

Entwicklung einer Demontageplattform

Heavy Lifter – Konstruktion und Bautechnik

Karl-Christian Thienel, Neubiberg

1998 verabschiedeten die in der Oslo and Paris Commissions (OSPAR) vertretenen europäischen Regierungen der Nord- und Ostsee-Anrainerstaaten eine Umweltschutzdeklaration für die Nordsee. Ein Bestandteil der Konvention sieht den gezielten Rückbau von Offshore-Stahlplattformen vor. Angesichts der zu erwartenden Aufträge – in der Nordsee befinden sich 700 Plattformen – erarbeiteten mehrere Konsortien Konzepte für den Rückbau. Ein Konsortium hatte die Idee, eine robuste und kostengünstige Demontageplattform zu entwickeln, die das Archimedische Prinzip für ein vertikales Abheben nutzen sollte. Dieser MPU Heavy Lifter besteht aus einem zellularen U-förmigen Schwimmkörper aus Leichtbeton mit je einem Leichtbetonturm an den vier Ecken. Der Leichtbeton stellte angesichts der geringen Betonrohddichte und des notwendigen Einsatzes von Leichtsand eine Herausforderung an die Betonhersteller dar. In dem Beitrag werden die Grundlagen für Entwurf und Bemessung, die geforderten Betoneigenschaften, das umfangreiche Versuchsprogramm mit seinen Ergebnissen sowie die Bauausführung beschrieben.

1 Ausgangssituation

Der Untergang der Torrey Canyon 1968 und die damit verbundene Freisetzung von 117000 t Rohöl führte zur Gründung der Oslo and Paris Commissions (OSPAR). Die in dieser Kommission vertretenen europäischen Regierungen der Nord- und Ostsee-Anrainerstaaten verabschiedeten 1998 mit der OSPAR Convention eine Umweltschutzdeklaration für die Nordsee. Gemäß dieser Konvention sollen die maritimen Ökosysteme und ihre biologische Vielfalt gegen Verschmutzung geschützt werden. Ein Bestandteil der Konvention sieht den gezielten Rückbau von Offshore-Stahlplattformen vor [1].

Gegenwärtig gibt es allein in der Nordsee 700 Plattformen, die mit Ausnahme einiger

Schwergechichtsplattformen zurückgebaut werden müssen. Für den Bereich der Nordsee umfasst der Markt für die Demontage der vorhandenen Offshore-Stahlplattformen ein Volumen von 10 Mrd. €. Der weltweite Markt mit mehr als 7000 Plattformen repräsentiert ein geschätztes Auftragsvolumen von 50 Mrd. US \$ bis 80 Mrd. US \$ [2, 3].

Als größte Herausforderung werden die großen Stahlplattformen mit einem Gewicht ihrer Deckkonstruktion von über 10000 t angesehen, die mit wenigen Ausnahmen in einer Wassertiefe von mehr als 100 m stehen. Zurzeit steckt der Rückbau von Offshore-Plattformen noch in den Kinderschuhen. Bis 2004 wurden erst 54 Konstruktionen rückgebaut. Darunter waren mit der zu zweifel-

haftem Ruhm gelangten Brent Spar [4] und der Hutton TLP (engl.: tension leg platform) auch Schwimmplattformen [2].

Angesichts der zu erwartenden lukrativen Aufträge hatten sich in den letzten Jahren mehrere Konsortien zusammengefunden, darunter ein Konsortium, um eine robuste und kostengünstige Demontageplattform zu entwickeln, die sich das Prinzip des Archimedes für ein verti-

kales Abheben zunutze machen sollte: den MPU Heavy Lifter. Diese Variante einer „Ein-Schiff-Lösung“ war ein U-förmiger Halbtaucher aus Beton. Für dieses Konzept entwickelte die Firma Dr. techn. Olav Olsen AS einen Entwurf [5]. Zusammen mit verschiedenen Firmen aus der Schiffsbau- und Offshore-Industrie gründete sie 1998 die MPU Enterprise AS mit dem Ziel, das Konzept zu realisieren. Die Firma Dr. techn. Olav Olsen AS konnte nicht zuletzt ihre große Erfahrung aus dem Bau zahlreicher Betonplattformen (Condeep) einbringen.

MPU steht für Multi Purpose Unit und deutet mit diesem Namen bereits an, dass das Konzept neben der primären Anwendung für weitere lukrative Geschäftsfelder geeignet

Der Autor:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel studierte Bauingenieurwesen an der TU Braunschweig. Anschließend war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Masivbau und Brandschutz der TU Braunschweig. Nach der Promotion erhielt er ein Feodor-Lynen-Stipendiat der Alexander-von-Humboldt Stiftung am Center for Advanced Cement Based Materials (ACBM) der Northwestern University, USA. Darauf folgte eine Anstellung bei der Liapor GmbH & Co. KG in deren Verlauf er zum Leiter der F&E-Abteilung befördert wurde. Seit dem Jahr 2003 ist Karl-Christian Thienel als Universitätsprofessor Leiter des Instituts für Werkstoff des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München.

