

**Vorschlag zur Herstellung von Offshore- Windenergieanlagen
mit einem Stahlbetonfundament
mit Hilfe von druckluftgesteuerten Tauchkörpern**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Allgemeines	2
2. Ausbildung des Fundaments	2
3. Herstellung des Fundaments mit Hilfe eines Schwimmdocks	2
4. Absenken des Fundaments auf Montagetiefe	3
5. Herstellung des Turmschafts mit Stahlbeton- Fertigteilen	4
6. Aufbauen des ganzen Windturms	4
7. Anheben des ganzen Bauwerks in den Schwimmzustand	4
8. Transportzustand und Schwimmstabilität	5
9. Absenken des Bauwerks	6
10. Absetzen des Bauwerks auf den Meeresgrund	7
11. Vorschläge zum Teleskopieren des Windturms	8
12. Restliche Arbeiten	9
13 Kurzer Bauzeitenplan	9
14 Alternativer Vorschlag	11
15 Darstellung der zugehörigen 9 Bilder	12 - 19
Bedeutung der Bezeichnungs-Nummern	20

1. Allgemeines

Hier wird beschrieben und gezeigt, wie das Stahlbeton- Fundament einer Offshore- Windenergieanlage (OWEA) in einem Meerhafen schwimmend hergestellt, dort auf Grund gesetzt, darüber der Turm mit Generatorgondel und Rotor montiert und dann von einer speziellen Kombination aus Schwimm- und Tauchkörper in die Transportlage angehoben, zum Einbauort auf hoher See geschleppt und dort zielgenau auf den Meergrund abgesetzt wird. In der Patentanmeldung Nr. 10 2007 002 314.8 vom 16.1.2007 sind die Vorgänge beim Anheben, Transportieren und Absenken des Unterbaus einer OWEA als Verfahren beschrieben. Der Erfinder des Verfahrens mit der zugehörigen Vorrichtung verzichtet jedoch auf den weiteren Patentschutz, so dass die Anwendung der Erfindung ohne Patentgebühren möglich ist.

Die Nennleistung der Turbine soll 5 MW betragen. Dazu wird eine Nabenhöhe von 100 m über MW gewählt mit einem erforderlichen ein Rotor- ϕ von 100 bis 120 m. Auf diese Weise ist eine jährliche Stromproduktion von etwa 20 Millionen kWh zu erwarten, also doppelt so viel wie an Land. Unsere Regierung geht davon aus, dass bis zum Jahre 2030 die deutschen Offshore- Windparks 20 bis 25 Gigawatt leisten. Das bedeutet, dass bis dahin etwa 4000 bis 5000 Offshore-Windtürme der obigen Größenordnung in Betrieb sein sollen mit einer jährlichen Produktion von 80 bis 100 Mrd. kWh.

Im Folgenden wird anhand eines mit geschätzten zahlenmäßigen Abmessungen versehenen maßstäblichen Beispiels ein Vorschlag für die Ausbildung und Herstellung der Windenergieanlage beschrieben und dargestellt. So kann ein Betrachter sich ein gutes Bild von der beschriebenen Konstruktion und der Arbeitsvorgänge machen. Ein Fachmann kann damit sogar die anfallenden Kosten abschätzen. Die gewählten Größenordnungen und die daraus ermittelten Massen sind aber keinesfalls bindend und müssen im Anwendungsfall optimiert werden.

2. Ausbildung des Fundaments.

Bild 1 zeigt den gewählten Grundriss des Fundaments **4** mit einer vollen Kreisfläche von 40 m Durchmesser. Die Bodenplatte ist nach außen mit einer ringförmigen, 3,5- 4 m hohen Wand **7** abgeschlossen. Dazwischen stehen 8 sternförmig angeordnete, bis zu 7m hohe Aussteifungs- und Kragwände **8**, mit oberen Druckgurten. Darüber sitzt der etwa 2,5 m hohe tassenförmige Fundamenthals. So entsteht eine Gesamthöhe von 10 m. Die Bodenplatte wird durch eine innere Ringwand **13** als Oberzug verstärkt. Es ist zweckmäßig, diese Platte außen ringförmig nach unten zu verstärken (z. B. auf 6 bis 7 m Breite).

Die obigen Abmessungen sind reichlich gewählt. Sie hängen von der Gründungstiefe, der Bodenbeschaffenheit und den auf das Bauwerk wirkenden Kräften ab.

3. Herstellung des Fundaments .

Im Gegensatz zur üblichen Herstellung an Land mit Stapellauf auf schiefer Ebene wird dazu ein flaches Schwimm- Dock **5** ohne Seitenwände vorgeschlagen, das nicht nur schwimmend die Lasten tragen kann, sondern auch voll unter dem schwimmfähigen Fundament **4** abtauchen kann. Dazu erhält es beispielsweise gestrichelt dargestellte, geschlossene Kammern. Beim Betonieren der Teile für die 1. Bauphase müssen sie durch Druckluft wasserfrei gehalten werden, um den nötigen Auftrieb zu erzielen.

Bild 1a zeigt den Zustand nach dem Betonieren der Sohlplatte mit ihren Verstärkungen, der 3,5m hohen Außenwände und der 3m hoch geschalteten 8 radialen Innenwände **8** und der inne-

ren Ringwand **13** mit einem Gewicht von ca.2500 to. Dabei taucht die Sohle des 2,5 m hohen Docks (geschätztes EG = 600 to) etwa 2,0 m unter den Wasserspiegel.

In **Bild 1b** wird der Zustand gezeigt, nachdem das Schwimmdock durch Verringerung des Luftdrucks und Einströmen des Wassers auf den Grund gesunken ist. Dabei schwimmt das noch unvollständige 3,5 m hohe Fundament und taucht 2,0 m ein.

In **Bild 1c** wird die 2. Bauphase gezeigt, d. h. der Zustand nach dem Verziehen des noch unvollständigen Fundaments um etwa 50m. Nach seiner vollständigen Herstellung besitzt es ein Gewicht von ca. 3500 to, wobei sich seine Eintauchtiefe auf 2,80 m erhöht.

Nach Bild 2 hat ein hinter der aus Spunddielen und Pfählen bestehender Kaimauer auf Standplatz I (mit Pahlgründung) stehender Schwerlastkran **35** bereits von einem davor liegenden Lastkahn die bis zu 350 to schwere Gondel **38** der WEA im Abstand von bis zu 14 m angehoben und sie neben sich auf die Mauer gesetzt. Dies geschah ähnlich mit den ebenfalls per Schiff transportierten, bis zu 200 to schweren stählernen Turmschüssen **39** und mit den Rotorblättern.

4. Absenken des Fundamentes auf die Montagetiefe

Nach den Entladevorgängen kann das fertige Fundament **4** in den 10 m tiefen Bereich gezogen werden. Der Kran hebt dann die 8 Segmente der Absenkhilfe **34** auf das Fundament, wo sie zwischen den 2 Ringwänden des Fundaments und zwischen den radialen Querwänden **8** befestigt werden. Die Segmente bestehen nach **Bild 2a** jeweils aus 2 x 4,3 m hohen Aufhängungen zur Übertragung der Auftriebskräfte der darin gelagerten Luftkissen **11** auf das Fundament. Als Aufhängungen werden in geringem Abstand stehende, gebogene Stahlmanschetten **40** vorgeschlagen, die unten an Längsriegeln **42** befestigt sind. Letztere sind radial verschieblich in untere Aussparungen der beiden Ringwände und eines zusätzlichen niederen Zwischenrings. Dazu dienen dazwischen angeordnete hydraulische Pressen **41** mit jeweils 3 Kammern. Wird die innere Kammer unter Druck gesetzt, dann bewegen sich die beiden Kolben nach außen und schieben die Längsriegel in die Aussparungen und verriegeln damit die Absenkhilfe mit dem Fundament. Umgekehrt wird über ventilgesteuerte Drücke in den beiden Außenkammern die Absenkhilfe vom Fundament getrennt.

Beim Fluten des Fundaments würde es bei einer bestimmten Füllhöhe unkontrolliert mit wachsender Geschwindigkeit absinken. Wird aber gleichzeitig der Luftdruck in den Luftkissen **11** an die jeweilige Wassertiefe in deren Sohlen angepasst, dann hält der Auftrieb bei einem bestimmten Volumen der Kissen das Ganze in der Schwebe. Der gezeichnete Querschnitt der beiden aufgeblasenen Kissen von 21 m² erzeugt bei einer mittleren Länge von 8 · 14,6 m einen Auftrieb von etwa 2500 to und eine Zugkraft im oberen Scheitel der Manschetten **40** von 64 kN/m. Erforderlich sind 3500 to (Fundamentgewicht) – 1400 to (Wasserverdrängung) = 2100 to Auftrieb.

Davor wird das schwimmende Fundament am Kran angehängt. Eine geringe Druckreduzierung verringert den Auftrieb und vergrößert die Aufhängelast entsprechend. So kann der Kran mit einer kleinen Hakenlast gezielt und vorsichtig das Fundament auf die Sockel in 10 m Wassertiefe absetzen. Ohne die Absenkhilfe müsste der Kran bei 26m Ausladung eine Unterwasser-Last von 2100 to halten und bewegen, was seine Kräfte übersteigt. Nach dem Absetzen des Fundaments auf mehrere Sockel wird der Auftrieb der Luftkissen soweit reduziert, dass die Segmente der Absenkhilfe vom Fundament **4** gelöst werden können. Ein geringer Druckanstieg lässt sie dann von alleine nach oben schwimmen, von wo sie wieder auf ihren Lagerplatz zurückkehren. Die beschriebene Absenkhilfe stellt eine neuartige Vorrichtung zum Absetzen von großen Lasten auf den Grund von Gewässern, ohne Mithilfe von wesentlichen äußeren Kräften, dar.

