren werden können. Zu berücksichtigen ist auch, daß die Antriebsmotoren oft nur mit halber oder noch geringerer Nennleistung gefahren werden, so daß der $\cos. \varphi$ sehr schlecht ist. Weil der Blindstrom bezahlt werden muß, wenn er nicht durch Kondensatoren ausgeglichen wird, sind solche in allen Schöpfwerken eingebaut.

Als Verschlüsse gegen Hochwasser sind auch in den Pumpenläufen doppelte Absperrorgane vorzusehen, wovon eines selbsttätig wirken muß. Drehklappen sind bei Schrägpumpen als Verschuß unmittelbar vor der Pumpe wegen ihres geringen Platzbedarfes und ihrer günstigen Einbauweise geeignet. Sie werden mit dem Anlaufen der Pumpen hydraulisch geöffnet, wobei darauf zu achten ist, daß die Öffnungsbewegung der Klappenkörper dem Förderstrom der Pumpe angepaßt ist. Wenn die Einstellung so ist, daß die Klappe vom Förderstrom zusätzlich aufgestoßen wird, ergibt sich beim Abstellen der Anlage, daß das zurückflutende Wasser von außen her die Klappe in Schließstellung bringt und die Dichthaltung verbessert. An den Vertikalpumpen in Greetsiel sind noch Keilflachschieber mit außenliegender Spindel und elektrischem Antrieb eingebaut. Schieber mit innenliegenden Gewindespindeln sind infolge der Verschmutzung durch Wasser innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit unbrauchbar, da die Spindeln festsitzen, so daß der Schieber sich nicht mehr oder nur noch mit großer Anstrengung öffnen und schließen läßt.

Die äußeren selbsttätig arbeitenden Schnellverschlüsse sind in den meisten Fällen Klappen. In Greetsiel und Leybucht siel werden große Einzelklappen durch hydraulische Huborgane beim Pumpbetrieb in Öffnungsstellung gefahren, um das Druckrohr voll freizugeben. Beim Schließen werden die Klappen hydraulisch gebremst, wodurch besonders bei großer Förderhöhe harte Schläge auf das Auslaufbauwerk vermieden werden. In Harlesiel (Abb. 7) ist seinerzeit von äußeren Klappen abgesehen worden, weil durch deren Schlagen beim Schließen — besonders bei großer Förderhöhe — Schäden am Bauwerk befürchtet wurden. Der Einstrom von Außenwasser wird durch das in Heberform ausgebildete Druckrohr verhindert, welches jedoch im Pumpbetrieb hydraulisch ungünstig ist. Weitere Druckkanäle dieser Art sind daher nicht ausgeführt worden.

Vor großen Pumpen sind auch Jalousieklappen zweckmäßig, die keinen zusätzlichen hydraulischen Antrieb erfordern. Die Ausstromöffnung wird entweder von zwei übereinanderliegenden oder von vier mit einem Stegkreuz unterteilten Klappen geschlossen. Diese Hohlklappen sind durch Ölfüllung so ausgewogen, daß sie im Pumpenstrom leicht aufschwimmen und nur einen geringen hydraulischen Verlust erzeugen, der nach Angaben der Herstellerfirmen weniger als 10 cm betragen soll.

Im Schöpfwerk Knocksiel sind als äußere Abschlußorgane Schnellschlußschütze eingebaut, die hydraulisch betätigt werden und sich bei Ausfall des Stromes selbsttätig schließen. In den Schützen sind zusätzliche Klappen notwendig, da beim Anlaufen des Pumpenaggregates nicht gegen das geschlossene Schütz gepumpt werden kann, wozu mehrere Minuten Öffnungszeit benötigt werden. Beim Hochfahren des Schnellschlußschützes schließen sich die Klappen selbsttätig.

Im Scheitel der Druckrohrleitungen und unmittelbar hinter den Rückschlagklappen sind Entlüftungen notwendig. Diese Entlüftungsöffnungen sind mit Rückschlag-Dichtklappen zu versehen, da sonst beim Pumpbetrieb Luft angesaugt wird, wobei die Heberwirkung gestört und damit die Förderleistung der Pumpen beeinträchtigt wird.

Ein Vergleich der Pumpeneinrichtung in den Schöpfwerken zeigt, daß für die gleiche Aufgabenstellung verschiedene Lösungen in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten entstanden sind. Sie sind unter Berücksichtigung der jährlichen Betriebs- und Unterhaltungskosten sowie der Anlage- und Investitionskosten jedoch unterschiedlich zu bewerten (SAALFELD und KASPEROWSKI 1965). Danach sind selbst bei großen Förderströmen Schöpfwerke mit vertikalen Pumpen wirtschaftlich und wartungsgünstig herzustellen, was mancher Anschauung, nach der Schrägpumpen am wirtschaftlichsten sind, widerspricht.