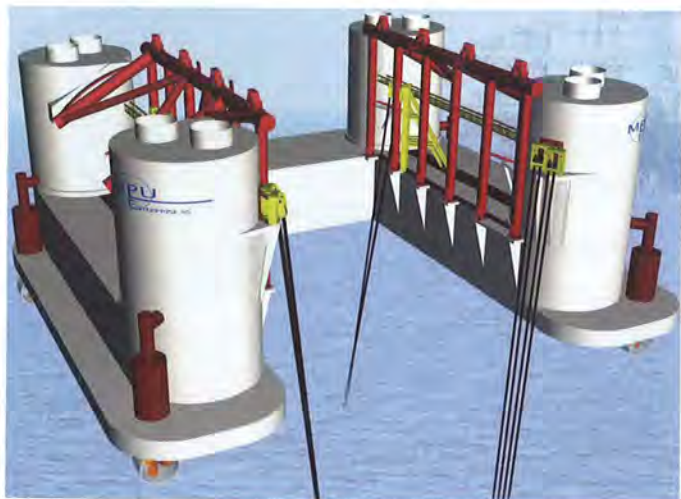


Bild 1: Isometrische Darstellung des MPU Heavy Lifters [6]

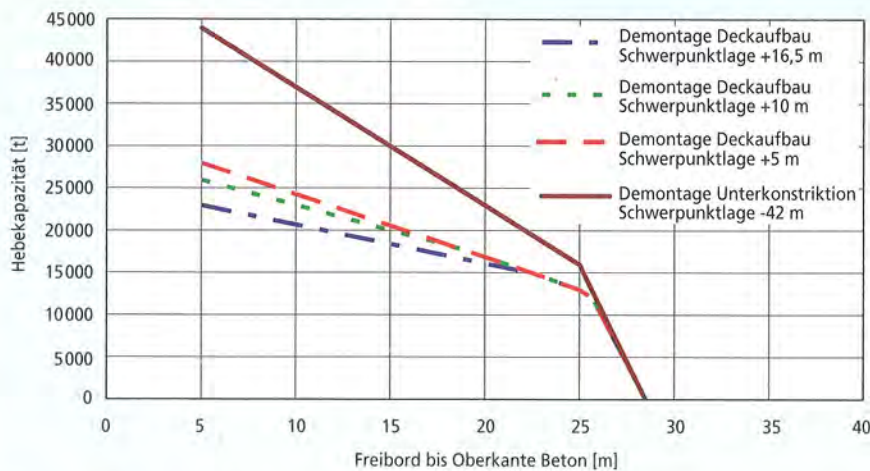


Bild 2: Hebekapazität des MPU Heavy Lifters in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe und dem verbleibenden Freibord bis Oberkante der Betonkonstruktion [nach 8]

wäre. Mit der geplanten Ausrüstung könnten zum Beispiel die Unterkonstruktionen großer Windkraftanlagen versetzt werden. Außerdem wäre die Montage aller möglichen schweren Unterwasserinstallationen ein zusätzliches Einsatzgebiet.

2 Konzept

Der MPU Heavy Lifter (MPU-HL) besteht aus dem zellularen U-förmigen Schwimmkörper aus Leichtbeton mit je einem Leichtbetonturm an den vier Ecken. In der durch den Betonschwimmkörper gebildeten Transportöffnung (half-moon pool) sollte im Einsatz die zu demontierende Plattform aufgenommen werden. Zwischen den beiden Türmen jedes Schenkels sitzt je ein hydraulisch betriebener Stahlrahmenträger. Dieser Stahlrahmen kann in Richtung des half-moon pools geschwenkt werden. Mithilfe dieser Stahlrahmen sollte der MPU Heavy Lifter in der Lage sein, die Deckkonstruktionen ausrangierter Offshore-Plattformen von ihrer Unterkonstruktion abzuheben. Zusätzlich sollte der MPU Heavy Lifter mit vier Gruppen von Seilwinden ausgestattet werden (Bild 1). Mit deren Hilfe sollte es dem MPU Heavy Lifter möglich sein, die stählernen Unterkonstruktionen der ausgedienten Plattform zu entfernen. Umgekehrt sollte der MPU Heavy Lifter natürlich in der Lage sein, neue Plattformen vor Ort zu installieren.

Die Größe des MPU Heavy Lifters wurde durch die Abmessungen der bestehenden Offshore-Plattformen bestimmt. Mit einer Breite des half-moon pools von 50 m könnten etwa 80 % der bestehenden Deckkonstruktionen und etwa 55 % der Unterkonstruktionen aufgenommen werden [7]. Neben der maximal zulässigen Abmessung spielte die maximale Hebekapazität eine entscheidende Rolle für die Dimensionierung des MPU Heavy Lifters. Die Hebekapazität ist bei einer Konstruktion, die auf dem Prinzip des Archimedes beruht, eine Funktion der Eintauchtiefe (Bild 2) und hängt wegen der erforderliche Stabilität zudem noch von

der Lage des Schwerpunkts ab. Die Angaben gelten im Fall der Demontage der Deckaufbauten einer Plattform für das Anheben mit geöffneten Fluttanks und im Fall der Demontage der Unterwasserkonstruktion einer Plattform für das Anheben mit geschlossenen Fluttanks [8].

Zur Verbesserung der Schwimmstabilität war im unteren Bereich des Schwimmkörpers eine außen umlaufende Krempe angeordnet, die zusätzlichen Auftrieb lieferte. Für den Hebevorgang musste eine Methode gefunden werden, die den MPU Heavy Lifter kontrolliert in Kontakt mit seiner Last bringen konnte und beide zusammen aus dem Wasser drückte, ohne dabei durch ein Verdrehen oder Kippen die Gesamtstabilität zu gefährden. Dieses Ziel wurde durch je zwei Fluttanks in den Türmen bewerkstelligt. Bei einem Tiefgang von 20 m stand mit diesem System eine Kapazität von 8000 t zur Verfügung. Diese Kapazität ließ sich problemlos durch Aufsätze auf den Türmen vergrößern [8]. Nach seiner Außerdienststellung könnte die Beton-

Tafel 1: Technische Spezifikation des MPU Heavy Lifter [8]

Gesamtlänge	m	92
Gesamtbreite	m	104
Höhe	m	40
Maximale Breite der Transportöffnung	m	50
Maximale Länge der Transportöffnung	m	63
Tiefgang für Hebevorgänge	m	18...26
Maximaler Tiefgang	m	33
Ballastkapazität	t	53800
Eigengewicht	t	41900
davon Stahlbauteile und Ausrüstung	t	4800
Unsicherheit bei Betongewicht/-dichte	%	7,5
Hebekapazität Deckaufbauten	t	15000
Hebekapazität Unterkonstruktionen	t	25000

konstruktion als Lager für Öl und Gas dienen. Einige Eckwerte der Konstruktion sind in Tafel 1 zusammengestellt.

