

# Simulation des Stapellaufes

## 1 Allgemeines

Auch in der frühen Entwurfsphase ist es von wesentlicher Bedeutung, eine detaillierte Stapellaufrechnung durchführen zu können, falls die Werft nicht über ein Baudock verfügt und daher auf den Stapellauf verzichten kann. Entscheidend ist dabei, ob die Werft grundsätzlich von einem in etwa unveränderlichen Wasserstand an Hinterkante Bahn ausgehen kann (wie z.B. NOBISKRUG oder TNSW) oder ob der Wasserstand aufgrund von Umweltbedingungen größeren Schwankungen unterworfen ist (wie z.B. bei der FSG). Wesentliche Aufgabe der Stapellaufrechnung besteht darin, das Schiff ohne Schaden bei gleichzeitiger Vermeidung von Schäden an der Ablaufbahn ins Wasser zu bekommen. Zusätzlich muß man jedoch beachten, daß sich aufgrund der sich stetig verkürzten Bauzyklen eine Verzögerung aufgrund ungünstiger Witterungsverhältnisse stark auf den Produktionsplan und damit auf die Kosten auswirkt. So werden z.B. bei der FSG unmittelbar nach dem Stapellauf das Deckshaus und die Maschine mittels eines angemieteten Schwimmkranes aufgesetzt. Jede Verzögerung des Stapellaufes bringt daher erhebliche Mehrkosten mit sich, da der teure Schwimmkran nutzlos warten muß. Auf der anderen Seite ist es ausgesprochen ärgerlich, wenn lediglich aufgrund eines sicher durchzuführenden Stapellaufes zusätzliche Verstärkungen angebracht werden müssen, die nach dem Stapellauf wieder entfernt werden müssen. Da also der Stapellauf aufgrund nicht vorhersehbarer Witterungsbedingungen immer ein erhebliches technisches Risiko darstellt, ist es notwendig, ihn möglichst genau berechnen zu können. Will man unnötige Verstärkungen grundsätzlich vermeiden, dann ist es erforderlich, auch schon während der Methodenplanungsphase sicherzustellen, daß das Schiff im angestrebten Abarbeitungsgrad unter Annahme vernünftiger Witterungsbedingungen sicher ablaufen kann. Um dieses sicherzustellen, muß im Einzelfalle geprüft werden, ob die folgenden Schadensmöglichkeiten sicher vermieden werden können:

- **Kippen:** Das Schiff dreht nicht rechtzeitig auf und kippt dann um Hinterkante Bahn. Diese Schadensart führt unter Umständen zu einem Totalverlust des Schiffes bei gleichzeitigen Schäden an Schlitten und Bahn. Daher muß das Kippen unter allen Umständen vermieden werden. Offensichtlich neigt das Schiff vor allem dann zum Kippen, wenn der Massenschwerpunkt weit hinten liegt und gleichzeitig hinten wenig Auftrieb entsteht, z. B. weil das Schiff sehr schlank ist oder bei niedrigem Wasserstand.
- **Dumpen:** Das Schiff schwimmt an Hinterkante Bahn nicht frei und fällt dann ins Wasser. Das Dumpen führt nur dann zu einem Schaden, wenn das Schiff im Verlauf seiner Fallkurve entweder auf das Hellingende oder auf den Gewässerboden aufschlägt. Dann allerdings kann die Beschädigung beträchtlich sein. Im allgemeinen dumpen Schiffe dann, wenn der Massenschwerpunkt so weit vorne liegt, daß beim freischwommenen Schiff vorne ein größerer Tiefgang vorliegt als der Wasserstand an Hinterkante Bahn.
- **Kentern:** Schiffe kentern beim Stapellauf von vorneherein, wenn deren seitliche Auswanderung des Massenschwerpunkts das Kippmoment der Bahn überschreitet. Dies kommt allerdings -selbst bei nur einer Mittelbahn- praktisch nicht vor. Allerdings ist zu beachten, daß Schiffe während der Aufdrehphase kentern können, da die Restkraft am Bugschlitten ein krängendes Moment verursacht. Im wesentlichen sind lange, schlanke Schiffe kentergefährdet, die hohe Restkräfte bei geringen KM-Werten aufweisen.
- **Beschädigung des Bodens:** Bedingt durch hohe lokale Bodenbelastung kann die Bodenstruktur des Schiffes überlastet werden und es kommt zu einer Beschädigung des Schiffes (oder der Bahn, falls diese falsch ausgelegt wurde, was aber praktisch meines Wissens nicht vorkommt). Beschädigungen aufgrund hoher Kantenpressung sind vor allem dann zu erwarten, wenn nicht genügend Auftrieb entsteht, d.h. bei schlanken Hinterschiffen und/oder niedrigen Wasserständen. Erwartete Bodeschäden begrenzen häufig den zulässigen Wasserstand und sind Anlaß für (meist temporäre) Verstärkungen der Bodenstruktur.

- **Zu große Restkraft:** Meist ist -aus Kostengründen- nur der untere Teil der Ablaufbahn für große wandernde Einzellasten ausgelegt. Dreht das Schiff zu früh auf, dann fällt die große Restkraft im unverstärkten Teil der Bahn an und führt zu Zerstörungen.
- **Kollision:** Je nach Platzverhältnissen kann das Schiff mit festen, landseitigen Einrichtungen kollidieren, z.B. wenn nicht genügend Auslaufstrecke vorhanden ist oder bei Seitenwindeinfluß und seitlichen Beschränkungen.
- **Stehenbleiben:** Bedingt durch eine ungünstige Kombination von Reibbeiwert und Hellingneigung, läßt sich das Schiff nicht anschieben oder es bleibt während der Ablaufphase stehen.
- **Bodenberührung:** Bei nicht ausreichendem Freischlag zwischen Schlitten oder Schiff und dem Gewässergrund kommt es zur Grundberührung und damit zu Schäden an Schiff und/oder Schlitten.

Eine sorgfältig durchgeführte Stapellaufrechnung hat das Ziel, potentielle Gefährdungen soweit wie möglich auszuschließen und eventuell Gegenmaßnahmen aufzuzeigen. Bevor wir überlegen, wie eine Simulationsmethode für Stapellaufberechnungen beschaffen sein muß, um alle möglichen Gefährdungen analysieren zu können, wollen wir zunächst untersuchen, welche Beschränkungen sich aus der üblichen Vorgehensweise ergeben.

