



# **Gutachten über das Überbordgehen von zwei Kranen in Rostock am 31.01.2020**

Auftraggeber: Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Hamburg

Hamburg, 8.1.2021

**TUHH**  
Technische Universität Hamburg  
Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit  
Am Schwarzenberg-Campus 4 D-21073 Hamburg  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger



Prof. Dr.- Ing. S. Krüger, Leiter des Institutes für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit

# 1. Zusammenfassung

Im Auftrag der BSU sollte das Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit zur Klärung der Frage beitragen, warum am 31.01.2020 in Rostock zwei Mobilkrane beim Verfahren über Bord des Schwergutschiffes JUMBO VISION über Bord gegangen sind. Im Einzelnen sollten folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Wie konnte es dazu kommen, dass sich ein seitlich verfahrens Kran nicht mehr anhalten ließ, obwohl solche Beladungsvorgänge mit baugleichen Kranen schon oft durchgeführt worden sind?
- Welche Möglichkeiten hätte es gegeben, den Unfall verhindern zu können?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen haben wir ein Berechnungsmodell erstellt, mit dem es gelang, den Unfall rechnerisch nachzuvollziehen. Danach ergibt sich folgender Sachverhalt:

Der Unfall wurde ausgelöst durch das Zusammenwirken mehrerer ungünstiger Umstände, von denen jeder alleine nicht notwendigerweise unfallursächlich war. In der Summe ergab sich jedoch eine Situation, die das Überbordgehen eines Krans stark begünstigt hat. Zu den unfallrelevanten Faktoren zählen die Stabilitätssituation des Schiffes, das Stabilitätsmanagement während und vor der Unfallsituation, die Verfahrenssequenz eines Krans sowie die ungünstigen Untergrundverhältnisse.

Der Kran wurde zunächst fälschlicherweise erst nach Landseite gefahren, und dann nach Seeseite umgesteuert. Dadurch wurde eine Rollschwingung des Schiffes angeregt, deren Periode etwa 20s betragen hat.

Etwa 10s nach Losfahren des Krans Richtung Seeseite wurde versucht, den Kran anzuhalten. Als das nicht sofort gelang, wurde versucht, den Kran umzusteuern. Dieser Vorgang fiel nahezu exakt mit Maximum der Rollbeschleunigung der ausgelösten Rollschwingung zusammen.

Es ist davon auszugehen, dass die Räder des Krans zum Anhaltezeitpunkt bereits Schlupf hatten. Das ist einmal der zusätzlich wirkenden Rollbeschleunigung geschuldet, andererseits aber auch der Tatsache, dass der Kran auf sehr ungünstigen Untergrundverhältnissen fuhr.

Nachdem die Räder einmal Schlupf hatten, konnte der Kran kein Bremsmoment mehr aufbringen, und er fuhr dann solange weiter, bis er aufgrund der sich stetig vergrößernden Neigung des Schiffes in Rutschen kam

und bis schließlich ein Radsatz über die Lukendeckelkante fuhr. Dann ist der Kran gekippt und über Bord gefallen.

Unsere Berechnungen haben eindeutig ergeben, dass das Schiff zum Unfallzeitpunkt keine so ausreichende Stabilität hatte, dass ein Verfahren des Krans ohne weiteres möglich war. Das ergibt sich eindeutig daraus, dass es ohne Zusatzmaßnahmen kaum möglich gewesen war, den Kran in Bewegung zu setzen, ohne dass die herstellerseitigen Grenzwerte für das seitliche Verfahren des Krans im Laufe des Verfahrenvorganges überschritten worden wären. Das begründet sich auch darin, dass das Verfahren des Krans nennenswerte Rollschwingungen auslöst, die sich dem rein statischen Verfahren des Krans überlagern. Darüber hinaus hat bereits das Bewegen des bordeigenen Geschirrs deutlich vor Verfahren des Krans Neigungsdifferenzen erzeugt, die größer waren als die herstellerseitigen Grenzwerte für das seitliche Verfahren des Krans.

Es erscheint aber aufgrund des Unfallablaufes nicht wahrscheinlich, dass die herstellerseitig zulässigen Grenzwerte für das seitliche Verfahren des Krans in die Planung der Operationen eingeflossen sind.

Unsere Berechnungen haben eindeutig ergeben, dass das fälschliche Verfahren des Krans in Richtung Landseite den Unfall begünstigt hat, es war aber nicht allein unfallursächlich. Gleichfalls war es angesichts der Umstände auch nicht sicher möglich, den Kran so wie geplant verfahren, wenn das Schiff eine Anfangsschlagseite in Richtung Land gehabt hätte.

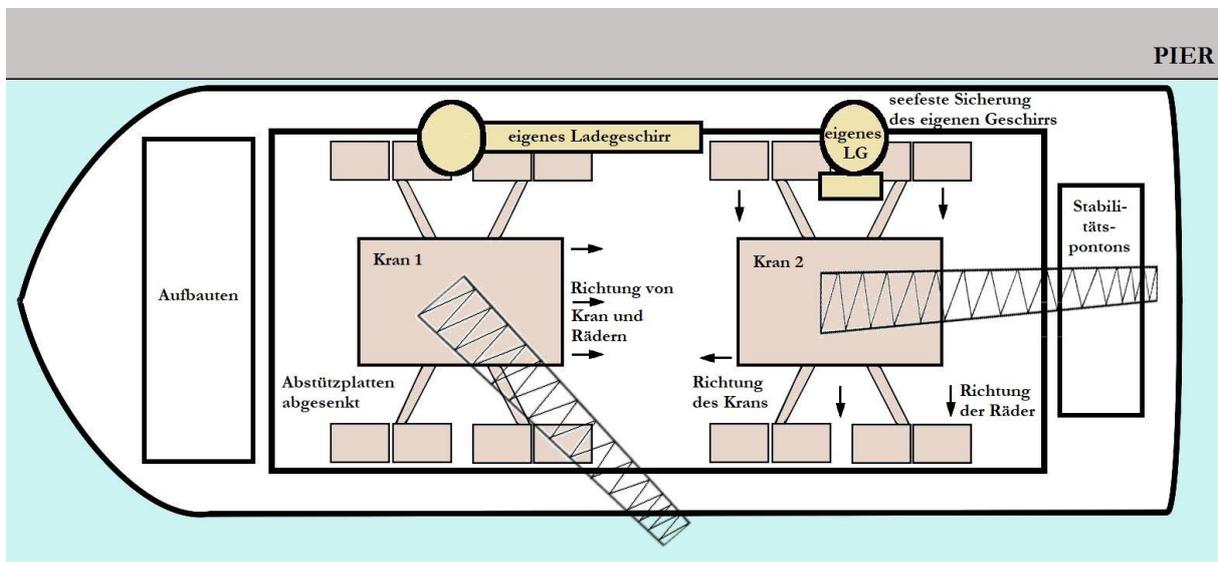
Es wurde zunächst versucht, den Kran anzuhalten, bevor er umgesteuert wurde. Dazu reichte aber die Zeitspanne nicht aus, um sicher die Feststellbremse des Krans zu aktivieren, wodurch er immer weiter Richtung Seeseite gefahren ist. Unsere Berechnungen haben ergeben, dass der Kran bei Betätigen der Feststellbremse sicherlich nicht gekippt wäre. Jedoch wäre der durch das Bremsen wirkende Verzögerungseffekt so groß gewesen, dass der Kran aufgrund unserer Berechnungen auch dann über Bord gerutscht wäre, weil die Beschleunigung auf den Kran beim Bremsen angesichts der ungünstigen Untergrundverhältnisse zu groß gewesen wäre.

Der Unfall wäre aus unserer Sicht in jedem Falle vermeidbar gewesen, wenn der Stabilitätsponton nicht vor dem Verfahren des Krans eingeholt worden wäre. Wenn das aus betrieblichen Gründen nicht möglich gewesen wäre, dann hätte der Kran nur in ganz kleinen Schritten verfahren werden dürfen, wenn gleichzeitig permanent kontrolliert worden wäre, ob die momentane Neigung des Schiffes noch innerhalb der zulässigen Grenzwerte für das Verfahren des Krans gewesen wäre.

## 2. Tatbestand

Der unten angegebene Tatbestand ergibt sich aus den durch die BSU vorgelegten Unterlagen wie folgt:

An Bord des Schwergutschiffes „JUMBO VISION“ sollten zwei selbstfahrende Krane LMH550 des Herstellers Liebherr verladen werden. Die Krane waren zuvor mittels der bordeigenen Schwergutbekranung durch einen Tandem-Lift an Bord genommen und auf dem Hauptdeck abgestellt worden. Zum Verladezeitpunkt herrschte Regen, daher war das Deck nass. Die Krane wurden auf Stahlplatten abgestellt, die auf den Lukendeckeln auflagern. Die prinzipielle Anordnung der Krane auf Deck unmittelbar vor dem Unfallzustand ist in Abb. 1 gezeigt.



**Abb. 1: Position der Krane auf der JUMBO-Vision unmittelbar vor dem Eintreten des Unfalles. Quelle: BSU**

Nachdem die Krane auf Deck gehoben waren, wurden die Stabilitätspontons des Schiffes an Deck gehoben und dort verstaut.

Gegen 20.45 abends wurde dann beschlossen, dass der Kran Nr. 2 (der hintere Kran) ein Stück in Richtung Seeseite verfahren werden sollte, um seine endgültige Stauposition zu erreichen. Der Kranführer fuhr den Kran Nr. 2 an, jedoch zunächst fälschlicherweise in Richtung Landseite. Nachdem der Fehler bemerkt worden war, wurde der Kran in Richtung Seeseite umgesteuert. Nach einem gewissen Fahrweg sollte der Kran angehalten werden, dazu wurde der Kran mittels der Fernbedienung gestoppt. Jedoch ließ sich der Kran nicht stoppen, so dass der Kranführer den Kran dann voll umsteuerte. Auch dadurch ließ sich der Kran nicht stoppen. Schließlich drehten irgendwann die Räder des Kranunterwagens durch, so dass dieser immer weiter gegen Seeseite verfuhr und schließlich umkippte und über Bord in die See fiel. Dadurch erfuhr das Schiff eine erhebliche Schlagseite, so dass dann auch der Kran Nr. 1 über Bord kippte. Dadurch entstand er-

heblicher Sachschaden, zwei Personen wurden dabei leicht verletzt, konnten aber noch an Bord versorgt werden.

### **3. Durch die vorliegende Untersuchung zu klärende Fragestellungen**

Durch die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Hamburg, wurden dem Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit der TU Hamburg-Harburg folgende Fragestellungen vorgelegt, welche durch entsprechende Berechnungen zu klären sind. Im Einzelnen sollten folgende Fragestellungen durch das vorliegende Gutachten geklärt werden:

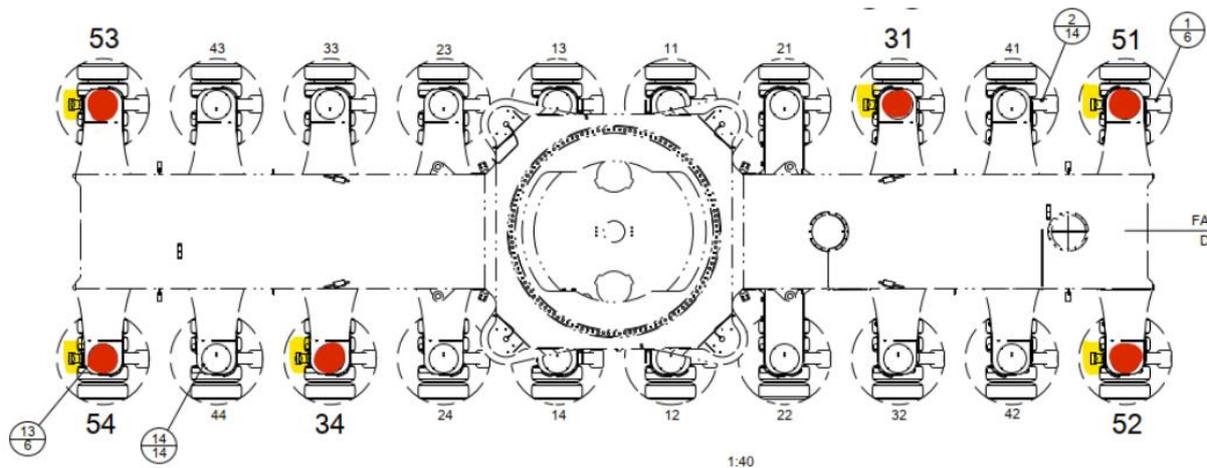
- Wie konnte es dazu kommen, dass sich der Kran nicht anhalten ließ, obwohl solche Beladungsvorgänge mit baugleichen Kranen schon oft durchgeführt worden sind?
- Welche Möglichkeiten hätte es gegeben, den Unfall verhindern zu können?

Zur Klärung dieser Fragen wurden durch die BSU folgende Unterlagen vorgelegt:

- Stabilitätsbuch des Schiffes und Beladungsfall zum Unfallzeitpunkt
- Zeitschriebe der kraninternen Aufzeichnungen
- Zeugenaussagen der Beteiligten zum Unfallhergang
- Unterlagen zur Bauweise der Krane
- Tonaufzeichnungen des VDR von Deck und von der Brücke
- Videoaufzeichnungen der Hafenkameras in Rostock
- Handakte der BSU

## 4. Das Fahrwerk des Krans LMH550

Die verunfallten Krane vom Typ Liebherr LMH550 sind selbstfahrende Krane. Zum Unfallzeitpunkt hatte Kran Nr. 2 ein Gewicht von 410t, Kran Nr. 1 ein Gewicht von 420t. Der Schwerpunkt der Krane betrug 26.36m über dem Kiel des Schiffes. Diese Angaben haben wir dem Ladefall zum Unfallzeitpunkt entnommen (Quelle: BSU).



**Abb. 2: Unterwagen des Kranes LMH 550. Quelle: BSU/Liebherr**

Zur Funktionsweise des Kranunterwagens führt die Fa. Liebherr folgendes aus (Quelle: BSU/Liebherr):

*„Der LHM 550 hat 20 Einzelradsätze von denen 6 Radsätze angetrieben sind (rot gekennzeichnet, Hydraulikmotor gelb markiert).*

*Der Fahrtrieb des LHM erfolgt hydraulisch, d.h. die Antriebsmotoren sind in einem hydraulischen Kreis zusammengeschlossen. Der Dieselmotor treibt über das Verteilergetriebe mehrere Hydraulikpumpen an, die den entsprechenden Volumenstrom für die Hydraulikmotoren an den Radsätzen zur Verfügung stellen. Die Geschwindigkeit des LHM wird dabei über die Menge des zur Verfügung gestellten Volumenstromes geregelt. Mit dem Fahrhebel wird die Ansteuerung der Hydraulikpumpe und damit der Volumenstrom von Null bis Maximum eingestellt. Dadurch ist eine stufenlose Regelung der Fahrgeschwindigkeit allein über den hydraulischen Antrieb möglich. Das heißt, wenn der Hydraulikvolumenstrom bis auf Null reduziert wird (Fahrhebel neutral bzw. auf „Null“) bremst auch der Kran bis zum Stillstand ab.*

*Damit bei stillstehendem Kran aber nicht permanent das Hydrauliksystem des Fahrtriebes arbeiten muss und damit der Kran auch nicht „wegrollt“ sobald der Antrieb aus ist (z.B. Kran abgestellt) verfügen die angetriebenen Radsätze zusätzlich noch über eine federdruckbelastete Lamellenbremse. Diese Lamellenbremse arbeitet als reine Haltebremse und muss*

*hydraulisch aktiv angesteuert werden um sie zu öffnen, wird die hydraulische Ansteuerung weggenommen oder unterbrochen (z.B. Not Aus) schließt die Bremse automatisch durch intern verbaute Federn.*

*Die Kransteuerung ist so designt, das 1 Sekunde nachdem der Kran zum Stillstand gekommen ist (Volumenstrom der Hydraulikmotoren ist auf Null geregelt) die Ansteuerung der Lamellenbremse weggenommen wird und damit die Haltebremse schließt. Die Lamellenbremse wird somit im Normalfall nur bei stillstehendem Kran geöffnet und geschlossen und unterliegt daher auch keinem Verschleiß.*

*Der Kran ist mit der oben aufgeführten Standardachsordnung dafür freigegeben eine Steigung von bis zu 5% zu befahren und kann somit auch bei 5% Gefälle hydraulisch gebremst stehen bleiben.*

*Es ist zu beachten, dass die maximale Steigung von 5% nur in Unterwagenlängsrichtung zulässig ist. Quer zum Unterwagen ist für das Verfahren nur eine maximale Neigung von 2% zulässig.*

*Diese Begrenzung ergibt sich aber nicht aus der Antriebsleistung, sondern aus der zusätzlichen Belastung der Radsätze aufgrund des außermittigen Schwerpunktes des dann seitlich geneigten Kranes.*

*(Die zu Verfügung stehende Antriebsleistung ist aufgrund der 360° drehbaren Fahrwerk in alle Fahrrichtungen gleich.)"*

Daraus ergibt sich, dass der Kran im regulären Betrieb gegen eine Steigung von 2.86 Grad anfahren kann, wenn in Unterwagenlängsrichtung verfahren wird, sowie gegen eine Steigung von 1.15 Grad in Querrichtung, wobei sich die Steigung in Querrichtung aber nicht wegen der Antriebsleistung ergibt, sondern aufgrund des durch die Belastung der Räder übertragbaren Moments.

## 5. Auswertung des Kranmesssystems

Der Kran LMH 550 verfügt über ein eigenes System zur Datenaufzeichnung. Dieses wurde durch die Fa. Liebherr ausgelesen, ausgewertet und der BSU zur Verfügung gestellt (vgl. Abb. 3). Weiterhin hat die Fa. Liebherr der BSU einige zusätzliche Erläuterungen zur Funktionsweise des Krans gegeben, die sich auf die unten, stehende Auswertung beziehen. Diese uns zur Verfügung gestellten technischen Informationen geben wir hier insoweit wieder, soweit sie für die folgenden Ausführungen relevant sind.

In Abb. 3 ist oben der zeitliche Verlauf des Neigungswinkels des Krans dargestellt. Dieses Signal entspricht nach Angaben der Fa. Liebherr der Krängung des Schiffes, und darauf wird weiter unten noch eingegangen.

Darunter ist das Meisterschaltersignal dargestellt. Es ist zu erkennen, dass um 20:48:21 das Meisterschaltersignal aus der Nullstellung gebracht wird, der Kran setzt sich in Bewegung. Daher wird in allen folgenden Ausführungen der Zeitpunkt 20.48:21 als  $t=0$  bezeichnet.

Wenn das Meisterschaltersignal aus der Nullstellung gebracht wird, wird die Lamellenbremse gelöst und der Kran wird hydraulisch verfahren. Dabei ertönt nach Angaben der Fa. Liebherr ein deutlich vernehmbares Piepsignal, solange der Meisterschalter gelegt ist.