Die Demontage einer ausgedienten stählernen Offshore-Installation sollte nach folgendem Verfahren ablaufen: Der MPU Heavy Lifter sollte mit seiner 30- bis 40-köpfigen Besatzung von Hochseeschleppern mit einer Höchstgeschwindigkeit von 14 Knoten bis auf 800 m an die Offshore-Plattform herangebugsiert werden. Die eigentliche Annäherung wäre mithilfe eines eigenen Antriebs erfolgt, der aus acht Strahlrudern bestand. Der MPU Heavy Lifter sollte zunächst auf die erforderliche Tiefe mithilfe seiner Ballasttanks abgesenkt werden, um mit seinem Stahlrahmen unter die zu demontierende Deckkonstruktion gelangen zu können (Bild 3 links). In dieser Position hätte sich der Lifter mit seiner offenen Seite voran an die Plattform angenähert und sie in den half-moon pool aufgenommen (Bild 3 Mitte). Als nächstes sollte der Stahlrahmen des MPU Heavy Lifters und das Deck der ausrangierten Plattform



Bild 3: Prinzipieller Ablauf der Demontage einer ausgedienten Stahlplattform; Phase 1 bis 3 [6]



Bild 4: Prinzipieller Ablauf der Demontage einer ausgedienten Stahlplattform; Phase 4 bis 6 [6]



Bild 5: Prinzipieller Ablauf der Demontage einer ausgedienten Stahlplattform; Phase 7 bis 9 [6]

miteinander verbunden und das Deck von der Unterkonstruktion getrennt werden. Sobald dies geschehen ist, werden die Ballasttanks mithilfe großer Drucklufttanks ausgeblasen. Der Lifter würde so die Decklast durch den erhöhten Auftrieb von der Unterkonstruktion abheben. Dieses Unterfangen setzt eine sehr präzise Steuerung für das Ausbalancieren des Lifters und der vertäuten Deckkonstruktion voraus. Für den weiteren Transport an Land sollte die Deckkonstruktion auf spezielle Schiffe verbracht werden (Bild 4). Im letzten Schritt sollte mithilfe von Seilwinden auch die Unterkonstruktion entfernt werden (Bild 5).

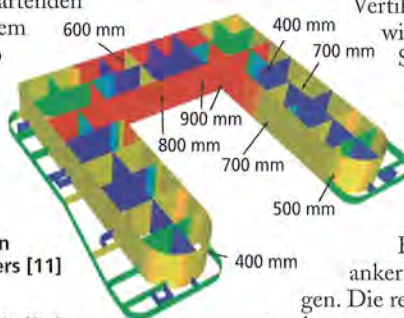
3 Grundlagen für Entwurf und Bemessung

Mit dem Heavy Lifter wurde in verschiedenen Bereichen Neuland betreten. Die projektierende norwegische Firma Dr. techn. Olav Olsen AS hatte bereits seit Jahren viel Erfahrung im Bau von Beton-Offshore-Plattformen gewonnen und setzte dieses Wissen im Entwurf des MPU Heavy Lifters um. Das Konzept wurde für den MPU Heavy Lifters unter anderem von Det Norske Veritas (DNV) intensiv auf seine Eignung hin überprüft. Die beschriebene Demontage einer Plattform hätte bis zu einer Wellenhöhe von 1,5 m, der Windstärke 4 und einer Strömungsgeschwindigkeit von einem Knoten beginnen können. Die Grenze für dieses Unterfangen wäre bei einer Wellenhöhe von 3 m, der Windstärke 6 und einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 Knoten erreicht gewesen. Aufgrund der Ergebnisse wurde das Konzept bereits im Jahr 2000 für den geplanten Einsatz freigegeben. Die bautechnische Zulassung hatte nach den Regeln zu erfolgen, die für Seeschiffe gelten. Es war daher eine Lloyds Klassifizierung vorzunehmen. Der Entwurf und die Überprüfung der Konstruktion erfolgte nach den DNV Regularien und norwegischen Normen. Letzteres galt insbesondere für die Leichtbetonkonstruktion, die nach NS 3473.E 2003 [9] bemessen werden sollte. Dennoch waren viele Fragen offen, die im Rahmen eines umfangreichen Versuchsprogramms beantwortet werden mussten.

Die Bemessung einer schwimmenden hochseegängigen Betonkonstruktion gestaltet sich recht aufwändig. Für den Nachweis der Seegängigkeit waren die Bemessungswellen festzulegen und die statischen bzw. quasi-statischen Wellenlasten zu ermitteln. Dies führte letztlich zu 600 Lastfällen infolge von 44 Bemessungswellen.

Eine kritische Belastungssituation ergab sich für den Zeitpunkt, zu dem die Ballasttanks entleert würden und sich der Heavy Lifter aufwärts bewegt und die zu demontierende Plattform in diesem Zuge aus ihrer festen Verankerung mit dem Meeresboden löst. Für diese Situation ist eine genaue Vorhersage der tatsächlich zu erwartenden Beanspruchung extrem schwierig. Es blieb nur eine statistische Vorhersage übrig, für die zahlreiche numerische Simula-

Bild 6: Verteilung der Wanddicken im unteren Bereich des Heavy Lifters [11]



tionen mit unterschiedlichsten Deckaufbauten, für deren Montage der Heavy Lifter geeignet sein sollte, Ballastverteilungen und Meeresbedingungen (Wellenhöhe, Strömung, Wind) durchgeführt werden mussten. Angesichts der etwa 400 in Frage kommenden Varianten der zu demontierenden Altplattformen kamen allein für den Zeitpunkt des Abhebens für den Leichtbetonrumpf schließlich ungefähr 500 Lastfälle zusammen [10]. Das so prognostizierte Verhalten stimmte sehr gut mit entsprechenden Modellversu-

chen im Wassertank überein, die parallel dazu in Norwegen durchgeführt wurden [8]. Die getroffenen Annahmen konnten daher für die weiteren FE-Berechnungen genutzt werden, mit deren Hilfe schließlich die iterative Anpassung der Steifigkeit und Tragfähigkeit der Betonquerschnitte vorgenommen wurde. Bild 6 zeigt, wie sich die Berechnungen und die dadurch vorgenommenen Optimierungen auf die Wanddicken im Bereich des Auftriebskörpers und der umlaufenden Kreme ausgewirkt hat. Ausführliche Informationen zur Bemessung sind in [11] zu finden.

