

Ontwerp van gebalanceerde bewegende constructies

Voor zowel stilstaande als bewegende constructies is (kracht-)balans een belangrijke eigenschap. Bij statische constructies helpt balans

voor een goede krachtverdeling. Bij dynamische constructies of mechanismen is balans belangrijk om aandrijfkrachten

te minimaliseren en, voor snelle bewegingen, om trillingen te voorkomen. Dit artikel geeft inzicht in het

dynamisch balanceronderzoek aan de Universiteit Twente en daarnaast in de

mogelijkheden van balans in de architectuur en de beeldende kunst.

V. van der Wijk, afd. *Werktuigbouwkundige Automatisering, leerstoel Ontwerp van Mechanismen en Robotica, Universiteit Twente, Enschede*

Wanneer constructies groter worden of wanneer ze sneller moeten gaan bewegen, dan is een goede massaverdeling van toenemend belang. Door onbalans in bijvoorbeeld gebouwen en bruggen ontstaan onnodig hoge belastingen waardoor extra verstevigingen nodig zijn. Voor langzaam bewegende constructies zoals hijskranen, liften, en mobiele daken is balans noodzakelijk voor een minimaal aandrijfvermogen en een laag energiegebruik. Ook draagt balans bij aan de veiligheid. Wanneer er bijvoorbeeld iets misgaat met de aandrijving, dan zal een gebalanceerde constructie niet gaan bewegen of gaan vallen. Bij industriële robots die met hoge snelheid iets moeten oppakken en plaatsen zorgt onbalans voor ernstige trillingen die nadelig zijn wanneer hoge precisie en korte omlooptijden zijn gewenst. Ongebalanceerde machines hebben daarom een zwaardere constructie en fundering nodig.

Voorwaarden dynamische balans:

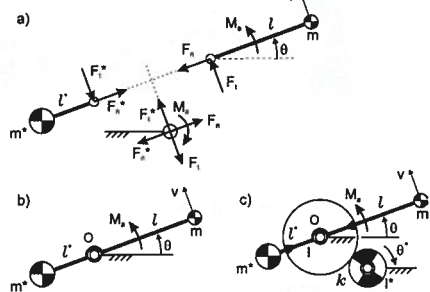
$$F_n - F_n^* = (ml - m^*l^*)\ddot{\theta}^2 = 0$$

$$F_t - F_t^* = (ml - m^*l^*)\dot{\theta} = 0 \rightarrow ml = m^*l^*$$

$$M_a - M_a^* = I\ddot{\theta} - I^*\ddot{\theta}^* = (I - kI^*)\ddot{\theta} = 0$$

$$\text{met } \dot{\theta} = k\dot{\theta}^*$$

$$\rightarrow I = kI^*$$

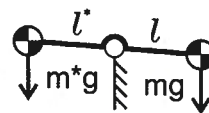


Afbeelding 1. Eliminatie van dynamische reactiekrachten en -momenten door een contramassa en een contra-tragtheid.

Een mechanisme is dynamisch in balans wanneer

de netto dynamische reactiekrachten en reactiemomenten op de basis nul zijn. Wanneer een stang met een massa m om een vast punt op de basis draait, zoals in afbeelding 1a, dan werken er op dit punt de reactiekrachten F_n en F_t en het reactiemoment M_a , die afhankelijk zijn van de snelheid en versnelling van de beweging. Deze veranderende reactiekrachten zijn een belangrijke bron van machinetrillingen. Wanneer er aan de andere zijde van het vaste punt ook een stang met een massa wordt geplaatst zodanig dat deze gelijke maar tegengestelde reactiekrachten uitoefent op het vaste punt, dan zijn de netto reactiekrachten op de basis gelijk aan nul. In dat geval is de stang in afbeelding 1b een krachtgebalanceerde stang. Om het reactiemoment M_a van de basis te elimineren kan een element worden toegevoegd die om een ander vast punt en in tegengestelde richting van de stang draait door bijvoorbeeld een tandwieloverbrenging (afb. 1c) of door een extra aandrijving. Het mechanisme heeft dynamische momentbalans wanneer de traagheid van de stang gelijk is aan de tandwieloverbrenging maal de traagheid van het tegendraaiende element ($I=kI^*$). Voorwaarden statische massabalans

$$(ml - m^*l^*)g = 0 \rightarrow ml = m^*l^*$$



Afbeelding 2. Statisch balanceren met massa's resulteert in dezelfde oplossing als voor dynamische krachtbalans. Statisch balanceren

heeft echter te maken met de uitwisseling van potentiële en elastische energie, terwijl dynamisch balanceren betrekking heeft op de krachten en momenten veroorzaakt door snelheid van versnelling van beweging.