Zunächst setzt sich der Kran in die falsche Richtung in Bewegung. Liebherr gibt dabei an, dass der Kran zunächst um 0.03m nach Steuerbord (Landseite) versetzt worden ist. Das ergibt sich nach Angaben der Fa. Liebherr aus der zeitlichen Integration der Hydrauliköl-Volumenströme (siehe dazu auch das Gutachten von Prof. Dr. Ing.- F. Wirz). Diese Wegberechnung ist in Abb. 3 unten gezeigt.

Der Kran wird dann sofort in die Gegenrichtung umgesteuert und nicht erst angehalten. Das bedeutet, dass der Piepton weiter ertönt, weil der Meisterschalter gelegt bleibt. Auch die Feststellbremse rückt nicht ein, weil das Meisterschaltersignal gelegt ist.

Der Kran verfährt dann nach Backbord (Seeseite), weil das Meisterschaltersignal entsprechend gelegt ist. Das Piepsignal ertönt weiter.

Um 20:48:36 (also 15s nach Anfahren des Krans) wird das Meisterschaltersignal auf 0 gelegt, weil der Kran anhalten soll. Weil das Meisterschaltersignal auf Null gelegt wird, setzt der Piepton aus. Liebherr gibt an, dass der Kran bis dahin etwa um 0.6m Richtung Backbord (Seeseite) gefahren ist.

Diese Distanz ergibt sich wiederum aus der Auswertung des zeitlichen Integrals der Hydraulikölvolumenströme. Eine solche Auswertung ist möglich (siehe Gutachten Prof. Wirz), wenn man davon ausgeht, dass sich alle angetriebenen Räder des Krans gleichschnell drehen.

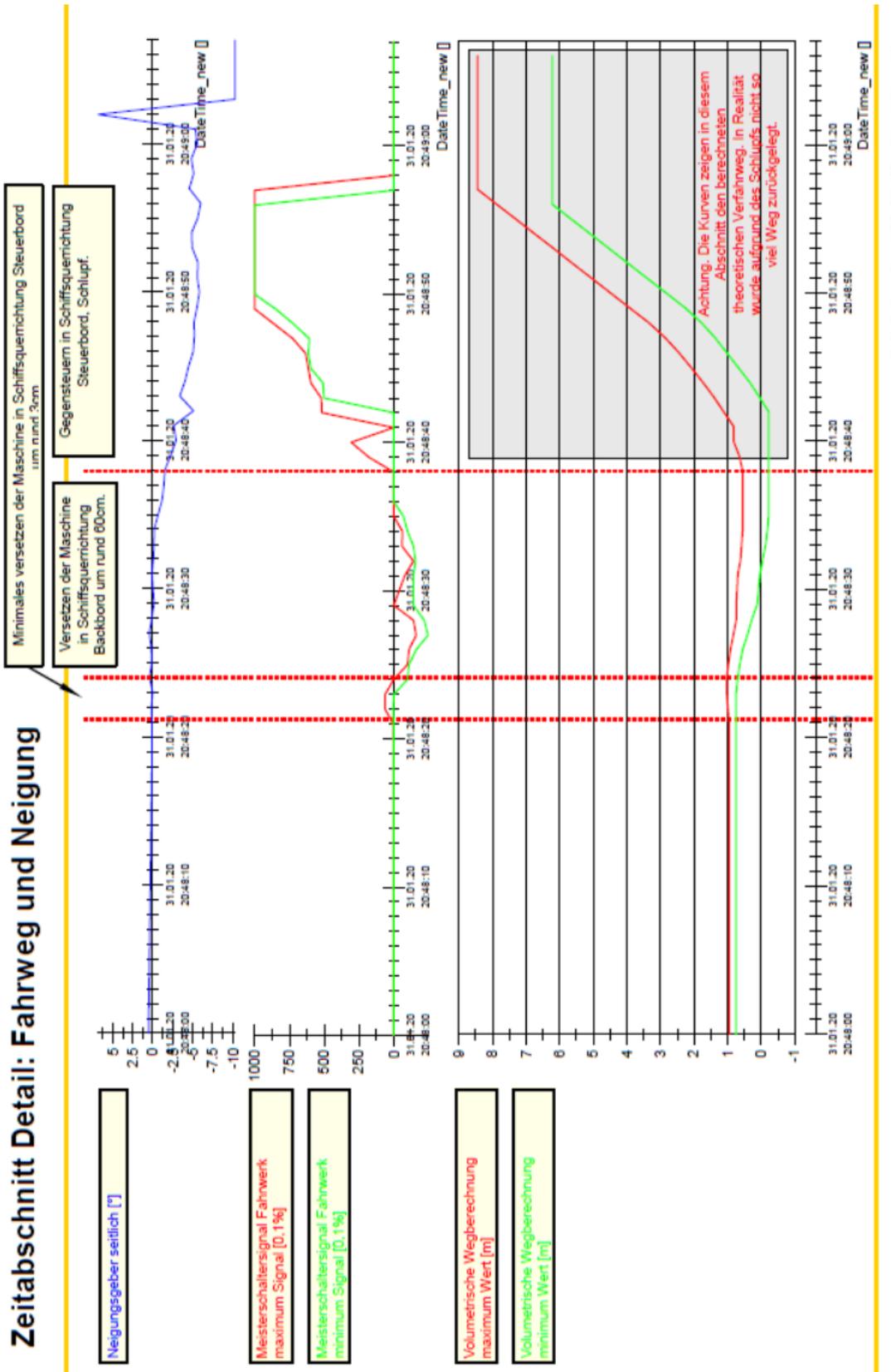
Die von Liebherr angegebenen 0.6m Verfahrweg wurden offenbar der roten Kurve entnommen, die mit „Volumetrische Volumenberechnung, Maximumwert“ bezeichnet ist. Diese von Liebherr angegebene Wegstrecke passt etwa zu dieser Kurve.

Nun gibt es eine zweite Kurve, die mit „Volumetrische Volumenberechnung, Minimumwert“ bezeichnet ist. Dieser kann man einen Verfahrweg von ca. 1.20m zuordnen. Daraus lässt sich folgern, dass der Kran mindestens 0.6m und höchstens 1.2m verfahren ist, wenn man die Werte entsprechend zuordnet. Die Begriffe „Minimum“ und „Maximum“ ergeben in dem Fall auch Sinn, weil der Verfahrweg negativ aufgetragen ist.

Nun ist in beiden Kurven erkennbar, dass der Verfahrweg ab 20:48:34 nicht mehr zunimmt, obwohl das Meisterschaltersignal noch gelegt ist. Auch nach allen Zeugenaussagen hat sich der Kran kontinuierlich bewegt. Nach den Ausführungen von Prof. Wirz in seinem Gutachten ist es nur möglich, dass das volumetrische Wegsignal keine Wegzunahme anzeigt, wenn mindestens eins der angetriebenen Räder Schlupf hat. Das bestätigt prinzipiell auch die Fa. Liebherr in Ihrer Auswertung.

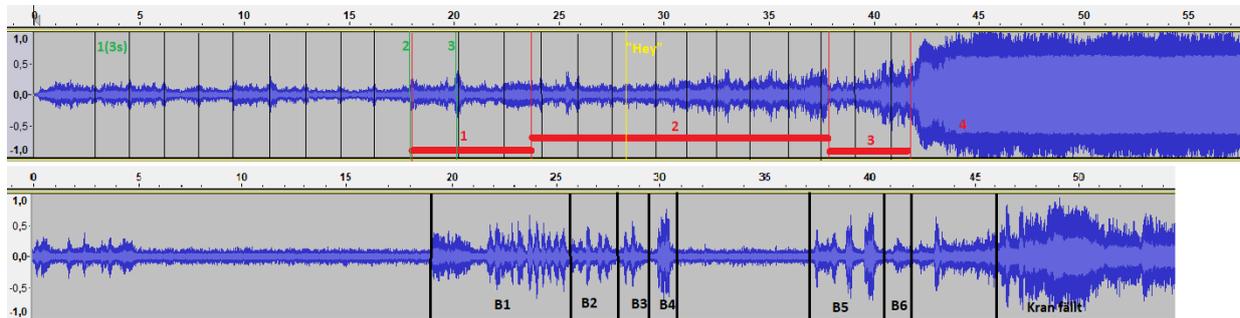
Daher muss im Folgenden davon ausgegangen werden, dass um 20:48:34 ein Verfahrweg des Krans von mindestens 0.6m und höchstens 1.2m vorgelegen haben muss.

Nachdem das Meisterschaltersignal auf Null gelegt wurde, wird die Feststellbremse angesteuert. Dann wird auch kein Piepton mehr gesendet. Um 21:48:38, also 2s nach dem Einlegen der Nullstellung des Meisterschalters, wird der Kran umgesteuert. Das erkennt man am Signal des Meisterschalters. Es wird wieder der Piepton gesendet, und die Feststellbremse wird wieder gelöst, sofern sie überhaupt vollständig eingerückt war (siehe Gutachten Wirz). Danach nimmt das Wegsignal ab, was nur möglich ist, wenn die Räder erheblichen Schlupf haben. Um 20:48:48 endet die Aufzeichnung, vermutlich, weil der Kran dann bereits über Bord geht.



**Abb. 3: Zeitschrieb zu Verfahrensweg, Meisterschaltersignal und Neigung. Quelle BSU/Liebherr.**

## 6. Auswertung der Tonaufzeichnungen



**Abb. 4: Visualisierung der Tondateien des VDR: Oben: Deck, unten: Brücke. Quelle: BSU**

Durch die BSU wurden uns die Tonaufzeichnungen des VDR zur Verfügung gestellt. Wir haben sie mit dem Audio-Programm „AUDACITY“ bearbeitet, und die Visualisierung ist in Abb. 4 dargestellt. Die obere Tonspur zeigt die Aufzeichnungen vom Deck, die untere die von der Brücke. Wir haben die beiden Tonspuren exakt relativ zueinander so dargestellt, wie wir sie erhalten haben, d.h. die Aufzeichnung beginnt jeweils mit dem Anfang der Tondatei. Laut Angaben der BSU bezeichnet der Dateiname der VDR-Dateien den Startzeitpunkt. Legt man dies zu Grunde, dann sind die beiden Tonspuren in Abb. 4 zeitsynchron dargestellt.

Mittels Rauschunterdrückung wurden Hintergrundsignale entfernt, und z.T. wurde die Abspielgeschwindigkeit verändert, um die Geräusche auswerten zu können. Abb. 4 zeigt die Signale der bearbeiteten Spuren, jedoch in der Originalabspielgeschwindigkeit. Die zugehörigen Tondateien wurden der BSU elektronisch separat zur Verfügung gestellt.

In Abb. 4 sind für den Unfallablauf wesentliche Ereignisse eingetragen. Wir beziehen uns zunächst auf die untere Tonspur (Brücke). Folgende Ereignisse wurden herausgehört, wiedergegeben sind die Worte des Sprechers im jeweils bezeichneten Intervall:

- B1: „Yes, stop one, not that fast, ... stop, stop, stop, stop, stop, stop“
- B2: “Let me know first, c’ me on guys“
- B3: “We get five Degrees“
- B4: “Stooooop“
- B5: “Stop with this crane, stooop, stooop“
- B6: (Nicht zweifelsfrei interpretierbar)

Dabei könnte es bei B3 auch „have“ statt „get“ heißen, das ließ sich nicht eindeutig klären. Definitiv spricht die Brücke aber von „five“

degrees", worauf immer sich das beziehen mag. Ab 46s ist dann deutlich zu hören, dass der Kran fällt.

In der Tonspur von Deck sind ebenfalls mehrere Ereignisse eingetragen, die für den Unfallablauf relevant sind. Zunächst wurden mit dünnen, senkrechten schwarzen Linien die Zeitpunkte markiert, an denen ein Fahrsignal des Kranes zu hören ist. Wir gehen davon aus, dass immer dann, wenn der Kranoperator den Kran in Bewegung setzt, ein stetiges Piepsignal gesendet wird. Nimmt man das an, dann wird der Kran etwa 3s nach Beginn der Aufzeichnung in Bewegung gesetzt. Das entspricht der Uhrzeit 20:48:21 auf dem Liebherr-Zeitschrieb ( $t=0$ ).

Aus Abb. 4 oben ist nun zu erkennen, dass im Zeitintervall zwischen 16s und 20s **kein** Piepsignal des Kranes zu hören ist, es wurde keine schwarze Linie eingetragen (zu dem Zeitpunkt wurden aber eine rote und eine grüne Markierung bei  $T=18s$  gesetzt). Daraus folgt, dass sich der Kran zwischen 16s und 22s **nicht** im Fahrmodus befindet.

Vergleicht man dieses mit den Aufzeichnungen der Fa. Liebherr (Abb. 3), dann wird dort erkenntlich, dass um 20:48:36 das Meisterschaltsignal auf 0 geht und um 20:48:38 das Meisterschaltsignal in die andere Richtung geht, der Kran wird umgesteuert. Der mit „2“ bezeichnete grüne Balken in Abb. 4 gibt den Zeitpunkt des Anhaltens wieder, der mit „3“ bezeichnete grüne Balken den des Umsteuerns.

Wertet man die entrauschte Tondatei weiter aus, dann lassen sich drei interessante Bereiche ausmachen, die in Abb. 4 oben in Rot eingetragen sind und die mit 1, 2, und 3 bezeichnet sind:

1: Es ist deutlich ein schabendes/schleifendes Geräusch zu hören. Diese lassen sich recht eindeutig dem Durchdrehen von Rädern zuordnen. Das erkennt man beim Hören sofort, und optisch wird das durch den erhöhten Grundsignalpegel deutlich. Der Kran fuhr ja auf Stahlplatten, die laut und vorliegenden Angaben nass und auch sandig waren, und das Geräusch passt zu einem leicht auf einem solchen Untergrund rutschenden Rad. Das Geräusch setzt deutlich erkennbar bei 20.2s ein, was man auch am dann schnell erhöhten Schallpegel feststellt. Der Zeitpunkt entspricht dem Anhalten und Umsteuern des Kranes. Das passt sehr gut zu der Tatsache, dass zu diesem Zeitpunkt die Zeitintegration des Volumenstromsignals keine Wegzunahme mehr liefert.

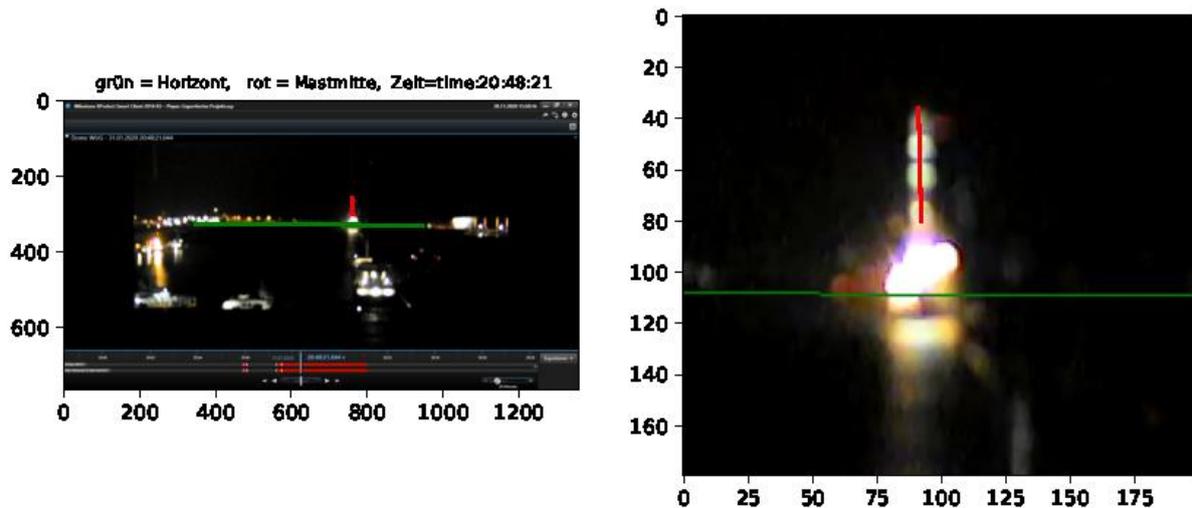
2: Hier ist eindeutig zu hören, dass mindestens ein Rad permanent durchdreht. Man hört ein hochfrequentes Schleifen, welches gelegentlich durch noch höherfrequente Schleifpeaks unterbrochen wird. Das Geräusch lässt sich eindeutig einem auf trockenem Untergrund durchdrehenden Rad zuordnen. Man erkennt eine generelle Zunahme der Heftigkeit des Durchdrehens im Zeitverlauf auch daran, dass der Grundpegel stetig zunimmt.

3: Das Durchdrehen nimmt jetzt sukzessive massiv zu, es drehen immer mehr Räder durch, und/oder die Drehzahl des durchdrehenden Rades erhöht sich, was man an der steigenden Frequenz erkennt. Weil sich die Durchdrehzahl erhöht, wenn die Radbelastung sinkt, kann man mit Sicherheit davon ausgehen, dass in dieser Phase die betroffenen Räder des Krans schon substantiell entlastet sind.

4: Jetzt drehen definitiv mehrere Räder durch, man erkennt deutlich ein hochfrequentes Kreischen, dass in der Intensität stark ansteigt. Unmittelbar danach rutscht der Kran dann definitiv über Bord, was an der Geräuschkulisse sofort erkenntlich wird.

## 7. Auswertung der Aufzeichnung der Hafenkameras

Messbild: t0.jpg Winkel: Mast0= 88.3 grad



**Abb. 5: Ermittlung der Krängung des Kranes mittels photogrammetrischer Messungen der UNI Hannover**

Durch die BSU wurden uns ebenfalls die Aufzeichnungen der beiden Hafenüberwachungskameras zur Verfügung gestellt. Eine Kamera zeigt Schiff und Kran von hinten (vgl. dazu auch Abb. 5) sowie eine weitere die Situation schräg von der Seite (vgl. dazu Abb. 7). Aus den Aufzeichnungen der einen Kamera von hinten ist sehr gut zu erkennen, wie sich das Schiff mehr und mehr nach der Seeseite neigt, bis der hintere Kran dann ins Wasser kippt. Auf der anderen Kameraaufzeichnung ist sehr gut zu erkennen, wie sich das Schiff immer weiter neigt, der Kran dann Richtung Seeseite ins Rutschen kommt und dann über Bord kippt. Seitens der BSU wurde die UNI Hannover beauftragt, den Neigungswinkel des Kranes zu bestimmten, unfallrelevanten Zeitpunkten zu ermitteln.

```
===== RESTART: C:\Users\manfr\Desktop\schiffs-fall.py =
Bild: t0.jpg, Winkel 88.31 °, Zeit: time:20:48:21
Bild: t1.jpg, Winkel 86.82 °, Zeit: time:20:48:36
Bild: t2.jpg, Winkel 85.72 °, Zeit: time:20:48:41
Bild: t3.jpg, Winkel 84.30 °, Zeit: time:20:48:51
Bild: t4.jpg, Winkel 84.42 °, Zeit: time:20:48:56
>>>
```

**Abb. 6: Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung der UNI Hannover. Quelle: BSU**

Die Ergebnisse dieser Messungen (vgl. dazu Abb. 5) wurden uns durch die BSU übermittelt, und sie sind in Abb. 6 zusammengefasst.