## 2 Bisheriger Stand der Technik

In der klassischen Stapellauftheorie wird vorausgesetzt, daß sowohl das Schiff wie auch die Bahn starr (d.h. unverformbar) sind. Meist wird der Stapellauf auch statisch berechnet, d.h. die Wasseroberfläche wird als unverformbar angenommen. Dann bestimmt man aus hydrostatischen Berechnungen für das mit Hellingneigung vertrimmte Schiff die Formwerte und geht folgendermaßen vor:

- **Aufdrehen:** Sind die Momente um Vorkante Schlitten, also im wesentlichen Gewicht mal Schwerpunktlage und Verdrängung mal Verdrängungsschwerpunktlage im Gleichgewicht, dann dreht das Schiff auf. Die Restkraft wird einfach aus Gewicht minus Verdrängung bestimmt.
- **Kippen:** Sind die analogen Momente um Hinterkante Bahn ausgeglichen, dann kippt das Schiff, wenn es nicht schon vorher aufgedreht ist. Die Differenz im Ablaufweg ergibt die sogenannte Kippreserve.
- **Bodendruck:** Das Schiff wird als Balken unter trapezförmiger Streckenlast angenommen. Die Gesamtbelastung ergibt sich aus Gewicht minus Auftrieb, die Verteilung aus der Momentenbilanz. Damit kann der Bodendruck berechnet werden.

In Sonderfällen wird auch die Ablaufgeschwindigkeit berechnet, z.B. um den Auslaufweg abzuschätzen. Dabei ist diese Betrachtungsweise für grobe Untersuchungen durchaus ausreichend, obwohl sie in bestimmten Fällen zu falschen Schlußfolgerungen führt. Die wesentlichen Mängel der klassischen Vorgehensweise sind meiner Meinung nach die folgenden:

- Dadurch, daß das **Schiff** als starr angenommen wird, vernachlässigt man dessen Durchbiegung. Daher wird der maximale Bodendruck erheblich **unterschätzt**, da die Bahn insbesondere am Ende nicht gleichmäßig beansprucht wird.
- Dadurch, daß die **Bahn** als starr angenommen wird, werden die Bodendrucke nun wiederum **überschätzt**. Durch die Elastizität der Bahn werden die (beim elastisch betrachteten Schiff berechneten) Bodendrucke wieder etwas gemindert, da sich die Bahn durch Verformung den Spitzenlasten entzieht.

- Dadurch, daß die **Wasseroberfläche** als unverformbar angenommen wird, werden die Bodendrücke **überschätzt**, da sich im allgemeinen am Heck ein Wellenberg ausbildet, der den Auftrieb vergrößert.

Daraus wird deutlich, daß das klassische Berechnungsverfahren nicht zwingend konservativ ist. Je nachdem, welcher Effekt überwiegt, können die nach der klassischen Methode berechneten Bodendrücke über- oder unterschätzt werden. Will man an die ingenieurmäßig noch vertretbaren Grenzen herankommen, dann wird deutlich, daß das Verfahren eben wegen dieser Eigenschaft nicht brauchbar ist. Daher wollen wir uns im folgenden mit einer verbesserten Theorie beschäftigen, die auf einer voll dynamischen Simulation beruht.

### 3 Numerisches Simulationsverfahren

#### 3.1 Grundlagen

Offensichtlich wird eine wesentliche Verbesserung erzielt, wenn die Bewegung des Schiffes dynamisch berechnet wird und sowohl Schiff als auch Bahn als elastisch angenommen werden. Gleichzeitig muß die Verformung der Wasseroberfläche berücksichtigt werden. Die Schiffsbewegung kann dabei durch die Bewegungsgleichungen eines starren Körpers beschrieben werden, die numerisch im Zeitbereich gelöst werden können. Diese Vorgehensweise entspricht etwa der bei der Simulation des Manövrierverhaltens. Natürlich kommen bei der Stapellaufrechnung noch die Freiheitsgrade Trimm, Vertikalbewegung und Krängung hinzu.

Der elastische Schiffskörper wird durch finite Balkenelemente dargestellt, wobei pro Elementknoten zwei Freiheitsgrade zugelassen sind: Eine Absenkung und eine Verdrehung.

Zur Beschreibung der Wasserbewegung dienen Flachwassergleichungen. Diese Gleichungen werden mit einem impliziten Differenzenverfahren gelöst (SÖDING 1975).

Zur Berechnung des Stapellaufes werden folgende Koordinatensysteme verwendet:

- Das bodenfeste Koordinatensystem  $x_B$ - $y_B$ - $z_B$ , wobei die  $x_B$ -Achse in Ablafrichtung, die  $z_B$ -Achse nach oben und die  $y_B$ -Achse in Schiffsquerrichtung zeigt. Die Ablaufbahn und die Verknüpfung von Schiff, Bahn und Gewässer, die Ruhewasser- und die Gewässerbodenhöhen werden in diesen Koordinaten beschrieben. Die Koordinaten und Geschwindigkeiten des Schwerpunktes werden ebenfalls in diesem System angegeben.
- Das für den Schiffbauer gewohnte schiffsfeste System  $x_S$ - $y_S$ - $z_S$  des Schiffes. Es bewegt sich mit dem Schiff, die  $x_S$ -Achse zeigt in Schiffs längsrichtung nach hinten in Ablafrichtung, die  $y_S$ -Achse nach Steuerbord und die  $z_S$ -Achse nach oben. Die Schiffsform und die Kräfte bzw. Momente bezüglich des Massenschwerpunktes sowie die Balkenknoten werden in diesem System dargestellt.
- In gewässerfesten Koordinaten  $x_G$ - $y_G$  werden die Randbedingungen des Gewässers beschrieben. Dazu werden die Indizes  $i$  und  $j$  der Gewässerzellen aufsteigend in Richtung der  $x_G$ - bzw.  $y_G$ -Achse eingeführt.

Der Trimmwinkel  $\vartheta$  ist im mathematisch positiven Sinne definiert. Die  $x_B$ - $z_B$ - und  $x_S$ - $z_S$ -Ebene fallen zusammen.

## 3.2 Modellierung

### 3.2.1 Schiffskörperoberfläche

Analog zur Vorgehensweise bei den üblichen volumetrischen Berechnungen wird die Schiffsform einfach durch eine Menge von Spanten idealisiert. Da die Berechnung der hydrostatischen Kräfte auch bei verformter Wasseroberfläche unproblematisch ist, ergibt sich das optimale Spacing der Spanten aus einer möglichst guten Idealisierung der Massenverteilung und der Schiffsstruktur.

### 3.2.2 Elastische Struktur des Schiffskörpers

Jeder Spant stellt einen Knoten des FE-Schiffsbalkens dar, an dem das Flächenträgheitsmoment und die Schubfläche bekannt sein müssen. Zwischen zwei Spanten wird ein Timoshenko-Balkenelement angesetzt, das konstante Querschnittswerte über seine Länge hat. Diese werden aus den Daten an den beiden Spanten gemittelt. Sprunghafte Veränderungen der Querschnitte lassen sich also nur verschmiert darstellen. Aufgrund der Einzelbalkenelemente kann die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Systems aufgestellt werden. Aufgrund der nichtlinearen Federkennlinien (s.u.) ist das Gleichungssystem jedoch ebenfalls nichtlinear, es kann aber nach einem von KUNOW angegebenen Verfahren durch schrittweise Linearisierung gelöst werden.