Wanneer mechanieken langzaam bewegen, dan zijn de dynamische reactiekrachten laag en vaak

verwaarloosbaar. Wel is de statische balans dan nog van belang. Ondanks dat statisch balanceren wezenlijk verschilt met dynamisch balanceren zijn de oplossingen voor dynamische krachtbalans gelijk aan statische balans met massa's. Bij statisch balanceren moet het (potentiële en elastische) energieniveau van het mechanisme gelijk blijven voor iedere stand (zoals bij Anglepoise tafellampen), terwijl het bij dynamisch balanceren gaat om het elimineren van de krachten en momenten veroorzaakt door de beweging. Dit artikel gaat vooral in op de dynamische krachtbalans. De gevonden oplossingen zijn zodoende bruikbaar voor zowel stilstaande, rustig bewegende, en snel bewegende constructies.

Construeren met gebalanceerde pantografen

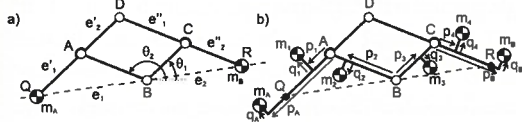
Balansvoorwaarden:

$$m_2 q_2 - m_4 q_4 - m_B q_B = 0$$

$$m_3 q_3 - m_1 q_1 - m_A q_A = 0$$

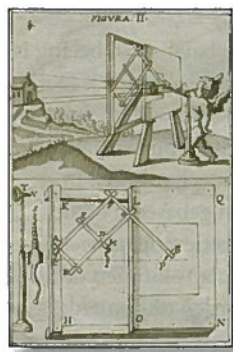
$$(m_1 + m_A) e_1'' + m_2 p_2 - m_4 p_4 - m_B p_B = 0$$

$$(m_4 + m_B) e_2' + m_3 p_3 - m_1 p_1 - m_A p_A = 0$$



Afbeelding 3. Pantograafmechanisme waarvan scharnier B het centrum van de massa is van a) massa's m_A en m_B ; b) massa's m_A en m_B en de massa van iedere stang.

Het mechanisme van afbeelding 3, dat bestaat uit een parallellogram ABCD waarvan de stangen AD en CD zijn verlengd tot respectievelijk de punten Q en R, wordt een pantograaf genoemd. De pantograaf is een bekend instrument om tekeningen mee te vergroten, of om mee te graveren. Het instrument vindt zijn oorsprong in 1603 wanneer Christophori Scheiner het ontwikkelt voor een schilder, met de bedoeling de werkelijkheid te kunnen kopiëren naar tekening, zoals te zien is in afbeelding 4 [1]. De pantograaf is wellicht het oudst bekende kopieerapparaat.

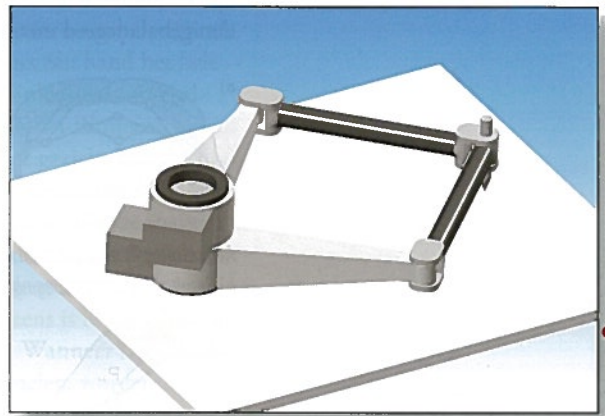
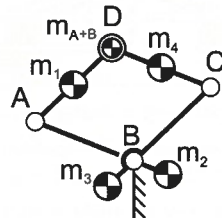


Afbeelding 4. Illustratie van de uitvinding van de pantograaf in 1603 door Christophori Scheiner, bedoeld om de werkelijkheid te kunnen kopiëren naar tekening [2].

