

Feste Warnowquerung Rostock – Besondere Beanspruchungen der Tunnelelemente beim Absenken und Zwischenlagern

Dieter Winselmann, Uwe Gerlach

Ingenieurbüro Prof. Duddeck und Partner GmbH, Braunschweig

Zusammenfassung: Zur besseren Anbindung der westlichen Wohngebiete an den Seehafen im Osten wird zwischen Rostock und Warnemünde ein Absenktunnel durch die Warnow gebaut. Im Endzustand besteht der Tunnel aus 15 m langen, einzelnen Tunnelblöcken, die sich als Gliederkette Untergrundverformungen anpassen können. Für den Bauzustand werden jeweils acht Blöcke zu insgesamt sechs Schwimmstücken zusammengespannt. Aus den Bauzuständen, durch die erforderliche Zwischenlagerung und aus Wellen entstehen hohe Biegebeanspruchungen dieser Schwimmstücke, die sich oft nur als kleine Differenzen großer Zahlen darstellen. Für eine sichere Ausführung ist die rechnerische Erfassung aller Zwischenzustände unabdingbar.

1 EINLEITUNG

Der historische Stadtkern von Rostock, s. Abbildung 1, liegt ca. 10 km landeinwärts an der Warnow, die von hier aus in nördlicher Richtung in die Ostsee fließt. Die Erweiterung der Stadt hat sich beiderseits entlang der Warnow vollzogen. Der große Seehafen Rostocks liegt im Osten der Warnow. Die großen neuen Wohngebiete, die vornehmlich in der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg entstanden sind, liegen westlich der Warnow. Während der Zeiten des Berufsverkehrs entstehen hieraus hohe Verkehrsströme durch das Zentrum Rostocks, für die auch die bestehende Fährverbindung von Schmarl im Westen zum Seehafen nur wenig Entlastung bringen kann. Im Oktober 1994 wurde daher von der Rostocker Bürgerschaft der Beschluß gefaßt, eine „Feste Warnowquerung“ im Bereich der

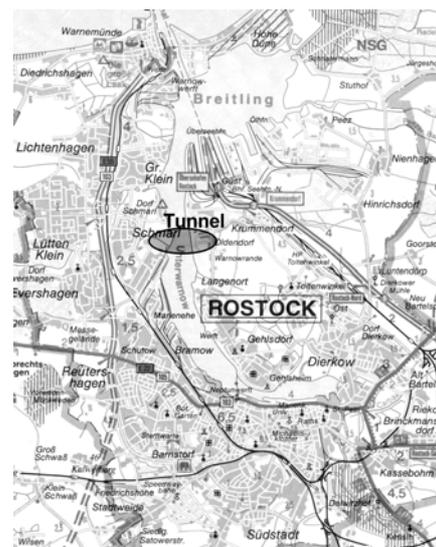


Abbildung 1: Lageplan Rostock

jetzt vorhandenen Fähre zu errichten.

Auf der Grundlage des Fernstraßenbauprivatfinanzierungsgesetzes (August 1994) wurde ein Wettbewerb für ein Konzessionsmodell ausgeschrieben. Im Rahmen dieses Wettbewerbes arbeiteten Bietergemeinschaften unterschiedliche technische Lösungen aus und boten sie auf der Basis einer privaten Finanzierung an, die sich über Benutzungsgebühren (Maut) während der ersten 30 Betriebsjahre tragen muss. Nach Ablauf der 30jährigen Refinanzierungsphase geht das Bauwerk unentgeltlich in den Besitz der Hansestadt Rostock über.

Im Juli 1996 wurde der Konzessionsvertrag auf der Grundlage des Baues eines Absenktunnels mit der französischen Baufirma Bouygues und der australischen Bank Macquarie unterzeichnet und die Konzessionsgesellschaft Warnowquerung GmbH & Co. KG gegründet, die selbst für die gesamte Entwurfsplanung und die Planfeststellung des Querungsbauwerkes sowie der zugehörigen Anschlußstrecken verantwortlich war. Im Juni 1998 wurde der Antrag auf Planfeststellung eingereicht und der Beschluß erging gut ein Jahr später im Oktober 1999, so dass schon im März 2000 offizieller Baubeginn sein konnte.

2 Bauweise

Nach einer Variantenuntersuchung, bei der sowohl mehrere Brückenlösungen (feste sowie bewegliche Brücke) als auch unterschiedliche Baumethoden zur Herstellung eines Tunnels verglichen wurden, ergab sich ein Tunnel im Einschwimm- und Absenkverfahren als kostengünstigste Lösung, die durch eine Trassenoptimierung auch im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung keine ungünstigeren Eingriffe in die Natur bedingt als sie bei den Alternativen erforderlich wären.