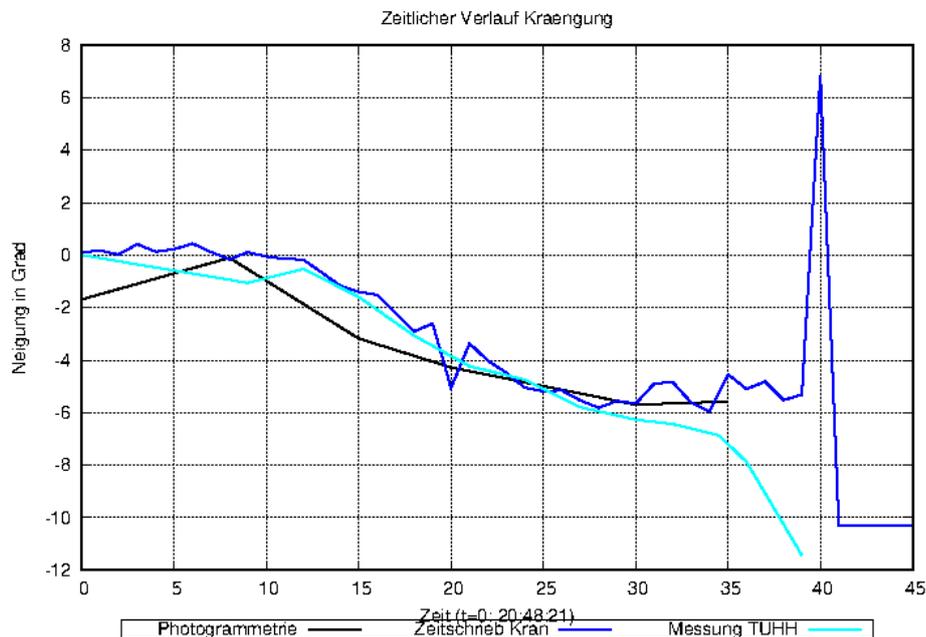
Unabhängig von den photogrammetrischen Auswertungen durch die UNI Hannover haben wir ebenfalls versucht, aus den Aufzeichnungen den Verlauf des Krängungswinkels über der Zeit zu bestimmen. Dazu wurde die Mittelachse des hinteren Kranes als Referenzlinie genommen, und gegen diese Referenzlinie wurde dann grafisch mittels einer Art Pendels dessen Auswanderung gegenüber dem Referenzzustand gemessen. Daraus konnte der Krängungswinkel des Kranes gegenüber dem Ausgangszustand bestimmt werden. Als Ausgangszustand wurde der Beginn des Verfahrens des Kranes um 20:48:21 angesetzt. Der Krängungswinkel zu diesem Zeitpunkt (Referenzzeitpunkt) wurde zunächst zu Null angenommen, alle weitere Krängungswinkel ergeben sich dann als Differenz zum Zustand um 20:48:21. Dabei sind die Aufzeichnungen der Hafenkameras zeitsynchron zum VDR des Schiffes. Ferner wurde angenommen, dass sich der Kran nicht relativ zum Schiff bewegt, was zumindest für den Beginn der Verfahrbewegung richtig sein dürfte. Die Messung wurde unabhängig voneinander zwei Mal zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt, um einen Eindruck der Genauigkeit des Verfahrens zu erhalten. Das Messprinzip ist in Abb. 7 gezeigt.



**Abb. 7: Mechanische Messung der Kranneigung gegen den Referenzzustand um 20:48:21 mittels einer Art Pendels durch TUHH/M6.**

Die Ergebnisse beider Messverfahren sind in Abb. 8 über der Zeit zusammengestellt, dabei bezeichnet  $t=0$  das Losfahren des Kranes um 20:48:21. In Abb. 8 sind auch die Neigungssignale des Kranes eingetra-

gen, der verfahren wurde. Dieser Neigungswinkel entspricht nach Angaben von Liebherr dem Neigungswinkel des Decks.



**Abb. 8: Visualisierung des Rollwinkels über der Zeit für alle drei Messungen**

Aus Abb. 8 wird zunächst ersichtlich, dass alle Messungen relativ gut zueinander passen, daraus kann man schließen, dass die Messverfahren im Groben brauchbar erscheinen. Weiterhin lässt sich erkennen, dass der Krängungswinkel über der Zeit nicht linear ist, wie man es bei einem mit konstanter Geschwindigkeit seitwärts fahrenden Kran erwarten würde. In Abb. 8 wurde ebenfalls das Signal des Liebherr-Neigungsgebers eingetragen (dunkelblaue Kurve). Es passt ebenfalls gut zu den Messungen. Vermutlich wird aber das Signal des Neigungsgebers beim Kippen des Kranes unzuverlässig, weil wahrscheinlich ein erheblicher Dynamik-Anteil im Signal enthalten ist. Insgesamt kann man davon ausgehen, dass Abb. 8 den zeitlichen Verlauf des Krängungswinkels ausreichend richtig wieder gibt, was sich damit begründet, dass drei vollkommen unabhängige und auch unterschiedliche Messmethoden verwendet wurden.

Nach 28s sagt die Brücke laut Brückenaufzeichnung: „We have (get) five Degrees“. Das entspricht ziemlich exakt dem von allen Messungen zu diesem Zeitpunkt ermittelten Wert. Alle Messungen weisen übereinstimmend einen Winkel von ca.5.5 Grad auf. Dabei ist zusätzlich zu bedenken, dass die Krängungsanzeige auf der Brücke wegen deren Trägheit der Schiffsbewegung nachläuft. Das bedeutet, dass der tatsächlich nach 28s vorliegende Krängungswinkel größer sein kann, als sich nach der Brückenanzeige ergibt. Daraus ergibt sich, dass die Brücke entweder tatsächlich „have“ gesagt hat, weil ein Krängungswinkel von 5 Grad bereits auf der Brücke

angezeigt wurde, oder aber sie hat „get“ gesagt, weil die Brückenanzeige nachlief und deswegen die 5 Grad noch nicht angezeigt wurden. Zu dem Zeitpunkt hat sich aber das Schiff bereits um ziemlich genau 5 Grad nach Seeseite geneigt. Die Aussage der Brücke bezieht sich also unzweifelhaft auf einen Krängungswinkel von 5 Grad.

5 Grad entspricht nun einer Steigung von 8.7%. Das bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt die zulässige Neigung für das Verfahren des Krans grundsätzlich erheblich überschritten war. Denn in Querrichtung ist nur eine Neigung von 2% zulässig, und selbst in Längsrichtung hätte der Kran dann nicht mehr verfahren werden dürfen, weil die zulässige Neigung dafür 5% beträgt. Daraus ergibt sich eindeutig, dass zu diesem Zeitpunkt Krängungswinkel aufgetreten sind, die größer sind als die für das seitliche Verfahren des Kranunterwagens zulässigen Krängungswinkel. Und zu diesem Zeitpunkt weisen die Messungen nur eine sehr geringe Streuung auf.

15 Sekunden nach erstmaligem Anfahren des Kranes wird das Meisterschaltersignal auf Null gestellt, weil der Kran anhalten soll. Zu diesem Zeitpunkt hat das Schiff bereits eine Neigung von ca. 2 Grad nach Seeseite. Das entspricht einer Steigung von 3.5% und überschreitet die zulässige Steigung für das Verfahren des Kranes in seitlicher Richtung ebenfalls erheblich. 2% Steigung entspricht einem Krängungswinkel von 1.15 Grad. Aus Abb. 8 wird nun ersichtlich, dass dieser Wert schon 2-5s früher erreicht wird, je nach Messung.

Die Messungen haben damit eindeutig ergeben, dass der Kran recht schnell in eine Situation gekommen ist, in der die für das seitliche Verfahren zulässigen Neigungswinkel überschritten wurden.

Eine weitere bedeutsame Tatsache ergibt sich aus der Auswertung der Hafenkamera im Zeitintervall zwischen 20:47:11 und 20:48:21. Man erkennt zunächst, dass die Beleuchtung des vorderen Kranes ausgeht. Das wird damit erklärt, dass dieser sich in einem vordefinierten Modus selbstständig herunterfährt. Gleichzeitig ist auf dem Video der Überwachungskamera unzweifelhaft zu erkennen, dass sich das Schiff nach dem Erlöschen der Kranbeleuchtung merklich zur Seeseite neigt. Wir haben diesen Neigungswinkel analog zur oben geschilderten Vorgehensweise bestimmt und sind auf eine Winkeländerung von 2.5 Grad gekommen, um die sich der Kran während dieses Zeitraumes zur Seeseite neigt. Gleiches gilt natürlich auch für das Schiff selbst. Die UNI Hannover wurde durch die BSU er sucht, ebenfalls den Neigungswinkel zu diesem Zeitpunkt zu bestimmen. Die Messung ergab hier einen (absoluten) Winkel von 92.2 Grad, also 2.2 Grad Richtung Landseite, vgl. dazu auch Abb. 9. Die Auswertung des Liebherr- Neigungszeitschriebs ergab für diesen Zeitpunkt eine landseitige Neigung von ca. 1.2 Grad. Wir haben nun den zeitlichen Verlauf des Krängungswinkels um diesen Zeitvorlauf erweitert und in Abb. 10 zusammengestellt. Es ergibt sich daraus, dass das Schiff zu diesem Zeitpunkt eine landseitige Neigung von 1.2-2.2 Grad gehabt haben muss.

Messbild: fall0.jpg Winkel: Mast0= 92.2 grad

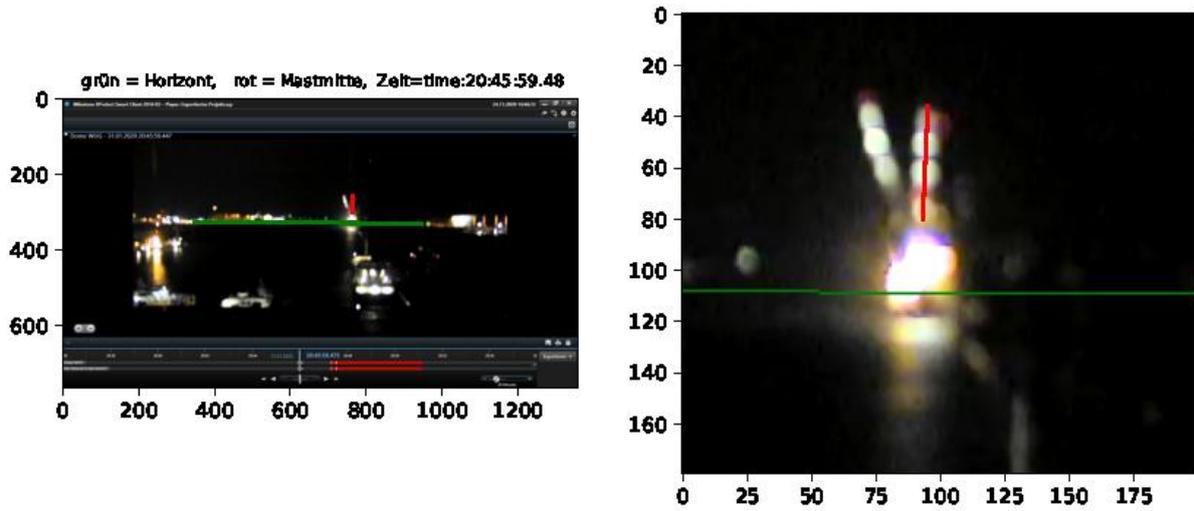


Abb. 9: Ermittlung der Krängung des Kranes mittels photogrammetrischer Messungen der UNI Hannover um 20:46.

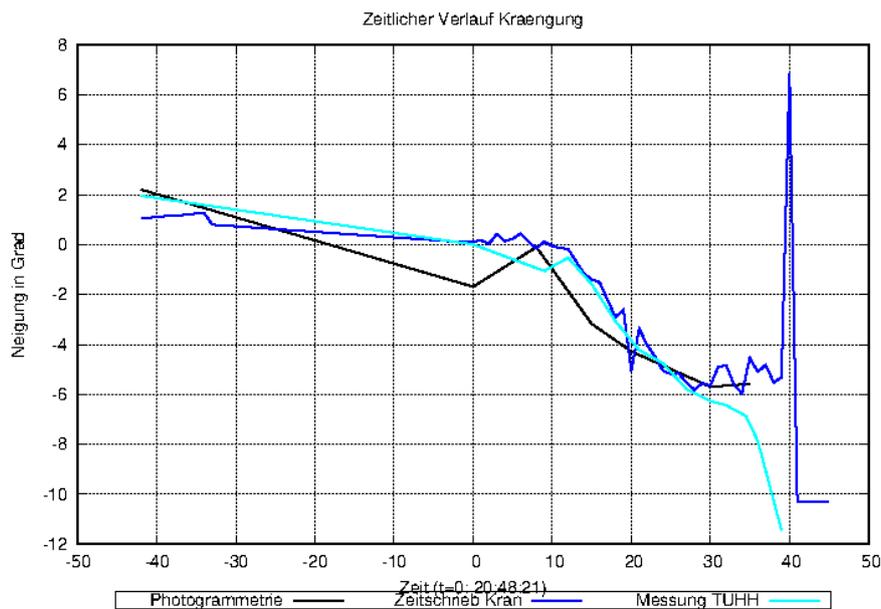
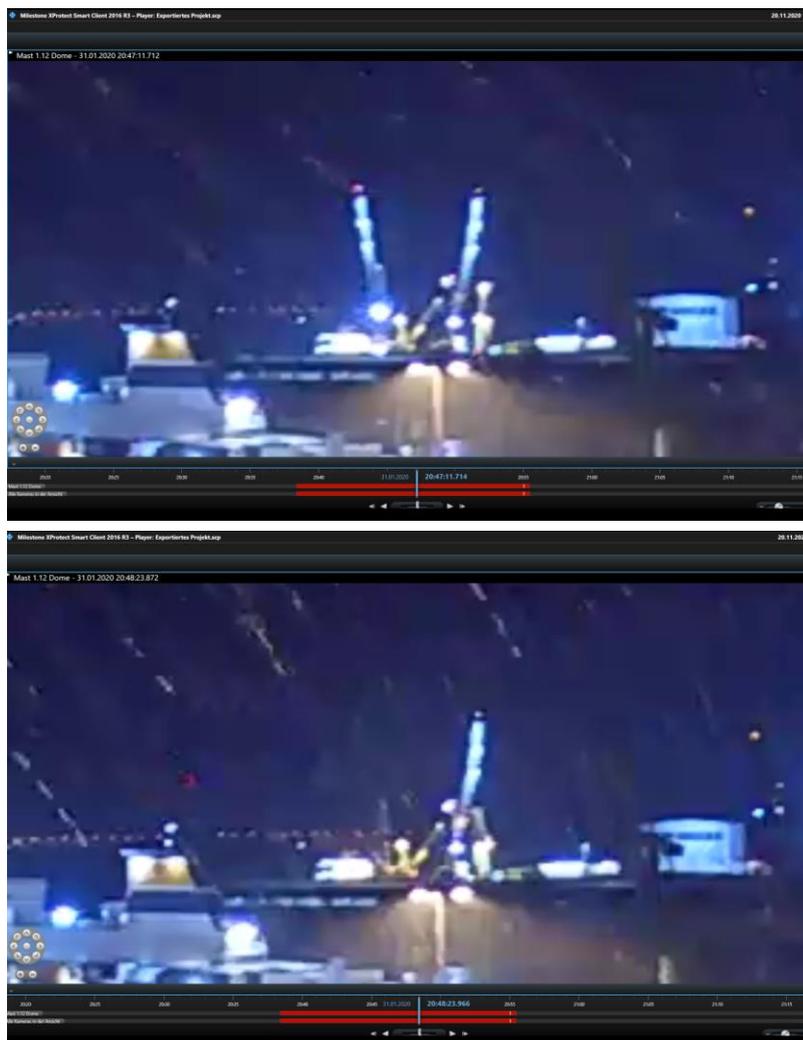


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Krängungswinkels einschließlich der Phase vor dem Anfahren des Krans.

Der Grund für diese Neigungsänderung nach Seeseite ist in Abb. 11 zu erkennen: Dort sind zwei Aufnahmen der zweiten Hafenkamera gezeigt, und zwar um 20:47:11 (vor dem Herunterfahren des vorderen Krans) und um 20:48:24 (3s nach Losfahren des hinteren Kranes). Man erkennt deutlich, dass der vordere Kran seine Beleuchtung gelöscht hat, als Folge des Herunterfahrens. Man erkennt beim Vergleich der Bilder aber auch deutlich, dass sich die Position des hinteren Bordkranes der JUMBO VISION in der Zwischenzeit verändert hat. Das hat eindeutig zur Vergrößerung der Schlagseite in Richtung Seeseite geführt. Und das ist auch logisch, denn ein Einholen des Kranauslegers verschiebt dessen Schwerpunkt von der Land- zur Seeseite hin.



**Abb. 11: Screenshots der zweiten Hafenkamera um 20:47:11 (oben) und um 20:48:24 (unten).**

Daraus ergibt sich, dass das Verfahren des bordeigenen Kranauslegers eine Schlagseitenänderung von 1.2-2.2 Grad Richtung Seeseite bewirkt hat. Die Neigungsänderung aufgrund der Verfahrbewegung des bordeigenen Geschirrs bewirkt somit eine Neigungsänderung des Schiffes, die grö-

ßer ist als die für das Verfahren des Kranes zulässige Neigung. Folgt man den Messungen der UNI Hannover, dann hätte das Schiff bereits zum Beginn des Kranverfahrens eine Neigung gehabt, die größer gewesen wäre als die zulässige Neigung für das Verfahren des Kranes. Vermutlich wird es aber so sein, dass bei den kleinen Neigungen die elektronische Messung von Liebherr an genauesten ist, und diese zeigt keine deutliche Neigung zur Seeseite zum Beginn des Verfahrens des Krans an.