### 3.2.3 Massenverteilung des Schiffskörpers

Ebenso wie die elastischen Kenndaten wird auch die Masse pro Länge an jedem Spant angesetzt. Zwischen den Spanten wird ein trapezförmiger Verlauf angenommen. Aus der Masse pro Länge wird die Gesamtschiffsmasse durch Integration über die Länge mit der Trapezregel berechnet.

### 3.2.4 Ablaufbahn

Das Schiff gleitet auf einer Bahn, die auf Mitte Schiff angeordnet ist und im boden- und schiffsfesten Koordinatensystem in der  $x_B$ - $z_B$ - bzw.  $x_S$ - $z_S$ -Ebene liegt. Die Form der Bahn muß nicht gerade sein, auch gekrümmte Bahnverläufe sind möglich.

### 3.2.5 Gewässer und Randbedingungen

Die Grundform des Gewässers ist rechteckig. Seine Ausdehnung in  $x_G$ - und  $y_G$ -Richtung des Gewässerkoordinatensystems wird durch die Seitenlängen  $l_{x-G}$  und  $l_{y-G}$  festgelegt. Die Lage des Koordinatensprungs des Gewässerkoordinatensystems wird in bodenfesten Koordinaten angegeben. Zur Berechnung der Wasserbewegung wird das Gewässer in rechteckige Zellen zerlegt. Jeder dieser Zellen wird eine Gewässerbodenhöhe  $h_B$  in Bodenkoordinaten  $z_B$  zugewiesen, sie stellt die mittlere Bodenhöhe des Gewässers im Bereich der Zelle dar. Die Gewässerbodenhöhe darf auch über der Ruhewasserhöhe liegen. So kann im Helgenbereich ein Strand dargestellt werden. Zur Erfassung von nicht rechteckigen Gewässerformen kann jeder Zelle zusätzlich eine von drei Randbedingungen zugewiesen werden:

- Die Zelle enthält Flüssigkeit, gleichzeitig kann durch die Ränder etwas hindurchströmen.
- Die Zelle ist gesperrt, es kann keine Flüssigkeit durch eine ihrer vier Seitenflächen hindurchtreten. Dies ist eine Reflexionsbedingung.
- Die Zelle stellt einen offenen Rand dar. Eine Welle, die auf eine derartige Zelle trifft, läuft ungestört durch sie hindurch.

Die Wasserbewegung und die sich einstellende Verformung des Gewässers werden nach dem von SÖDING (1975) entwickelten Verfahren berechnet.

### 3.2.6 Aufklotzung

An jedem Spant kann eine Aufklotzung angesetzt werden. Aufklotzung bedeutet hier eine repräsentative Federsteifigkeit aus Bahn, Schlitten, Aufliegern, Keilen und Pallen. Die Aufklotzung wirkt als Einzelkraft auf den Knoten des Schiffsbalkens. Sinnvolle Bedingung für die Aufklotzung ist spielfreies Einpassen zwischen Schiff und Ablaufbahn. Jeder Aufklotzung wird eine Kraft-Dehnungskennlinie zugewiesen. Von entscheidender Bedeutung für die Kraftberechnung ist, daß die Federkennlinie der Aufklotzung von vorneherein als voll nichtlinear angesetzt wird, da die Pallung beim Stapellauf bis über die Quetschgrenze hinaus belastet wird.

## 4 Schlußfolgerungen aufgrund von Stapellaufsimulationen

### 4.1 Die einzelnen Phasen des Stapellaufes

Bedingt durch die Berücksichtigung der elastischen Effekte ergibt sich eine andere Einteilung der einzelnen Phasen des Stapellaufes, als aufgrund der klassischen Methode. Dieser Zusammenhang wird aus Abb. 1 deutlich, wo die einzelnen Abschnitte des Stapellaufes beispielhaft für eine ECOBOX 42 auf der Ablaufbahn der FSG dargestellt sind. Im einzelnen sind dies:

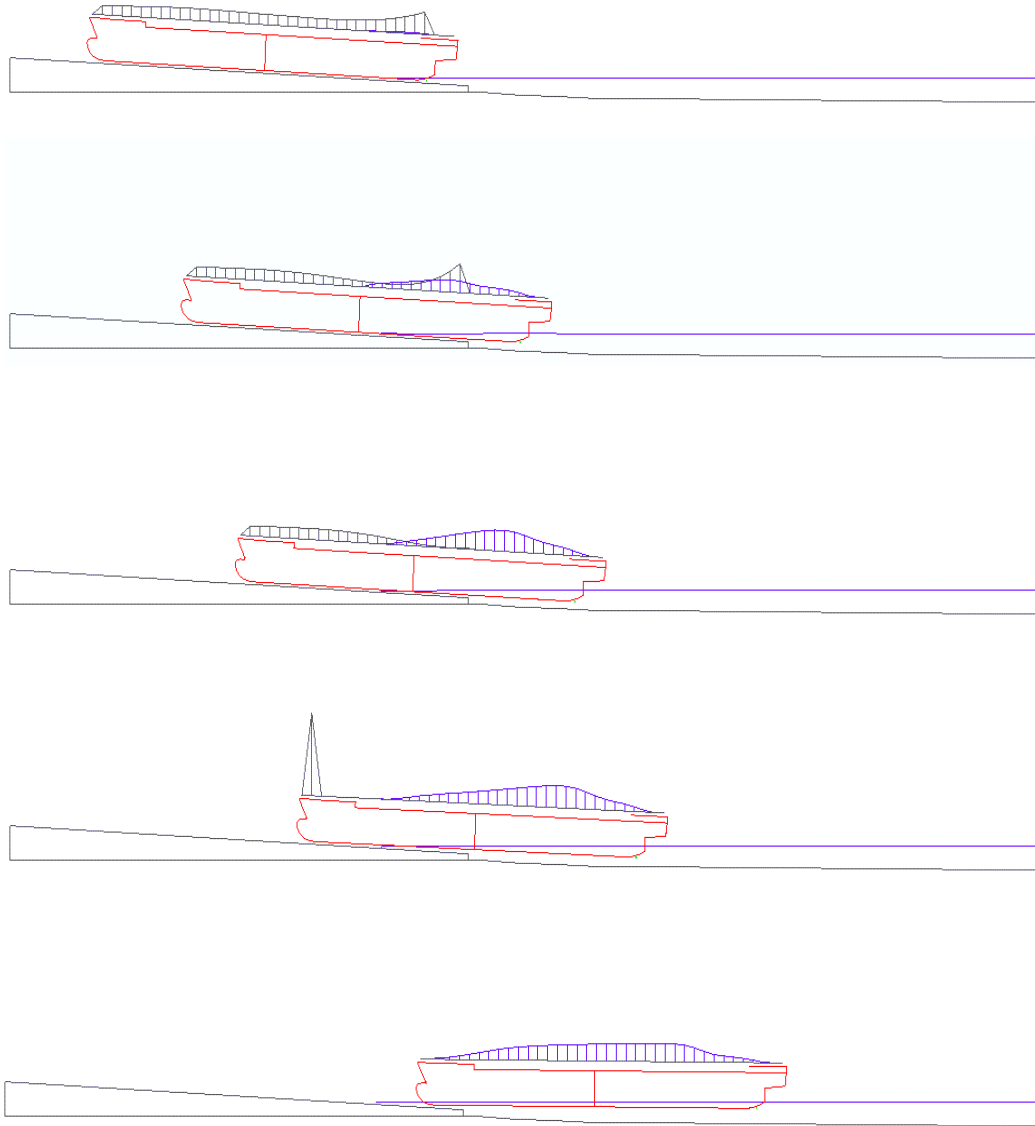


Abbildung 1: Die einzelnen Phasen des Stapellaufes

- **Ruhelage und trockene Anlaufphase:** Die Ausgangslastverteilung des Schiffes entspricht der Bedingung des spielfreien Einpassens der Aufklotzung zwischen Schiff und Bahn. Je nach Lage des Schiffes auf der Helling, Reibungsbeiwert und Hellingneigung wird das Schiff nach Lösen der Stopper angeschoben oder es beschleunigt selbstständig. Je nach Lage des Schiffes auf der Ablaufbahn ergibt sich eine mehr oder weniger ausgeprägte trockene Anlaufphase.
- **Anstieg des Bodendruckes:** Wenn das Schiff abwärts gleitet, fahren zunehmend mehr Schlitten über Hinterkante Bahn. Gleichzeitig bewirkt das hinabfahrende Schiff einen Wellenberg, dadurch steigt dessen Auftrieb. Da die überhängende Länge des Schiffes zunimmt, biegt sich das Schiff immer mehr um Hinterkante Bahn. Aufgrund der Durchbiegung verschiebt sich die Belastungsspitze immer weiter zu Hinterkante Bahn. Dadurch steigt der Bodendruck, bis er sein Maximum

erreicht. Dies ist der kritische Moment für die Bodenstruktur.

- **Kompensation der Vorverformung und Aufdrehbeginn:** Das Schiff fährt weiter bahnabwärts, aufgrund des zunehmenden Auftriebes nimmt der Bodendruck stetig ab. Der zunehmende Auftrieb bewirkt eine Verringerung der Durchbiegung und damit einen weiteren Abbau des Bodendruckes. Irgendwann ist der Auftrieb so groß, daß der an Hinterkante Bahn gelegene Schlitten lastfrei kommt. Der Aufdrehvorgang beginnt.
- **Aufdrehvorgang:** Durch den steigenden Auftrieb wird das Schiff zunehmend nach oben aufgebogen. Dabei findet eine Lastumlagerung von hinten nach vorne statt: Zunehmend kommen mehr Schlitten lastfrei, bis dann nur noch der (oder die) Bugschlitten tragen. Dies ist etwa der Moment der größten Gefährdung der Hellingbahn.
- **Freischwimmen:** Das Schiff fährt weiter bahnabwärts. Irgendwann ist der Auftrieb so groß, daß der Bugschlitten lastfrei kommt. Das Schiff schwimmt frei und muß ggf. gebremst werden, um nicht mit landseitigen Einrichtungen zu kollidieren.

Aufgrund der Simulation können nun zunächst folgende Fragen beantwortet werden, die sich allein aus der simulierten Starrkörperbewegung des Schiffes ergeben.

## 4.2 Kippen, Dumpen und Kentern

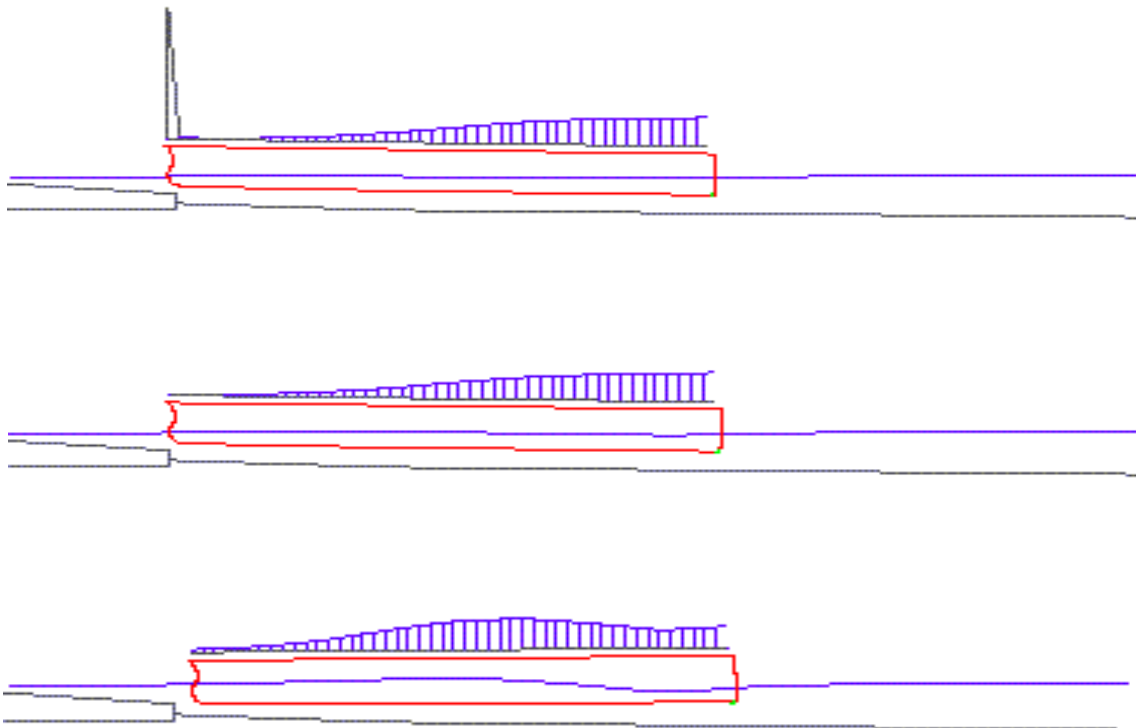


Abbildung 2: Simulation eines Dumpvorgages, bei dem nur eine Schiffshälfte abläuft. Im weiteren Verlauf der Rechnung schlägt der Bugwulst auf dem Gewässerboden auf.