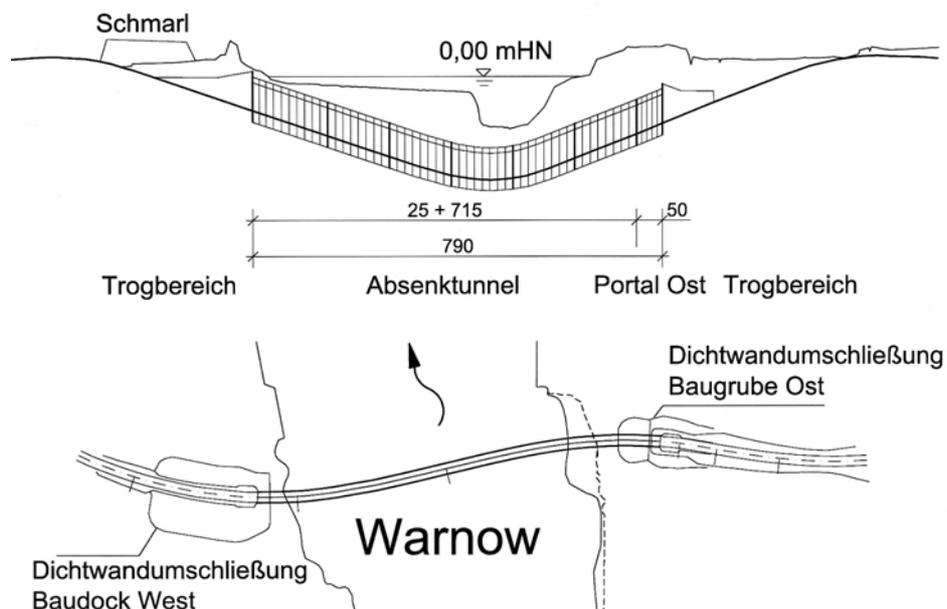


Abbildung 2: Warnowquerung, Längsschnitt und Grundriss

Der Tunnel wird als zweizelliger Stahlbetonrahmen hergestellt. Im einzelnen besteht das Querungsbauwerk aus den Trogstrecken im Westen und im Osten sowie zwei je 12,5 m langen Portalblöcken im Westen und fünf je 10 m langen Ortbetontunnelblöcken bzw. dem Portal im Osten. Dazwischen befindet sich die ca. 715 m lange Absenkstrecke, die aus sechs Absenkelementen mit je ca. 119,2 m Länge gebildet wird, s. Abbildung 2. Ein Absenkelement besteht aus acht je ca. 15 m langen Blöcken, die im Endzustand durch verzahnte Fugen getrennt sind. So erhält der Tunnel eine gewisse Beweglichkeit, um Zwängungen aus Baugrundverformungen zu minimieren und um sich der unterschiedlich hohen Überschüttung anpassen zu können.

Neben der Herstellung im Einschwimm- und Absenkverfahren ist eine weitere Besonderheit dieses Bauwerkes, dass die Trogstrecken nicht als z. B. Stahlbetontröge ausgebildet werden, sondern dass in den Sand- und Mergelböden Dichtwände erstellt werden, die zusammen mit einer durchgehend vorhandenen unteren Mergelschicht auch für den Endzustand einen dauerhaft dichten Trog ausbilden, aus dem das Restwasser (Sickerwasser) abgepumpt werden muß. Die Böschungen der Tröge werden im Inneren des abgedichteten „Topfes“ als Raumgitterwände ausgeführt.

Im Rahmen der Optimierung der nur dreieinhalb Jahre langen Bauzeit wurde während der Ausführungsplanung entschieden, die beiden westlichen Tunnelblöcke (Portalblöcke) zusammen mit dem letzten Tunnelelement zu betonieren und in einem Stück einzuschwimmen. Dies hat wesentliche Auswirkungen auf die Nachweise im Schwimmzustand, da sie sehr sensibel auf die Länge eines Schwimmelementes reagieren, und auf das Sekundärauflager, das aufgrund des Schleusenbauwerkes weiter zur Mitte des Schwimmelementes verschoben werden musste.

3 Einschwimm- und Absenkverfahren

Bei Ortbetontunneln, die im Einschwimm- und Absenkverfahren hergestellt werden, werden die einzelnen Tunnelblöcke der Absenkstrecke während der Bauzeit zu größeren Absenkelementen zusammengeschlossen. Dies kann über hochfeste Bewehrungselemente oder aber – wie auch im Falle der Warnowquerung – über Spannglieder mit Vorspannung erfolgen. Die so gebildeten Absenkelemente werden an den

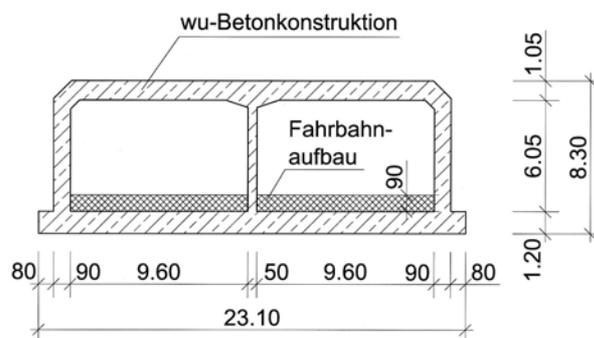


Abbildung 3: Querschnitt

Stirnseiten provisorisch mit Schottwänden verschlossen und müssen so konstruiert sein, dass sie zum einen einschließlich aller Gewichte der Absenkausrüstung und der Pontons noch sicher aufschwimmen und zum anderen nach dem Absenken mit Beton im Sohlbereich so ballastiert werden können, dass die Auftriebssicherheit auf Dauer gewährleistet ist. Hieraus ergeben sich enge Grenzen, innerhalb derer der Querschnitt und die Wanddicken optimiert werden müssen. Der Querschnitt ist in Abbildung 3 dargestellt.