Für die schlaffe Bewehrung wurde Betonstahl B500C nach EN 10080 gewählt. Als Spannstahl wurden Spannstahl nach BS 5896 Super (1640/1860) vorgesehen. Zum Einsatz kamen 19-litzige Spannglieder von DSI für die Bodenplatte, die Wände und die

Vertikalvorspannung der Türme sowie zusätzlich einige 12-litzige Spannglieder für die Wände. Die Litzen hatten einen Durchmesser von 15,7 mm.

Die vergleichsweise geringe Zugfestigkeit des Leichtbetons erforderte für die Bewehrung weite Biegeradien sowie große Verankerungs- und Übergreifungslängen. Die rechnerisch erforderlichen Längen konnten zum Teil durch das Ausbilden geschweißter Stöße und durch zusätzliche Spaltzugbewehrung reduziert werden. Aus dem gleichen Grund wurden besonders im Bereich von Betonierfugen Kopfplatten für die Verankerung eingesetzt (Bild 7).

4 Betoneigenschaften

Der Wunsch nach einem minimalen Konstruktionsgewicht des Schwimmkörpers und damit einem Maximieren der möglichen Hebekapazität war der entscheidende Grund für die Wahl eines Leichtbetons. Hinzu kamen die von den Norwegern geschätzte sehr gute Dauerhaftigkeit und die nachweislich gute Dauerschwingfestigkeit. Mit dem gewählten Leichtbeton der Festigkeitsklasse LC35/38 ging man allerdings an die Grenzen des technisch Machbaren. Entgegen üblichen Anforderungen wurde nicht die Trockenrohddichte als Kriterium für die Beurteilung herangezogen. Gefordert wurde stattdessen eine Betonrohddichte nach dem Ausschalen von maximal 1.600 kg/m³. Diese Vorgabe er-

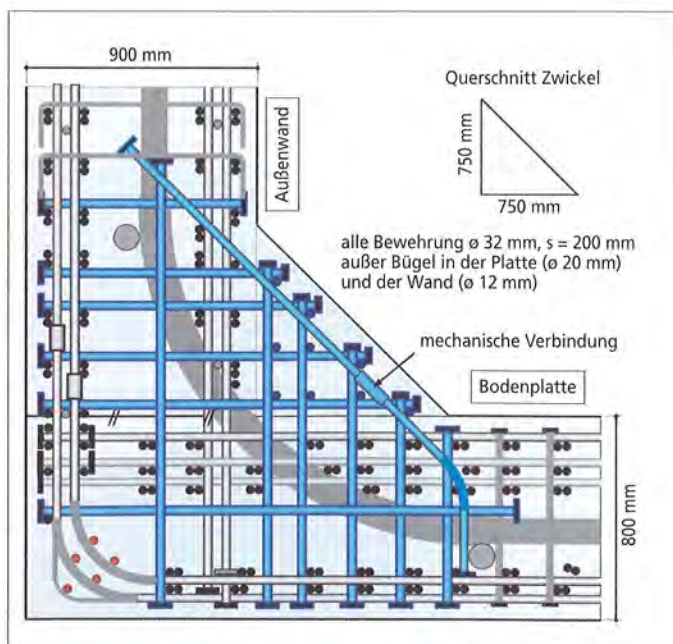


Bild 7: Bewehrungsdetails am Beispiel der Ausbildung des Übergangs von der Bodenplatte zur äußeren Wand [11]

Tafel 2: Betoneigenschaften für die Bemessung

Festigkeitsklasse	LC35/38	
Festbetonrohddichte ρ_c	kg/m ³	1600
Trockenrohddichte ρ_{cd}	kg/m ³	1350
Nenndruckfestigkeit f_{cn}	N/mm ²	27,3
Bemessungswert der Druckfestigkeit (ULS) f_{cd}	N/mm ²	21,8
Bemessungswert der Zugfestigkeit (ULS) f_{td}	N/mm ²	0,91
Elastizitätsmodul	kN/mm ²	10,4
Querdehnzahl	-	0,2

forderte einen Leichtbeton entsprechend der Rohdichteklasse D1,4 nach DIN 1045-1 und machte den Einsatz von Leichtsand unabdingbar. Für die spätere Bemessung wurde von einer Trockenrohddichte von 1350 kg/m³ ausgegangen. Auf Basis dieser Rohdichte wurden von den norwegischen Planern folgende Abminderungsfaktoren für den Elastizitätsmodul $((p/2200)^2)$ und die Zugfestigkeit $(0,85 (0,15 + (p/2200)))$ angesetzt. Für die Bemessung ergaben sich dann nach NS 3473:2003 [9] die in Tafel 2 aufgeführten Bemessungswerte. Die Anwendbarkeit der in NS 3473:2003 enthaltenen Regeln auf den hier gewählten Leichtbeton wurde im Rahmen des Briten EuRam III Projekts „Euro-LightCon“ nachgewiesen [12]. Lediglich für kleine, sehr hoch beanspruchte Bereiche wurde ein Normalbeton der Festigkeitsklasse C55/67 vorgesehen.