5 Herstellen des Turmschaftes aus Stahlbeton- Fertigteilen

Da der Unterbau oder der Turmschaft **6** nach seiner Absenkung auf 30 m Tiefe im Endzustand mindestens 10 m über die mittlere Wasseroberfläche reichen soll, muss der Fundamenthals noch um 30 m nach **Bild 3** und **Bild 8** verlängert werden. Als Außen- ϕ des Schaftes wird 7,3 m gewählt. Seine konstante Wanddicke von 45 cm ergibt ein Gewicht des 30 m hohen Schaftes von 750 to. Zu seiner Herstellung werden 6 Ringe **6,1** bis **6,6** von etwa 4,2 m Höhe, ein 3,0 m hoher Zylinder mit Türöffnung und ringförmiger Balkonplatte **6,7** sowie ein oberster Ring **28** mit innerer Kopfverstärkung und 2m Höhe, als vorgefertigte Teile vorgeschlagen

Von seinem Standplatz I kann der Kran die bis zu 35 m (nach Bild 2) entfernt hergestellten Zylinder **6** und das Endstück **28** des Stahlbeton-Turmschafts erreichen. Sie wiegen jeweils bis zu 120 to. Er setzt nun alle (außer **28**) übereinander auf das Fundament. Dabei sorgen in Hüllrohren eingefädelt Bewehrungsstäbe für die nötige Verbindung untereinander. Vor der Kaimauer setzt danach der Kran eine Stützkonstruktion **36** auf Sockel im Fundament und dann darüber ein kurze Brücke **37** mit Verbindung zu Kaimauer

6. Aufbauen des ganzen Windturms

Zunächst wird der der Kran **35** über die Brücke **37** zum Standplatz II verschoben. Weil der noch 28m hohe Schaft zum späteren Teleskopieren benützt werden soll, wird der 32 m lange unterste Schuss **39a** des Stahlturms mit etwa 200 to Gewicht, mit Hilfe des Krans nach **Bild 8** und **Bild 7** von oben in den Zylinder eingefädelt und unten auf die Sockel **23** gestellt. Daran sind, über den Umfang verteilt, Gewindegustangen **27** befestigt. An diesen Zugstangen ist mit Hilfe von Tragmuttern **30** auch ein Podest **24** angehängt. Die Gewindestangen werden darauf unten in die Gewindehülsen **26** des Fundaments eingedreht. Zwischen dem Podest **24** und dem unteren Verstärkungsring **19** des Stahlturms, sind über den Umfang verteilt, 8 · 2 hydraulische Pressen **15** angeordnet, die je 55 to tragen müssen und beispielsweise einen Hub von 30 cm besitzen. Darüber befinden sich noch 8 Zugpressen **16**, an denen ebenfalls das Podest hängt.

Jetzt wird der 2m hohe Kopfring **28** des Schaftes **6** aufgesetzt, wobei die Zugstangen durchgefädelt werden. Er wird damit nach unten angeschraubt und dann der ganze Turmschaft unter eine bestimmte lotrechte Vorspannung gesetzt.

Danach werden die zwei übrigen stählernen Turmschüsse **39** übereinander montiert und mit ebenfalls 14 m Ausladung die Gondel mit dem Generator sowie der Rotor bei einer Nabenhöhe von beispielsweise 89m über der Wasserlinie daraufgesetzt.

Darauf wird der Kran wieder in seine Ausgangsstellung I verschoben. Zum Schluss hebt er die Stützkonstruktion **36** und die Brücke **37** von dem Fundament ab und macht das ganze Bauwerk bereit zum Abtransportieren.

7. Anheben des ganzen Bauwerks in den Schwimmzustand.

Dazu wird eine Kombination aus Schwimmkörper **1** und Tauchkörper **2** verwendet, wobei ersterer auf dem Tauchkörper liegt und voll ihm getragen wird. Diese Einheit wird herangeschwommen. Ihre beiden Hälften klappen nach **Bild 3a** um das Scharnier **9** im Grundriss wie eine Muschel auseinander, so dass die Kombination den Fundamenthals umfahren und dann umschließen kann. Es wird zweckmäßigerweise als Kugelgelenk ausgebildet, damit beim Öffnen und Schließen Zwängungskräfte bei Seegang nicht entstehen. Nach dem Zusammenklappen der beiden Hälften und Anlegen an den Fundamenthals werden Schwimm- und Tauchkörper nach **Bild 3b** zusammen auf das Fundament abgesetzt und dort verankert.

Zum Befestigen und Lösen des Tauchkörpers am und vom Fundament der Anlage wird eine Vorrichtung nach dem Prinzip eines Bajonettverschlusses vorgeschlagen. Danach geschieht die

Verriegelung und die spätere Entriegelung durch kurzes Drehen des Tauchkörpers gegenüber dem Fundament. Dazu werden zweckmäßigerweise an den $8 \cdot 5 = 40$ Kontaktstellen der ringförmigen Wände des Tauchkörpers mit den radialen Fundamentwänden **8** Ankerköpfe auf den Letzteren befestigt. Darüber besitzen die Tauchkörperwände unten tangential ausgerichtete Ankerschienen. Vor der Verriegelung wird der Auftrieb des Tauchkörpers so gesteuert, dass er noch über dem Fundament schwebt. Bei seinem Drehen gleiten die Ankerschienen berührungslos unter die Überstände der Ankerköpfe. Nun wird der Auftrieb erhöht, wobei die Anker kraftschlüssig werden und bei weiterer Steigerung schließlich das ganze Gewicht des Bauwerks anheben und so zum Schwimmen bringen.

Zum Transport des ganzen Bauwerks wird zweckmäßigerweise die Flut abgewartet, wonach es in tiefere Gewässer gezogen werden kann.

Der ringförmige Schwimmkörper 1 nach **Bild 4** dient der Aufnahme der Technik (z.B. Seilwinden und Kompressoren), dem Aufenthalt der Mannschaft und wegen seiner Höhe und Geschlossenheit auch der Schwimmstabilität der ganzen Transporteinheit. Außerdem übernimmt er die Aufhängung des Bauwerks und seine Führung und Stabilisierung beim Absenken. Er wird unten durch eine ringkreisförmige, schwimmfähige Plattform zusammen gehalten. Diese umschließt etwa in der Höhe des Wasserspiegels mit einer besonderen Manschette **22** den Turmschaft. Sie ist so ausgebildet, dass sie die horizontalen Kräfte des Schwimmkörpers auf den Schaft **6** beim späteren Absenken des Bauwerks übertragen kann, sowie die dann relativen lotrechten Bewegungen und Verdrehungen (zwischen Schwimmkörper und dem Schaft) zwangungsfrei gestattet. Daneben steht eine zylindrische Wand **29**, die ein Überfluten der Plattform von der Mitte her verhindert.

Der darunter liegende Tauchkörper 2 besitzt $8 \cdot 4 = 32$ ringförmig angeordnete Kammern **10**, die unten offen und oben etwa halbkreisförmig abgedeckt sind. Darin befinden sich Luftkissen **11**, die mit Druckluft mehr oder weniger stark aufgeblasen sind. Über die ringförmigen Kammerwände und die radialen Querwände **25** werden deren Auftriebskräfte direkt auf die Kragträger **8** des Fundaments übertragen. Die jeweils etwa 4 m breiten Kammern besitzen von innen nach außen gestaffelte Höhen von 3 - 4 - 5 - 6 m und passen sich so der geneigten Oberkante von **8** an.

Der Luftdruck darf den Wasserdruck an der jeweiligen Eintauchtiefe der Luftkissen nicht wesentlich übersteigen. Wie bei der Absenkhilfe **34** verändert sich durch Variation des Luftdrucks das Volumen der Kissen und damit ihr Auftrieb. Sie sind so dimensioniert, dass sie zusammen mit dem Auftrieb des Fundaments das ganze Bauwerk mit Schwimm- und Tauchkörper tragen (Gesamtgewicht ca. 7000 to) tragen.

Bei einem Auftrieb (Wasserverdrängung) des Fundaments (ohne Hals) von etwa 1400 to muss der Tauchkörper **2** allein insgesamt 5600 to tragen können. Sein Volumen beträgt etwa 5900 m^3 . Das heißt, dass seine OK etwa 0,25 m über dem Wasserspiegels liegt und den Schwimmkörper nach **Bild 6a** voll mit trägt.

8. Transportzustand und Schwimmstabilität

Die folgenden Gewichte und Auftriebskräfte sind aus den beiliegenden Zeichnungen überschlüssig ermittelt oder nur geschätzt worden und werden in to angegeben.

Fundament (insgesamt 10 m hoch)	3500 to
Stahlbetonschaft, 30 m hoch	750 to
Stahlurm, 87,5 m hoch, geschätzt	500 to
Gondel mit Rotor	400 to
Schwimmkörper geschätzt	650 to
Tauchkörper „	<u>1200 to</u>
Insgesamt	7000 to

Auftrieb : Fundament $A_u = 1400 \text{ to}$
 Auftrieb: Tauchkörper, bei 0,25m Freibordhöhe $A_o = \underline{5600 \text{ to}}$
 Schwerpunkt des Gesamtauftriebs = 3,50 m tief mit $A = 7000 \text{ to}$

Zur Berechnung der Höhe des Metazentrums der unter der Wasserlinie liegenden beiden Baukörpern Fundament und Tauchkörper wird der Schwerpunkt von deren Wasserverdrängung, d. h., deren Auftriebs berechnet und zwar in Abhängigkeit der Querneigung α der Turmachse. Dabei muss aber die Höhe des fest verbundenen Schwimmkörpers von 5m berücksichtigt werden, denn ohne diesen Aufbau wäre die ganze Transporteinheit instabil.

Da bei den möglichen Drehbewegungen das tiefliegende Fundament stets unter der Wasserlinie liegt, ändert sich sein Schwerpunkt A_u nicht und pendelt in etwa 7,7m Tiefe.

Anders liegen die Verhältnisse beim Tauchkörper. Er besteht aus einem 6m hohen äußeren Ring mit $R_a = 20\text{m}$ und aus drei weiteren, inneren Ringen von 5, 4 und 3m Höhe. Für einen 5,75m eingetauchten Vollkreis wird der horizontale Abstand x_A des Auftriebs A_o vom Drehpunkt auf der Wasserlinie $x_{Ao} = (R_a^2/4H) \cdot \text{tg}\alpha = 17,39 \cdot \text{tg}\alpha$ mit einem Moment $M_{Ao} = 17,39 \cdot \pi \cdot 20^2 \cdot 5,75 = 17,39 \cdot 7225 = 125650 \cdot \text{tg}\alpha$.

Die 3 inneren Differenzhöhen $\Delta H = 1\text{m}$ liegen stets unter Wasser und liefern einen Beitrag zum entlastenden Drehmoment von $\Delta M_{Ao} = 7000 \cdot \text{tg}\alpha$. Der Auftrieb des Fundaments ergibt dagegen ein belastendes Moment $M_{Au} = -1400 \cdot 7,7 \cdot \text{tg}\alpha$. Der gesamte Auftrieb bringt also bei einer Neigung α ein entlastendes Moment von $121800 \cdot \text{tg}\alpha$ mit einer Resultierenden im horizontalen Abstand $x_a = (121800 / 7000 = 17,4) \cdot \text{tg}\alpha$. Dessen Schnittpunkt mit der geneigten Turmachse d. h., das Metazentrum, liegt um $x_a/\text{tg}\alpha$ über dem Gesamtschwerpunkt des Auftriebs d. h., $17,4 - 3,50 = 13,9 \text{ m}$ über der Wasserlinie, ist also unabhängig von der Neigung α .