Nach Fertigstellung aller Tunnelelemente erfolgt das Einschwimmen und Absenken in die vorab ausgebagerte Absenkrinne sukzessive von Ost nach West. Als Widerlager für das erste Element dienen dabei die im Osten zu diesem Zeitpunkt bereits fertiggestellten und überschütteten fünf Portalblöcke. Die Einschwimmelemente werden an ihrer Ostseite (Primärseite) über eine Konsole an das vorhergehende Element bzw. an das Portal angekoppelt und an ihrer Westseite (Sekundärseite) auf zwei in den Außenwänden eingebauten, höhenverstellbaren Stahlstempeln aufgelagert. Unter den Stahlstempeln werden vorab Hilfsfundamente abgesenkt. Zwischen den Tunnelelementen und der Sohle der Absenkrinne verbleibt zunächst ein ca. 75 cm hoher Spalt, der nachträglich durch Rohre in der Tunnelsohle mit Sand verfüllt wird. Hierzu wird ein Sand-Wasser-Gemisch mit hohem Druck so eingespült, dass sich einzelne „Sandkuchen“ von bis zu 25 m Durchmesser ausbilden, die am Ende eine kontinuierliche Auflagerfläche ergeben.

In den Fugen zwischen den einzelnen Absenkelementen sind auf genau justierten Stahlrahmen großvolumige Abdichtungsprofile, sogenannte Gina-Profile, montiert, die bei geringem Anfangsdruck, der mechanisch durch horizontale Pressen aufgebracht wird, eine erste Abdichtung gewährleisten. Die eigentliche Abdichtungswirkung dieser Profile entsteht erst, wenn das Wasser zwischen den Schottwänden der beiden letzten Elemente nach innen abgelassen wird und der verbleibende Wasserdruck, der dann allein auf das Sekundärende wirkt, die Elemente zusammenschiebt und die Abdichtungsprofile komprimiert. Für den Endzustand wird zusätzlich ein Omega-Band eingebaut.

Für die Herstellung der Absenkelemente ist ein temporäres Dock erforderlich. Wegen der Größe der Elemente und der schwierigen zeitlichen Disposition kommen Docks von Werften hierfür nur selten infrage. In der Regel wird vorab ein unabhängiges Baudock erstellt oder wie hier für den Warnowtunnel ein Teil der Rampe so ausgebaut, dass er als Dock verwendet werden kann. Aufgrund der begrenzten räumlichen Verhältnisse und zur Minimierung des Baudocks ist es so ausgelegt, dass jeweils nur zwei der sechs Elemente darin hergestellt werden können. Dies erfordert am Übergang in die Warnow ein provisorisches Schleusenbauwerk, das wieder verschlossen werden kann. Die fertiggestellten Tunnelelemente werden so ballastiert, dass sie mit dem Fluten des Baudocks möglichst gleichmäßig über die Länge aufschwimmen. Danach werden sie bis zum Absenken zwischengelagert. Hierfür mussten Plätze mit entsprechendem Tiefgang ausgewählt werden, die auch ausreichend vor größeren Welleneinflüssen geschützt sind. Die beiden ersten Elemente des Warnowtunnels werden für ca. ein Jahr in einem Werftbecken südlich von Warnemünde gelagert, das dritte und vierte an einem Lagerplatz, der speziell hierfür im Breitling hergerichtet wird. Die beiden letzten Elemente können direkt aus dem Baudock zur Absenkstelle verholt werden. Das Absenken der ersten Elemente sofort nach deren Herstellung ist zum einen aus zeitlichen Gründen nicht möglich, da das Ostportal so früh noch nicht fertiggestellt ist, und zum anderen technisch problematisch, da ein Element erst vollständig unterspült werden kann, wenn das jeweils nächste Element abgesenkt ist. Werden folgende Elemente erst später abgesenkt, liegt ein Element zu lange, ohne am Ende unterspült zu sein, und es besteht die Gefahr, dass sich in dem verbleibenden Spalt unter dem Element Schlamm o. ä. abgelagert.

Damit die Zusammendrückung in den Fugenbändern zwischen den Elementen erhalten bleibt, darf der Wasserdruck von der letzten Schottwand durch Lenzen des Baudocks erst entfernt werden, wenn das Portal West überschüttet ist und ausreichende Horizontalkräfte übertragen werden können. Da das Portal jetzt auch mit eingeschwommen

wird, ist es erforderlich, die Sohle hierfür speziell rau auszubilden, um die Reibung zu gewährleisten.

4 Absenken

Das Absenken der Tunnelelemente erfolgt über vier Seile mit Pontons oder Schwimmkränen. Die genaue Ausführung steht z. Zt. noch nicht fest. Die Abbildung 4 zeigt exemplarisch den Zustand beim Absenken mit Pontons. An der Primär- und an der Sekundärseite sind dafür jeweils ca. 25 m vom Elementende entfernt je zwei Aufhängeösen in die Tunneldecke einbetoniert worden. Für das Absenken – sowie auch während der Zwischenlagerung – werden die Elemente mit Wasser ballastiert. Hierzu sind im Innern der einzelnen Elemente in jeder Tunnelröhre je 5 im Mittel ca. 21,8 m lange Ballastwassertanks eingebaut worden. Durch gezielte Veränderung der Wasserstände müssen das Elementgewicht, die Biegebeanspruchungen der Elemente sowie die Seil- und Auflagerkräfte sehr genau eingestellt werden, da die resultierenden Beanspruchungen sich als kleine Differenz großer Zahlen ergeben, s. u.