5 Versuchsprogramm

Der geforderte Leichtbeton stellte angesichts der geringen Betonrohddichte und des Einsatzes von Leichtsand eine Neuerung für den Bau von Offshore-Konstruktionen und auch den grundsätzlichen Einsatz unter den zu erwartenden extremen Randbedingungen dar. Bisher wurden vergleichbare Leichtbetone vor allem für attraktive Wohn- und Bürogebäude verwendet [13]. Für die Offshore-Konstruktionen wurden bis dahin nur hochfeste Leichtbetone der Festigkeitsklasse LC50/55 D2,0 und höher eingesetzt [14]. Leichtsande waren noch nie für Offshore-Konstruktionen verwendet worden.

Nachdem sich herausgestellt hatte, dass der Bau des MPU Heavy Lifters in den Niederlanden erfolgen würde, begannen Mitte 2006 erste Vorversuche für den benötigten Leichtbeton in enger Zusammenarbeit zwischen der bauausführenden Firma van Hattum en Blankevoort, dem Betonlieferanten Mebin, dem Zementhersteller ENCI, der Firma Liapor als Lieferant der leichten Gesteinskörnung und dem Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr als technischem Berater. Diese Vorversuche bestätigten zunächst, dass die gewünschte Leichtbetonqualität möglich war. Sie legten die Basis eines umfangreichen Versuchsprogramms, in dessen Rahmen die Materialeigenschaften und die Eignung kritischer Konstruktionsdetails im Rahmen experimentell verifiziert wurden. Das Versuchsprogramm umfasste unter anderem

- Betonversuche (Festigkeitsentwicklung, Spannungs-Dehnungs-Linie, Elastizitätsmodul, Kriechen, Schwinden),
- Untersuchungen zur Verankerung der schlaffen Bewehrung,
- Untersuchungen zur Verankerung der Spannglieder sowie
- maßstäbliche Bauteilversuche.

In Norwegen konzentrierte man sich bei der norwegischen Forschungsanstalt SINTEF auf die Bestimmung der Betoneigenschaften. Die anderen Versuche wurden an der Hochschule Lausanne EPFL, Schweiz, durchgeführt und in [11] beschrieben.

Parallel dazu wurde in Rotterdam von den an den Vorversuchen Beteiligten an der Optimierung der Betonzusammensetzung weitergearbeitet. Zum Betonentwurf kamen nach den Vorversuchen neue Randbedingungen hinzu. Die norwegischen Auftraggeber bestanden auf einem Leichtbeton, der der norwegischen Fassung der europäischen Betonnorm NS-EN 206-1 [16] entsprach. Für die Einstufung entsprechend der erwarteten Exposition und die daraus resultierenden Anforderungen an den Leichtbeton wurde in Verbindung mit [9] die Dauerhaftigkeitsklasse MF40 gefordert. Es ergaben sich folgende zusätzliche Anforderungen:

Äquivalenter Wasserzementwert $\leq 0,40$	
Anrechenbarkeitswert für Silikastaub	2,0
Maximaler Hüttensandgehalt	65 M.-%
Nacherhärtungspotenzial f_{c90}/f_{c28}	$\geq 15\%$
Luftgehalt	$\geq 4,0$ Vol.-%

Für die Kombination von CEM III mit Flugasche bzw. Silikastaub enthält [15] keine Regelungen. Aus diesem Grund wurden im weiteren Verlauf der Entwicklung vor allem „niederländische“ Zusammensetzungen mit CEM III/B als Sommermischung und „norwegische“ Zusammensetzungen mit einer Mischung aus CEM I und CEM III/B getestet.

Ein Ziel dieser Optimierung war es, die geforderten Festigkeits- und Rohdichtewerte auch unter den modifizierten Randbedingungen zu halten und zugleich die Wärmeentwicklung zu minimieren. Angesichts von Wanddicken bis 900 mm im unteren Bereich des Heavy Lifters (s. Bild 6) stellte der Abfluss der entstehenden Hydratationswärme vor allem durch den Einsatz von CEM I ein nicht unerhebliches Problem dar (Bild 8). Der gewählte Leichtbeton wird ja gerade wegen seiner geringen Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,55$ W/(mK)) [16] im Wohnungsbau eingesetzt. Bereits in den ersten semi-adiabatischen Versuchen zeigten die zunächst favorisierten Bindemittelkombinationen (Betonzusammensetzungen 1.1, 1.4 und 5 in Bild 8) einen inakzeptabel hohen Temperaturanstieg. Aus den zahlreichen Vorversuchen gingen schließlich die Zusammensetzungen 6 und 7 (Tafel 3) hervor, die die Anforderungen auch im Hinblick auf die Festigkeits- und Rohdichtevorgaben zielsicher einhielten.

Bei früheren Leichtbetonprojekten in Norwegen hatten die Auftraggeber stets auf der Anlieferung trockener Körnung bestanden. Diese Forderung wurde von den Auftraggebern für den MPU Heavy Lifter beibehalten und galt auch für den Leichtsand. Da sowohl das Transportbetonwerk im Hafen von Rotterdam als auch die Firma Liapor am Main-Donau-Kanal über eine Lände verfügten, konnte die Körnung per Schiff geliefert werden. Dies stellte angesichts der Forderung nach trockenem Material eine nicht unerhebliche logistische Herausforderung dar. Der trockene Leichtsand konnte nur per Silo-Lkw transportiert werden.