Nach den hier gewonnenen Erfahrungen dürften sich wirtschaftliche und beim heutigen Stand der Pumpentechnik betriebssichere Lösungen durch Unterwasserpumpen anbieten. Für kleine und auch mittlere Förderströme sind sie bereits ausgeführt worden, wobei das Problem

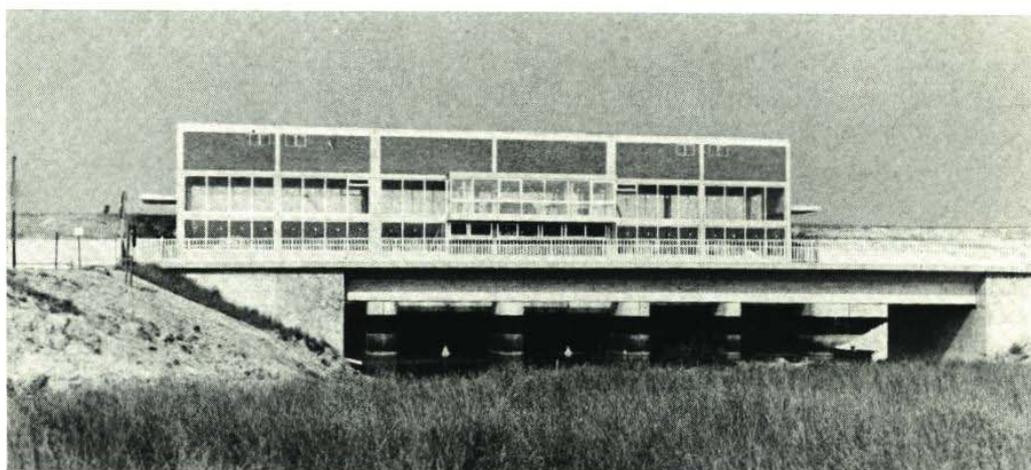


Abb. 18. Aufnahme des Mündungsbauwerkes Sautelersiel von der Binnenseite; davor Straßenbrücke, unterhalb der die mittleren Sieleinläufe und seitlichen Pumpeneinläufe erkennbar sind

in der Kontrolle und der Wartung der eingetauchten Pumpensätze liegt. Als besonders strömungsgünstig bei großen Fördermengen und sehr kleinen Förderhöhen könnte auch eine Propeller-Rohrpumpe mit horizontaler Welle und einem außerhalb untergebrachten Antriebsmotor angesehen werden. Leistungsfördernd bei dieser Pumpenart ist die geradlinige Wasserführung, bei der Umlenkverluste vermieden werden. Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage wird hierdurch nicht unerheblich verbessert. Gegenwärtig werden bereits die ersten Aggregate dieser Art an anderer Stelle eingebaut.

Die Außen- und Binnenwasserstände werden in das Schöpfwerk übertragen und übereinander aufgezeichnet, so daß jederzeit die geodätische Förderhöhe erkennbar ist und entsprechend den nach Versuchen und Berechnungen vorgegebenen Pumpenkennlinien die Drehzahl und Schaufelstellung eingestellt werden kann. Gemessen wird ebenfalls die Wasserstandsdifferenz am Rechen, der den Pumpenöffnungen vorgesetzt ist. Bei einer Verstopfung des Rechens steigt das Gefälle über eine zulässige Grenze, oberhalb der die Rechenreinigungsanlage sich automatisch einschaltet und der Rechen wieder freigemacht wird, wie es bei den neuesten Anlagen in Sautelersiel und Knocksiel der Fall ist. An den älteren Schöpfwerken, wie in Harlesiel, fehlen Rechenreinigungsanlagen noch; an den anderen Schöpfwerken werden sie von Hand gesteuert. Ihr Einbau vermindert die Pumpkosten merkbar.

Der Betrieb der hochwertigen Pumpenaggregate erfordert ein umfangreiches Steuer- und Überwachungssystem, welches sich schon darin ausdrückt, daß z. B. im Siel und Schöpfwerk Sautelersiel (Abb. 18) rund 6 km Schaltkabel notwendig sind. Die Sielverschlüsse und Schöpfwerkspumpen werden von einem zentralen Schaltraum aus bedient, in dem auf einem Steuer-

pult die Symboldarstellungen der verschiedenen Betriebsvorgänge zusammengefaßt sind. Durch umfangreiche Sicherungen und Blockierungen ist dafür gesorgt, daß Schäden durch unrichtige Bedienung vermieden werden. So kann beispielsweise eine Pumpe erst dann angefahren werden, wenn vorher durch Fettpumpen der nötige Fettdruck in den Pumpenlagern hergestellt ist. Auch werden die Temperaturen der Motoren überwacht und führen zu selbsttätigen Abschaltungen, falls die betrieblich zulässigen Grenzen überschritten werden.