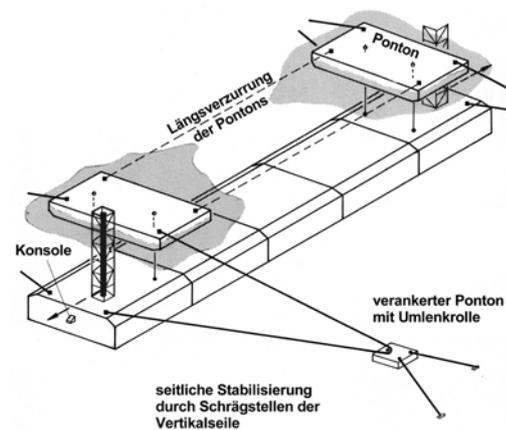


Abbildung 4: Absenken mit Pontons

5 Statische Beanspruchungen beim Absenken

Die Ausführungen zur Bauweise und zu den Schwimm- bzw. Absenkzuständen sind nötig, um zu verstehen, dass die Beanspruchungen der Tunnelelemente sich bei diesem Verfahren grundsätzlich von den üblichen Beanspruchungen eines Tunnelrahmens unterscheiden und aus Lastfällen herrühren, die bei einem vor Ort betonierten Tunnel gar nicht auftreten.

Neben der üblichen Beanspruchung des Tunnelrahmens im Endzustand in Querrichtung folgen aus den Bauzuständen hohe und z. T. nur schwer kalkulierbare Beanspruchungen in Längsrichtung. Die wesentlichen Bauzustände sind durch die sieben Phasen

1. Aufschwimmen im Baudock und Trimmen
2. Schwimmen und Zwischenlagerung
3. Eintauchen beim Absenken
4. Absenken an den Seilen
5. Auflagern auf Hilfsfundamenten
6. Unterspülen
7. Endlage nach dem Absetzen und Ballaustausch

gekennzeichnet. In jeder dieser Phasen ist eine abgestimmte Wasserballastierung erforderlich. Der Auftriebsüberschuss, mit dem das Element aufschwimmt bzw. das Gewicht inklusive Ballastierung, mit dem das Tunnelelement jeweils am Boden gehalten wird, ist im Vergleich zu seinem Gesamtauftrieb extrem klein. Die einzelnen Werte sind in der Tabelle 1 in Prozent der Gesamtauftriebskraft eines Standardelementes angegeben. Die Gesamtauftriebskraft beträgt für ein ca. 119,2 m langes Element, wenn es vollständig unter Wasser ist, je nach Wichte des Wassers 213.620 bis 219.180 kN. Ihr steht das Gesamtgewicht inklusive Ballastierung und Absenkausrüstung von 221.120 bis 226.660 kN gegenüber.

	Kräfte [kN]		Anteil [%]	
	min G max A	max G min A	min G max A	max G min A
1. Eigengewicht	183.710	193.410	83,82	90,54
2. Ballastierung (Auflagerung Hilfsfundamente)	39.790	24.550	18,15	11,49
2. Absenkausrüstung	3.160	3.160	1,44	1,48
3. Auftrieb	-219.180	-213.620	100,00	100,00
4. Absenkgewicht (in Seilen hängend)	2.000	2.000	0,91	0,94
5. res. Gewicht beim Auflagern bis Unterspülen	7.480	7.500	103,41	103,51
6. Differenzdruck aus Unterspülen	-1.750	-1.750	0,80	0,82

Tabelle 1: Gewichte und Auftrieb

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich ist, wird das Tunnelelement mit einem Gewichtsanteil von weniger als 1 % abgesenkt und bis zur Umballastierung bzw. bis zur Überschüttung mit einem Gewichtsanteil von nur ca. 3,5 % am Boden gehalten. Vor dem Unterspülen ergibt sich eine Auftriebssicherheit von nur ca. $\eta = 1,035$, die während des Unterspülens durch den Druck noch bis $\eta = 1,026$ reduziert wird. Diese geringen Sicherheiten sind nur zulässig, da die Gewichte ständig durch die gemessenen Seil- bzw. Pressenkräfte überwacht werden und die Ballastierung gegebenenfalls angepasst werden kann. Übliche Gewichtsrechnungen sind hier nicht ausreichend. Die statische Berechnung muß daher sukzessive verfeinert werden. Im Rahmen der Ausführungsplanung werden in einer ersten Berechnung Grenzwerte für alle Eingangsparameter angesetzt, um zum einen die mindestens erforderliche Größe der Ballastwassertanks bei leichtem Element und großem Auftrieb zu ermitteln und zum anderen zu bestätigen, dass mit den gewählten Größen der Tanks eine ausreichende und angepasste Ballastierung in allen Einzelzuständen möglich ist. In weiteren Berechnungsschritten werden dann die Eingangsparameter hinsichtlich des aufgemessenen Verdrängungsvolumens, der Gewichte und der tatsächlich eingebauten Bewehrungsmengen immer weiter verfeinert und die Gewichts- und Absenkberechnung angepasst. Für die Herstellung der Tunnelelemente muß mit der ersten Berechnung auch schon die erforderliche Anzahl der Spannglieder der Längsvorspannung bestimmt werden. Als Kriterium für die Auslegung dieser Längsvorspannung dient neben dem Bruchsicherheitsnachweis die Forderung, dass in den Blockfugen immer eine Mindestdruckspannung von $0,1 \text{ N/mm}^2$ erhalten bleiben soll. Durch den Anpressdruck soll die Dichtigkeit der Blockfugenbänder sichergestellt werden.