Die Forderung nach der trockenen Gesteinskörnung wirkte sich unmittelbar auf die Betontechnologie aus. Durch die zu erwartende anrechenbare Wasseraufnahme (w_{60} und $0,7 \cdot w_{BVK}$ [17]) von mehr als 100 l/m³ Leichtbeton (s. Tafel 3) war mit einem sehr deutlichen Ansteifen des Leichtbetons zu rechnen. Der Auftraggeber verlangte auf der Baustelle die Konsistenz F5/F6 für Wände, Bodenplatte und Decke sowie C2/C3 für die

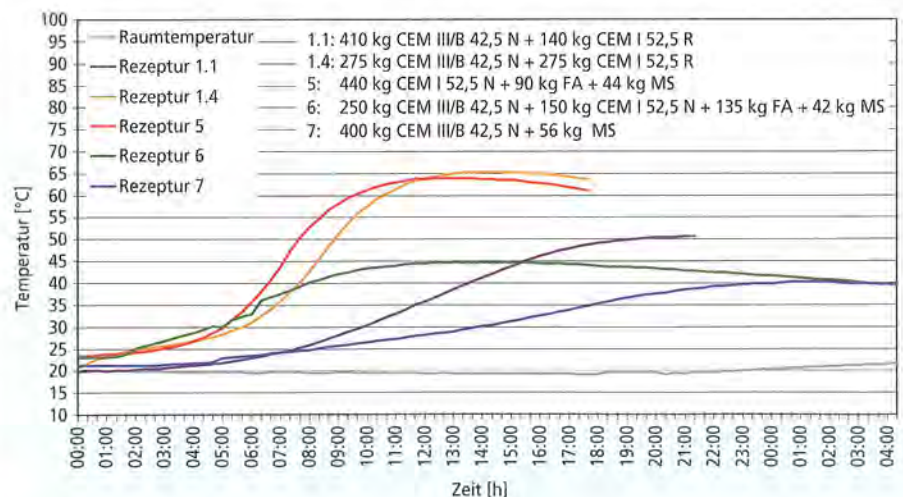


Bild 8: Vergleich der semi-adiabatischen Temperaturentwicklung

Tafel 3: Zusammensetzung der eingesetzten Leichtbetone

	Betonzusammensetzung 6 „norwegische Mischung“			Betonzusammensetzung 7 „niederländische Mischung“		
	Stoffraum	Rohdichte/ Dichte	Massen trocken	Stoffraum	Rohdichte/ Dichte	Massen trocken
	[dm ³ /m ³]	[kg/dm ³]	[kg/m ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/dm ³]	[kg/m ³]
Liapor K-Sand 0/2	180	1,73	311	255	1,73	441
Liapor F 6.5 2/10	380	1,19	452	380	1,19	452
Flugasche SMZ-VU	60	2,25	135			
Silica-Suspension ¹⁾	30	1,40	42	40	1,40	56
CEM III/B 42,5 N	84	2,98	250	134	2,98	400
CEM I 52,5 N	47	3,18	150			
Wasser	170	1,00	170	145	1,00	145
Poren	49			46		
Summe	1000		1510	1000		1494
Saugwasser			105			130
Luftporenbildner	3,92	1,06	0,20	3,92	1,06	0,20
Fließmittel			4,0			4,0

¹⁾ Der Wassergehalt von 50 M.-% wurde auf das Zugabewasser angerechnet.

Tafel 4: Ergebnisse der Bauteilversuche

		Betonzusammensetzung 6	Betonzusammensetzung 7	
Frischbetonrohddichte	kg/m ³	1546	1536	
Setzmaß	mm	265	260	
Ausbreitmaß	mm	640	645	
Luftgehalt	Vol.-%	4,1	4,7	
Druckfestigkeit	3 d	N/mm ²	27,1	28,5
	7 d	N/mm ²	34,9	34,8
	28 d	N/mm ²	41,0	39,7

Türme. Diese Konsistenzbereiche mussten für mindestens 30 Minuten nach der Übergabe des Betons gehalten werden [18]. Hinzu kam eine Lade- und Transportzeit von etwa 15 Minuten. Ohne entsprechende Maßnahmen, war die angestrebte Konsistenz mit der trockenen leichten Gesteinskörnung nicht zu erreichen.

Die Untersuchung der Verarbeitungseigenschaften zeigten den Ausführenden, welche Bedeutung das Mischregime für die Herstellung eines Leichtbetons hat. Durch den nachstehenden Ablauf konnte schließlich ein ausreichend großes Zeitintervall für den Einbau des Leichtbetons auf der Baustelle sowie gleichmäßigere Ergeb-

nisse bei der Übergabekonsistenz erreicht werden.

Schritt 1: Vormischen von Liapor-Körnung und -Leichtsand mit dem berechneten Saugwasser (w_{60} und $0,7 \cdot w_{BVK}$) für zwei Minuten

Schritt 2: Zugabe von Zement und Flugasche und eine Minute mischen

Schritt 3: Zugabe von 75 % des Anmachwassers und weitere zwei Minuten mischen

Schritt 4: Zugabe der Silica-Suspension, der Zusatzmittel und des Restwassers und weitere vier Minuten mischen

Mit den beiden ausgewählten Leichtbetonen wurden im nächsten Schritt auf der Baustelle Pump- und Bauteilversuche durchgeführt. Auf den Einsatz von Betonpumpen wurde bei der späteren Bauausführung verzichtet, weil die Frischbetonrohddichte durch den Pumpendruck über die Toleranzgrenze hinaus erhöht wurde. Stattdessen wurde der Beton mit Kübeln zur Einbaustelle gebracht. Die Bauteilversuche bestätigten nochmals, dass die Verarbeitungseigenschaften den Erwartungen entsprachen und die geforderten Rohddichte- und Festigkeitswerte eingehalten werden (Tafel 4).

Eine Ergänzung für das Versuchsprogramm wurde notwendig, nachdem im Zuge der Bauteilversuche Unstimmigkeiten zwischen theoretischer und tatsächlicher Betonrezeptur aufgetreten waren. Die Unterschiede fielen zunächst durch Abweichungen zwischen der rechnerischen Frischbetonrohddichte und der gemessenen Frischbetonrohddichte auf. Über diesen Abgleich wurden auch die gemessenen Luftgehalte kontrolliert. Die Luftgehalte wurden parallel mit dem Druckpuff nach [19] und dem Rollometer nach [20] ermittelt und stimmten gut mit den theoretischen Vorgaben von 4 Vol.-% bis 5 Vol.-% überein. Bei der Rückrechnung ergaben sich jedoch Luftgehalte von 10 Vol.-% bis 14 Vol.-%. Von Seiten der Auftraggeber wurde sofort die Frage aufgeworfen, ob die Differenz auf eine falsche Annahme bei der Wasseraufnahme beruhen könnte. Ein Fehler von 50 l/m³ bis 100 l/m³ wäre fatal gewesen, weil alle Dauerhaftigkeitsprognosen und die Genehmigungen durch die norwegischen Versicherer auf einem äquivalenten Wasserzementwert $\leq 0,40$ basierten.