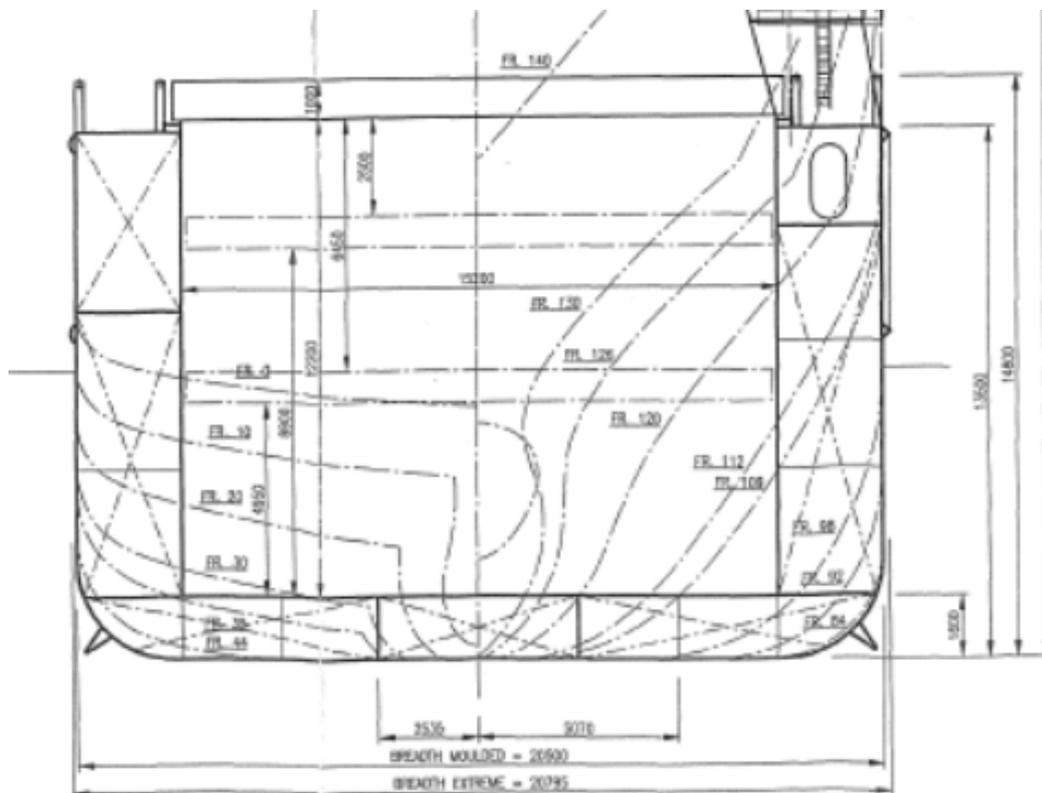
Sicher ist aber, dass durch in der Schwergutverladung typische Operationen wie das Verfahren eines Auslegers im vorliegenden Fall durchaus Neigungen erzeugt wurden, die außerhalb des für das seitliche Verfahren des Krans zulässigen Neigungsbereichs liegen.

## 8. Schiff und Beladungszustand

Die JUMBO VISION ist ein so genanntes H-Type HEAVY LIFT Vessel mit der IMO Nummer 9153642, das für die Fahrt mit offenen Laderäumen zugelassen ist. Klassifiziert wurde das Schiff von Lloyds Register, das Stabilitätsbuch stammt vom April 2013. Die Hauptdaten des Schiffes lauten:

- Länge über alles: 110m
- Länge zwischen den Loten: 102.50m
- Breite auf Spanten: 20.50m
- Seitenhöhe Hauptdeck: 13.50m
- Tiefgang, max: 7.715m

Abb. 12 zeigt den Spantriss des Schiffes, den wir dem durch die BSU übermittelten Docking Plan entnommen haben.



**Abb. 12: Spantriss der JUMBO VISION. Quelle: BSU**

Von der BSU haben wir einen Ladefall „Rostock Situation during Accident“ erhalten. Danach erfüllte das Schiff folgende Stabilitätswerte:

### STABILITY

#### Sailing state

All draughts are above bottom of keel

Displacement	11784 t
Draught at 1/2Lpp	7.65 m
Trim pp	-0.45 m
Sailing state	O.K.
Draught foremark	7.45 m
Draught aftmark	7.87 m

#### Hydrostatic particulars

Immersion	19.78 t/cm
Mom.change trim	140.72 tm/cm
LCF	45.46 m
LCB	50.01 m
Blockcoefficient cb	0.725

#### Initial stability

KMt	9.64 m
KG	8.65 m
GG'correction	0.14 m
G'M liquid	0.85 m
List (SB = +)	0.03 °
Nat.roll period acc. IMO	17.35 sec

Actually measured	Draught aft [m]	Draught fore [m]	G'M [m]

Max. draughts Plimsoll mark  
(to u.s. keel)

<b>TFW</b>	8.031 m	<b>S</b>	7.718 m
<b>FW</b>	7.871 m	<b>W</b>	7.558 m
<b>T</b>	7.878 m		

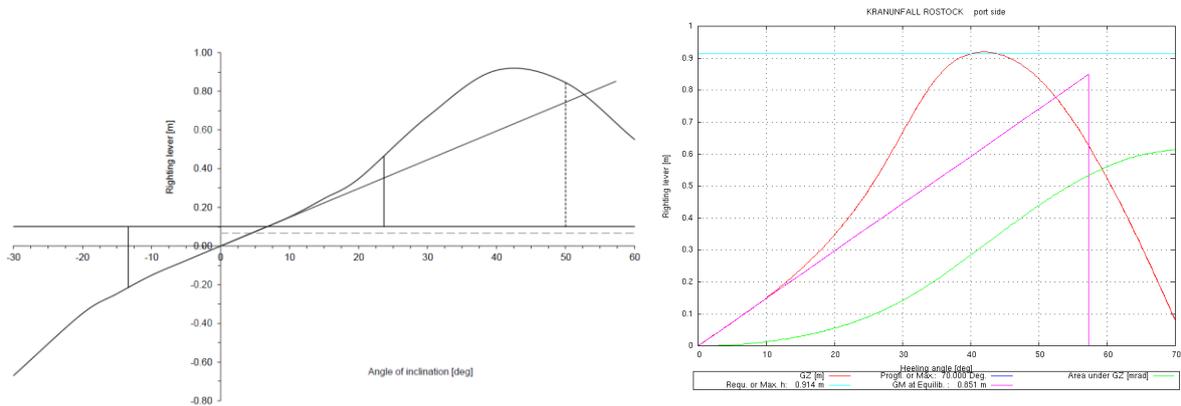
#### Dynamic stability

	Actual	I.M.O. Criteria	
G'M	0.85 m	0.15 m	meets criterion
Lever at 30°	0.67 m	0.20 m	meets criterion
Max. lever	0.921 m at	42.90 °	>25/30 °
Area up to 30°	0.142 mRad	0.055 mRad	meets criterion
Area up to 40°	0.285 mRad	0.090 mRad	meets criterion
Area 30° - 40°	0.143 mRad	0.030 mRad	meets criterion
Max. KG' acc. IMO A.684(17) for closed top sailing	8.792 m	9.355 m	meets criterion

**Abb. 13: Bordrechnerauszug für den Beladungsfall in der Unfallsituation. Quelle: BSU**

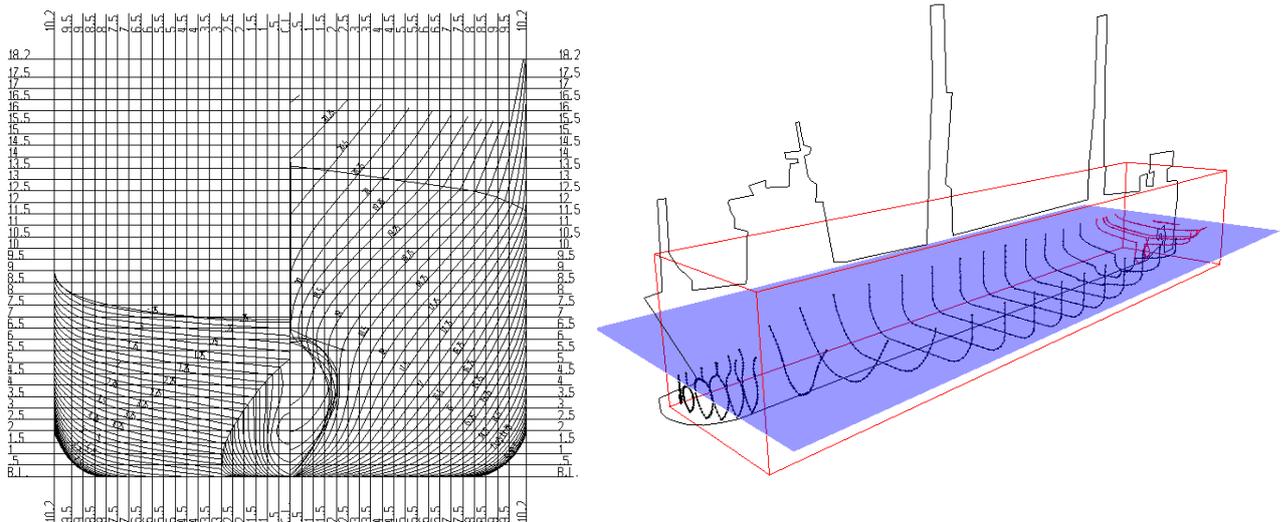
Die Hebelarmkurve des Schiffes ist in Abb. 14 gezeigt. Das Schiff erfüllt in diesem Zustand alle gültigen Stabilitätsregeln, auch wenn das im Hafen nicht erforderlich ist.

Bei der Zusammenstellung der Beladung des Schiffes wurden beide Krane mit einem ZCG von 26.36m über der Basis angenommen (Seite 4 des Bordrechnerausdrucks). Dabei ist jedoch nicht klar, ob in der Berechnung wirklich berücksichtigt wurde, dass beide Kranausleger zum Unfallzeitpunkt nahezu voll aufgetoppt gefahren sind, wie aus Abb. 11 eindeutig hervorgeht. Auch ist nicht sicher, dass der angenommene Beballastungszustand wirklich exakt dem Unfallzustand entspricht. Weil es im vorliegenden Fall auf sehr kleine Krängungswinkel ankommt, werden wir für unsre Berechnungen zunächst den vorgelegten Beladungsfall berücksichtigen, aber dann im Nachgang prüfen, welchen Effekt eine größere oder geringere Stabilität auf die Ergebnisse haben. Dazu berücksichtigen wir dann eine GM-Bandbreite von 0.2m als mögliche Unsicherheitsmarge.



**Abb. 14: Bordrechnerauszug der Hebelarmkurve in der Unfallsituation. Quelle: BSU (links) sowie die mit unserem Berechnungsmodell berechnete (rechts).**

Bei der Analyse des Unfalles kommt es darauf an, dass die Stabilität des Schiffes richtig dargestellt wird. Der Umschlag fand im Hafen statt, es können also Seegangswirkungen auf das Schiff vernachlässigt werden. Es geht also um die Berechnung der Rollbewegung des Schiffes im glatten Wasser und bei relativ kleinen Rollwinkeln. Zum entscheidenden Zeitpunkt des Umsteuerns des Kranes haben nach vorliegenden Messungen Rollwinkel von etwa 2-3 Grad vorgelegen, das Rutschen und Kippen des Kranes fand bei einem Winkel von etwa 6 Grad statt. Für die folgenden Untersuchungen ist es also völlig ausreichend, die Stabilität des Schiffes bis maximal 10 Grad richtig darzustellen.



**Abb. 15: Spantriss der JUMBO VISION in unserem Berechnungssystem (links) und Berechnungsmodell für Übertragungsfunktionen (rechts).**

Wir haben daher für unsere Untersuchungen die Spantform aus dem vorliegenden Docking Plan (Abb. 12) so aufbereitet, dass ein Rechenmodell für grundlegende schiffstheoretische Untersuchungen erzeugt werden konnte. Der übernommene Spantriss der JUMBO VISION ist in Abb. 15 links dargestellt, das Berechnungsmodell für die Bestimmung der Übertragungsfunktionen mit äquivalentem Massenquader in Abb. 15 rechts.

Der mit unserem Rechenmodell berechnete Ladefall weist praktisch die gleichen Tiefgänge auf wie der Bordrechnerausdruck, auch die berechneten Hebel stimmen im relevanten Winkelbereich praktisch überein, wie der Vergleich der Ausdrücke zeigt. Wir gehen daher davon aus, dass unser Rechenmodell für die genannten Zwecke brauchbar ist.

Der Beladungsfall der JUMBO VISION weist im Bordrechnerausdruck eine Rollzeit des Schiffes von 17.35s nach IMO aus (S. 5). Unsere Berechnungen des Beladungsfalles aufgrund der vorgegebenen Massenverteilung haben dagegen eine Rollzeit von 19.81s ergeben, weil das tatsächliche Massenträgheitsmoment aufgrund der Ladungsverteilung größer ist als nach den vereinfachten Annahmen des IMO-Wetterkriteriums, welche die konkrete Einzelmassenverteilung der konkreten Beladungssituation überhaupt nicht berücksichtigen. Diese Problematik haben wir im Rahmen der Unfalluntersuchungen der MSC ZOE für die BSU untersucht (siehe Untersuchungsbericht zum Überbordgehen von Containern von der MSC ZOE, [www.bsu-bund.de](http://www.bsu-bund.de)).

Yard number:	Ship name: JUMBO VISION	Date: 03.Dec.2020
--------------	----------------------------	----------------------

Loading Condition: KRANUNFALL ROSTOCK

Light Ship Weight	: 10954.000 t
Longitudinal Centre of Gravity	: 49.632 m fr. AP
Transversal Centre of Gravity	: 0.095 m fr. CL
Vertical Centre of Gravity	: 7.423 m fr. BL

Deadweight	: 830.000 t
Longitudinal Centre of Gravity	: 47.197 m fr. AP
Transversal Centre of Gravity	: -1.259 m fr. CL
Vertical Centre of Gravity	: 26.360 m fr. BL

Total weight	: 11784.000 t
Longitudinal Centre of Gravity	: 49.460 m fr. AP
Transversal Centre of Gravity	: 0.000 m fr. CL
Vertical Centre of Gravity	: 8.757 m fr. BL

Equilibrium Floating Condition of Case: KRANUNFALL ROSTOCK

Shell Plating Factor: 1.003 | Density of Sea Water: 1.006 t/m<sup>3</sup>

Equilibrium Floating Condition :

Ships Weight	: 11784.000 t
Longit. Centre of Gravity	: 49.460 m.b.AP
Transv. Centre of Gravity	: 0.000 m.f.CL
Vertic. Centre of Gravity (Solid)	: 8.757 m.a.BL
Free Surface Correction of V.C.G.	: 0.000 m
Vertic. Centre of Gravity (Corrected)	: 8.757 m.a.BL
Draft at A.P (moulded)	: 7.862 m
Draft at LBP/2 (moulded)	: 7.642 m
Draft at F.P (moulded)	: 7.422 m
Trim (pos. fwd)	: -0.440 m
Heel (pos. stbd)	: -0.000 Deg.
Volume (incl. Shell Plating)	: 11713.717 m <sup>3</sup>
Longit. Centre of Buoyancy	: 49.439 m.b.AP
Transv. Centre of Buoyancy	: 0.000 m.f.CL
Vertic. Centre of Buoyancy	: 4.219 m.a.BL
Area of Waterline	: 1924.561 m <sup>2</sup>
Longit. Centre of Waterline	: 45.491 m.b.AP
Transv. Centre of Waterline	: 0.000 m.f.CL
Metacentric Height	: 0.851 m
Metacentric Height required GMreq	: 0.000 m

Calculation of righting levers:

Trim chosen from Equilibrium condition. Draft at LbP/2 from A.P.  
 Non wt openings considered for freeboard calculations only

Port side of righting lever curve calculated.

Maximum Leverarm : 0.914 m  
 Downflooding Angle : 70.000 Deg  
 Range : 70.000 Deg

Draft m.a.BL	Trim m	Heel Degree	GZ m	Freeboard m	Point Name
7.642	-0.440	0.000	-0.000	99.000	No relevant Points
7.609	-0.447	5.000	0.073	99.000	No relevant Points
7.509	-0.449	10.000	0.150	99.000	No relevant Points
7.340	-0.435	15.000	0.238	99.000	No relevant Points
7.102	-0.402	20.000	0.347	99.000	No relevant Points
6.795	-0.349	25.000	0.487	99.000	No relevant Points
6.416	-0.276	30.000	0.667	99.000	No relevant Points
5.980	-0.250	35.000	0.838	99.000	No relevant Points
5.525	-0.284	40.000	0.914	99.000	No relevant Points
5.036	-0.388	45.000	0.907	99.000	No relevant Points
4.506	-0.559	50.000	0.836	99.000	No relevant Points
3.947	-0.711	55.000	0.705	99.000	No relevant Points
3.365	-0.830	60.000	0.525	99.000	No relevant Points
2.759	-0.945	65.000	0.314	99.000	No relevant Points
2.140	-1.048	70.000	0.081	99.000	No relevant Points

## 9. Kurze Beschreibung der Berechnungsmethode E4ROLLS

Die Analyse des Unfalles durch Verfahren des Kranes wird mit unserem Seegangsprogramm E4ROLLS durchgeführt. Der dieser Berechnungsmethode zugrunde liegende Seegangscode ROLLS wurde am ehemaligen Institut für Schiffbau der Universität Hamburg im Rahmen der Untersuchung des Kenterunfalls der E.L.M.A. TRES 1987 von Söding und Kröger entwickelt.

Weil E4ROLLS speziell für die Berechnung großer Rollwinkel in (etwa) vorlichem oder achterlichem Seegang entwickelt wurde, wo es besonders auf das Erfassen der Nichtlinearitäten der Rollbewegung ankommt (würde man, wie z. B. in linearen Streifenmethoden üblich, die Rollbewegung linear erfassen, dann würde man die Hebelarmkurve des Schiffes durch eine Gerade der Gleichung  $h=GM*\varphi$  ersetzen, d. h. ein Kentern des Schiffes wäre schon vom Ansatz her ausgeschlossen), besteht das Konzept des Programms darin, die Bewegung des Schiffes zwar in allen 6 Freiheitsgraden zu beschreiben, dabei aber nur die Rollbewegung und die Längsbewegung nichtlinear anzusetzen. Die anderen Bewegungen, also Stampfen, Tauchen, Gier – und Querbewegung werden durch lineare Übertragungsfunktionen berechnet, die Kopplung mit den nichtlinearen Bewegungen wird aber beachtet. Die linearen Übertragungsfunktionen werden dabei mit einem Programm berechnet, das die hydrodynamischen Massen mit Hilfe von Rankine-Quellen nach Yeung berechnet. Dies hat gegenüber der alten Methode der Lewis-Spanten den Vorteil, dass die Schiffsform insgesamt besser berücksichtigt wird, und dass vor allem für große B/T-Verhältnisse, wie sie bei RoRo-Schiffen oder Fähren üblich sind, bessere Ergebnisse geliefert werden. Der Aufrichthebel des Schiffes im Seegang wird dabei mit dem bewährten Konzept der äquivalenten Welle nach Grim berechnet. Dadurch ist das Programm extrem schnell, so dass eine Vielzahl von Situationen dadurch überhaupt erst berechenbar geworden ist. Weil die Quer- und Gierbewegung des Schiffes nur linear erfasst werden, kann E4ROLLS das Querschlagen des Schiffes nicht beschreiben. Aus dem gleichen Grund wird die Gefährdung des Schiffes quer zur See bei geringen Geschwindigkeiten durch E4ROLLS überschätzt, weil die durch den Seegang in das Schiff eingetragene Energie nicht ausreichend in eine Driftbewegung umgesetzt wird. Die Differentialgleichung für die nicht-lineare Rollbewegung lautet:

$$\ddot{\varphi} = \frac{M_{wind} + M_{sy} + M_{wave} + M_{Tank} - M_d - m(g - \ddot{\zeta})h_s - I_{xz} \left[ (\ddot{\vartheta} + \vartheta\dot{\varphi}^2) \sin \varphi - (\ddot{\psi} + \psi\dot{\varphi}^2) \cos \varphi \right]}{I_{xx} - I_{xz}(\psi \sin \varphi + \vartheta \cos \varphi)}$$

$M_{Wind}$  bedeutet ein Moment durch seitlichen Winddruck,  $M_{wave}$  die Seegangsmomente, die aufgrund direkter Erregung auf das Schiff einwirken,

$M_{Sy}$  und  $M_{Tank}$  sind weitere externe Momente durch Stabilisatoren oder Tanks.  $I_{xx}$  bedeutet das Massenträgheitsmoment um die x-Achse,  $I_{xz}$  ist ein Deviationsmoment.  $M_D$  ist das nichtlineare Rolldämpfungsmoment durch den Rumpf und die Schlingerkiel.  $H_S$  ist der Aufrichthebel des Schiffes im Seegang, der mit der Ersatzwelle nach Grim berechnet wird.