Die endgültige Absenkberechnung bei den in Tabelle 1 genannten kleinen Differenzen der sehr großen Zahlen für Auftrieb und Gewicht ist erst nach dem Aufschwimmen im Baudock möglich. Erst anhand des in dieser Phase vermessenen Freibords ist die Größe des Restauftriebes, der durch die Ballastierung ausgeglichen werden muss, und vorher nur durch sehr genaue Vermessungen und Gewichte von Probewürfeln eingegrenzt wurde, endgültig bekannt. Die Berechnung der zusätzlichen Ballastierung kann nun mit der erforderlichen Genauigkeit durchgeführt werden. Für die beiden ersten Tunnelelemente, die bis jetzt ausgeschwommen wurden, wurde rechnerisch ein Freibord von 0,55 m nach dem Aufschwimmen bestimmt. Eingestellt hat sich ein mittleres Freibord von ca. 0,57 m mit einer leichten Verkippung von ca. ± 3 cm. Dies verdeutlicht, wie genau die Absenkberechnung bereits verfeinert wurde. Die Toleranzbreiten für die Ursprungsberechnung, die den Werten in Tabelle 1 zugrunde liegen, betragen:

Betongewicht: 23,63 – 24,13 kN/m³ Bewehrungsmenge: 1,20 – 2,00 kN/m³
 Betonvolumen: 63,69 – 64,12 m³/m Wichte des Wassers: 9,99 – 10,25 kN/m³
 Verdrängung: 179,26 – 179,80 m³/m

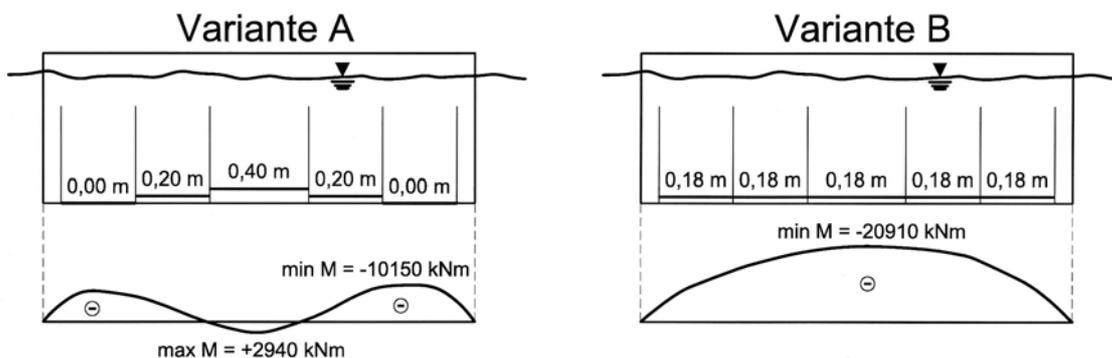


Abbildung 5: Einfluss unterschiedlicher Ballastierung bei gleicher Wassermenge

Das Gesamtgewicht des Ballastes hat aufgrund der großen Länge der einzelnen Schwimmelemente zusammen mit seiner Verteilung innerhalb der einzelnen Wassertanks großen Einfluß auf die Schnittgrößen und damit auch auf die Längsvorspannung. Hier ist es nötig, durch entsprechende Reserven auch Schwankungen während der Ausführung auszugleichen. Anhand des Beispiels auf Abbildung 5 wird die Empfindlichkeit der Ballastierung deutlich. In Variante B wurde zur Veranschaulichung der gesamte Wasserballast, der für Variante A ermittelt wurde, auf alle Tanks gleichmäßig verteilt. Die Summe der Vertikalkraft wird dabei nicht verändert. Die Biegemomente in der Mitte des Tunnelelementes ändern sich dann von +2.940 kNm auf –20.910 kNm. Die Berechnungen wurden für die Phase in der das Tunnelelement schwimmt durchgeführt.

Die einzelnen Elemente werden zunächst horizontal eingeschwommen. Das Absenken erfolgt über eine Seite, damit nicht das ganze Element gleichzeitig überströmt wird. In einem solchen Fall wäre die Verteilung der Abtriebskraft auf die vier Seile unbestimmt und könnte zu Überbeanspruchungen eines Traggliedes führen. Das langsame Eintauchen über eine Seite ermöglicht eine kontinuierliche und kontrollierte Steigerung der Seillasten, die zusätzlich zu den in dieser Phase bereits gut bekannten Gewichten konti-

nauerlich durch Messungen überprüft werden müssen. In dieser Phase muss die Ballastierung laufend angepasst werden, da bei dem Eintauchen einer Seite die abgewandte Seite bei unveränderten Gewichten aus dem Wasser herauskommt. Aufgrund der großen Hebelarme könnte dies zu hohen Biegemomenten und Überbeanspruchungen der Längsvorspannung in Elementmitte führen.

Erst während des Absenkens wird das Element – an den Seilen hängend – in die endgültige Neigung, die bis zu 3,84 % beträgt, gebracht. Die Abbildung 6 zeigt exemplarisch eine zugehörige Ballastierung. Durch die Neigung des Tunnelelementes verläuft das Ballastwasser in den Tanks. Es ergibt sich eine Verschiebung der Resultierenden zu dem tieferen Ende hin. Bei unveränderter Ballastierung würde der Unterschied zwischen dem geneigten und dem horizontalen Tunnelelement etwa $\pm 50\%$ in den Seilkräften betragen. Auch bei den Biegemomenten zeigt sich, wie sensibel die Beanspruchungen auf geringe Verschiebungen der Resultierenden reagieren.