Bei einem Transport mit voller Turmhöhe (Nabenhöhe = 120 m) ergibt sich mit den dortigen Abmessungen und den obigen Gewichten die Höhe des Schwerpunktes über der Wasserlinie $z_s = 9,45 \text{ m}$. Der Abstand zum Metazentrum ist nicht groß genug für die Sicherheit der Schwimmstabilität. Diese Sicherheit muss auch die horizontalen Windkräfte berücksichtigen. Ein hoher Seegang erzeugt dazu noch Schwingungen oder Schwankungen der Turmspitze. Das bedeutet Trägheitskräfte aus der großen Gondelmasse. Außerdem muss eine Resonanz der Turmschwingung mit der Wellenbewegung ausgeschlossen werden. Deshalb sollte ein Transport mit dieser großen Nabenhöhe nicht riskiert werden

Bei einem Teleskopturm nach **Bild 8** sinkt dagegen (selbst bei einer späteren Nabenhöhe von 100 m über MW) der Schwerpunkt der Transporteinheit auf 4,5 m über dem Wasserspiegel, also beträchtlich unter die Höhe des Metazentrums von 13,9 m, sodass ein Seetransport möglich wird. Dazu sind aber weitere Berechnungen und vor allem Modellversuche nötig.

Im Transportzustand würde der Seegang vertikale Bewegungen der ganzen Schwimmereinheit erzeugen. Wegen der Trägheit der großen Masse des Bauwerks ändert sich aber nur die Wasseroberfläche gegenüber der Bordwand. Das bedeutet Veränderungen des Schwimmkörper- Auftriebs mit entsprechenden Änderungen der Aufhängekräfte am Tauchkörpers während der Wellenbewegung. Eine Wellenhöhe von z. B. $+ - 1,5 = 3\text{m}$ erhöht den Auftrieb des Schwimmkörpers um $1,5 \cdot 1056 = 1584 \text{ to}$. Abzüglich 650 to Eigengewicht muss die Verbindung also etwa 940 to tragen Die Befestigungen müssen dafür dimensioniert werden.

9. Absenken des Bauwerks.

Nach dem Erfindungsanspruch und **Bild 4** geschieht die Absenkung zusammen mit dem am Fundament **4** befestigten Tauchkörper **2**. Letzterer muss vor dem Absenken vom Schwimmkörper **1** gelöst werden. Der Auftrieb des Tauchkörpers muss nun soweit verringert werden, dass er den Schwimmkörper nicht mehr trägt und sogar mit einer gewählten Kraft von etwa

150 to an ihm hängt. Dazu sind drei Seilwinden **3** im Schwimmkörper vorgesehen, die das Bauwerk stets mit dieser relativ geringen Kraft beim Absenken führen. Dabei gleitet es zwangungsfrei durch die Manschette **22** des Schwimmkörpers.

In ihr gestatten federnd gelagerte Rollen oder Gleitmittel auch eine Drehbewegung des Schwimmkörpers infolge des Seegangs. Seine lotrechten Bewegungen dürfen sich nicht auf die Kräfte in den Zuggliedern **3** auswirken. Es muss also dafür gesorgt werden, dass sich durch die Wellen der Abstand des hängenden Bauwerks von den 3 Seilwinden im Schwimmkörper nicht ändert. Dazu wird jede Seilwinde auf einen Sockel gestellt, der an seinen 4 Ecken über feststehende Rollen an 4 Gegengewichten hängt. So hängt auch bei starkem Seegang jede Seilwinde stets auf absolut gleicher Höhe. Beim Absenken wird ihr Abstand zum Fundament mit dem Tauchkörper wie üblich durch ihr Winden gesteuert. Soll dabei jede Winde eine Zugkraft von 50 to übertragen, dann müssen die 4 Gewichte zusammen 50 to + das Gewicht der Seilwinde wiegen. Wird nun beim Absenken des Bauwerks bzw. Abdrehen der Winden der Auftrieb im Tauchkörper durch die Druckluft in den Luftkissen **11** so gesteuert, dass die 3 · 4 Gewichte im Gleichgewicht mit der angehängten Last stehen, dann hängt das Bauwerk auch stets unabhängig von der Wellenhöhe mit einer Kraft von 150 to an den 3 Seilwinden. Diese Methode mit Umlenkrollen und Gegengewichten ist nur bei relativ kleinen lotrechten Aufhängekräften möglich. Ein solches Abwinden der ganzen Bauwerkslast ohne die kräftige Unterstützung durch den erfindungsgemäßen Tauchkörper ist nicht möglich.

Am Beginn des Absenkens wird der Auftrieb des Tauchkörpers von 5600 to auf 7000 – 650 – 150 – 1400 = 4800 to verringert. So sinkt der Schwerpunkt des Bauwerks von zunächst 4,5 m über der Wasserlinie darunter und stabilisiert das Ganze immer mehr. Dabei nimmt der Auftrieb wegen des 7,3 m breiten Turmschafts (bis UK = 20 m unter dem Wasserspiegel) um 840 to zu. In dieser Tiefe wird der erforderliche Auftrieb der Tauchkörper 4800 – 840 = 3960 to. Das ergäbe eine mittlere wirksame Tauchkörperhöhe $3960/1250 = 3,17$ m. Wegen des dortigen hohen Wasserdrucks von 22,33 m drücken sich aber die Luftkissen zusammen, sodass der erforderliche Auftrieb nicht erreicht würde. Der Luftdruck muss also soweit gesteigert werden, dass die mittlere wirksame Tauchkörperhöhe von 3,17 m erhalten bleibt. Um eine Überbelastung der Zwickel **12** zu vermeiden, müssen diese starr umschlossenen Hohlräume stets etwa unter einem Luftdruck gleich Ihrer Wassertiefe gehalten werden.

Die erforderlichen Luftkissendrucke sind durch Berechnung nur schwer einzuhalten. Wenn dagegen die Summe der Zugkräfte in den 3 Seilwinden **3** des Schwimmkörpers kontrolliert, und der Luftdruck in den Kissen während des Absenkens so gesteigert wird, dass die resultierende Anhängkraft sich stets im Gleichgewicht mit den gewählten Gegengewichten befindet (etwa konstante Höhe der Winden über dem Fußboden), dann regelt sich der nötige Auftrieb von alleine. So ist ein kontrolliertes Absenken des Bauwerks (mit Tauchkörper) und über die Zugglieder eine zielgenaue Führung möglich. Dabei wirkt die tiefe Lage des schweren Fundaments stabilisierend.

10 Absetzen des Bauwerks auf den Meersgrund.

Die vorgesehene Aufstandsfläche muss vorher möglichst genau und horizontal eingeebnet sein. Nach dem Absetzen muss der Auftrieb des Tauchkörpers soweit verringert werden, dass seine Verbindungen mit dem Fundament, gelöst werden können. Dies geschieht umgekehrt wie bei der Befestigung, durch Rückdrehen des Tauchkörpers gegenüber dem Fundament. Dadurch wird der Bajonettverschluss entriegelt.

Später, nach dem Fluten des Turmschaftes bis zur Meereshöhe mit etwa 1000 m^3 Wasser, sitzt das Bauwerk noch mit einer Last von $3500 + 750 + 900 - 850 - 1400 + 1000 = 3900$ to auf dem Untergrund. Dabei beträgt unter der ringförmigen Aufstandsfläche von 550 m^2 die Bodenpressung nur $7,1 \text{ to} / \text{m}^2$ zusätzlich zum Wasserdruck von $30 \text{ to} / \text{m}^2$. Auch wegen dieser Bo-

den- und weiteren Kantenpressung erhält die dort verstärkte Sohlplatte den ringförmigen Oberzug **13**.

Solange der Tauchkörper noch auf dem Fundament sitzt, wird vorgeschlagen, eine 3,5 m hohe Kolkschutz-Wand **20** nach **Bild 6b** entlang der ringförmigen Außenwand des Fundaments in den Untergrund einzurütteln. Diese Wand wird zweckmäßigerweise schon während der Herstellung der äußeren Fundamentwände **7** dort angeordnet. Sie kann auch als verlorene Außenschalung verwendet werden. Auf sie werden mehrere Rüttelbohlen aufgesetzt, die an dem Tauchkörper **2** hängen und die Schutzwand wie eine Spundwand etwa 2 m in den Meeresgrund eindrücken.

Nach der Trennung des Tauchkörpers vom Fundament kann er zusammen mit den Rüttelbohlen mit einer geringen Kraft zum Schwimmkörper **1** hochgezogen werden. Dann wird die Verbindung des Schwimmkörpers zum Turmschaft gelöst und die Kombination von Schwimm- und Tauchkörper wieder wie eine Muschel auseinander geklappt. Auf diese Weise kann die ganze Schwimmereinheit am Turm vorbeigezogen und danach wieder zu einem 11 m hohen Zylinder verbunden werden. In dieser Form wird sie zum Schluss an die Land- Baustelle zurück transportiert, wo sie das nächste Turmbauwerk umfasst und zum Schwimmen anhebt.

Um die Kipp- oder Standsicherheit des Windturms zu erhöhen, wird außerdem vorgeschlagen, mit Hilfe des vorhandenen Saugbaggers Sand aus dem Meeresgrund in die 8 offenen Kammern des Fundaments zu spülen. Bei einer Wichte des Sandes von $0,8 \text{ to/m}^3$ ergäben sich so eine zusätzliche Auflast von etwa 4000 to und eine zusätzliche Bodenpressung von etwa $7,2 \text{ to/m}^2$. Bei einer Schiefstellung des Turms könnte der Sand einseitig höher geschüttet werden als statischer Ausgleich für die dabei entstandenen Exzentrizitäten der lotrechten Turmlasten

11. Vorschläge zum Teleskopieren des Windturms

Der Umstand, dass zur vertikalen Bewegung des Bauwerks Druckluft verwendet wird, und die Einrichtung dazu an Bord vorhanden ist, legt es nahe, dieses Medium auch zum Teleskopieren zu benutzen. Dabei wird der Turm wie ein Kolben im Stahlbetonzylinder **6** mit Luftdruck nach oben gedrückt. Damit nicht der ganze Stahlurm unter Druckluft gesetzt wird, wird eine demontierbare, seilnetzverstärkte, halbkugelförmige Membran am unteren Rand befestigt. Dieser zusätzliche Aufwand und vor allem die nötige Dichtung zwischen Turm **39a** und Schaft **6**, sowie die Notwendigkeit, zeitweise unter Luftdruck zu arbeiten, spricht gegen diesen Vorschlag, auch wenn die Energie zum Anheben des Turms aus der Verdichtungsenergie der Luftkissen entnommen werden kann.

Deshalb werden im Folgenden anstelle von pneumatischen Kräften hydraulische Hilfsmittel verwendet.

Nach **Bild 7** wird der Stahlbetonschaft **6** mit den Zugstangen **27**, dem Podest **24** und den Muttern **30** verwendet. Der Stahlurm **39a** besitzt an seinem unteren Ende einen horizontalen Verstärkungsring **19**, durch welchen die 8 Gewindestangen **27** geführt sind.