Liegt der Schiffsschwerpunkt zu weit achtern oder ist der Wasserstand nicht ausreichend, dann **kippt** das Schiff um Hinterkante Bahn. Anders als bei der starren Methode kann nun das Kippen direkt berechnet werden. Als Kippreserve kann ggf. die gerade noch zulässige Schwerpunktslage des Schiffes

angegeben werden. Eine Kippreserve analog zur klassischen Methode kann etwa so ermittelt werden, daß jeweils die Momentensummen um Hinterkante Bahn und um Vorkante Schlitten gebildet werden. Die Kippreserve ergibt sich dann als Abstand zwischen den jeweiligen Momentengleichgewichten, vgl. Abb. 3.

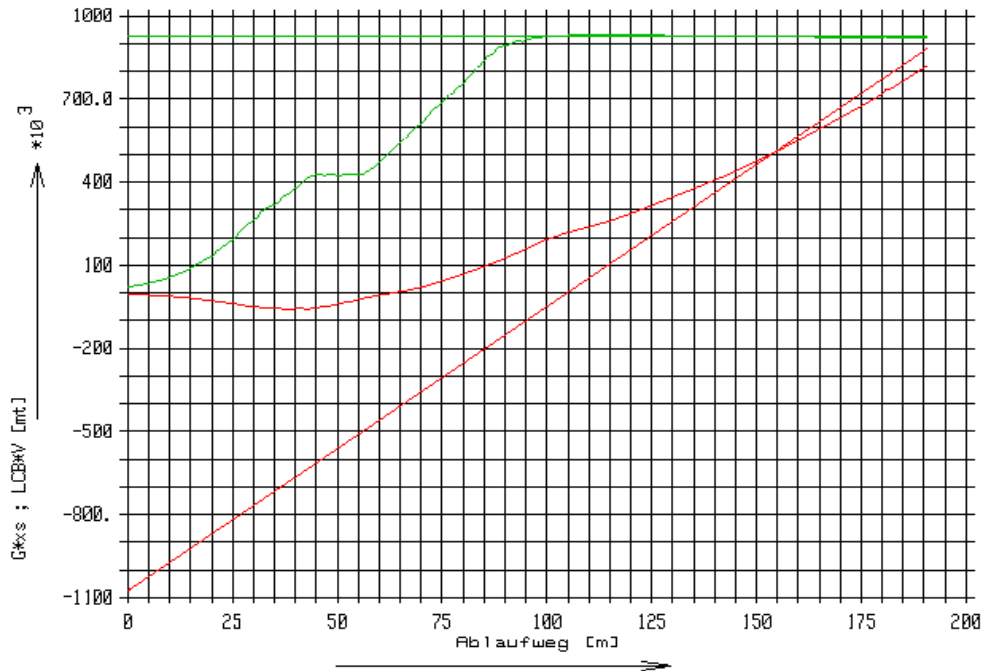


Abbildung 3: Berechnung der Sicherheit gegen Kippen. Rot: Momente um Hinterkante Bahn, grün: Momente um Vorkante Schlitten. Der Abstand zwischen den jeweiligen Schnittpunkten gibt die Kippreserve an.

Analog zum **Kippen** kann auch das **Dumpen** direkt berechnet werden, ebenso die Fallkurve. Abb. 2 zeigt beispielsweise eine Simulation des Dumpvorganges für den Stapellauf nur einer Schiffshälfte, in diesem Falle ein Vorschiff. Deutlich ist erkennbar, daß an Hinterkante Bahn noch eine erhebliche Restkraft vorhanden ist, da das Vorschiff in der Gleichgewichtslage erheblich vorlastig trimmt. In diesem Falle wäre das Vorschiff auf dem Gewässerboden aufgeschlagen. Wenn das Dumpen definitiv zur Beschädigung des Schiffes führt, müssen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

**Kentern** während der Aufdrehphase tritt in erster Näherung dann ein, wenn das krängende Moment -also KG mal Restkraft- größer ist als das aufrichtende Moment, nämlich Verdrängung mal KM. Diese Momente sind in Abb. 4 einander gegenübergestellt. Man sieht, daß das aufrichtende Moment in diesem Falle erheblich größer als das krängende ist; daher ergibt sich keine Gefährdung. Wenn sich jedoch aufgrund der Momentenbilanz eine Kentergefahr andeutet, muß genauer gerechnet werden, in dem das durch den Schlitten zusätzlich aufnehmbare Moment (durch Lastumverteilung in Breitenrichtung) mit berücksichtigt wird. Die Kentergefahr wird in jedem Falle durch Maßnahmen verhindert, die ein frühes Aufdrehen vermeiden (s.u.).



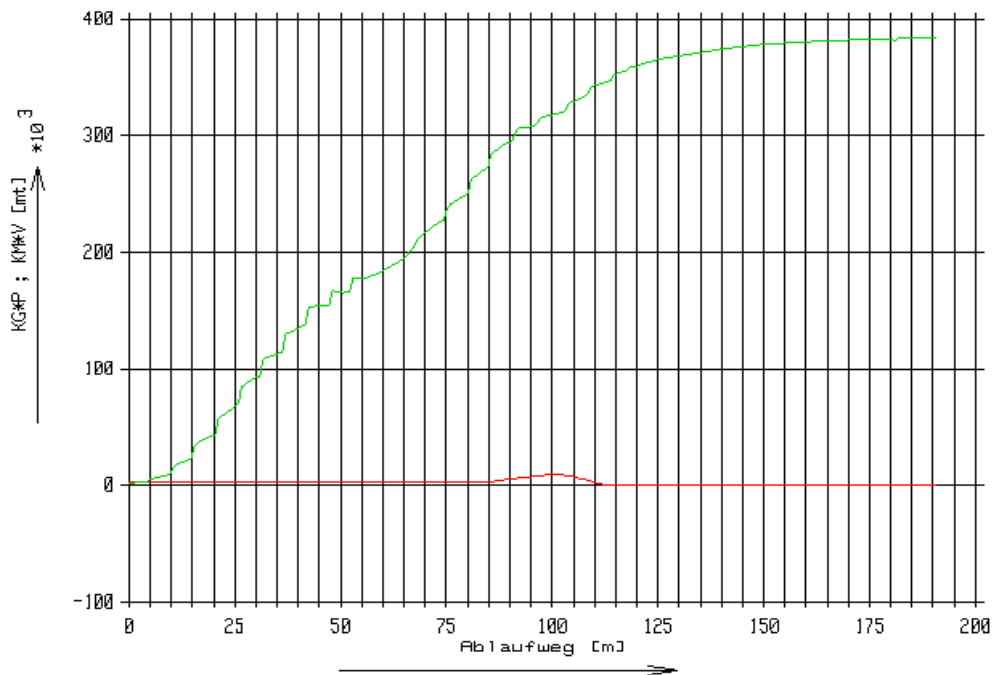


Abbildung 4: Berechnung der Sicherheit gegen Kentern Rot: Krängendes Moment durch  $KG \cdot$  Restkraft, grün: Aufrichtendes Moment durch  $KM \cdot$  Verdrängung. Offensichtlich ist das aufrichtende Moment immer um ein Vielfaches größer.