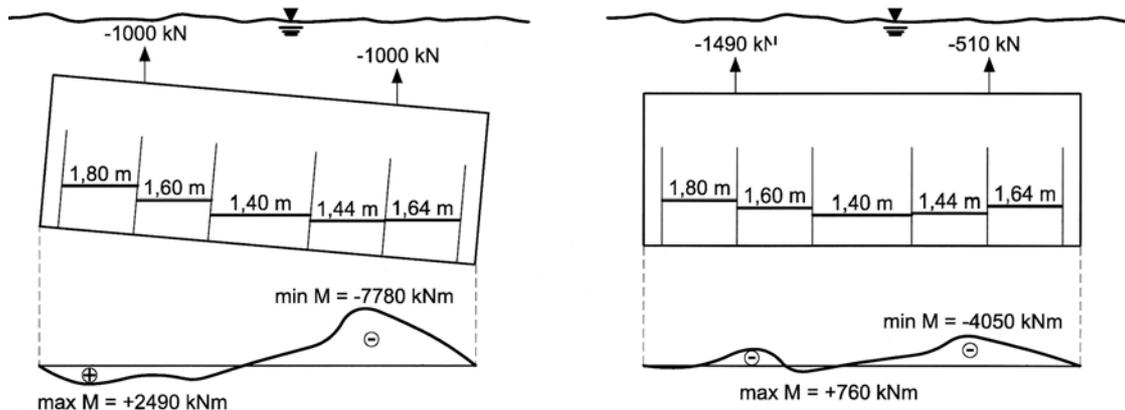


Abbildung 6: Einfluss der Elementneigung

6 Wellenbeanspruchungen

Aufgrund der begrenzten Größe des Baudocks müssen vier der insgesamt sechs Tunnelelemente zwischengelagert werden. Durch den Einfluss des Windes und durch vorbeifahrende Schiffe entstehen Wellen, die zu Biegebeanspruchungen der Tunnelelemente führen. Anders als bei den üblichen Lastansätzen, gibt es hierfür keine Vorgaben, so dass Ansätze und Grenzwerte in Abstimmung aller Beteiligten für die speziellen Verhältnisse vor Ort festgelegt werden müssen. Grundlage hierfür bilden Seegangsuntersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau für den Ausbau zum Seehafen Rostock aus dem Jahre 1994.

Statisch wichtig zur Beurteilung von Welleneinflüssen ist, daß es bei diesen Beanspruchungen sowohl auf die Höhe der Wellen als auch auf deren Länge, die direkt von der Wellenperiode abhängt, ankommt. Außerdem werden die Schnittgrößen durch den Winkel der Wellenrichtung zur Längsachse der Schwimmelemente bestimmt. Kurze

Wellen mit kleinen Wellenperioden haben auch bei größeren Höhen einen vergleichsweise kleinen Einfluss auf die Beanspruchung eines Tunnelelementes, da die an das Element angreifenden Kräfte sich auf kurzer Länge ausgleichen. Wellen mit großen Perioden führen dazu, dass das Element entweder in der Mitte oder an den Enden „aufreitet“. Hierdurch verändert sich auf großen Längen das Freibord und durch die Gewichtsveränderungen mit entsprechend großen Hebelarmen kommt es zu großen Biegebeanspruchungen. Die Biegemomente des Tunnelelementes sind in Abbildung 7 gegenübergestellt. Im Falle der Warnowquerung beträgt der Anteil aus Wellen infolge Wind und Schifffahrt bei den im Werftbecken gelagerten Tunnelelementen rechnerisch bis zu 80 % der Gesamtbeanspruchungen, vgl. Tabelle 3. Hier sind wahrscheinlich sehr konservative Ansätze für die Wellenbelastungen eingeflossen.

Periode	Wellenlänge	Winkel = 0,0°			Winkel = 15,0°			Winkel = 30,0°			Winkel = 45,0°		
		M	Mt	Q	M	Mt	Q	M	Mt	Q	M	Mt	Q
[sec]	[m]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]
3,00	14,05	231	0	10	110	0	10	80	50	0	10	100	0
4,00	24,68	1285	0	110	1940	810	120	1510	1450	90	1870	2180	90
5,00	36,60	7102	0	370	5680	1600	340	4690	3120	310	7580	4530	350
6,00	48,42	13938	0	640	13940	2050	640	12200	3740	640	12990	5520	800
8,00	70,91	26425	0	1310	30950	2160	1300	42220	4270	1280	51100	5750	1430
9,00	81,74	47499	0	1430	50880	2130	1470	56200	4010	1600	56560	4970	1530
10,00	92,39	60331	0	1700	62000	1960	1720	61970	3530	1710	55320	4840	1480
11,00	102,91	66982	0	1810	66910	1720	1790	63270	3040	1710	53820	4880	1410
12,00	113,32	67672	0	1830	66100	1500	1790	62560	3090	1640	49760	4740	1300
12,50	118,50	68235	0	1800	66700	1470	1770	60620	3080	1600	48180	4590	1240
13,00	123,65	66879	0	1780	65510	1480	1730	57530	3050	1530	45920	4480	1190

Tabelle 2: Schnittgrößen aus einer Einheitswelle mit einer Höhe von H=1,0 m

Für die vorgegebenen Wellenlängen und Wellenhöhen muß zunächst die Eintauchtiefe des Elementes sowie seine Neigung entsprechend der Wellenverteilung bestimmt werden, um anschließend aus den auf das Element wirkenden Gewichts- und Auftriebskräften die Beanspruchungen zu ermitteln. Für die statische Berechnung ist neben der Vielfalt der möglichen Wellen zusätzlich zu beachten, dass sich das Schwimmelement jeweils an verschiedenen Stellen in der Welle befinden kann. Dies gilt besonders für längere Wellen und führt dazu, daß die Lage des Anfangspunktes des Schwimmelementes innerhalb einer Wellenlänge rechnerisch variiert werden muss, um für die jeweilige Welle die ungünstigste Beanspruchung zu ermitteln. In der Tabelle 2 sind die Schnittgrößen infolge Windwellen für eine Einheitswelle mit einer Höhe von 1,0 m unter den Windangriffswinkeln von 0 bis 45 ° zusammengestellt. Die Wellengeometrie wird dabei

entsprechend einer Sinuskurve berücksichtigt. Es ist ersichtlich, dass sich bei Wind in Längsrichtung des Tunnelelementes (Winkel = 0 °) die ungünstigsten Biegemomente für Wellenlängen, die etwa der Länge des Tunnelelementes entsprechen, ergeben. Dies trifft etwa bei einer Periode von 12,5 sec. zu. Bei schrägem Windangriff erfährt das Tunnelelement zusätzlich Torsion.