Zum Anheben werden zweckmäßigerweise 16 über den Umfang verteilte Hubpressen **15** verwendet. Diese stützen sich über das Podest auf den unteren Muttern der Gewindestangen ab. Werden die Pressen ausgefahren, dann heben sie das ganze Turmgewicht von 900 to um beispielsweise 30 cm an. Dabei werden die oberen Muttern um dasselbe Maß hochgedreht. Auf den weiter oben, innen angeordneten Verstärkungsringen **18** sitzen 8 kleinere hydraulische Zugpressen **16** an denen ebenfalls das Podest hängt. Beim Anheben des Turms müssen diese gleichzeitig eingefahren werden. Werden nun die unteren Hubzylinder gesenkt, dann heben die oberen Zugpressen synchron das Podest mit diesen Zylindern wieder an, wobei die unteren Muttern nachgedreht werden müssen. Eine zusammenhängende Hydraulik steuert das Wechselspiel zwischen

Anheben des Turms und Nachziehen des Podests.

In diesem Bild sind auch die Steigeisen **14** ersichtlich, damit man von dem Eingang im oberen Teil des Turmschafts auf das tief hängende Podest gelangen kann. Dazu muss aber ein an seinen Rändern verstärktes Schlupfloch im Stahlmantel über der unteren Ringverstärkung **19** vorhanden sein.

Es ist grundsätzlich auch möglich, mit oben auf dem Schaftkopf **28** sitzenden Litzenhebern mittels hochfesten Spannstahl- Litzen den Turm an seinem unteren Verstärkungsring zu packen und ihn mitsamt dem Podest hochzuziehen. Das kann sogar kontinuierlich geschehen. Dabei muss zur Sicherheit an den Gewindestangen **27** nur jeweils eine Mutter nach gedreht werden. Die oben aus den Hebern herauschauenden Litzen lassen sich über große Haspeln auf dem Schwimmkörper aufwickeln. Auf diese Weise könnte aber auch auf die Zugstangen und eine externe Vorspannung des Turmschafts verzichtet werden (eventuell: innere Vorspannung eines ringförmigen Rippenquerschnitts).

12. Restliche Arbeiten.

In dem **Bild 7** sind auch die vertikalen, an den Stahlurm unten angeschweißten, 1,3 m langen Stützleisten **31** zu erkennen, von denen beispielsweise 24 Stück gleichmäßig über den Umfang des Stahlzylinders angeordnet sind. Über jeder dritten Stützleiste sind lange Schutzleisten **32** aufgestellt, die beim Hochfahren des Turms mit angehoben und dann freigelegt werden. Weil der Turm konisch ist, werden diese über dem Schaftkopf **28** durch Rollen geführt, die sich ihnen anpassen. Auf diese Weise übertragen die Schutzleisten in jeder Höhenlage die horizontalen Windkräfte auf den Turmschaft **6**, gewährleisten stets die lotrechte Stellung des Turms und schützen dessen Oberfläche gegen Beschädigung.

Ist die volle Hubhöhe erreicht, d. h., wenn die untere Verstärkungsrippe **19** gegen den Schaftkopf **28** stößt, werden darunter die 8 Muttern **30** festgedreht. Danach werden 24 kurze Stahlstreben **33** zwischen den Vertiefungen in **28** und **31** eingesetzt und dort festgekeilt. Diese übertragen die Last des Turms ebenfalls auf den Schaftkopf **28**, aber von oben. Die oberen Horizontalkomponenten der Streben übernehmen die innen an der Zylinderwand angeschweißten Aussteifungsrippen **18**. Bei der Kraftübertragung von dem Stahlurm auf den Stahlbetonschaft **6** werden zweckmäßigerweise die Streben **33** für die lotrechten Lasten und die Zugstangen **27** für die Biegemomente herangezogen. Letztere können durch dazwischen angeordnete, etwa 1,3 m lange Schraubanker unterstützt werden. Sollen die Zugstangen **27** auch noch im Endzustand den Turmschaft verstärken, dann müssen sie gegen das Meerwasser resistent sein. Dies kann beim Hochdrehen jeweils unter der unteren Mutter zum Beispiel durch eine Beschichtung mittels Ziehhülsen geschehen.

Bei einer geringen Schiefstellung des Fundaments kann beim Teleskopieren stets die Achse lotrecht gehalten und zum Schluss mit den Verbindungen **27** und **33** zum Schaftkopf **28** fixiert werden. Neigt sich der Turm erst später, ist auch eine nachträgliche Korrektur im Gegensatz zu einem normal errichteten Turm möglich. Dazu wird das Podest **24** von der Eingangs- zur Arbeitshöhe hochgezogen. Mit Hilfe der Pressen **15** lassen sich dann die Streben **33** neu verkeilen und die Tragmutter **30** nachdrehen..

Nach dem kraftschlüssigen Verbinden des Stahlturmes mit seinem Unterbau wird die ringförmige Abdeckhaube **17** über dem Schaftkopf **28** angebracht. Außerdem wird das Podest **24** soweit abgesenkt und arretiert, dass es durch den Turmeingang betreten werden kann. Der Turmschaft wird zum Schluss bis zum Außenwasserstand geflutet.

13. Kurzer Bauzeitenplan.

Zum Herstellen, Transportieren und Absenken auf den Meersgrund werden Wochentakte angestrebt.

1. Woche:

Einschalen, Bewehren und Betonieren der Sohlplatte auf dem Schwimmdock **5**. Herstellen der ringförmigen Außenwand **7** auf volle Höhe und der acht radialen Querwände **8** auf etwa 3m Höhe. Herstellen der inneren Ringwand **13** mit Anschluss an Sohle und Querwände. Dies sind etwa 1000 cbm Beton.

2. Woche:

Nach dem Abtauchen des Schwimmdocks **5** wird der hergestellte und schwimmfähige Unterteil des Fundaments etwa um 50 m zur 2. Arbeitsstelle verzogen. Dort werden die acht Querwände **8** zusammen mit dem sternförmigen Zentrum und den verbreiterten, geneigten Oberzügen ergänzt. Dazu kommt noch der 2,5 m hohe Fundamenthals. Diese Arbeiten umfassen etwa 400 cbm Stahlbeton. Daneben Herstellen der 8 Schaftringe aus Stahlbeton an Land. Weiteres Verziehen des noch schwimmfähigen ganzen Fundaments **7** um 55 m an die 3. Arbeitsstelle, sobald dort die Gondel mit dem Generator sowie die Rotorblätter und die stählernen Turmschüsse entladen sind, und den Platz frei machten.

3. Woche:

Montieren der 8 Absenkhilfen **34** auf dem schwimmenden Fundament. Absenken der Kombination durch Steuerung des Auftriebs und Führung durch den Kran. Entfernen der Absenkhilfen. Übereinandersetzen der vorbereiteten Turmschaftringe **6** auf den Fundamenthals, bis 28 m Höhe. Nach dem Verschieben des Krans **35** an den Standplatz II Einstellen des bereitstehenden untersten Turmschusses **39a** mit den Zugstangen **27** und angehängtem Podest **24** in den Turmschaft. Daraufsetzen des obersten, verstärkten Rings **28**. Vorspannen des ganzen Schaftes mit Hilfe der Gewindezugstangen **27**. Darüber Montage der zwei restlichen Turmschüsse sowie der Generatorgondel und des Rotors. Entfernen der Abstützung **36** und der Brücke **37**.

Andocken der schwimmenden Transporteinheit **1 + 2**, damit Anheben des ganzen Bauwerks und Freiräumen der 3. Arbeitsstelle.

4. Woche:

Transport des angehängten und stehenden Bauwerks in die offene See bis zur Einbau- und 4. Arbeitsstelle. Dort Absenken auf die geplante Meeressohle. Einrütteln der Kolksschutzwand **20**. Entriegeln des Tauchkörpers **2** vom Fundament und Hochziehen zum Schwimmkörper **1**. Gemeinsames Aufklappen von Tauch- und Schwimmkörper zum Lösen vom Turmschaft **6**. Rückkehr der Transporteinheit zur 3. Arbeitsstelle, wo das nächste fertig gestellte Bauwerk wartet.

Parallel dazu laufen die Arbeiten für das Teleskopieren des vorausgehenden Windturms auf die vorgesehene Nabenhöhe und die Restarbeiten sowie das Einspülen von Sand in die Fundamentkammern.

Bei entsprechender Organisation ist es so mit einer Einrichtung für Baustelle und Transport möglich, nach jeder Woche eine Windkraftanlage auf dem Meer zu installieren. Dies kann wegen der Tiefe des Gesamtschwerpunktes der großen Masse und seiner Basisbreite weitgehend unabhängig vom Seegang geschehen. Bei dem eingangs erwähnten Ziel der deutschen Politik müssen jedes Jahr bis 2030 durchschnittlich etwa 200 bis 250 der großen 5 MW- Anlagen auf hoher See in Betrieb gehen.

In **Bild 8** ist nochmals der Transportzustand dargestellt. Dabei sind in einer Tabelle die Nabenhöhen bei verschiedenen Wassertiefen zusammengestellt. Dabei erkennt man, dass z. B. bei einer Wassertiefe von 40 m trotz der größeren Absenktiefe von 30 m die Nabenhöhe im Trans-

portzustand mit 89 m nicht größer wird als bei einer Absenkung um 20 m. Ohne zu teleskopieren würde aber bei 40m Wassertiefe die Nabenhöhe beim Transport von 89 auf 130 m ansteigen mit entsprechend weiter verringerter Schwimmstabilität. Dies wird durch die nötige größere Schaftlänge und die dadurch mögliche größere Teleskopierlänge und der anschließenden entsprechend kleineren Turmschüsse verhindert. Das beschriebene Verfahren ist also auch noch bei einer Wassertiefe von 50 m anwendbar. Für eine geplante Nabenhöhe von 90 m über dem Wasser reicht ihre Höhe von 79 m beim Transportieren

14. Alternativer Vorschlag zum Absenken des Bauwerks.

Neben dem beschriebenen erfindungsgemäßen Vorschlag des Absenkens wird hier auch auf das übliche Verfahren hingewiesen. Dabei werden Schwerlastwinden mit mehrfach übersetzten Flaschenzügen, wie sie bei Schiffskranen üblich sind, oder große hydraulische Pressen verwendet. Davon werden auf dem Schwimmkörper **1** acht Stück von je etwa 500 to Tragkraft fest installiert. Sie sind in der Lage, das angehängte Gewicht des Bauwerks (bei Berücksichtigung des Fundamentauftriebs) einschließlich des Turms von bis zu 3800 to zu tragen.

Der Vorteil liegt darin begründet, dass jetzt der Tauchkörper **2** nicht mehr vom Schwimmkörper getrennt werden muss, sondern dass beide eine dauernde Einheit bilden und so zusammen einfacher ausgebildet werden können. Der Luftdruck in den Luftkissen kann wie im Transportzustand konstant gehalten werden. Diese müssen, weil immer in der gleichen Wassertiefe liegend, nur einen konstanten Auftrieb liefern. Nach dem Absenkvorgang und der Entlastung der Schwimmeinheit können sie aber noch ihre Eintauchtiefe regulieren. Die hohlen Zwickel **12** über den Räumen für die Luftkissen **11** müssen nicht mehr gegen den Wasserdruck geschützt werden. Außerdem wird die Manschette **22** zwischen Schwimmkörper **1** und Turmschaft **6** einfacher.