Fehldosierungen konnten nach eingehender Kontrolle ausgeschlossen werden. Der Verdacht konzentrierte sich schließlich auf die Werte der Kornrohddichte für den Leichtsand. Im Rahmen des Bauvorhabens wurden zwei Verfahren zur Bestimmung der Kornrohddichte verwendet. Das Labor der Firma Liapor arbeitete mit dem Standzylinder-Verfahren nach DIN V 18004 [17]. Bei diesem Verfahren wird die Kornrohddichte an ofentrockenem Material bestimmt. Der Betonlieferant Mebin griff auf das BVK-Verfahren nach DIN V 18004 zurück, das wassergesättigten Leichtsand nutzt. Um die Vermutung für die Ursache der Abweichung zu verifizieren, wurden am Institut für Werkstoff-

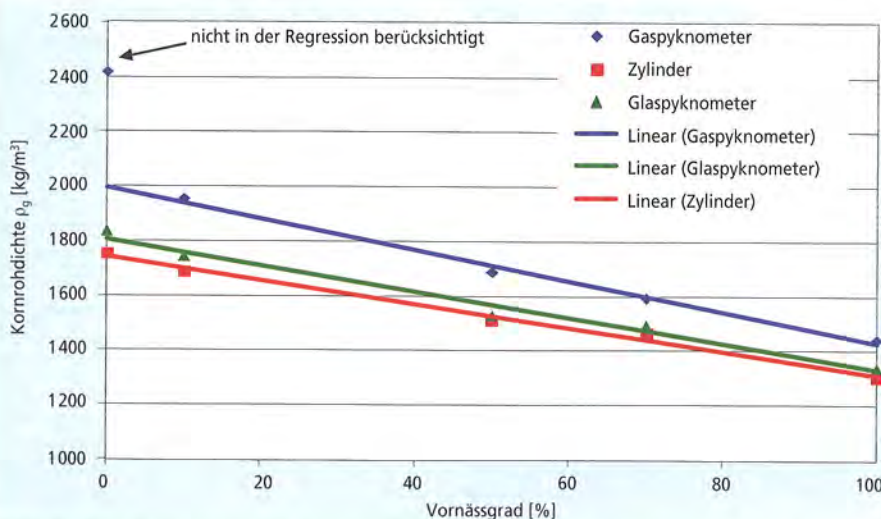


Bild 9: Einfluss des Vornässgrads des eingesetzten Leichtsands (Liapor K-Sand 0/2) auf den Messwert der Kornrohddichte



Bild 10: Blick in das Trockendock mit fertig betonierten Wänden eines Schenkels des MPU Heavy Lifters [21]

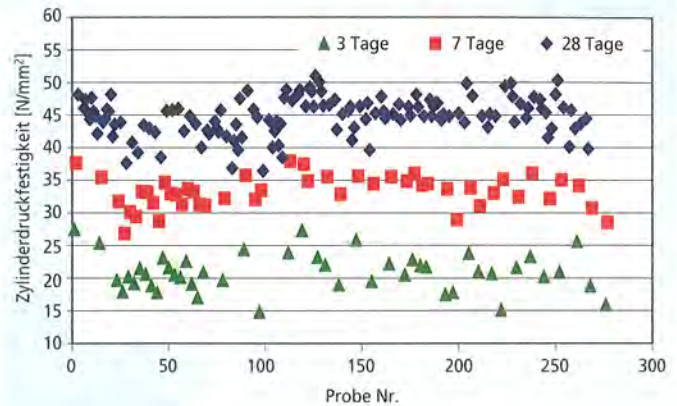


Bild 11: Auswertung der Zylinderdruckfestigkeit im Zeitraum 8/2007 bis 1/2008

fe des Bauwesens an der Uni der Bundeswehr München Versuche mit verschiedenen Messverfahren und unterschiedlich vorgemästet Leichtsand durchgeführt. Der Einfluss des Vornässgrads auf die ermittelte Kornrohichte war gravierend (Bild 9). Für die gleiche Sandprobe ergaben sich Unterschiede in der Kornrohichte von fast 500 kg/m^3 . Die Ergebnisse wurden durch parallel laufende Versuche bei SINTEF bestätigt.

In Rotterdam wurde der Leichtsand im Mischer im Transportbetonwerk auf etwa 15 M.-% vorgemästet. Dies entsprach einem Vornässgrad von 50 %. Nachdem die zu diesem Wert gehörende Kornrohichte für die Mischungsberechnung verwendet wurde, stimmten Rechnung und Messung wieder überein.

6 Bauausführung

Die Auftragsvergabe für den MPU Heavy Lifter erfolgte im Dezember 2006. Den Auftrag für den Bau der Leichtbetonkonstruktion im Wert von 55 Mio. € erhielt das niederländische Konsortium van Hattum en Blankevoort bv und BAM Civiel bv. Am 22. August 2007 begannen die Bauarbeiten mit der feierlichen Kiellegung. Der Rohbau sollte in 13 Monate fertig gestellt werden. Die Übergabe des Heavy Lifters war für Anfang 2009 vorgesehen.