Im vorliegenden Fall sind die Momente  $M_{Wave}$ ,  $M_{Sy}$ ,  $M_{Wind}$  und  $M_{TANK}$  gleich Null, und sie werden bei der Berechnung unterdrückt. Weil der Seegang abgeschaltet wird, entspricht  $h_s$  dem statischen Aufrichthebel. Neu hinzu kommt in der Berechnung das Kranmoment  $M_{Kran}$ , welches sich aus den im folgenden Abschnitt beschriebenen Anteilen zusammensetzt.

## 10. Zusammenwirken des Krans mit dem Schiff

Sicher ist aufgrund der Zeugenaussagen sowie aufgrund der Liebherr-Aufzeichnungen, dass der Kran zunächst irrtümlich um 20:48:21 Richtung Landseite verfahren wurde. Nachdem der Fehler bemerkt worden war, wurde der Kran angehalten und nach Seeseite ca. 0.6-1.2m verfahren, bis um 20:48:38 das Signal zum Umsteuern des Kranes gegeben wurde. Nimmt man zunächst an, dass der Kran gegenüber dem Schiff keine Winkeländerung erfährt, dann bewirkt das seitliche Versetzen des Krans zunächst ein statisches Krängungsmoment, welches sich linear aus dem Verschiebeweg des Krans ergibt, solange der Krängungswinkel klein bleibt.

Wird der Kran von 410t Gewicht um 0.6m versetzt, ergibt das ein statisches Krängungsmoment von 246mt. Das GM des Schiffes betrug zum Unfallzeitpunkt 0.850m, daraus würde sich ein statischer Krängungswinkel von 1.41 Grad ergeben. Rechnerisch ist dieser Wert etwas größer, als es einer Steigung von 2% entsprechen würde, die vom Kranhersteller als maximal zulässig angesehen werden. Damit wäre schon unter Annahme eines ideal aufrecht schwimmenden Schiffes (ohne Vorkrängung) und bei einer rein statischen Betrachtungsweise des Verfahrenvorganges der herstellerseitige Steigungsgrenzwert für das seitliche Verfahren des Kranes erreicht oder bereits knapp überschritten gewesen. Das Gleiche gilt natürlich auch dann, wenn der Kran um 1.2m verfahren worden wäre.

Zum Zeitpunkt des Kranumsteuerns lag jedoch ein Krängungswinkel in Richtung Seeseite von mindestens 3 Grad vor, also mehr als doppelt so viel wie bei einer rein statischen Betrachtungsweise. Zu dem Zeitpunkt kann der Kran aber noch nicht merklich gekippt sein, daher scheidet ein Winkelversatz zwischen Schiff und Kran als Erklärungsversuch zu diesem Zeitpunkt aus.

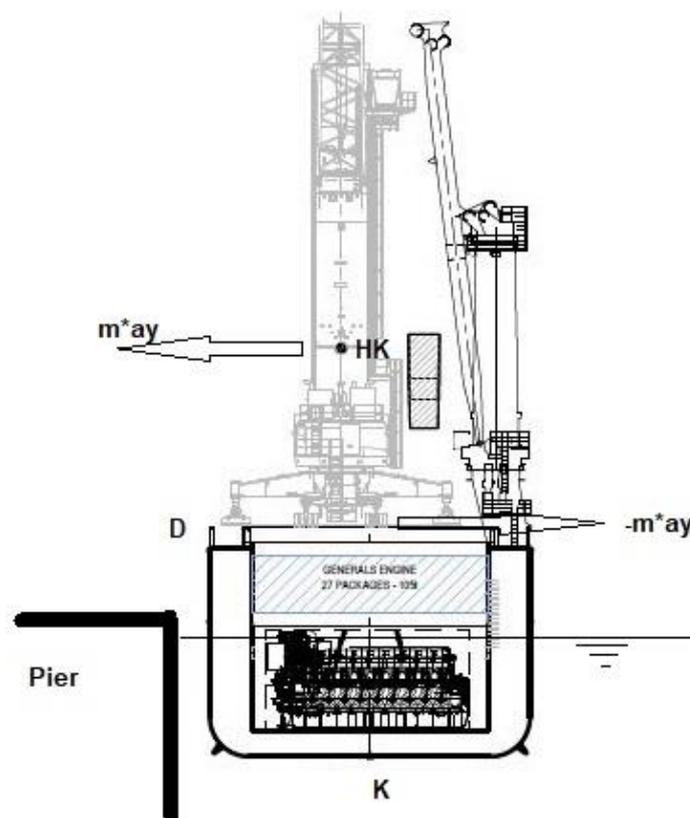
Daraus könnte man nun schließen, dass der Kran um mindestens 1.2m verfahren wäre, denn das ergäbe rechnerisch eine Krängung von 2.88 Grad und würde sich dann mit den gemessenen Krängungswinkeln zu diesem Zeitpunkt decken.

Diese zunächst naheliegende Annahme wird aber dadurch widerlegt, dass das Krängungswinkelsignal insgesamt nach allen Messungen einen stark nichtlinearen Verlauf hat. Das erkennt man in Abb. 8 deutlich daran, dass die Krängung nach ca. 20s kaum noch zunimmt, bis sie dann gegen Ende relativ schlagartig größer wird. Weil das krängende Moment durch den Kran aber stetig zunimmt, müsste sich dann auch die Krängung merklich vergrößern, was aber nicht der Fall ist. Somit ist der festgestellte Krängungswinkelverlauf keinesfalls mit einer rein statischen Betrachtung des Verfahrenvorgangs zu erklären.

Es müssen also bei dem Unfall auch dynamische Effekte eine Rolle spielen, was auch logisch ist, denn der Kran ist ja beim Bewegen angefahren und er wurde einmal umgesteuert.

In folgenden wird daher betrachtet, welchen Effekt das Anfahren und Anhalten des Kranes auf das Schiff hat. Dazu dient Abb. 16, in der die wichtigsten Größen dargestellt sind. In Abb. 16 steht der Kran der Masse  $m$  auf dem bei der Höhe  $D$  über Kiel  $K$  gelegenen Deck des Schiffes. Der Kran habe die Schwerpunkthöhe  $HK$  über dem Kielpunkt  $K$  des Schiffes. Der Ursprung unseres Koordinatensystems liegt dabei -wie allgemein üblich- im Kielpunkt des Schiffes.

Wenn nun der stehende Kran in Richtung Landseite (Pier) verfahren werden soll, dann muss er auf die entsprechende Verfahrgeschwindigkeit beschleunigt werden. Nach dem Newton'schen Prinzip wirkt dazu auf den Kran eine Beschleunigungskraft von  $m \cdot a_y$ , wenn  $a_y$  die Querbeschleunigung des Kranes ist. Die entsprechende Gegenkraft  $-m \cdot a_y$  beschleunigt nun zunächst das Schiff translatorisch von der Pier weg in Richtung Seeseite. Aufgebracht wird die Beschleunigungskraft vom Fahrwerk des Kranes, die über die Reibkraft der Räder diese Kraft aufbringen.



**Abb. 16: Zusammenwirken Schiff und Kran bei Beschleunigungsvorgängen**

Aus Abb. 16 wird nun ersichtlich, dass das translatorische Querbeschleunigen des Kranes neben einer Querkraft  $m \cdot a_y$  zusätzlich zu einem Rollmoment der Größe  $-m \cdot a_y \cdot HK$  führt, wobei das Rollmoment in Richtung Seeseite wirkt und sich auf den Koordinatenursprung, den Kielpunkt, bezieht. Das Rollmoment greift dabei auch im Massenschwerpunkt des Kranes (über Kiel) an. Denn die Wirkung des Kranes auf das Schiff ist zunächst die, dass die Räder eine horizontale Reibkraft  $m \cdot a_y$  erzeugen, deren Kraftangriffspunkt auf der Höhe des Decks  $D$  erfolgt. Es entsteht durch das Anfahren aber auch ein Kippmoment auf den Kran, der zu einer Verlagerung der Radlasten des Kranes führt. Dieses Kippmoment ist aber gerade so groß wie  $-m \cdot a_y \cdot (HK - D)$ , und somit ist das gesamte Rollmoment des Krans  $-m \cdot a_y \cdot HK$ , greift also, wie oben ausgeführt, in dessen Massenschwerpunkt an.

Ein Anfahren des Kranes nach Landseite bewirkt also ein seeseitiges Rollmoment, welches im Massenschwerpunkt des Kranes angreift. Ein Bremsen des Kranes aus dieser Bewegung kehrt die Verhältnisse um, es entsteht dann ein landseitiges Rollmoment. Ein Anfahren des Kranes nach Seeseite erzeugt dann wiederum ein landseitiges Krängungsmoment.

Der Verfahrensvorgang beginnt also mit einem Rollmoment nach Seeseite, gefolgt von zwei Rollmomenten nach Landseite.

Nun ergibt sich aus dem Zeitschrieb der Fa. Liebherr, dass das Anfahren, Anhalten und Wiederanfahren des Kranes etwa 3-4s gedauert hat. Das ergibt sich aus dem aufgezeichneten Meisterschaltersignal. Dieses Zeitintervall ist auf jeden Fall kurz gegenüber der Rollperiode des Schiffes, die 19-20s beträgt. Weil die Beschleunigungsintervalle des Kranes klein sind gegen die Rollperiode des Schiffes, kommt es nicht allein auf die absolute Größe des Beschleunigungsmomentes an, sondern stattdessen auf das Produkt aus Beschleunigungsmoment und dessen Einwirkdauer auf das Schiff.

Nach den Aufzeichnungen des Meisterschaltersignals hat es 3s gedauert, um den Kran anzufahren, 0.03m nach Landseite zu verfahren, zu bremsen und dann erneut anzufahren. Das ergibt eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 0.03m/s, wenn, wie aus dem Meisterschaltersignal ersichtlich wird, der Kran für 1s fährt. Dabei wird 1s beschleunigt, wie aus dem Meisterschaltersignal und dem Verfahren des Kranes erkenntlich wird. Weil es nur auf das Produkt aus Beschleunigungszeit und Beschleunigungsmoment ankommt, ist es völlig ausreichend, anzunehmen, dass der Kran innerhalb von 1s auf 0.03m/s beschleunigt. Das ergibt dann eine anzusetzende Querbewegung von  $0.03m/s^2$ , die dann genau 1s auf den Kran einwirken darf. Aus den gleichen Gründen wird im Folgenden dann auch nicht mehr unterschieden zwischen Beschleunigen und Anhalten des Krans.

Nun gibt die Fa. Liebherr an, dass die Fahrwege aus der volumetrischen Integration bestimmt wurden. Für den späteren seitlichen Versatz von

0.6m wurde dieser Wert aus der Maximum-Kurve des Fahrweges gewonnen (die Fahrwege haben ein negatives Vorzeichen, siehe Abb. 3), es hätten nach der Auswertung der Minimum-Kurve des Fahrweges aber auch 1.2m sein können (s. Abb. 3). Daher scheint es gerechtfertigt, die gleiche Unsicherheit bei der Wegbestimmung auch für das Verfahren nach Landseite anzusetzen, und dann käme man nach obiger Betrachtungsweise auf anzusetzende Beschleunigungen von maximal  $0.06\text{m/s}^2$ .

Die von uns angesetzten Rollmomente sind in jedem Falle im Sinne dieser Untersuchung **konservativ**, was bedeutet, dass sie Mindestmomente darstellen, die in jedem Falle aufgetreten sein müssen. Sicherlich waren die beim Verfahren des Kranes aufgetretenen Rollmomente größer. Das ergibt sich einmal daraus, dass der Kran ja nicht starr, sondern elastisch ist. Das gilt besonders für die Bereifung des Kranes. So wird es in jedem Fall dazu kommen, dass sich der Kran wegen der Elastizität der Bereifung gegenüber dem Deck des Schiffes neigt, wenn er beschleunigt oder gebremst wird. Das würde zu einer zusätzlichen transversalen Schwerpunktverschiebung führen, die ein zusätzliches krängendes Moment verursachen würde. Diesen Effekt haben wir aber bewusst nicht berücksichtigt.

Weil es für die in das Schiff eingetragene Erregung nur auf das Produkt von Rollbeschleunigung und deren Einwirkdauer ankommt, ist also die angesetzte Querbeschleunigung von  $0.03\text{-}0.06\text{m/s}^2$  innerhalb von 1s auf jeden Fall realistisch und zugleich konservativ.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich dann folgende Roll- und Krängungsmomente, die über den Kran auf das Schiff während der Anfahrphase des Krans einwirken:

- Der Kran beschleunigt mit  $0.03\text{m/s}^2$  bis  $0.06\text{m/s}^2$  in Richtung Landseite. Dadurch entsteht ein Rollmoment nach Seeseite.
- Der Kran fährt  $0.03\text{m}$ - $0.06\text{m}$  nach Landseite. Daraus resultiert ein Krängungsmoment nach Landseite.
- Der Kran bremst mit  $0.03\text{m/s}^2$  bis  $0.06\text{m/s}^2$  und erzeugt dabei ein Rollmoment nach Landseite.
- Der Kran beschleunigt mit  $0.03\text{m/s}^2$  bis  $0.06\text{m/s}^2$  nach Seeseite und erzeugt dabei ein Rollmoment nach Landseite.
- Der Kran fährt mit konstanter Geschwindigkeit nach Seeseite und erzeugt dabei ein linear steigendes Krängungsmoment nach Seeseite.
- Dabei werden nach 13s (gerechnet ab Losfahren des Krans)  $0.6\text{m}$ - $1.2\text{m}$  Fahrweg nach Seeseite erreicht. Der Kran fährt dabei mit einer Geschwindigkeit von mindestens  $0.06\text{m/s}$  bis höchstens  $0.12\text{m/s}$ .
- Ab diesem Zeitpunkt ist davon auszugehen, dass die Räder des Krans zumindest zeitweise Schlupf haben.

Nun hat das Gutachten von Prof. Wirz ergeben, dass sich der Kran zum Zeitpunkt des Umsteuerns nicht mehr anhalten ließ, weil durch den Schlupf eines (oder mehrerer Räder) die Hydraulik kein Bremsmoment mehr aufbringen konnte. Daher gehen wir davon aus, dass der Kran dann einfach weitergefahren ist, und zwar mit zunehmender Geschwindigkeit, weil die Hydraulik praktisch kein Moment mehr aufbringen kann und der Kran abwärts rollt.

Dann ist der Kran, wie man es deutlich auf den Aufnahmen hört und auch auf den Kamerabildern sieht, komplett ins Rutschen gekommen und dann über Bord gekippt.

Seitens der BSU wurde nun die Fa. Liebherr angefragt, unter welchen Bedingungen der Kran seitlich kippen würde. Dazu hat sich die Fa. Liebherr wie folgt geäußert (uns per e-mail durch die BSU übermittelt):

*„Meiner Berechnung nach würde der Kran ab ca. 11°-12° Seitenneigung über die Räder kippen. Aufgrund der ausgefahrenen Klappholme (Eckbasis 13m x 13m) und der daran montierten Abstützplatten würde der Kran aber nur soweit kippen bis die Abstützplatten auf dem Deck aufliegen. Selbst bei maximal eingefahrenen Abstützplatten (Abstützplatten ~500mm über Boden) würde sich der Kran damit nur um etwa 6° weiter neigen. Ein Kippen über die Abstützplatten würde dann erst bei einer Kranneigung von über 30° eintreten.“*

Aufgrund dieser Ausführungen in Verbindung mit dem zeitlichen Verlauf des Neigungswinkels (des Krans, welcher der Decksneigung entspricht, solange der Kran nicht kippt, vgl. Abb. 8) kann folgendes geschlossen werden:

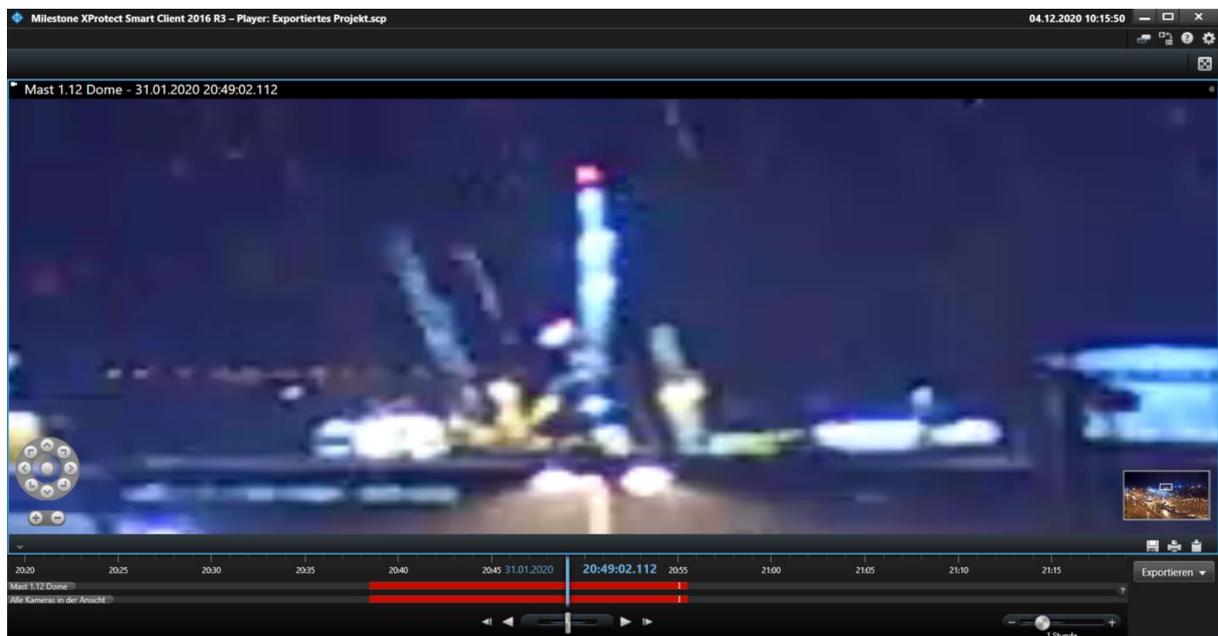
Der Kran kann trotz der auftretenden Krängung nicht gekippt sein, solange er sich noch mit beiden Radsätzen auf den Lukendeckeln befand. Das auf den Aufzeichnungskameras erkennbare Überbordkippen des Krans tritt genau dann ein, wenn der Kran mit einem Radsatz über die Lukendeckelkante gerutscht ist. Damit lässt sich der Verschiebeweg des Krans bis zu Kippzeitpunkt hinreichend gut bestimmen.