### 4.3 Aufdrehen und Bodendruck

Aus der Neudefinition der Stapellaufphasen wird deutlich, daß sowohl das Aufdrehen als auch der maximale Bodendruck erheblich von der Elastizität des Gesamtsystems abhängen. Daher empfehle ich, beide Effekte aus den berechneten Pallendrücken abzuleiten. Abb. 5 zeigt für den Stapellauf der ECOBOX (vgl. auch Abb. ??? Stapellaufphasen) die berechneten Schlittendrücke über der Hellingbahn. Jede Kurve stellt dabei die jeweilige Belastung eines Schlittens während des Ablaufes bezüglich Hinterkante Bahn ( $x = 0$ ) dar. Aus der Hüllkurve der einzelnen Schlittenbelastungen ergibt sich dann die wirksame Maximalbelastung der Ablaufbahn und des Schiffes. Betrachten wir zunächst den Belastungsverlauf des Bugschlittens. Das ist die Kurve, die bei dem größten  $x$ -Wert beginnt, da der Bugschlitten bei Ablaufbeginn am weitesten hellingaufwärts liegt. Man erkennt deutlich, daß die Belastung des Bugschlittens lange Zeit konstant bleibt, dann aber sprunghaft bis auf den absoluten Maximalwert ansteigt (Restkraft). Deutlich läßt sich nun aufzeigen, welchen Fehler man macht, wenn das Aufdrehen aufgrund der Momentenbilanz um Vorkante Schlitten gebildet wird: Dann würde man nämlich das Aufdrehen etwa da annehmen, wo der Lastanstieg des Bugschlittens beginnt, nämlich etwa ??? m vor HKB. In Wahrheit wird liegt aber -bedingt durch die Elastizität des Gesamtsystems- das Maximum der Restkraft etwa ?? m bahnabwärts an, nämlich in etwa dann, wenn der Schlitten vor dem Bugschlitten lastfrei kommt. Dadurch gewinnt man wertvolle Sicherheit bei der Festlegung der maximal zulässigen Lage des Aufdrehpunktes (wenn man diese Bezeichnung überhaupt beibehalten will, wie nämlich oben gezeigt wurde, ist das Aufdrehen als solches nur unscharf definiert. Ich bezeichne als Aufdrehen immer den Punkt der maximalen Restkraft). Außerdem wird offensichtlich, daß die Definition des Aufdrehens aufgrund der herkömmlichen Betrachtungsweise zu falschen Schlußfolgerungen führt: Danach würde man das Aufdrehen (und damit die Restkraft) günstig beeinflussen, wenn man den Gewichtsschwerpunkt nach hinten verschiebt, möglichst durch Beballasten der Hinterpiek. Die Simulation zeigt nun deutlich, daß diese Vorgehensweise unter Umständen kontraproduktiv ist: Bedingt durch die Elastizität des Schiffes wirkt sich die Füllung der Hinterpiek überhaupt nicht auf die Schlittenkräfte am Bug aus, erhöht aber

sinnloserweise den Bodendruck. Die einzige Möglichkeit, wirksam die maximale Bugschlittenbelastung zu reduzieren, besteht darin, durch geschickte Wahl der Aufklotzungssteifigkeiten dafür zu sorgen, daß die benachbarten Schlitten möglichst lange mittragen. Dies wird auch intuitiv in praxi schon lange durch die (allerdings mehr oder weniger geschickte) Ausführung der Wiege bewerkstelligt.

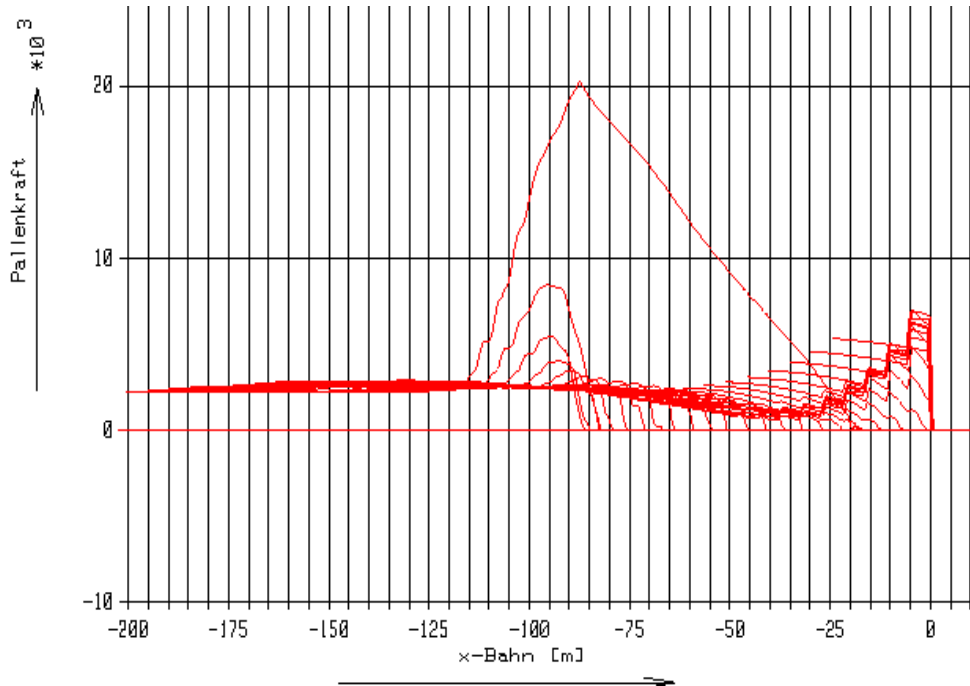


Abbildung 5: Verteilung der Pallenkräfte auf die Ablaufbahn.