Der Nachteil liegt in den größeren Investitionskosten für die starken Hebezeuge und deren Unterkonstruktionen. Das Herstellen des Kolkschutzes mit Hilfe einer eingerüttelten Schutzwand muss von einem besonderen horizontalen Rahmen aus geschehen, der mit dem Fundament abgesenkt wird, und dann separat wieder hochgezogen wird. Entscheidend ist jedoch die Lösung des folgenden Problems:

Bei Wellengang beim Absenken verändert sich der Auftrieb der Schwimmeinheit dauernd, weil sie wegen des Beharrungsvermögens der schweren angehängten Masse des Bauwerks der Welle nicht folgen d. h., ihre relative Höhenlage zum Fundament nicht verändern kann, wenn nicht besondere „Dämpfer“ dazwischen eingebaut werden. Sonst werden die Aufhängekräfte der Schwerlastheber stoßförmig beträchtlich erhöht oder verringert und damit auch die Beanspruchung der Konstruktion darunter. Dieser Effekt tritt im Prinzip bei allen, an oder auf Schiffen (ohne festen Stand) angehängten schweren Lasten auf. Mit zunehmendem Verhältnis der Masse des Schiffes zur Masse der Last wird er aber immer kleiner.

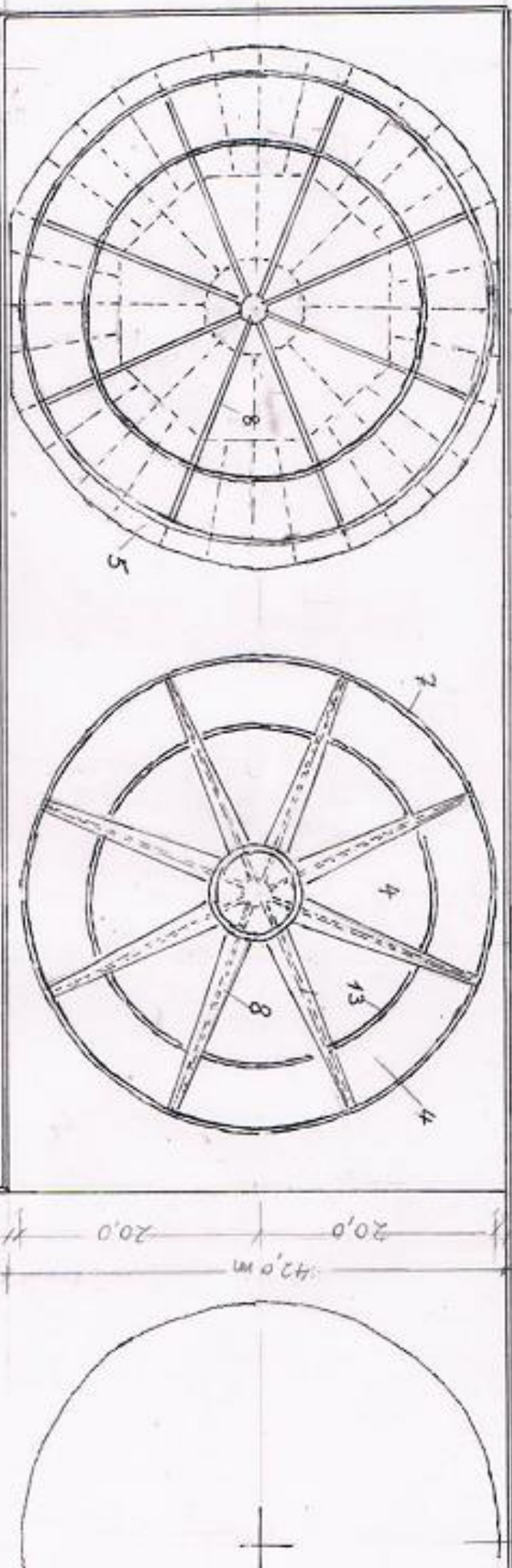
15. Darstellung der zugehörigen Bilder 1- 8