Zunächst ergibt sich aus den Tonaufzeichnungen recht deutlich, dass aufgrund der Geräuschentwicklung ein heftiges Verrutschen des Kranes spätestens nach 40s einsetzt. Das deckt sich soweit auch mit den Aufzeichnungen der Hafenkamera, die den Vorgang schräg von der Seite gefilmt hat. Auf diesen Aufzeichnungen ist aber zu erkennen, dass sich der Kran bereits 33s nach Beginn der Verfahrbewegung deutlich heftiger seitlich bewegt als zuvor. Das lässt den Schluss zu, dass eine Rutschbewegung das reine Fahren des Krans überlagert. Wir gehen somit davon aus, dass sich der Kran ab 33s schneller seitlich bewegt, als es einer reinen Fahrbewegung entsprechen würde.

Gleichfalls kann man aus den Krängungswinkelaufzeichnungen der Fa. Liebherr eine starke Spitze des Krängungswinkels bei 20s erkennen (vgl. Abb. 3). Weil der Sensor des Kranes die Neigung aus den Beschleunigungen ermittelt, ist diese Spitze durch eine laterale Beschleunigung entstanden, die durch das plötzliche Rutschen des Kranes des Krans entsteht und die der Sensor dann als Winkeländerung interpretiert. Denn der Kran ist ja nicht gekippt.

Betrachtet man alle diese Fakten zusammen, dann muss der Kran spätestens nach 20s angefangen haben, substantziell seitlich zu rutschen.

Aus den Aufzeichnungen der Hafenkamera lässt sich nun recht gut ermitteln, um 20:49:02 eine deutliche Kippbewegung des Krans feststellen. Dieser Zeitpunkt entspricht einem Zeitintervall von 41s nach Anfahren des Kranes. Man kann somit davon ausgehen, dass etwa zu diesem Zeitpunkt ein Radsatz über die Lukendeckelkante fährt.



**Abb. 17: Kippzeitpunkt des Kranes aus den Videoaufzeichnungen um 20:49:02**

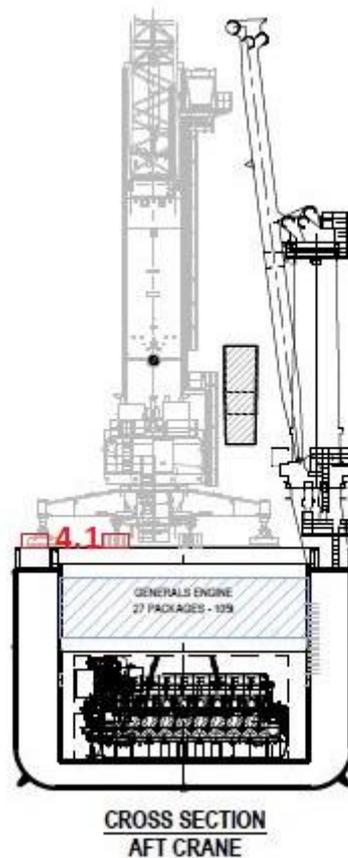
Aus Abb. 18, welche die Stauposition des hinteren Kranes zeigt, lässt sich nun ermitteln, dass seitliche der Verschiebeweg etwa 4.1m betragen hat, bis ein Radsatz über die Lukendeckelkante gefahren ist.

Aus diesen Überlegungen folgt für die Kranbewegung nach Einsetzen des Schlupfes zwischen Rädern und dem Untergrund:

- Der Kran ist bis zu diesem Zeitpunkt (13s nach Losfahren des Krans) einen Verschiebeweg von 0.6m bis 1.2m gefahren.
- Der Kran beschleunigt jetzt in Richtung Seeseite, weil die Hydraulik kein Antriebsmoment mehr aufbringt und weil zu diesem Zeitpunkt

die Krängung des Schiffes Richtung Seeseite dadurch weiter zunimmt.

- Etwa nach 20s beginnt der Kran zu rutschen, bis ein Radsatz über die Lukendeckelkante fährt. Bis zum Kippen hat der Kran etwa eine Wegstrecke von 4.1m zurückgelegt.
- Unterstellt man zunächst, dass der Kran bis zum Zeitpunkt des versuchten Anhaltes eine Verfahrstrecke von 0.6m zurückgelegt hätte, dann verbleiben jetzt noch 3.5m, die der Kran dann in 28s zurückgelegt hat. Das ergibt eine zeitlich gemittelte Geschwindigkeit von 0.125m/s. Unterstellt man dagegen, dass der Kran bis zum Anhaltezeitpunkt 1.2m verfahren wäre, dann ergeben sich noch 2.9m, die der Kran dann in 28s verfahren bzw. gerutscht ist, was einer mittleren Verfahrgeschwindigkeit von 0.104m/s entspricht.

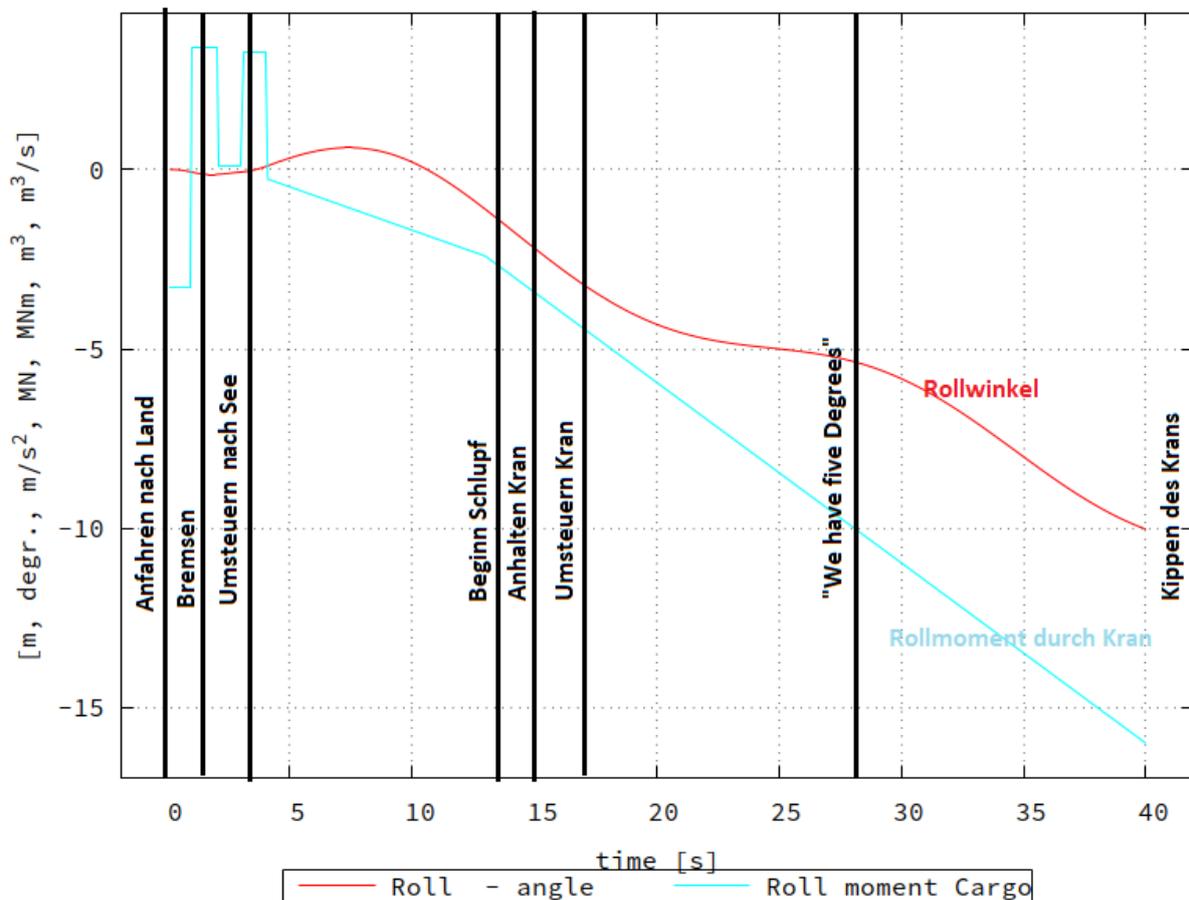


**Abb. 18: Verschiebewegermittlung zum Kippzeitpunkt des Kranes**

Diese Rollmomente haben wir numerisch in einer entsprechenden Simulation mit unserem Programm E4ROLLS mittels „User-Coding“ auf das Schiff aufgebracht. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

# 11. Ergebnisse der Berechnungen im Zeitbereich

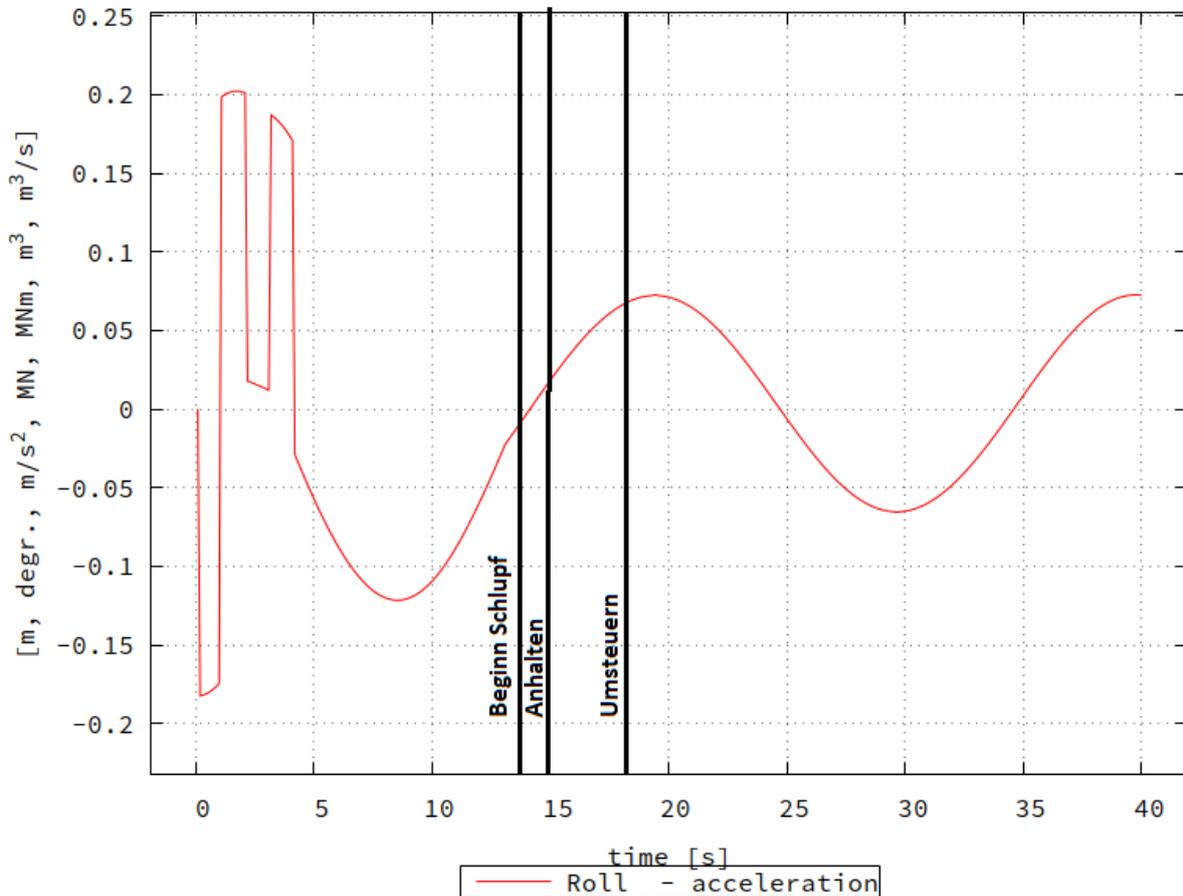
Wir haben nun die oben identifizierten Rollmomente auf das Schiff aufgebracht und mittels des Berechnungsverfahrens E4ROLLS die sich einstellende Schiffsbewegung berechnet. Die Berechnungsergebnisse für den Unfallzustand sind in Abb. 19 zunächst für den Fall dargestellt, dass der Kran 0.6m seitlich verfahren ist, bis versucht wird, ihn anzuhalten. Die Beschleunigungsmomente durch den Kran betragen  $0.03\text{m/s}^2$ , und die Rollgeschwindigkeit des Schiffes zum Startzeitpunkt des Krans beträgt 0 Grad/s. Das Anfangsmetazentrum des Schiffes ist wie im Ladefall  $0.85\text{m}$ .



**Abb. 19: Berechnungsergebnisse für den Fall  $0.03\text{m/s}^2$  Anfahrbeschleunigung,  $0.6\text{m}$  Verfahrweg,  $0$  Grad/s Anfangsrollgeschwindigkeit,  $\text{GM}=0.85\text{m}$**

Abb. 19 zeigt nun die wichtigsten Ergebnisse der Berechnung des Verfahrvorganges unter den oben beschriebenen Annahmen. Die rote Kurve zeigt den Verlauf des Krängungswinkels über die Zeit, die hellblaue die wirkenden Rollmomente. Zum Zeitpunkt  $t=0$  versetzt der Kran Richtung Landseite, bremst dann und verfährt nach Seeseite. Dadurch wird jetzt eine Rollschwingung angeregt, die dem statischen Verfahren des Kranes überlagert wird. Entscheidend ist jetzt für den weiteren Verlauf, dass die Rolleigenpe-

riode des Schiffes etwa 20s beträgt. Um die dadurch entstehenden dynamischen Effekte deutlich zu machen, haben wir die Rollbeschleunigung berechnet und in Abb. 20 dargestellt. Die in Abb. 20 dargestellt Rollbeschleunigung enthält nicht die Anteile der statischen Krängung.



**Abb. 20: Verlauf der Rollbeschleunigung über der Zeit.**

Interessanterweise fällt der Beginn des Einsetzens des Schlupfes der Räder etwa mit dem Nulldurchgang der Rollbeschleunigung zusammen. Das bedeutet, dass ab 13s die Rollbeschleunigung auf den Kran in Richtung Seeseite wirkt und damit den statischen Krängungswinkel vergrößert. Abb.20 zeigt ja die Rollbeschleunigung des Schiffes, und die Wirkung auf den Kran ist dann entgegengesetzt.

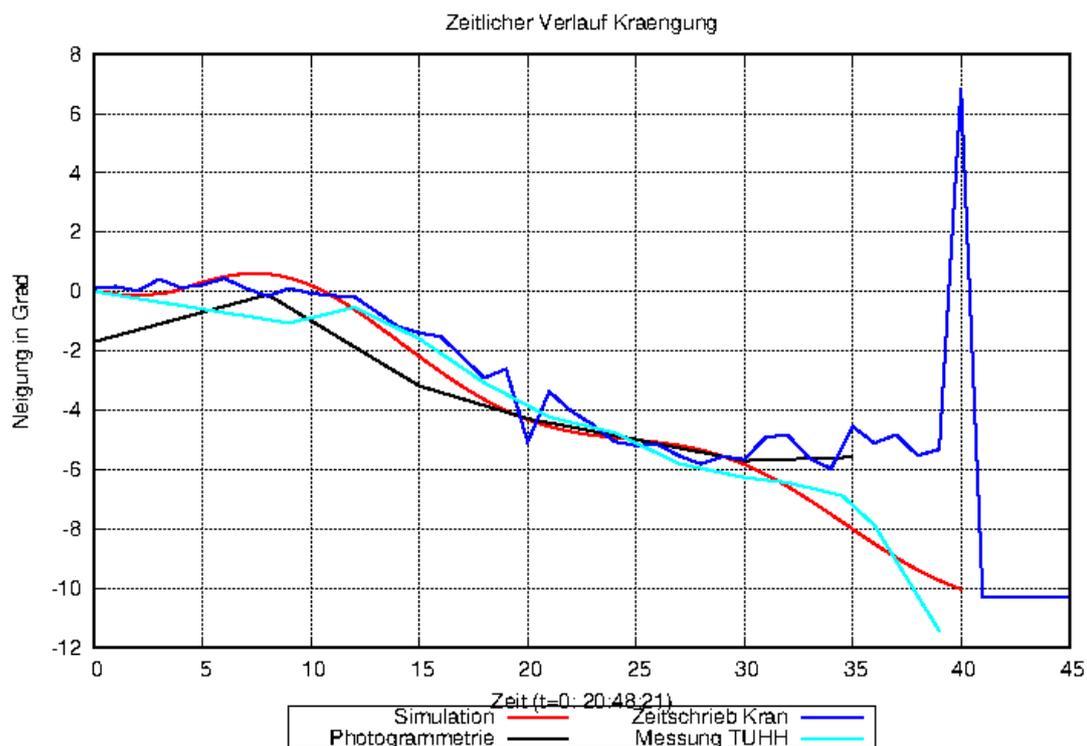
Entscheidend für den weiteren Unfallablauf ist jedoch, dass das Umsteuern des Kranes exakt mit dem Maximum der Rollbeschleunigung zusammenfällt, weil genau dann die seeseitige Rollschwingung ihren Umkehrpunkt hat. Das wird aus Abb. 19 auch deutlich, aber nicht so markant, weil der Rollschwingung ja das seitliche Verfahren des Kranes überlagert ist.

Jetzt wird auch klar, warum der Kran nicht anhalten konnte und spätestens beim Umsteuern auf jeden Fall Schlupf auftrat und der Kran zu rutschen

anfang: Der statischen Krängung wird das momentane Maximum der Rollbeschleunigung überlagert.

Die Rollschwingung erklärt auch, warum der Kran mehrfach ruckartig gerutscht ist: Nach 27s wirkt die Rollbeschleunigung der Kranbewegung maximal entgegen, und nach 37s wieder maximal in Richtung der Kranbewegung. Das trägt mit dazu bei, dass der Kran dann nach 37 final von Bord rutscht, was man an der massive Geräuschentwicklung nach 37s sofort auf den Tonaufzeichnungen feststellen kann (vgl. dazu auch Abb. 4). Nach 28s erreicht unsere Berechnung 5.2 Grad Rollwinkel, zu dem Zeitpunkt bemerkt die Brücke, dass 5 Grad Krängung anliegen.

Zum Zeitpunkt des Umsteuerns nach 18s haben wir einen statischen Krängungswinkel von 3.30 Grad errechnet. Zu dem Zeitpunkt beträgt der Rollbeschleunigungsanteil auf den Kran  $0.07\text{m/s}^2$ , was 0.40 Grad entspricht. Daraus ergibt sich ein wirksamer Krängungswinkel zum Zeitpunkt des Umsteuerns von 3.70 Grad, das entspricht 6.5%. Das ist erheblich mehr, als vom Kranhersteller zugelassen.