Abb. 5 zeigt auch deutlich die Entstehung des maximalen Bodendruckes an Bahnende: Man erkennt am sägezahnartigen Verlauf der Schlittenbelastungen deutlich, wie jeweils der hintere Schlitten die Belastung mit aufnimmt, wenn sein Vorgänger über das Bahnende hinausgefahren ist. Aus der eigentlichen Entstehung des Bodendruckes lassen sich auch die Maßnahmen ableiten, wie er verringert werden kann. Zunächst sei der Vollständigkeit halber die (triviale) Maßnahme genannt, daß der Bodendruck vor allem durch das Schiffsgewicht beeinflusst wird: Je leichter das Schiff, desto geringer der Bodendruck. Manchmal gelingt es, durch geeignete Verteilung des Schiffsgewichtes (z.B. Ablegen der Lukendeckel weit vorne) den Bodendruck zu verringern. Außerdem hilft auch die durch die Ablaufgeschwindigkeit erzeugte Welle beim Abbau des Bodendruckes, allerdings kann man diese meist nicht beeinflussen. Man hat aber noch weitere Möglichkeiten: Wenn die Steifigkeit der Aufklotzung dort, wo der maximale Bodendruck auftritt, verringert wird (z.B. durch kontrolliertes Annrannen der Keile), dann verteilt sich Last besser (die Belastungsspitze wird abgebaut) und der Bodendruck sinkt. Eine andere Möglichkeit war schon unseren Vorfahren bekannt: Theoretisch läßt sich der Bodendruck auch dadurch verringern, daß das hintere Ende der Ablaufbahn abgesenkt wird, etwa wie eine Kreisbahn. Dadurch findet ebenfalls eine Lastumlagerung nach vorne statt, und der Bodendruck wird abgebaut. Meist reicht es, etwa die letzten 20m der Bahn abzurunden, dann ergeben sich etwa Kreisradien von 1-2 km. Hierbei ist allerdings Vorsicht geboten, denn die Ablaufbahn selbst ist meistens auch nicht steif, sondern unterliegt selbst elastischen Verformungen. So haben wir bei der FSG-Ablaufbahn festgestellt, daß sich das gesamte Bauwerk beim Stapellauf bis zu 20mm (gemessen an HKB) absenkt, wodurch ebenfalls eine erhebliche Reduktion des Bodendruckes erfolgt. Würde man nun das Ende der Bahn kreisförmig gestalten (bzw. der Biegelinie des Schiffe anpassen), dann hätte das unter Umständen auch eine Erhöhung des Bodendruckes weiter vorne zur Folge. Daher muß bei der Simulation des Stapellaufes die Steifigkeit der Ablaufbahn möglichst mit berücksichtigt werden (für unsere Ablaufbahn machen wir das auch). Da-

bei wird ein Dilemma der genauen Berechnung deutlich: Auch wenn die Theorie die einzelnen Effekte besser vorhersagen kann, wird das Ergebnis nur dann besser, wenn die einzelnen Eingangsgrößen sehr genau bekannt sind. Daher wurden bei der FSG umfangreiche Messungen der Bodenbelastungen an einem Schiff vorgenommen, um alle Berechnungen zu verifizieren. Es versteht sich von selbst, daß die berechneten Bodendrucke mit Hilfe einer FEM-Berechnung der Schiffsstruktur auf ihre Zulässigkeit hin überprüft werden müssen. Abb. 6 zeigt beispielhaft die Verformung der Bodenstruktur einer C-Box zum Zeitpunkt der maximalen Bodenbelastung.

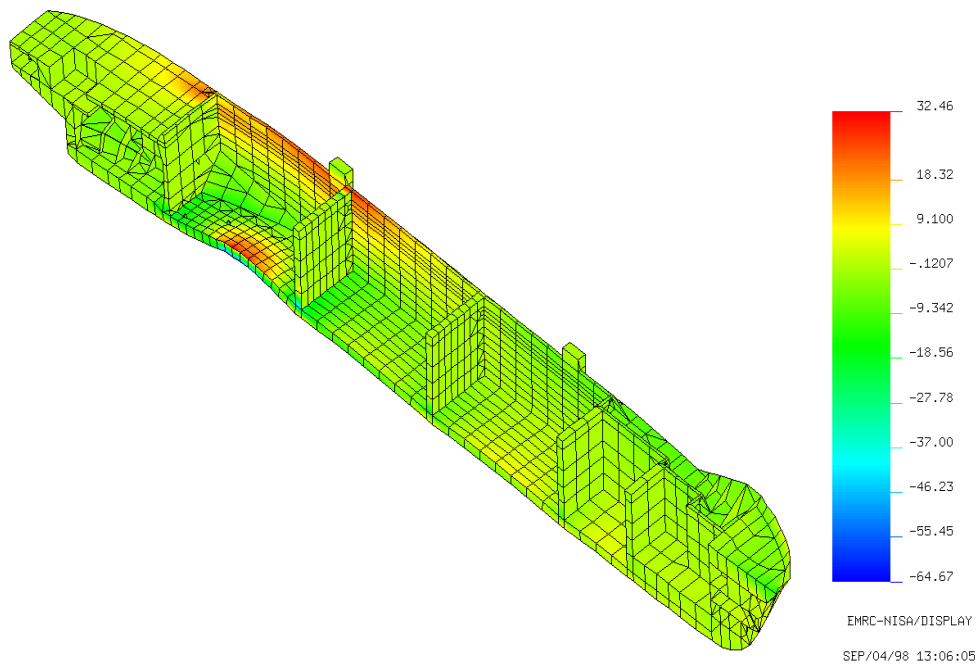


Abbildung 6: FEM-Berechnung der Strukturbelastung beim Stapellauf zum Zeitpunkt des maximalen Bodendruckes

## 5 Stapelläufe unter unsymmetrischen Ablaufbedingungen

Durch Kombination der Stapellaufmethode mit den Ansätzen zur Berechnung des Manövrierverhaltens ist es möglich, auch den Einfluß von seitlichen Kräften zu untersuchen. Dabei sind im wesentlichen Seitenkräfte durch Windeinfluß (das Hauptproblem bei der FSG, da die Schiffe mit wenig seitlicher Clearance aus einer überdachten Halle ins Freie ablaufen. Dadurch haben die seitlichen Windkräfte einen sehr großen Hebelarm bei gleichzeitig nur geringem Querwiderstand gegen Gier- und Driftbewegung) sowie Unsymmetrien der Ablaufbahn zu berücksichtigen. Dabei werden seitliche Kräfte folgendermaßen wirksam: Während der Aufdrehphase dreht das Schiff um den Bugschlitten. Dieser nimmt kein Drehmoment auf, solange die Drehung nur gering ist und der Schlitten nicht gegen die seitliche Bahnführung verkantet. Der Bugschlitten erfährt keine seitlichen Verschiebungen, er bildet einen Momentanpol. Daher wird dort eine entsprechende Seitenkraft angebracht. Wenn das Schiff freigeschwommen ist, ergibt sich zusätzlich eine Querkraft, die zu einem Querversatz führt. Abb. 7 zeigt die Simulation eines Stapellaufes