Bild 1 Herstellung des Fundaments i.M. 1:500

1. Bauphase

2. Bauphase

3. Bauphase (Bild 2)



1a Herstellung des unteren Fundament-
teils auf einem Schwimmdock

1b nach dem Absetzen des Docks und
Schwimmen des Fundaments

1c Herstellen des restlichen
Fundaments nach dem Verziehen

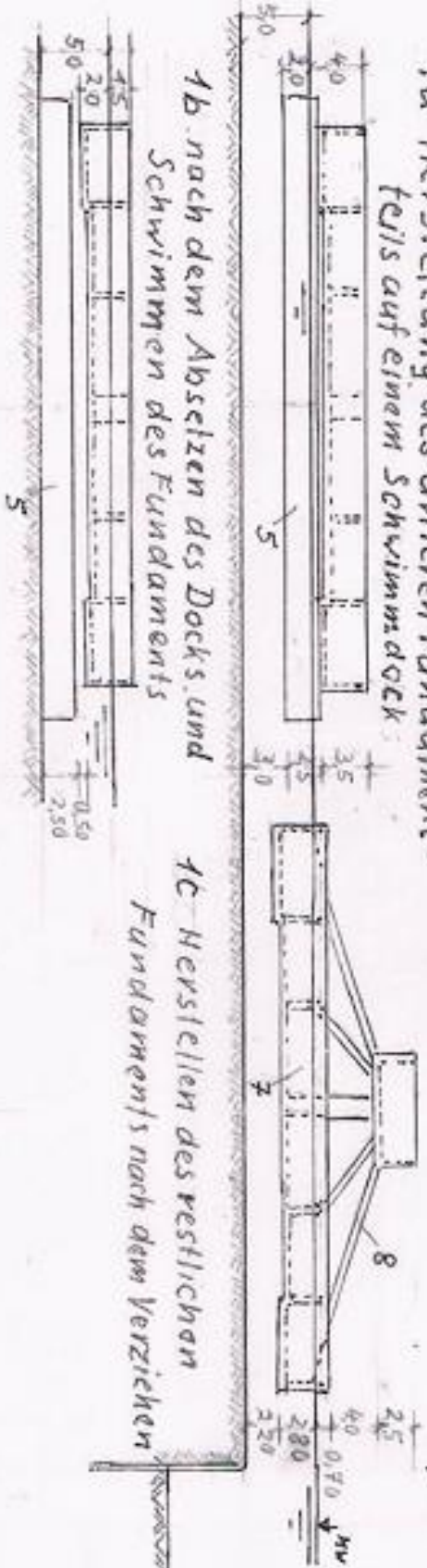


Bild 2 Absetzen des Fundaments auf die Hafensohle

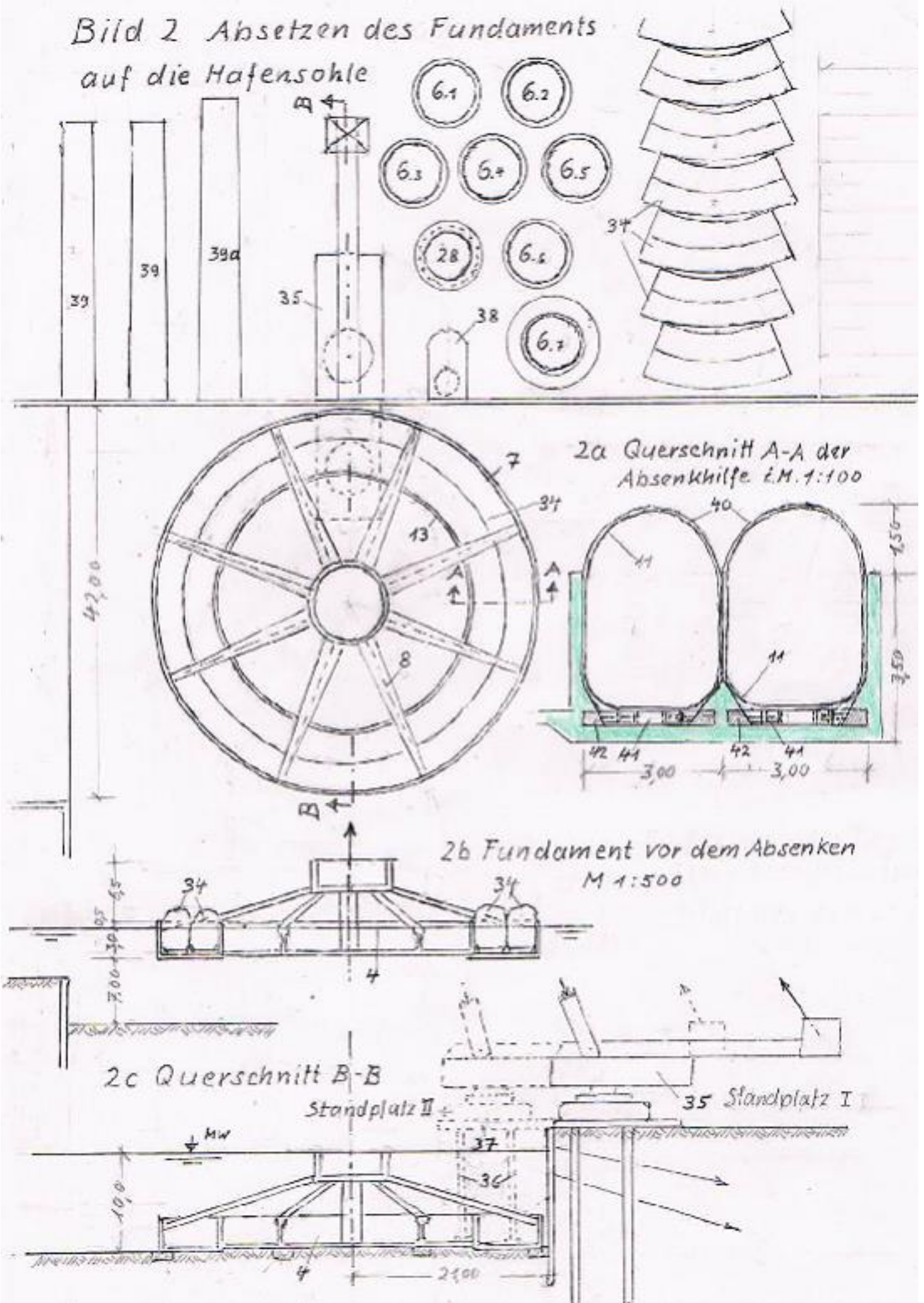
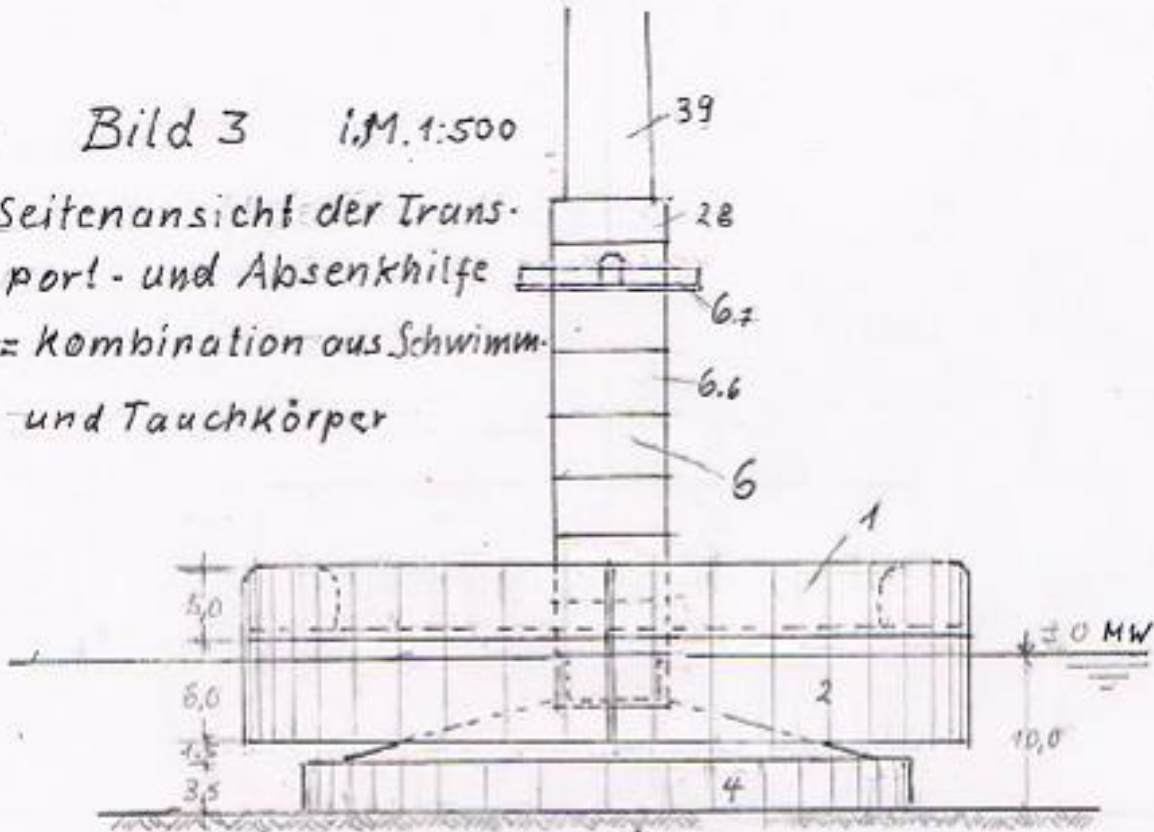
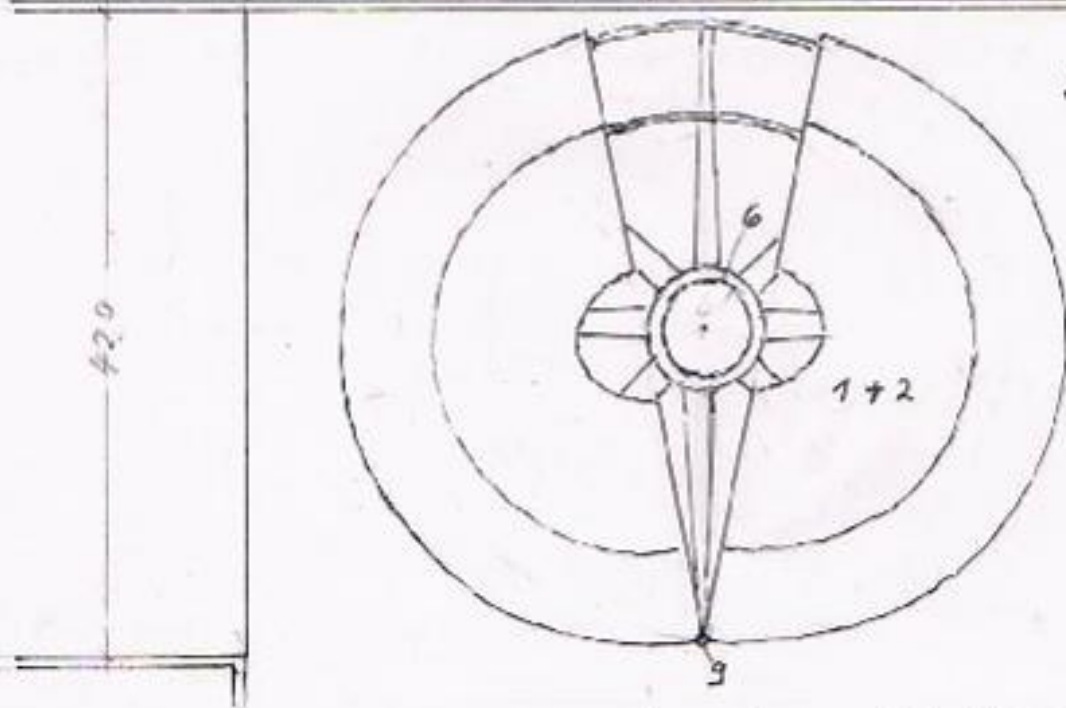


Bild 3 i.M. 1:500

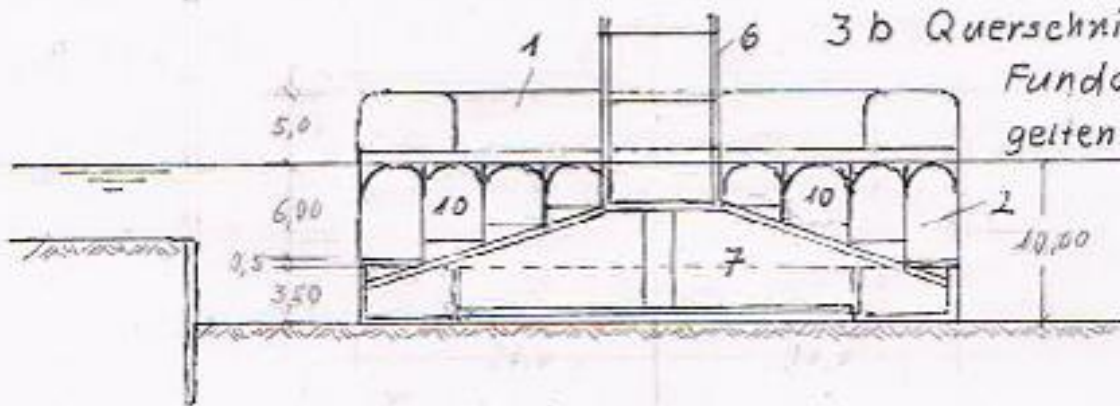
Seitenansicht der Transport- und Absenkhilfe
= Kombination aus Schwimm- und Tauchkörper



Kaimauer



3a Grundriss der aufgeklappten Kombination vor dem Andocken an das Fundament



3b Querschnitt der mit dem Fundament verriegelten Kombination

Bild 4

Schwimmkörper über
Tauchkörper
im Absenkbzustand

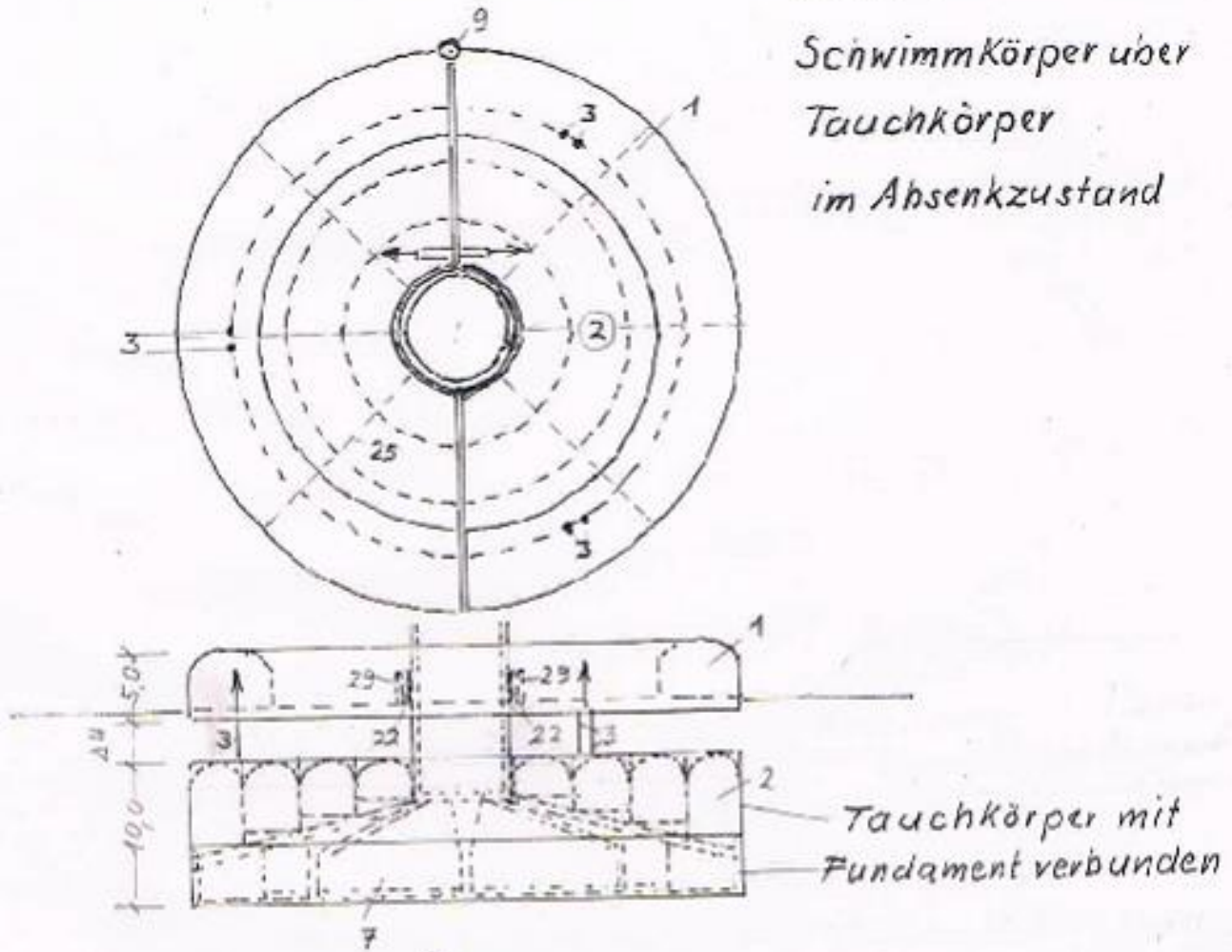
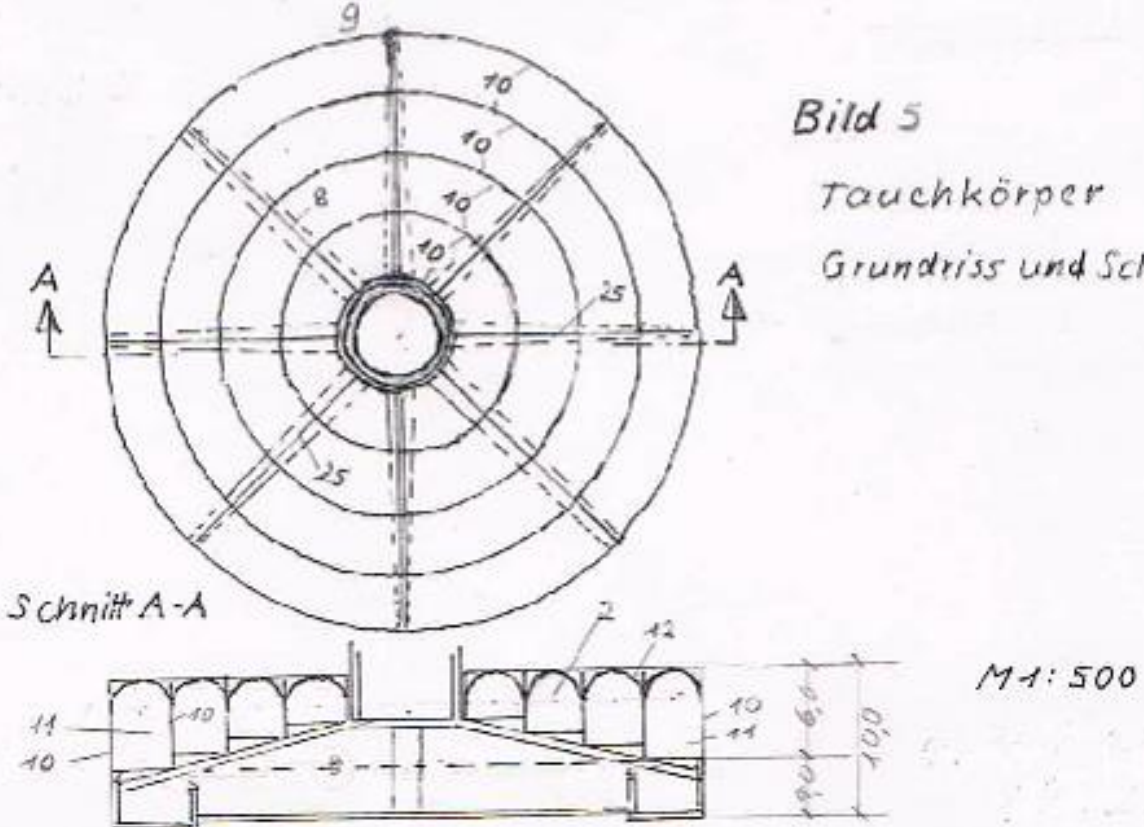