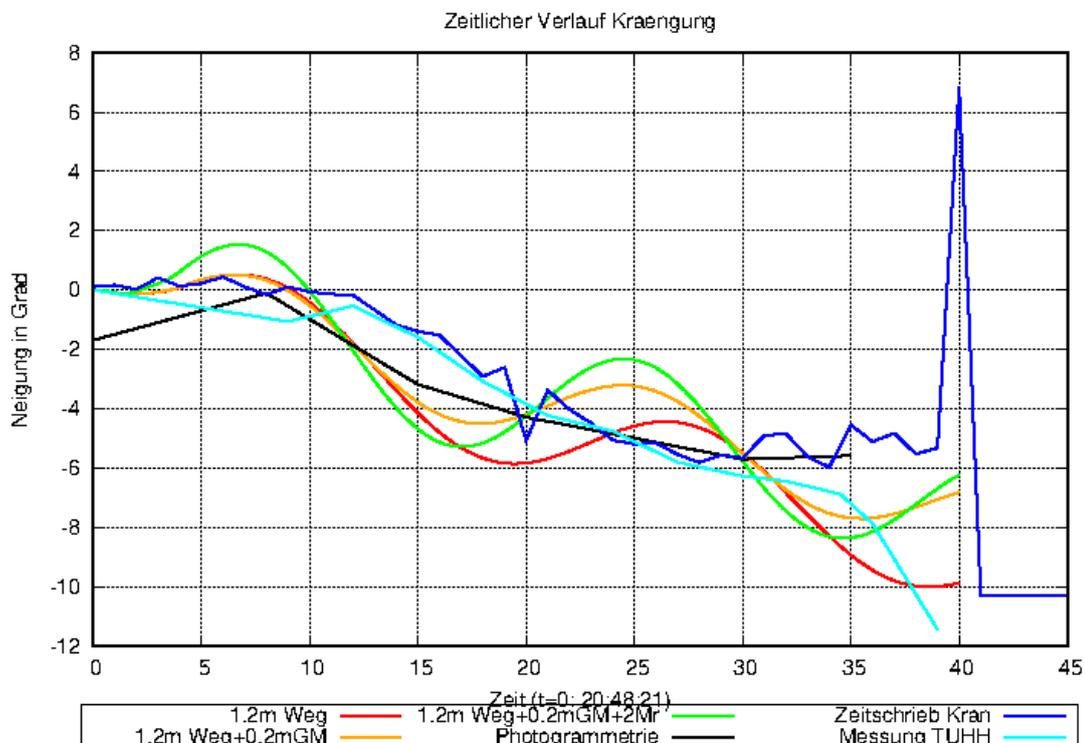
**Abb. 21: Vergleich unserer Berechnungen mit den Krängungswinkelmessungen**

Wir haben nun unsere Berechnungsergebnisse (rote Kurve) zusammen mit den verschiedenen Messungen der Rollwinkel zusammengestellt und in Abb. 21 dargestellt. Man erkennt sofort, dass die Rechnung insgesamt sehr gut zu den Messungen passt. Dabei muss bedacht werden, dass der Liebherr-Sensor eine starke translatorische Beschleunigung des Krans teilweise als Kippen interpretiert, so dass diese Messung gegen Ende nicht mehr als zuverlässig betrachtet werden kann.

Weil unsere Berechnung sehr gut zum Unfallablauf passt, ist davon auszugehen, dass wir alle relevanten Faktoren qualitativ richtig erfasst haben. Als unstrittig muss gelten, dass das irrtümliche Verfahren des Kranes eine Rollschwingung von ca. 20s Periode ausgelöst hat. Ebenso unstrittig ist, dass das Umsteuern des Kranes genau mit dem Maximum der Rollbeschleunigung zusammenfällt und dass spätestens dann die Räder Schlupf bekommen haben.

Wir haben bei unseren Berechnungen jedoch bestimmte Annahmen getroffen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Das betrifft den tatsächlichen Fahrweg des Kranes, die Anfangsrollgeschwindigkeit des Schiffes sowie dessen Anfangsstabilität. Wir werden daher im Folgenden untersuchen, welche Kombination von Parametern die beste Annäherung an die gemessenen Rollwinkelverläufe liefert. Das ist dann die höchstwahrscheinliche Abfolge des Unfalles.

Dabei geht es jedoch nicht mehr um die Klärung des Unfallablaufes selbst, denn diese ist bereits durch Abb. 19-21 eindeutig geklärt, sondern es geht jetzt lediglich noch darum, wie der Unfall grundsätzlich hätte vermieden werden können.



**Abb. 22: Vergleich der berechneten Rollwinkel unter verschiedenen Annahmen**

Abb. 22 zeigt das Ergebnis unserer systematischen Berechnungen. Wir haben zunächst den Rollwinkelverlauf berechnet unter der Annahme, dass

der Kran um 1.20m seitlich verfahren ist. Das ist das Maximum, was aufgrund der Auswertung der Liebherr-Messungen möglich ist. Die Ergebnisse sind in der roten Kurve in Abb. 22 dargestellt. Man erkennt sofort, dass die Annäherung an die Messwerte schlechter ist als nach Abb. 21. Vor allem wird nach 20s unter diesen Annahmen ein Krängungswinkel von 6 Grad errechnet, was keines falls zu den Messungen passt.

Nun wäre es denkbar, dass die Stabilität des Schiffes größer ist, als sich aufgrund des Ladefalles ergibt. Bei größerer Stabilität würde sich dann natürlich ein kleinerer Krängungswinkel ergeben. Die Ergebnisse für diese Eingangswerte (Verfahren um 1.2m, GM 0.2m erhöht) sind in der orangefarbenen Kurve in Abb. 22 dargestellt. Jetzt stellt sich nach 20 etwa der gleiche Krängungswinkel ein, aber die Phasenlage der Kurve passt jetzt nicht mehr zu den Messungen.

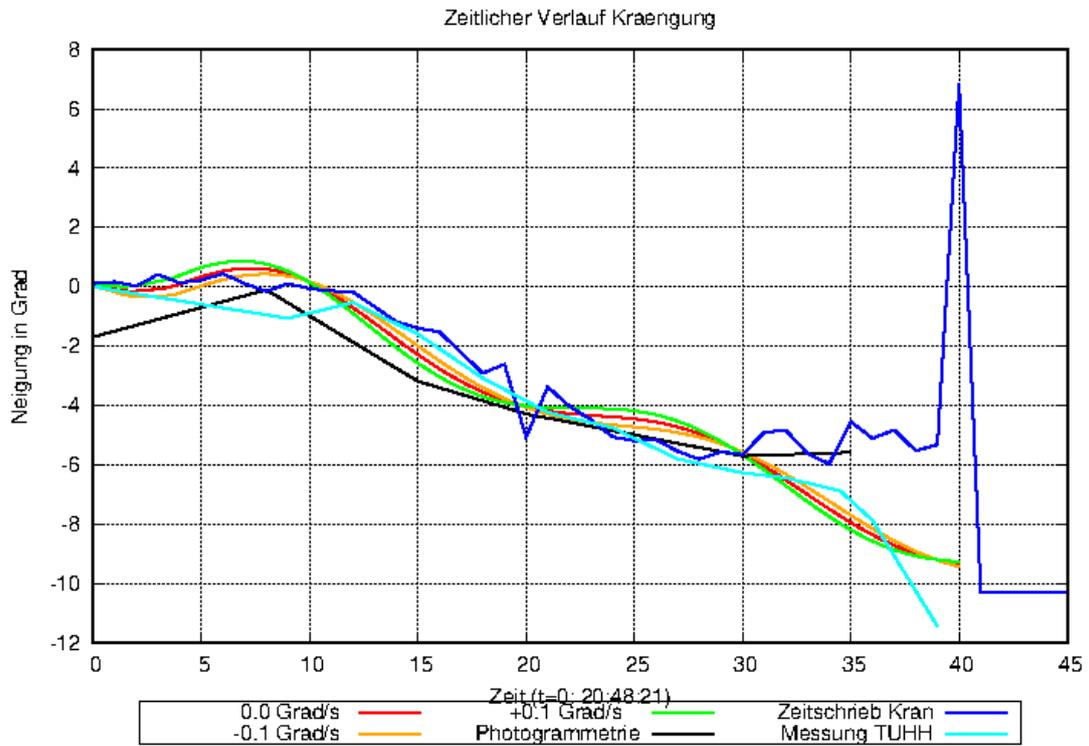
Wir haben nun versucht, das Rollmoment bei Anfahren des Kranes zu vergrößern, in dem wir  $0.06/m/s^2$  zugrunde gelegt haben. Diesen Wert haben wir oben als maximal mögliche Beschleunigung begründet. Das Ergebnis ist in Abb. 22 in Form der grünen Kurve dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Annäherung an die gemessenen Verläufe noch schlechter wird.

Damit ist nun zweierlei nachgewiesen: Erste muss der von der Fa. Liebherr angegebene Verfahrenweg recht gut stimmen, denn die Annahme eines größeren, aber aufgrund der Aufzeichnungen noch plausiblen Verfahrenweges führt in keiner sinnvollen Kombination zu einer plausiblen Repräsentation der Messwerte. Zweitens muss die im Ladefall der JUMBO VISION angegebene Stabilität des Schiffes recht gut stimmen, weil sonst die Phasenlage der Bewegung nicht richtig herauskommen würde.

Damit bestätigen unsere Berechnungsergebnisse zwei wichtige Eingangsgrößen für den Unfall, nämlich die Stabilität des Schiffes und die Verfahrensbewegung des Kranes.

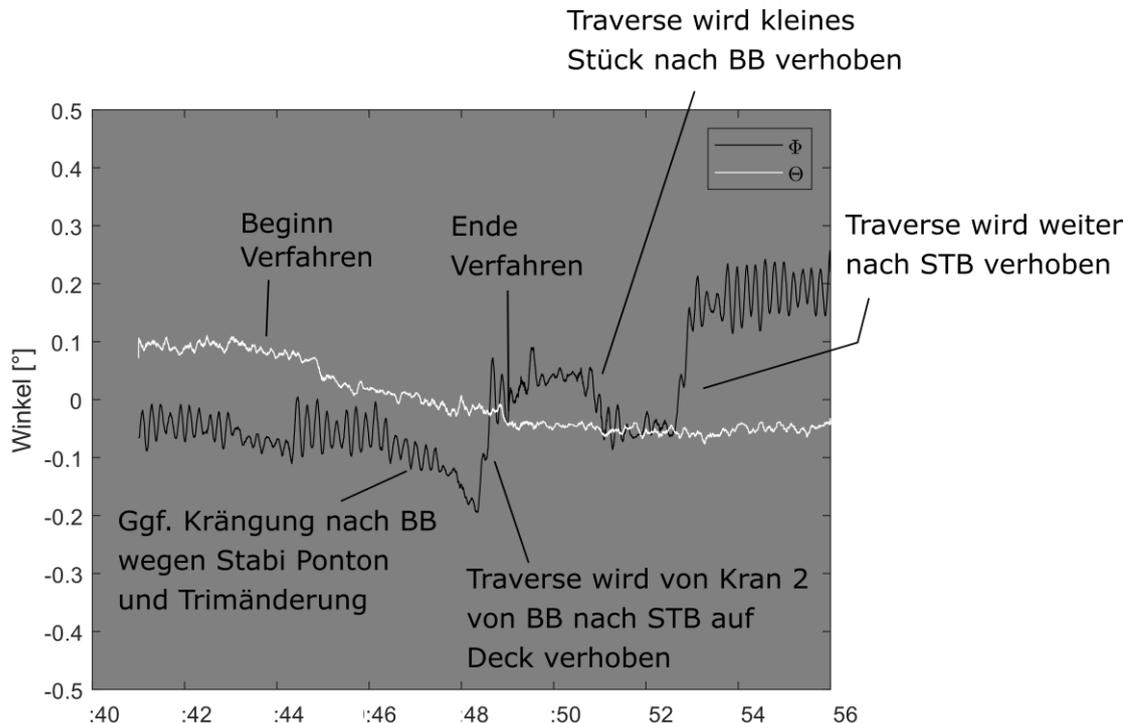
Aus grundsätzlichen physikalischen Überlegungen heraus ist es nicht möglich, dass eine angenommene Anfangsrollgeschwindigkeit zu Beginn des Verfahrens des Kranes die Verhältnisse so ändern kann, dass eine der drei Kurven in Abb. 22 mit den Messergebnissen zusammenfällt. Daher werden wir diesen Einfluss nur noch für die ursprünglich ermittelte Parameterkombination untersuchen.

Die Ergebnisse sind in Abb. 23 dargestellt. Dort wurde die Anfangsrollgeschwindigkeit mit  $-0.1$ ,  $0$  und  $+0.1$  Grad/s angenommen. Die Größenordnung wurde deshalb gewählt, weil sie bei einer Rollperiode von 20s etwa einer Amplitude von einem Grad entspricht. Man erkennt, dass der Einfluss der Anfangsrollgeschwindigkeit keinen sonderlich großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Damit ist dann auch dieser Einfluss abschließend geklärt.



**Abb. 23: Einfluss einer möglichen Anfangsrollgeschwindigkeit auf den Rollwinkelverlauf**

## 12. Validierung der Rechenannahmen



**Abb. 24: Messung der Schiffsbewegungen Trimm (weiße Kurve) und Krängung (schwarze Kurve) beim Verfahren eines Kranes LMH 550 an Bord eines anderen Schiffes durch TUHH/M-06.**

Zur Bestätigung der von uns getroffenen Annahme, dass das Verfahren des Kranes eine Rollschwingung ausgelöst hat, haben wir eine Rollschwingungsmessung an Bord eines Schiffes durchgeführt, bei der ein Kran des gleichen Typs LMH550 an Bord verfahren worden ist, nachdem er mittels Tandem-Lift an Bord genommen worden ist. Der Kran wurde jedoch nur in Längsrichtung verfahren, und zum Zeitpunkt des Verfahrens war der Stabilitätsponton des Schiffes noch hinten angeschlagen. Das Anfangs-GM des Schiffes während des Verfahrens des Krans betrug deutlich über 3m.

Das von uns entwickelte Messsystem beruht auf einer Weiterentwicklung des elektronischen Inclinometers der Firma Ocean Systems Solutions für mobile Anwendungen und hat eine Auflösungsgenauigkeit von etwa 2/100 Grad. Abb. 24 zeigt nun die Ergebnisse unserer Messung für das Längsverfahren des Krans. Die weiße Kurve gibt dabei den Trimmwinkel des Schiffes an. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der statische Mittelwert des Trimmwinkels ändert, wenn der Kran verfahren wird. Es ist aber auch zu erkennen, dass dem Signal des Trimmwinkels Schwingungen überlagert sind. Das liegt daran, dass der Kran beschleunigt und dann auch nicht mit konstanter Geschwindigkeit verfährt, weil das Meisterschaltersignal auch während des Verfahrens etwas variieren wird. Weil das

Längenmetazentrum des Schiffes deutlich größer ist als 100m, ist natürlich die Amplitude der Stampfschwingung sehr klein, aber sie liegt noch oberhalb der Messgenauigkeit unseres Messsystems.

Interessant ist jetzt das im vorliegenden Fall aufgezeichnete Signal des Rollwinkels. Durch den ausgebrachten Stabilitätsponton werden ja die Trägheitshauptachsen des Schiffes verdreht, so dass eine Kopplung der Rollbewegung mit der Stampfbewegung des Schiffes erfolgt. Dadurch bewirkt das Auslösen einer Stampfschwingung durch das Verfahren des Krans sofort eine deutlich sichtbare Rollschwingung. Dies hat natürlich wegen der hohen Stabilität des Schiffes eine recht geringe Amplitude, aber sie ist dennoch deutlich zu erkennen. Ebenso führt das Verfahren der Traverse durch das bordeigene Geschirr nicht nur zu einer deutlich sichtbaren Änderung der statischen Gleichgewichtslage, sondern auch zu einer erkennbaren Rollschwingung. Trotz der hohen Stabilität des Schiffes und dem reinen Längsverfahren des Krans wird bei diesem Verfahrensvorgang wird eine maximale Amplitudendifferenz von 0.4Grad erreicht, was zwar absolut gesehen sehr wenig ist, aber in Anbetracht der zulässigen 2% (entsprechend 1.15 Grad) eben doch einen bemerkenswerten Wert darstellt.

Die durchgeführte Messung bestätigt also qualitativ unsere obigen Ausführungen zum Verfahren des Krans auf der JUMBO VISION.

## 13. Möglichkeiten zur Vermeidung des Unfalles

Der Unfall geht unseren Berechnungen nach hauptsächlich auf ein nicht ausreichendes Stabilitätsmanagement während des Verfahrens des Krans zurück. Die Stabilität des Schiffes war durch das Einholen des Stabilitätspontons soweit herabgesetzt, dass ein Verfahren des Krans kaum noch möglich war, wenn der herstellerseitige Grenzwert von 2% Neigung während des Verfahrens hätte eingehalten werden müssen.

Der Unfallablauf lässt für uns grundsätzlich den Schluss zu, dass die Schiffsführung nicht gewusst haben kann, dass bereits beim Erreichen eines statischen Krängungswinkels von 1.15 Grad der herstellerseitige Grenzwert für das Verfahren des Kranes überschritten war.

Das geht für uns auch daraus hervor, dass das versuchte Anhalten des Krans nicht aus Stabilitätsgründen bzw. aus Gründen des Überschreitens eines kritischen Krängungswinkels erfolgt ist, sondern weil ein Hindernis (Laschmaterial) dem weiteren Verfahren des Krans im Weg war (siehe Zeugenaussagen Port Captain und Kranfahrer). Aus dem Meisterschaltersignal ergibt sich, das Anhalten des Kranes deswegen etwa 15 nach dessen Losfahren eingeleitet wurde. Die Tonaufzeichnungen weisen dahingehend aus, dass die Brücke erst nach 21s aufgefordert hat, die Kranfahrt zu verlangsamen. Auch aus dem brückenseitigen Hinweis, dass 5Grad Krängung erreicht sind, geht nicht hervor, dass man sich darüber im Klaren war, dass dieser Krängungswinkel bereits so kritisch war, dass der Kran nahezu zwangsläufig über Bordgehen musste.

Zu dieser Gesamtsituation passt auch die Tatsache, dass durch das vorherige Verschwenken des bordeigenen Kranes bereits eine Krängungswinkeldifferenz erreicht wurde, die erheblich größer war als der zulässige herstellerseitige Grenzwert für das Verfahren des Kranes bei seitlicher Neigung.

Daraus ergibt sich unzweifelhaft, dass die zum Verfahrzeitpunkt vorhandene Stabilität des Schiffes nicht in einem vernünftigen Verhältnis zu der für das sicherere Verfahren des Krans zulässigen Neigung war. Daraus kann man zunächst folgern, dass der Unfall in jedem Falle vermieden worden wäre, wenn die Stabilität des Schiffes höher gewesen wäre. Das wäre eindeutig dadurch zu erreichen gewesen, wenn ein Stabilitätsponton noch draußen gewesen wäre.