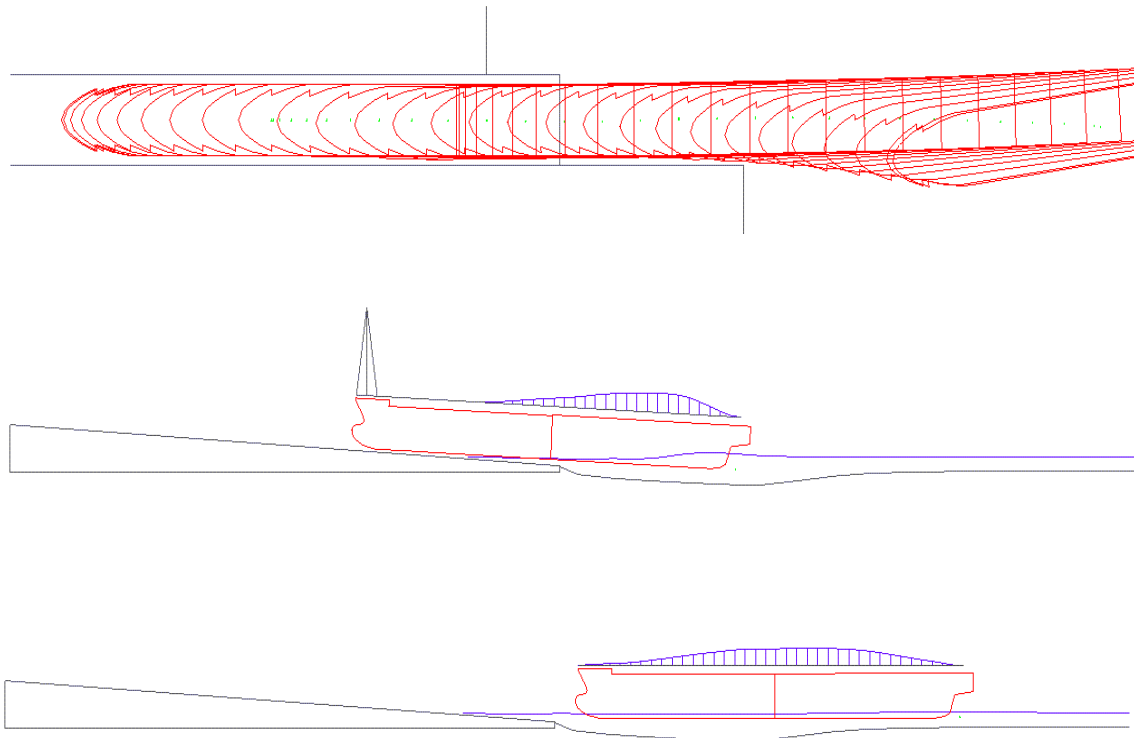


Abbildung 7: Simulation eines Stapellaufes unter unsymmetrischen Ablaufbedingungen. Entlang der BB-Seite des Schiffes ist eine Spundwand angeordnet.

unter unsymmetrischen Ablaufbedingungen. Die Unsymmetrie ist hier dadurch gegeben, daß auf der Backbordseite des Schiffes eine Spundwand angeordnet ist, die den Bahnverlauf merklich beeinflusst. Die einzelnen Effekte lassen sich gut anhand von Abb. erläutern. Dort ist die Verformung der Wasseroberfläche zwischen Schiff und Spundwand zu verschiedenen Zeiten des Ablaufes angegeben. Man erkennt, daß sich zunächst während des Aufdrehens eine heftige Welle am Hinterschiff ausbildet. Da sich das Schiff um den Bugschlitten drehen kann, wird durch die Welle das Hinterschiff von der Spundwand weggedrückt und es wird eine Drehbewegung eingeleitet. Später dissipiert die Welle am Ende der Spundwand, gleichzeitig entsteht nun etwa an der vorderen Schulter zwischen Schiff und Spundwand ein Wellental. Dadurch wird die Drehbewegung verstärkt, da nun das Vorschiff gegen die Spundwand gedrückt wird. Trotzdem läuft das Schiff ohne Kollision an der Spundwand vorbei. Berechnungen unter Seitenwindeinfluß haben jedoch gezeigt, daß bei Wind auf die Spundwand von mehr als 10m/s eine Kollision des Schiffes an der Spundwand stattfindet. Die Berechnungen wurden durch die Modellversuche von MEWIS und FRÖHLICH (1995) im wesentlichen bestätigt. Bei den FSG-Stapelläufen wird immer die gerade noch zulässige Windgeschwindigkeit bestimmt, die zu einem garantiert kollisionsfreien Ablauf des Schiffes führt.

## 6 Literatur:

BRENKE, R. (1971) *Der Stapellauf des Massengutschiffes Stadt Bremen*, Schiff und Hafen

BRENKE, R. (1975) *Stapellauf der 393000tdw Europa-Tanker*, Schiff und Hafen

BRENKE, R. (1972) *Der Stapellauf des 33kn-Containerschiffes Sea-Land Galloway*, Schiff und Hafen

BRIX, J. (1978) *Die Eigenschaften von Bremsschilden für Längsstapelläufe*, HANSA

FRÖHLICH, M., GROTHUES-SPORK, H., MEWIS, F. (1995) *Stapelläufe unter unsymmetrischen Ablaufbedingungen*, JSTG, Band 89, Springer

GROTHUES-SPORK, H. (1976): *Modellversuche zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens von Schiffen beim Stapellauf*, VWS, Berlin, Bericht Nr. 882/80

GROTHUES-SPORK, H. (1981): *Einflüsse beschränkter Wasserverhältnisse und dynamische Vorgänge beim Stapellauf von Schiffen*, VWS Berlin, Bericht Nr. 55

HABERECHEIT, J., PETERSHAGEN, H. (1969) *Bau einer neuen Großhelling bei den Rheinstahl Nordseewerken, Emden*, HANSA 106

KOLLMANN, F. (1962) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Springer

KRÜGER, S. (1995): *Untersuchung eines Stapellaufes unter unsymmetrischen Ablaufbedingungen*, in: FRÖHLICH, M., GROTHUES-SPORK, H., MEWIS, F. (1995), *Stapelläufe unter unsymmetrischen Ablaufbedingungen*, JSTG, Band 89, Springer

KUNOW, R. (1975): *Ein Beitrag zur Berechnung und Messung der Kantenpressung beim Stapellauf großer und schlanker Schiffe*, Schiffstechnik 1975, Band 22

KUNOW, R. (1972) *Pallenkräfte beim Docken Schiff und Hafen*

LEHMANN, E. (1988): *Deckscontainer und Schiffsverformungen*, JSTG, Band 81, Springer

SCHLÜTER, STEMMER (1941): *Der Stapellauf eines großen Schiffes*, JSTG Band 42, Springer

SCHUMANN, C. (1993): *Programmbeschreibung für das Querstapellaufprogramm QUSTA*, Inst. f. Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 2402

SCHUMANN, C. (1994): *Beschreibung des Längsstapellaufprogrammes LASTAS*, Inst. f. Schiffbau, Hamburg, Bericht Nr. 2410

SÖDING, H. 1985): *Numerische Methoden der Strömungsmechanik*, Inst. f. Schiffbau, Hamburg, Vorlesungsmanuskript Nr. 30

SÖDING, H. (1975) *Das Programm TIDES zur Berechnung der Wasserbewegung beim Stapellauf von Schiffen*, UNI Hannover, ESS, Bericht Nr. 6