Die Abbildung 7 zeigt für eine kurze Welle mit einer Periode von $T = 6,0$ sec. und eine lange Welle mit einer Periode von $T = 12,5$ sec. die Wellenverteilungen und daraus resultierende Biegemomente. Die Wellenhöhe und das Freibord sind in den Darstellungen zur besseren Übersicht nicht maßstäblich dargestellt worden. Bei der Bestimmung der aus den veränderlichen Wellenhöhen resultierenden lokalen Auftriebskräfte muss beachtet werden, dass der Einfluss der Wellen von der Eintauchtiefe des Elementes und der Wassertiefe abhängt. Die Druckverteilung unter einer fortschreitenden Welle setzt sich aus dem hydrostatischen und dem dynamischen Anteil aus der Wellenbewegung zusammen. Mit zunehmender Tiefe gleichen sich die an der Oberfläche vorhandenen Wellen aus. Der ausgleichende Einfluß verringert sich bei größeren Wellenperioden. Bei einer Eintauchtiefe von ca. 7,8 m (Freibord = 0,50 m), wie sie für diese Tunnelelemente vorgesehen ist, und einer Wellenperiode von 6,0 sec. wirken auf die Sohle des Tunnelelementes nur noch ca. 53 % der an der Oberfläche vorhandenen Druckunterschiede. Die Berechnung der Wellendrucke erfolgt nach der linearen Wellentheorie von AIRY-LAPLACE.

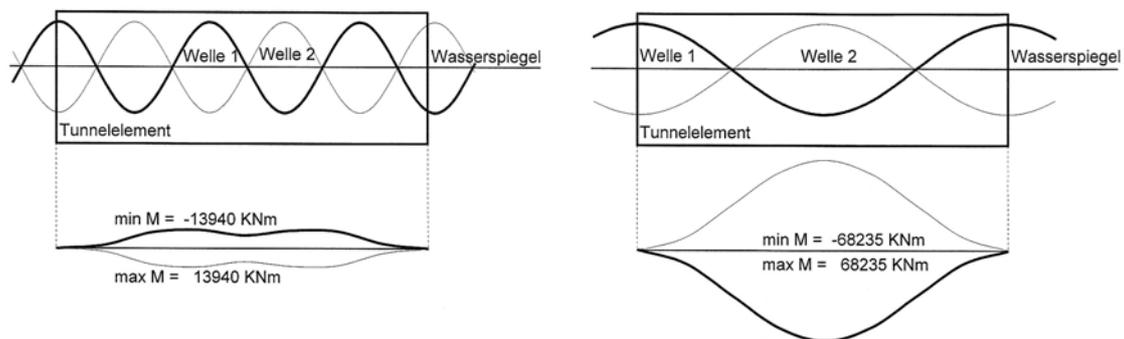


Abbildung 7: Biegemomente aus Wellen infolge Wind

In der Natur treten über einen längeren Zeitraum keine Wellen mit einer konstanten Wellenhöhe und einer konstanten Wellenlänge auf, sondern verschiedene Wellen überlagern sich. Dies kann durch sogenannte Wellenspektren erfaßt werden. Solche theoretischen Spektren basieren auf umfangreichen Messungen und setzen sich aus verschiedenen Wellen mit unterschiedlichen Wellenhöhen und Perioden zusammen. Die Spektren werden in die einzelnen Wellenanteile nach der Fourieranalyse zerlegt. Die zu den einzelnen Wellen gehörenden Biegebeanspruchungen werden dann entsprechend der Energieanteile der jeweiligen Wellen überlagert. Für die Wellenbeanspruchung des Warnowtunnels wurde als Verteilung das Jonswap-Spektrum zugrunde gelegt. Bei den vorliegenden Verhältnissen ergibt sich hieraus eine Erhöhung der signifikanten Wellenhöhe

um ca. 86 %. Das zugrunde gelegte Wellenspektrum liegt für die Lagerungsorte der Tunnelelemente auf der sicheren Seite, da es aus Messungen in der Nordsee im Tiefwasser ermittelt wurde und daher mit hoher Wahrscheinlichkeit einen größeren Anteil „langer“ Wellen enthält. Für die Ermittlung der einzelnen Wellenhöhen wurden Auswertungen der Universität Rostock und Studien der Bundesanstalt für Wasserbau zugrunde gelegt. Die Werte lagen zwischen 0,20 m (lange Wellen) und 0,50 m (kurze Wellen) für die Wellenhöhe und 15,0 sec. (lange Wellen) und 6,0 sec. (kurze Wellen) für die Wellenperiode. Daraus ergeben sich Wellenlängen von 48 m bei kurzen Wellen und 144 m bei langen Wellen.