Nun ist es denkbar, dass es aufgrund betrieblicher Abläufe nicht möglich war, den Stabilitätsponton hereinzuholen, wenn die beiden Krane ihre endgültige Stauposition erreicht hatten. In diesem Falle wäre die Stabilität des Schiffes ja praktisch nicht in sinnvollem Maße beeinflussbar gewesen.

Die dann geringere Stabilität hätte nun bewirken müssen, dass besondere Maßnahmen hätten eingeleitet werden müssen, um ein sicheres Verfahren des Krans auch unter diesen Umständen noch gewährleisten zu können. Der Unfallablauf legt aber nahe, dass solche Maßnahmen nicht ergriffen worden sind. Wir werden daher im Folgenden untersuchen, welche weiteren Möglichkeiten man gehabt hätte, auch bei der vorhandenen Stabilität des Schiffes die endgültige Stauposition des Krans sicher zu erreichen.

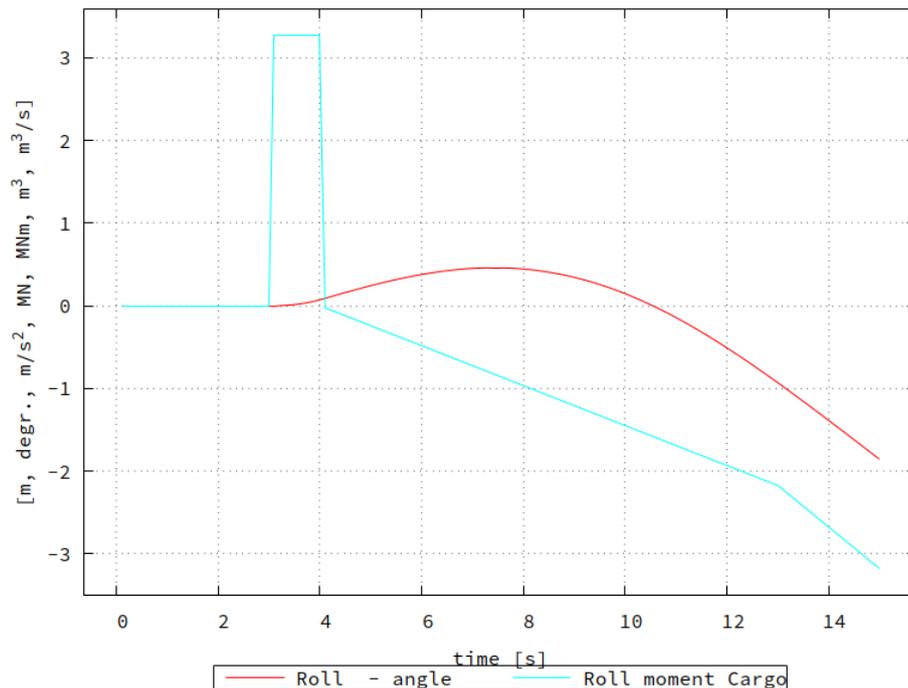
Grundsätzlich ist das immer möglich, wenn während des Verfahrens die Neigung des Schiffes ständig überwacht wird und der Kran sofort angehalten wird, wenn der herstellerseitige Grenzwert überschritten wird. Das setzt ein entsprechend akkurates Stabilitätsmanagement voraus, und das dürfte anhand des Unfallablaufes auch völlig unstrittig sein.

Wir wollen daher unsere Überlegungen über diese Forderung hin ausweiten und davon ausgehen, dass ein hinreichend sicheres Verfahren auch dann noch möglich ist, wenn es gelingt, den Kran noch regulär anhalten zu können. Das erfolglose Anhalten des Kranes wurde 15s nach dem erstmaligen Anfahren des Kranes eingeleitet, das entspricht 12s nach dem Anfahren des Krans in Richtung Seeseite. Zu diesem Zeitpunkt haben wir einen statischen Krängungswinkel von 2.33 Grad in Richtung Seeseite errechnet, vgl. Abb. 19. Aus Abb. 20 ergibt sich, dass zu diesem Zeitpunkt eine Querbeschleunigung auf den Kran von 0.021m/s durch die eingeleitete Rollschwingung gewirkt hat, das entspricht einem äquivalenten zusätzlichen Krängungswinkel von 0.12 Grad.

Daraus folgern wir zunächst, dass das sichere Anhalten des Kranes unter den gegebenen Untergrundverhältnissen nicht mehr möglich ist, wenn der resultierende Krängungswinkel zum Anhaltezeitpunkt 2.45 Grad beträgt.

Das Schiff ist nun durch das fälschliche Anfahren des Krans zur Landseite hin zu einer Rollschwingung angeregt worden, die dann der statischen Krängung überlagert wird. Wir haben daher untersucht, was passiert wäre, wenn der Kran gleich in die richtige Richtung bewegt worden wäre. Dazu haben wir die entsprechenden Rollmomente in unserer Berechnung einfach abgeschaltet, wir haben aber die Zeitachse nicht verändert, damit die Berechnungen vergleichbar sind. Das heißt, dass der Kran in unserer Berechnung zum gleichen Zeitpunkt in Richtung Seeseite verfährt, ohne dass er vorher in Richtung Landseite verfahren ist. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abb. 25 dargestellt.

Man erkennt in Abb. 25 zunächst, dass der statische Rollwinkel nach 15s (also zum gedachten Anhaltezeitpunkt) jetzt noch 1.86 Grad beträgt. Das sind 0.47 Grad weniger als unter den Umständen des Unfalles. Zunächst erscheint das recht wenig zu sein, das Verhältnis der statischen Rollwinkel nach 15s beträgt aber  $1.86/2.33=0.798$ . Das bedeutet, dass unter diesen Umständen nur 80% des statischen Krängungswinkels erreicht werden, was äquivalent wäre mit einem Anfangs-GM von 1.06m.



**Abb. 25: Verlauf von Rollmoment und Rollwinkel unter der Annahme, dass der Kran direkt nach Seeseite verfahren worden wäre.**

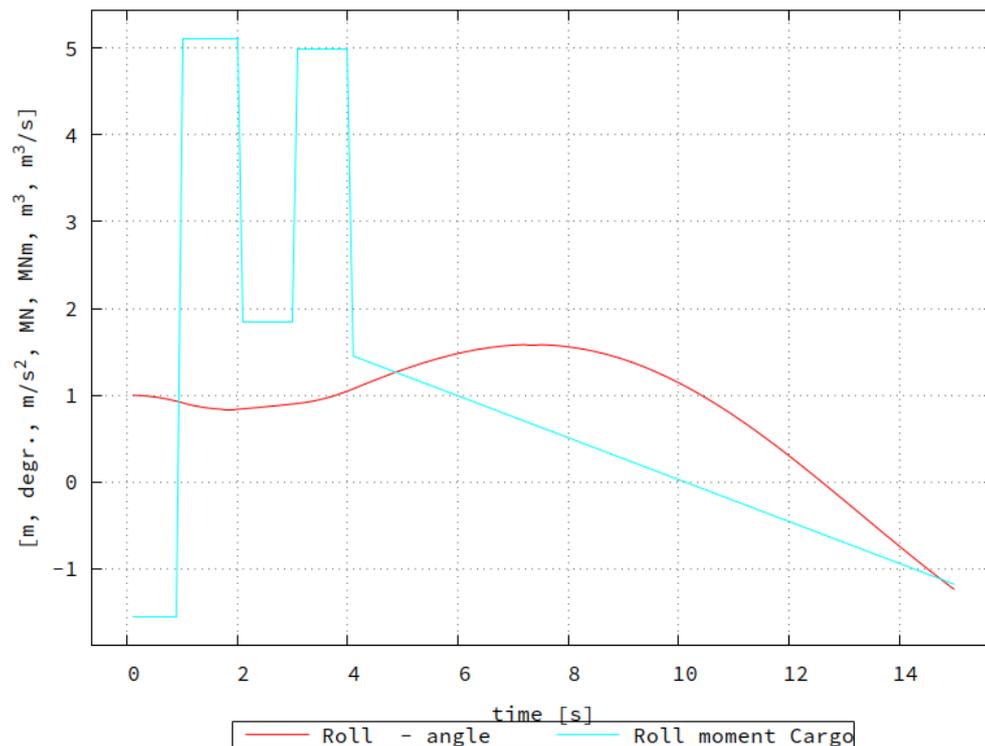
Das bedeutet, dass das fälschliche Verfahren des Krans zur Landseite hin einem Effekt gleichkommt, der etwa in 20cm Anfangsstabilität des Schiffes ausgedrückt werden kann.

Weil das Anhalten des Krans bezüglich der eingeleiteten Rollschwingung etwa zum gleichen Zeitpunkt stattfindet, ändert sich der dynamische Zusatzanteil des Rollwinkels nur unwesentlich, die Querbeschleunigung beträgt nun  $0.037\text{m/s}$  oder  $0.22$  Grad. Damit kommt man auf letztlich auf einen effektiven Rollwinkel von  $2.07$  Grad.

Ob unter diesen Umständen ein Anhalten des Krans noch möglich ist, lässt sich nun nicht sicher sagen. Es erscheint aber nicht wahrscheinlich, denn es deutet vieles darauf hin, dass unter diesen Umständen angesichts der Verhältnisse an Bord (Kran fuhr nassen, sandigen Stahlplatten) auch Schlupf aufgetreten wäre. Mit Sicherheit lässt sich aber sagen, dass das fälschliche Anfahren des Krans den Unfallablauf begünstigt hat, denn dadurch wurde der tatsächlich aufgetretene Krängungswinkel erkennbar vergrößert. Man kann aus diesen Berechnungen jedoch nicht den Schluss ableiten, dass das fälschliche Verfahren des Kranes alleine unfallursächlich war.

Offensichtlich wurde vor dem Verfahren des Krans eine vorher vorhandene landseitige Neigung durch das Verfahren des bordeigenen Geschirrs verändert. Als Neigungswinkeldifferenz wurden dafür  $1.2\text{-}2$  Grad ermittelt. Nun stellt sich die Frage, was passiert wäre, wenn der bordeigene Kran

sich nicht bewegt hätte und der Verfahrensvorgang des Krans mit einer Anfangsschlagseite in Landrichtung begonnen hätte. Dazu haben wir die Berechnung für den Unfallzustand wiederholt und eine Anfangsschlagseite Richtung Land angenommen. Diese haben wir von 0.5 Grad bis 1.5 Grad variiert. Das Ergebnis für eine angenommene landseitige Schlagseite von einem Grad ist in Abb. 26 für eine angenommene Schlagseite von 1 Grad gezeigt.



**Abb. 26: Verlauf von Rollmoment und Rollwinkel unter der Annahme, dass der Kran mit einer Schlagseite von einem Grad nach Landseite verfahren worden wäre.**

Wir haben bei unseren Berechnungen angenommen, dass der Kran wie im Unfallzustand zuerst fälschlicherweise nach Land verfährt. Man erkennt sofort, dass die Verhältnisse zum Anhaltezeitpunkt des Krans nach 15s erheblich verbessern. Allerdings tritt jetzt der größte Krängungswinkel in Richtung Landseite auf, er beträgt jetzt statisch 1.49 Grad. Zu diesem Zeitpunkt wirkt jetzt allerdings eine größere Beschleunigung von  $0.127\text{m/s}^2$  auf den Kran, was einer Vergrößerung des statisch äquivalenten Krängungswinkels um 0.74 Grad entspricht. Damit würde sich jetzt ein resultierender Krängungswinkel von 2.23 Grad ergeben.

Damit liefert diese angedachte Maßnahme den gleichen quantitativen Effekt wie das unmittelbare Verfahren des Krans in Richtung Seeseite, nur in die andere Richtung. Aus den oben ausgeführten Gründen ist es daher zweifelhaft, ob der Kran unter diesen Umständen angesichts der herrschenden Untergrundverhältnisse noch sicher anhalten könnte.

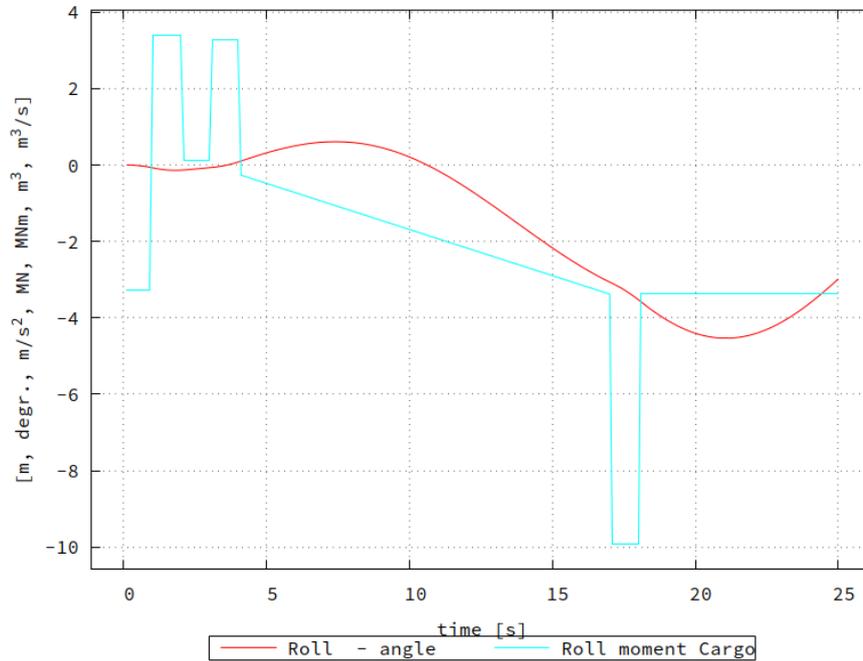
Daher wäre das Verfahren des Kranes unter den gegebenen Umständen auch mit einer landseitigen Vorkrängung nach unseren Berechnungen so auch nicht ohne Risiko machbar gewesen. Als Ergebnis hätte der Kran dann durchaus auch auf die Pier kippen können.

Aus unseren Berechnungen ergibt sich also, dass ein seitliches Verfahren des Krans unter den gegebenen Umständen nicht möglich war, ohne dass besondere, der Situation angepasste Maßnahmen erforderlich gewesen wären. Dazu hätte gehört, den Kran nur extrem vorsichtig in kleinen Sequenzen zu verfahren und dabei ständig die Neigung des Schiffes zu kontrollieren. Weil das so nicht erfolgt ist, ist die Situation zwangsläufig so weit eskaliert, dass der Kran dann unvermeidlich zu rutschen begann und dann über Bord ging.

Damit verbleibt nur noch eine Fragestellung, die zu klären ist. Der Operateur des Krans hatte ja zunächst versucht, diesen anzuhalten, in dem das Meisterschaltersignal zunächst auf 0 gelegt wurde. Dadurch wurde die Feststellbremse des Krans angesteuert. Dann wurde der Kran jedoch in die Gegenrichtung umgesteuert, was dazu geführt hat, dass die Feststellbremse wieder deaktiviert wurde. Weil der Kran stetig weitergefahren ist, scheint ausgeschlossen, dass in der kurzen Zeit die Feststellbremse eine nennenswerte Wirkung gehabt haben kann. Es aufgrund der Trägheit des hydraulischen Systems zweifelhaft, ob die Bremse überhaupt in der kurzen Zeit einrücken konnte.

Daraus ergibt sich die Fragestellung, was passiert wäre, wenn der Kranoperateur solange gewartet hätte, bis die Feststellbremse eingerückt wäre und nicht versucht hätte, den Kran in die Gegenrichtung umzusteuern.

Das Einrücken der Feststellbremse hätte in jedem Fall zu einem heftigen Bremsmoment auf den Kran geführt. Gleichzeitig hätte dieses Bremsmoment die seeseitige Neigung des Schiffes vergrößert. Wir haben dieses Bremsmoment nun analog zu den vorher erläuterten Beschleunigungsmomenten modelliert, wobei es wiederum nur auf das Produkt aus Bremsmoment und Einwirkdauer ankommt. Der Kran ist zum fraglichen Zeitpunkt mit mindestens  $0.06\text{m/s}$  gefahren, daraus ergibt sich, dass analog zur vorherigen Vorgehensweise eine auf das Schiff wirkende Querschleunigung von  $0.06\text{m/s}^2$  in dem Moment wirkt, wenn der Kran abgebremst wird. Wir haben in unseren Berechnungen angenommen, dass die Feststellbremse dann nach  $15\text{s}$  wirkt, also anstelle des Umsteuerns. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. 27 dargestellt.



**Abb. 27: Verlauf von Rollmoment und Rollwinkel unter der Annahme, dass der Kran mit durch die Feststellbremse gebremst worden wäre.**

Wie Abb. 27 zeigt, ergibt sich durch das Bremsen des Krans ein statischer Rollwinkel von 4.51 Grad nach 21s. Danach schwingt das Schiff dann zurück, weil sich das Krängungsmoment in unserer Rechnung nicht mehr ändert, denn der Kran ist ja rechnerisch zum Stillstand gekommen. Zu diesem Zeitpunkt wirkt dann das Maximum der Rollbeschleunigung auf den Kran, wir haben dieses mit  $0.22\text{m/s}^2$  ermittelt. Das entspricht einem zusätzlichen statischen Krängungswinkel von 1.28Grad, so dass der Kran in diesem Zeitpunkt einem äquivalenten Neigungswinkel von 5.79 Grad ausgesetzt ist.

Nach Angaben der Fa. Liebherr würde der Kran erst bei einem Winkel von 11.2 Grad seitlich über die Räder kippen, davon ist der berechnete Zustand weit entfernt. Ein Kippen des Krans aufgrund des Einrückens der Feststellbremse kann also mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden.

Aus Abb. 10 wird aber ersichtlich, dass der Kran unter diesen Bedingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit erst einmal weiterrutschen würde. Dadurch würde dann natürlich das krängende Moment in Richtung Seeseite vergrößert, und es würde in jedem Fall verhindert werden, dass das Schiff – wie in Abb. 27 gezeigt, zurückrollen würde. Damit würde dann die statische Schlagseite des Schiffes weiter vergrößert, und der Kran würde dann, wenn er einmal massiv zu rutschen begonnen hat, auch über Bord

gehen. Die Berechnung hat also ergeben, dass der Kran mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch über Bord gegangen wäre, wenn zum fraglichen Zeitpunkt die Feststellbremse eingerückt wäre.

Daraus folgt dann unausweichlich, dass sich der Unfall nur durch ein adäquates Stabilitätsmanagement hätte vermeiden lassen, was eine Überwachung der Neigung des Schiffes und ein extrem vorsichtiges Verfahren des Kranes bedeutet hätte. Und es wäre in jedem Fall besser gewesen, wenn die Stabilität des Schiffes größer gewesen wäre. Was dem Unfall zusätzlich Vorschub geleistet hat, waren die ungünstigen Untergrundverhältnisse, die ein Rutschen des Krans stark begünstigt haben.