Die Bedienung dieser umfangreichen und wertvollen maschinellen Anlagen setzt entsprechend qualifiziertes Personal voraus. Dessen Aufgabe hat vor allem die Überwachung, die Instandhaltung und die Beseitigung einfacher Störungen zu sein. Schäden an Pumpen, Getrieben, Motoren und Verschlüssen sind dagegen nur durch Spezialisten der Lieferfirmen zu reparieren, da die Schöpfwerkswärter nicht über entsprechend vielseitige Kenntnisse und auch Werkzeuge verfügen können, die zu deren Beseitigung notwendig sind.

VI. Schlußbetrachtung

Die in Ostfriesland fertiggestellten Siele und Schöpfwerke haben die Entwässerung bereits erheblich verbessert, was sich bei den starken Niederschlägen in jüngster Zeit vorteilhaft ausgewirkt hat. Wenn die Mündungsbauwerke Knocksiel und Sautelersiel ab Ende 1968 bzw. Anfang 1971 betrieben werden, können auch die am tiefsten liegenden Gebiete Ostfrieslands ausreichend entwässern. Der Ausbau der Binnengewässer ist dann noch zu vervollständigen und der Leistungsfähigkeit der Siele und Schöpfwerke anzupassen, um das Binnenwasser Ostfrieslands voll beherrschen zu können.

Aus der Darstellung der mit der Planung und Bauausführung von Sielen und Schöpfwerken verknüpften Probleme geht hervor, daß in deren konstruktiven und betrieblichen Gestaltung sich eine Weiterentwicklung abzeichnet, daß aber ein vergleichbarer Fortschritt in den Grundlagen für die hydraulische Bemessung der Sielquerschnitte und der Pumpenleistung nicht zu erkennen ist. Die heute bekannten Bemessungsverfahren sind entweder zu sehr auf Annahmen angewiesen, um genügend zuverlässig zu sein, oder rechnerisch zu unhandlich, um benutzt zu werden. Unter Ausnutzung elektronischer Rechenverfahren ist es heute jedoch möglich, auch ein verzweigtes Binnengewässernetz zu bearbeiten, was aber wiederum genaue Kenntnisse über die Verteilung von Niederschlag, Versickerung und Verdunstung im Einzugsgebiet voraussetzt. Diese werden daher zunächst untersucht werden müssen, um zu exakten Berechnungen zu kommen. Auf die allein aus der Erfahrung abgeleiteten Beziehungen für die Bemessung von Sielen und Pumpen müßte dann verzichtet werden können. Eine Überdimensionierung der Mündungsbauwerke auf Grund dieser Erfahrungswerte besteht jedoch keinesfalls, wie in letzter Zeit die Notwendigkeit, große Abflussmengen zu bewältigen, bewiesen hat.

VII. Schriftenverzeichnis

- Franzius-Institut der TH Hannover: Modellversuche für das Schöpfwerk Accumersiel. Unveröffentlichter Bericht, Hannover 1965.
- KERSTING, W.: Neuharlingersiel, Schöpfwerks-, Siel-, Hafens-, Straßen- und Hochwasserschutzbauten auf engstem Raum. Wasser und Boden, Jg. 11, 1959, H. 12.
- KÖRITZ, D.: Untersuchung des Neuharlingersielers Außentiefs 1954/55. Jahresbericht 1955 der Forschungsstelle Norderney, Bd. VII, 1956.
- KRAMER, J.: Zustand und Veränderungen des Greetsieler Außentiefs. Jahresbericht 1954 der Forschungsstelle Norderney, Bd. VI, 1955.

- KRAUSE, G.: Wasserwirtschaft in Ostfriesland. Tagungsheft der Wasser- und Kulturbauingenieure, Aurich 1959.
- LIESE, R.: Die Ermittlung der Abflußspende in der tidebeeinflussten Marsch. Deutsch. Gew. Mitt., Sonderheft 1960.
- LUCK, G.: Zur Gestaltung von Schöpfwerkspfeilern. Wasser und Boden, Jg. 17, 1965, H. 11.
- MÜLLER, E. u. MÜLLER-SPÄTH, W.: Beitrag zur Entwässerung der Marsch. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- MÜLLER, E. und MÜLLER-SPÄTH, W.: Berechnung der natürlichen Entwässerung in den Küstenmarschen. Die Küste, H. 16, 1968.
- RAGUTZKI, G.: Beitrag zur Gründung von Schöpfwerken nach den Ergebnissen von Sohldruckmessungen. Jahresbericht 1965 der Forschungsstelle Norderney, Bd. XVII, 1966.
- SAALFELD, K. und KASPEROWSKI, E.: Ein Vergleich von Propellerpumpen mit senkrechter oder mit schrägliegender Welle. KSB, Technische Berichte, 1965, H. 10.
- WOLTER, R.: Ingenieurbauten im Küstengebiet. BWK, Landesverband Niedersachsen, Berlin und Bremen, 5. Lehrgangsbericht, 1967.