Bild 5

Tauchkörper
Grundriss und Schnitt



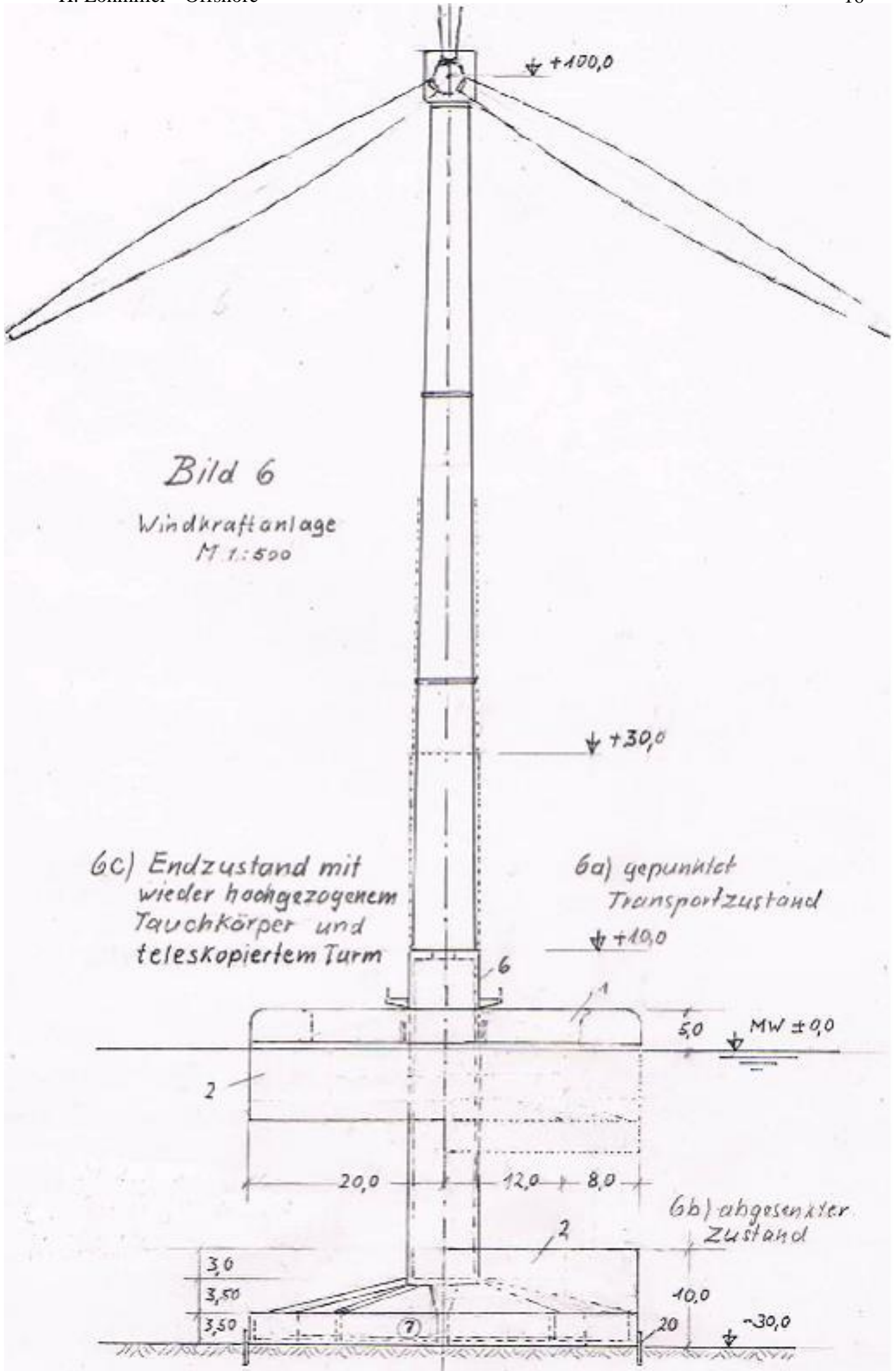
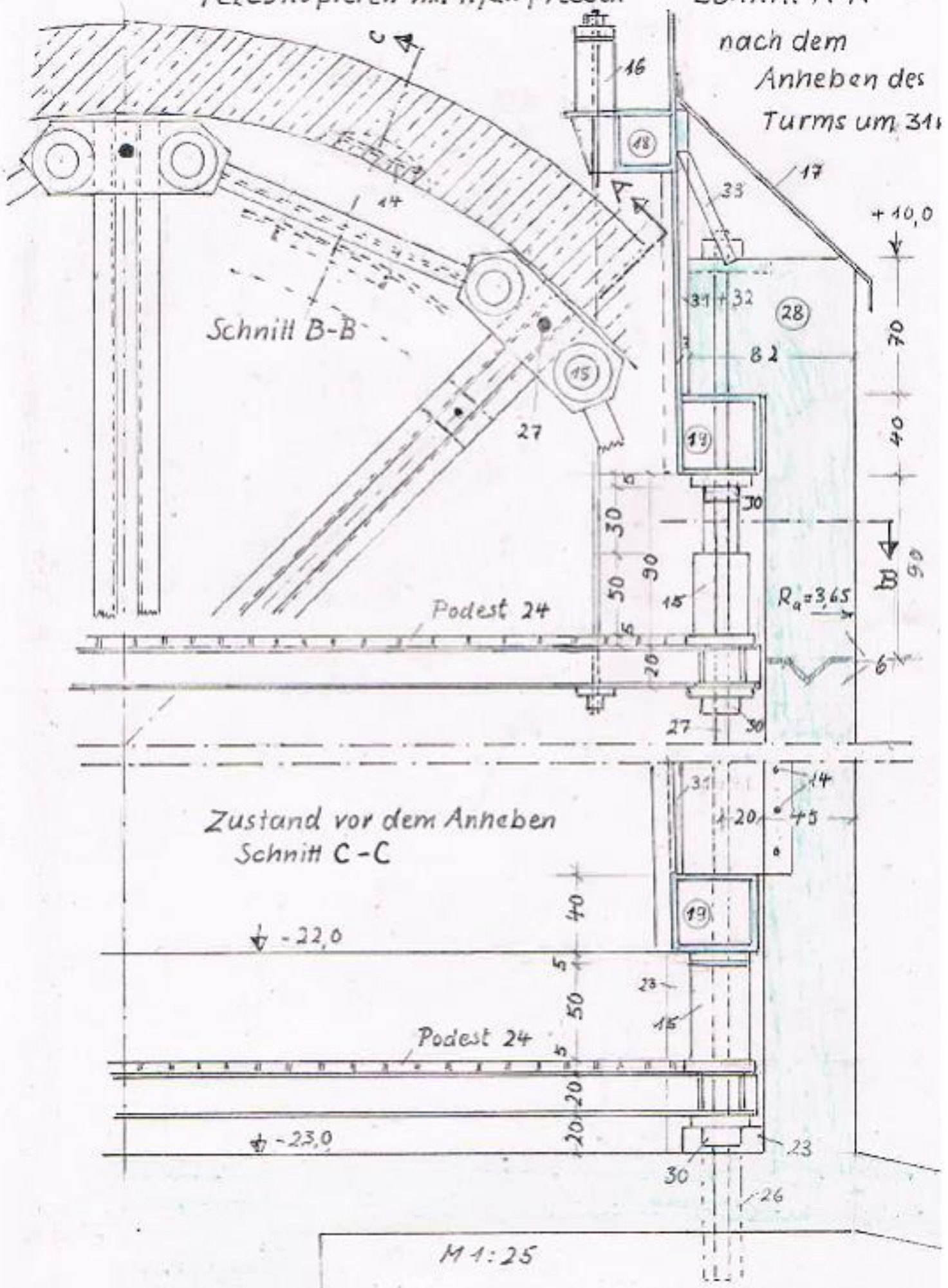