Falls es möglich ist, dass Wellen auf Grund eines geringen Freibords oder infolge der Elementkrümmung auf das Element auflaufen können, sind detaillierte Untersuchungen erforderlich. Wellen, die quer zum Schwimmelement auf die Tunneldecke auflaufen, werden auf dem Tunnel gebrochen und laufen an der gegenüberliegenden Seite gleichmäßig ab. Vereinfachend kann der oberhalb der Tunneldecke liegende Wellenanteil als gleichmäßige Zusatzbelastung, die durch größere Eintauchtiefen ausgeglichen wird, angenommen werden. Für die Warnowquerung waren diese gesonderten Berechnungen für das gekrümmte im Tiefpunkt liegende Tunnelelement erforderlich.

Zusätzlich zu den Wellen aus Wind entsteht durch vorbeifahrende Schiffe ein Schwall bzw. ein Sunk, der sich bis in benachbarte Hafenbecken auswirkt. Die Wasserspiegeländerung wird durch die Rückströmung hervorgerufen. Dabei muss die von fahrenden Schiffen verdrängte Wassermenge im Restquerschnitt des Kanales aus Kontinuitätsgründen zurückfließen. Statisch kann dies wie eine Welle mit großer Periode behandelt werden, die in Längsrichtung an dem Element vorbeiläuft.

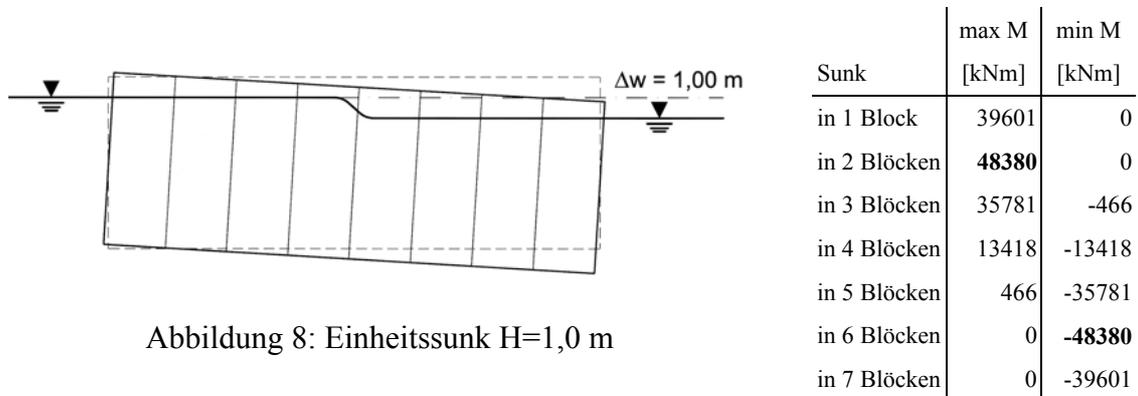


Abbildung 8: Einheitssunk H=1,0 m

Abbildung 8 zeigt unterschiedliche Phasen des Eintauchens eines Schwimmelementes infolge Sunk. Das Element bei glatter See ist in der Abbildung gestrichelt dargestellt. Die Belastung aus vorbeifahrenden Schiffen hängt von der Geschwindigkeit und dem Verdrängungsquerschnitt ab. Für die Zwischenlagerung wurde ein Verdrängungsquerschnitt von 532 m² und eine Geschwindigkeit von 6,0 Knoten festgelegt. Der berechnete Sunk ergibt sich damit zu 0,30 m. Die Berechnung der Schnittgrößen erfolgt indem der Sunk bzw. Schwall sukzessive über die Länge des Tunnelelementes verschoben wird. In Abbildung 8 sind die Beanspruchungen bei einem blockweise zunehmenden Sunk für eine Einheitshöhe von H = 1,0 m zusammengestellt.

7 Überlagerung

Nachdem die Schnittgrößen aus der Absenkberechnung und den Wellenberechnungen ermittelt sind, erfolgt die Überlagerung. Die Schnittgrößen sind für die einzelnen Lastfälle in Tabelle 3 zusammengestellt.

Beanspruchung		M [kNm]
Absenken		10.000
kurze Welle,	H = 0,50 m	11.930
lange Welle,	H = 0,30 m	13.650
vorbeifahrende Schiffe,	H = 0,30 m	14.510
Summe		49.730

Tabelle 3: Resultierende Beanspruchung eines Tunnelelementes

Die Beanspruchungen werden für die Spannungsnachweise zu Gebrauchsschnittgrößen und zum Nachweis der Vorspannung zu Bruchschnittgrößen kombiniert. Die äußeren Schnittgrößen werden dann den haltenden Beanspruchungen gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass zusätzlich zur Vorspannung auch der Wasserdruck auf die Stirnseiten der Tunnelelemente eine haltende Wirkung ausübt.

8 Schluß

Der Absenktunnel durch die Warnow ist im Endzustand eine Gliederkette aus 15 m langen einzelnen Tunnelblöcken. Für das Aufschwimmen, Zwischenlagern und Absenken ist es erforderlich, je acht Tunnelblöcke zu einem Schwimmelement zusammen zu spannen. Während dieser Bauphase sind die Beanspruchungen, die aus Einwirkungen resultieren, die oft viel weniger genau fassbar sind als es bei üblichen Lastzuständen der Fall ist, durch kleine Differenzen großer Zahlen geprägt. Hier kommt es sehr genau darauf an, auch Details zu erfassen und die entscheidenden Gefährdungssituationen zu erkennen. Das Analysieren und Abwägen von Risiken ist hierbei eine wesentliche Ingenieuraufgabe.