Für den Bau der Plattform wurde der hintere Teil eines Trockendocks im Hafen von Rotterdam abgeschottet und als Baugrube genutzt (Bild 10). Zunächst wurde eine Sauberkeitsschicht in das Trockendock betoniert, in der sich Leerrohre befanden, die später sicherstellen sollten, dass beim Fluten des Trockendocks Wasser unter die eigentliche Bodenplatte des Heavy Lifters gelang und er sich vom Untergrund hätte lösen können. Die Bodenplatte wurde in vier Betonagen zu je 850 m^3 bis 900 m^3 hergestellt. Jede einzelne Betonage zog sich über drei Tage hin. Mit einem zeitlichen Versatz von vier Wochen wurden die Wände des Schwimmkörpers hergestellt. Diese Betonagen umfassten jeweils 450 m^3 . Sobald die Schalung der Wände entfernt war, wurde mit der Decke des Schwimmkörpers und der äußeren Wand

der außen umlaufenden Stabilisierungskrempen begonnen.

Die Qualität des Leichtbetons stellte eine entscheidende Größe für das erfolgreiche Umsetzen des Konzepts des Heavy Lifters dar. Aus diesem Grund wurde die Betonqualität sehr streng überwacht. Vom Beton jedes Fahrmischers wurden Frischbetontemperatur, Luftgehalt und Frischbetonrohichte im Werk gemessen und dokumentiert. Auf der Baustelle wurden später bei der Übergabe und nach 45 Minuten das Setzmaß und das Setzfließmaß, das Ausbreitmaß zum Teil noch nach 90 Minuten gemessen. Für die Frischbetonrohichte war als Zielfenster 1580 kg/m^3 bis 1620 kg/m^3 vorgegeben. Bei Abweichungen vom Zielfenster für die Sollrohichte wurde die Lieferung abgewiesen.

Die Festigkeit wurde mit Zylindern kontrolliert, und zwar nach 3, 7, 28, 91 und 182 Tagen. Am Beispiel der Festigkeitswerte aus den ersten fünf Monaten des Baus ist zu sehen, dass das Transportbetonwerk durch die intensive Vorbereitung mit sehr hoher und gleich bleibender Qualität liefern konnte (Bild 11).

Die Betonarbeiten liefen bis in den Frühling 2008 nach Plan. Nachdem die Arbeiten am ersten Teil der Decke des Schwimmkörpers abgeschlossen waren, wurde die Betonage des ersten Turms in Angriff genommen. Die Baufirma hatte sich in Abstimmung mit dem Auftraggeber entschieden, für die Türme eine Gleitschalung zu verwenden. Der erste Turm wurde so nach 17 Tagen am 30. April 2008 fertig gestellt.

Die Arbeiten wurden Mitte 2008 aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt, die bisher errichteten Bauteile des MBU Heavy Lifters abgebrochen, der verbaute Stahl als Schrott verkauft und der Leichtbeton als Verfüllmaterial verwendet. Die innovative Idee, das Prinzip von Archimedes für ein vertikales Abheben von Offshore-Plattformen mithilfe einer Betonkonstruktion zu nutzen, konnte bedauerlicherweise (noch) nicht realisiert werden.

Literatur

[1] OSPAR: Internetauftritt OSPAR Commission, www.ospar.org, 2010

[2] Prince, I.: North Sea Abandonment heats up. E&P, Hart Energy Publishing, www.epmag.com/archives/features/2284.htm, 2004

[3] Bradbury, J.: Deconstruction solutions seek huge prize. E&P, Hart Energy Publishing, www.epmag.com/archives/features/2282.htm, 2004

[4] Wikipedia: Brent Spar. http://de.wikipedia.org/wiki/Brent_Spar, 2010

[5] Sandvik, K. et al.: Offshore Structures – A new challenge. XIV National Conference on Structural Engineering, Acapulco, 2004

[6] MPU: Internetauftritt www.mpu.no (nicht mehr verfügbar)

[7] Buijsse, A.J.T.: Platform Removal in the North Sea – Concept Design of a Single Lift Vessel. Master-thesis No. DCT 2005.33, Department of Mechanical Engineering, TU Eindhoven, 2005

[8] MPU Enterprise AS: New Technologies – MPU Heavy Lifter. The 5th annual NPF North Sea Decommissioning Conference, 15 – 16 February 2005

[9] Norges Standardiseringsforbund: NS 3473: Design of concrete structures, Design- and detailing rules. 6th edition, September 2003

[10] Det Norske Veritas: Using Sesam in novel design of heavy lifter – from concept development to detail engineering. http://www.dnv.de/services/software/publications/2007/no_2, 2007

[11] Ludescher, H.; Haugerud, S. A.; Ruiz, M. F.: Detail design of the MPU Heavy Lifter. Tailor Made Concrete Structures, fib Symposium, Amsterdam 2008, S. 931 – 937, Walraven & Stoeckel (Herausgeber); Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-475353-8, 2008

[12] EuroLightCon: <http://www.sintef.no/static/BM/projects/EuroLightCon/index.htm>, 2000

[13] Held, M.: Hochfester Konstruktions-Leichtbeton. Beton 46 (1996) H. 7, S. 411–415

[14] Fergestad, S.; Hagen, T.: Design of Brigs and Offshore Structures Using LWA Concrete. International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Proceedings, S. 164–175, Sandefjord, 20 – 24 Juni 1995

[15] Norges Standardiseringsforbund: NS-EN 206-1: Concrete – Part 1: Specifications, performance, production and conformity, 2001

[16] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-1244 – Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge „Liapor-Konstruktions-leichtbeton“, 2005

[17] DIN V 18004:2004-04: Prüfverfahren für Gesteinskörnungen nach DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104

[18] Van Hattum en Blankevoort: Method statement MPU – Heavy Lifter. Draft document no. 2879-W-001, 2006

[19] DIN 12350-7:2000-11: Prüfung von Frischbeton, Teil 7: Luftgehalte. Druckverfahren

[20] ASTM C 173: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischbeton durch Volumenmessung in: DAFStb-Heft 422 „Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048“

[21] MVM Betonstaal bv: Internetauftritt www.mvmbetonstaal.nl, 2010