Bild 7

Teleskopieren mit hydr. Pressen

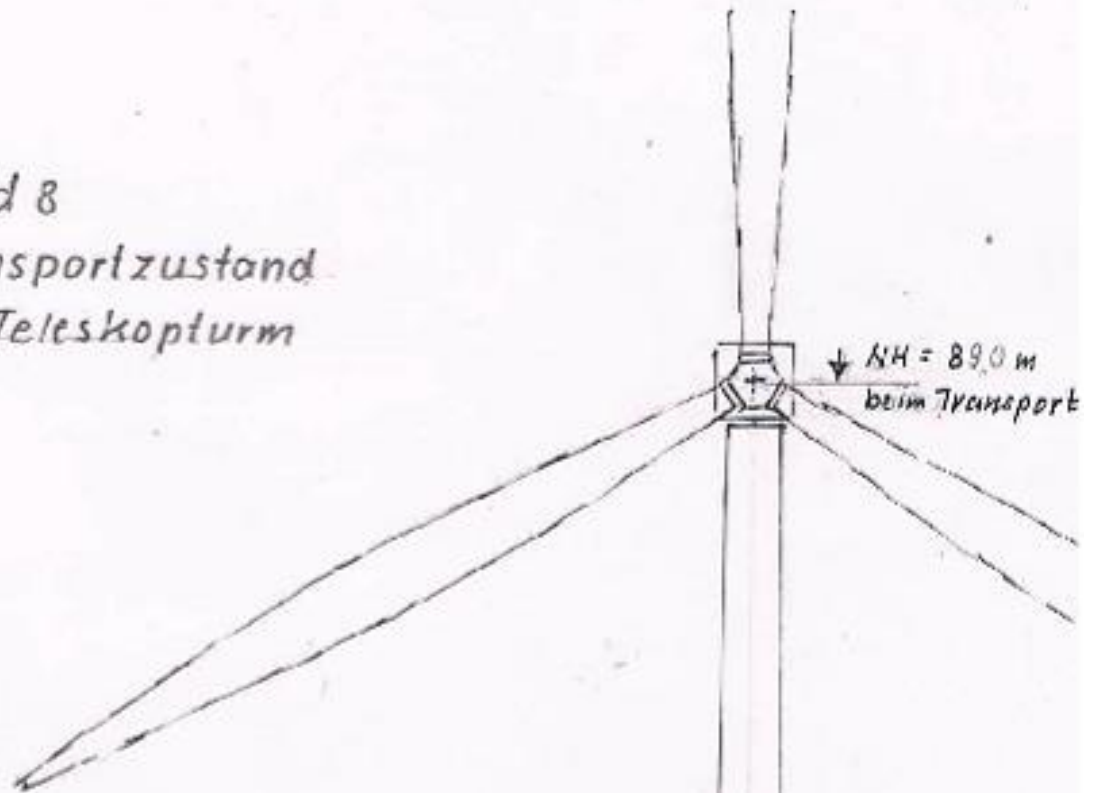
Schnitt A-A

nach dem Anheben des Turms um 311

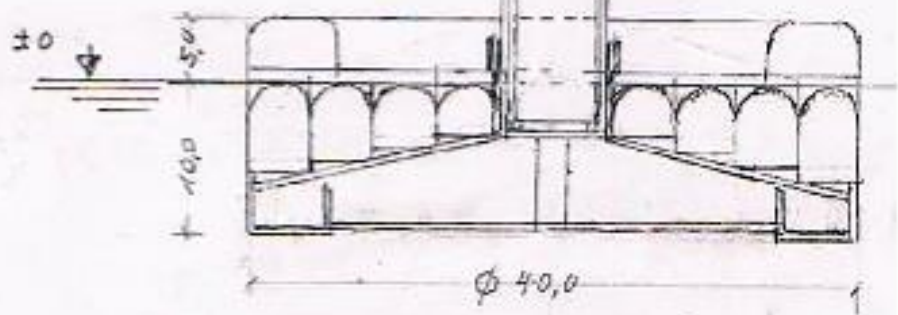


M 1:25

Bild 8
Transportzustand
für Teleskopturm

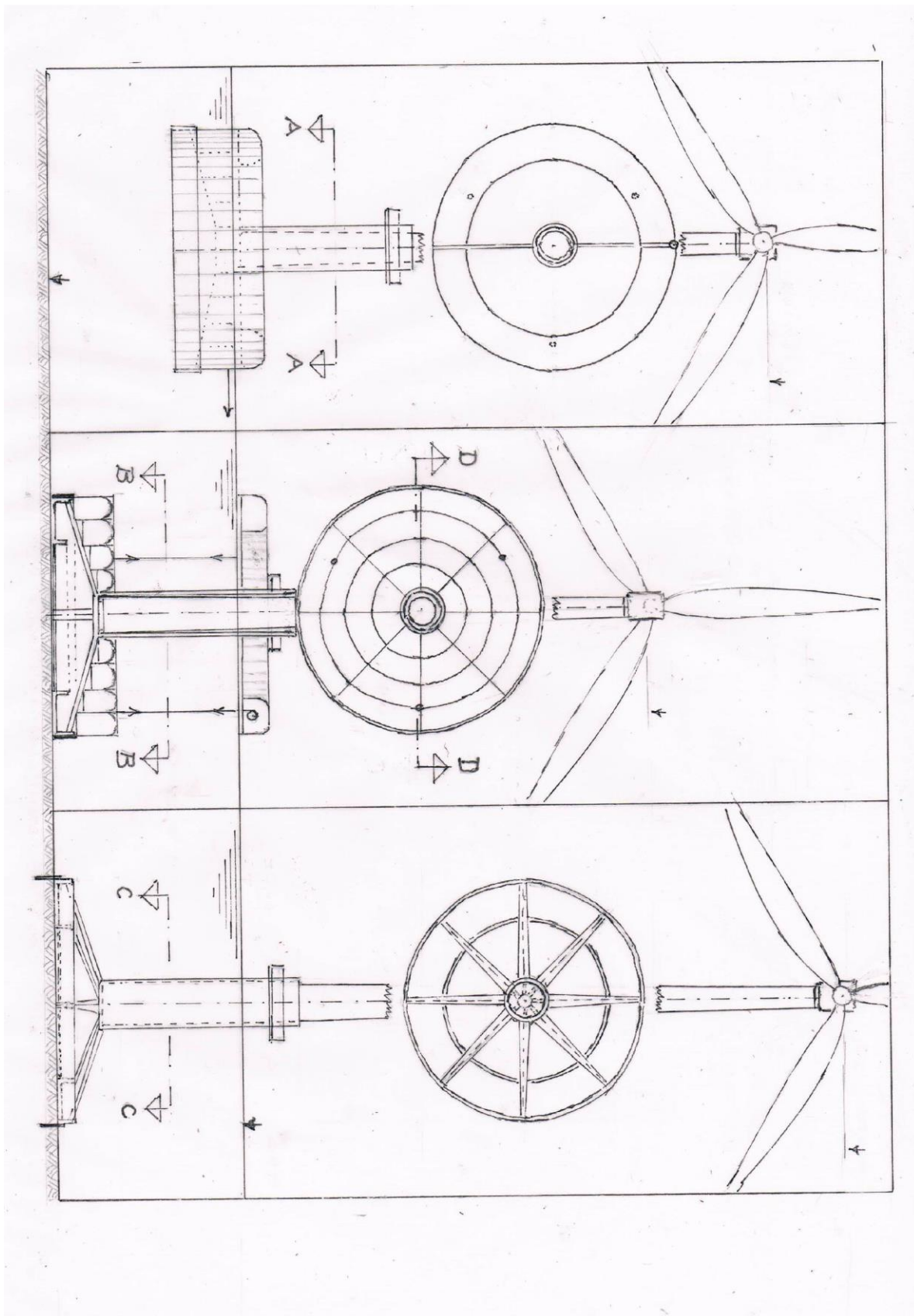


bei Wassertiefe WT =	50,0 m	40,0 m	30,0 m	20,0 m	
im Transportzustand					↓ SH = 50,0 bei WT = 50 m
OK Turmschaft	50,0	40,0	30,0	20,0	↓ SH = 40,0 bei WT = 40 m
Nabenhöhe NH =	89,0	89,0	89,0	89,0	↓ SH = 30,0 bei WT = 30 m
im Absenkzustand					↓ SH = 20,0 bei WT = 20 m
Absenken	40,0	30,0	20,0	10,0	
Nabenhöhe NH =	49,0	59,0	69,0	79,0	
im Endzustand					
Teleskopieren	51,0	41,0	31,0	21,0	
Nabenhöhe NH =	100,0	100,0	100,0	100,0	



M 1:500

Übersicht der WEA beim Transport, nach dem Absenken und im Endzustand



Bedeutung der Bezeichnungs-Nummern in der Darstellung der zugehörigen Bilder.

- 1 Schwimmkörper
- 2 Tauchkörper
- 3 Aufhängungen am Schwimmkörper
- 4 Kreisfundament
- 5 Schwimmdock
- 6 Turmschaft als Fertigteile
- 6a Turmschaftteil mit Balkonring
- 7 ringförmige Außenwand von 4
- 8 sternförmige Aussteifungswände in 4
- 9 Scharnier für 1 + 2
- 10 Kammern für Luftkissen
- 11 Luftkissen
- 12 Zwickel über den Kammern
- 13 ringförmige Zwischenwand in 4
- 14 Steigeisen in 6
- 15 Hubpressen
- 16 obere Zugpressen
- 17 ringförmige Abdeckhaube
- 18 oberer Verstärkungsring in 39a
- 19 unterer Verstärkungsring in 39a
- 20 Kolkschutzwand
- 22 Manschette des Schwimmkörpers
- 23 Sockel im Fundamenthals
- 24 an 39a angehängtes Podest
- 25 Querschotten zwischen den Kammern
- 26 Gewindehülsen im Fundamenthals
- 27 Gewindegzugstange
- 28 Kopf des Turmschafts
- 29 innere Zylinderwand im Schwimmkörper
- 30 Tragmuttern
- 31 Stützleisten an 39a
- 32 Schutzleisten für 39a
- 33 Stahlstreben auf 28
- 34 Absenkhilfe als Segment
- 35 Schwerlastkran
- 36 Stützkonstruktion für 35
- 37 Behelfsbrücke über 36
- 38 Generatorgondel
- 39 obere stählerne Turmschüsse
- 39a eingestellter unterer Turmschuss
- 40 Manschetten zum Aufhängen von 34
- 41 horizontale 3- Kammerpressen
- 42 Längsriegel für die Befestigung von 40

Impressum

Dr.-Ing. Hermann Lohmiller
Sparnsbergstr. 1
D-71272 Renningen

Tel. 49(0)7159-2713
E-mail hermaloh@t-online.de
S. 1 – 20 erstellt am 01.12.2012