De pantograaf is ook zeer geschikt voor het ontwerp van gebalanceerde constructies. Een bekende toepassing is het tekenta-

felmecanisme waarvan de linialen worden gebalanceerd met een contramassa die zich achter de tafel bevindt zodat de linialen met minimale inspanning kunnen worden bewogen. Wanneer in afbeelding 3a m_A en m_B respectievelijk de massa van de linialen en de contramassa voorstellen en punt B het scharnierpunt is met de tafel, dan is het mechanisme in balans voor $m_A e_1 = m_B e_2$. Met gelijkvormige driehoeken is dan af te leiden dat er moet gelden: $m_A e_1' = m_B e_2'$ en $m_A e_1'' = m_B e_2''$. Voor het gebalanceerde mechanisme ligt het centrum van de massa (CvM) in het scharnierpunt met de tafel. Algemeen geldt dat van een dynamische krachtgebalanceerde constructie het CvM voor iedere mogelijke beweging op een stationair punt ligt ten opzichte van de basis. Om een gebalanceerde pantograaf te construeren moeten de massa's van alle elementen worden meegenomen. De voorwaarden voor de krachtbalans van een algemene pantograaf staan in afbeelding 3b.

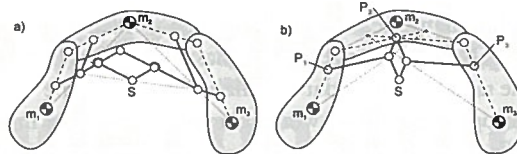
Afbeelding 5. a) Gebalanceerde 2-RRR robot manipulator die uit een pantograaf (b) is opgebouwd [3].



Afbeelding 5a toont een gebalanceerde 2-RRR Robot Manipulator, bedoeld om met hoge snelheid en hoge precisie te pakken en te plaatsen bij bijvoorbeeld de productie van microchips en MEMS. De robot is een variatie op de gebalanceerde pantograaf van afbeelding 3b, zoals te zien is in afbeelding 5b. Samen met een apart gestuurde contratraagheid voor momentbalans is de robot volledig dynamisch gebalanceerd. Een prototype van deze robot is ontwikkeld en getest in samenwerking met BESI en MECAL, met veelbelovende resultaten.

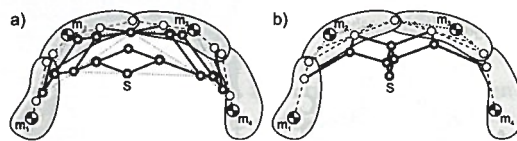
Combinaties van pantografen

Mechanismen die ontstaan door combinaties van gebalanceerde mechanismen, zijn zelf ook te balanceren. Zo ook combinaties van pantografen [4]. Bijvoorbeeld in afbeelding 6a waar het CvM van drie massa's is gebalanceerd ten opzichte van punt S met drie pantografen. De linkse en rechtse pantograaf 'wijzen' naar respectievelijk het CvM van m_1 en $m_2/2$ en het CvM van m_3 en $m_2/2$. De middelste pantograaf wijst met punt S naar het CvM van beide andere pantografen.

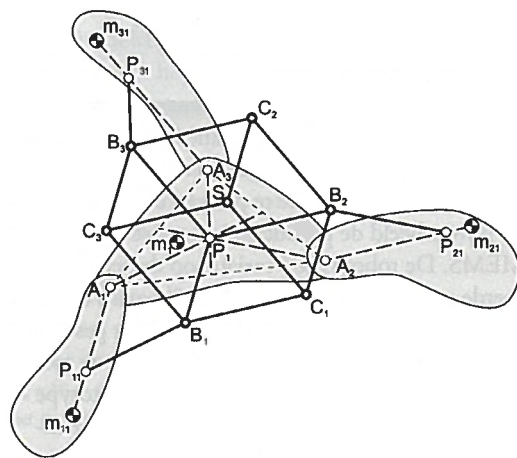


Afbeelding 6. a) Balanceren van drie massa's met drie pantografen; b) De drie pantografen kunnen op een speciale manier worden samengevoegd.

Het is mogelijk om de drie pantografen op een speciale manier samen te voegen waardoor het mechanisme van afbeelding 6b. ontstaat. De afmetingen van de drie parallelogrammen worden bepaald door de drie punten P1, P2 en P3. Hetzelfde is mogelijk voor het balanceren van vier massa's wat resulteert in de oplossing van afbeelding 7. Evenals in afbeelding 3b kan een willekeurige massaverdeling van ieder onderdeel worden meegenomen in de balans. Dit geldt tevens voor het mechanisme van afbeelding 8 waar vier massa's op een andere manier door negen pantografen worden gebalanceerd met het CvM in scharnier S.

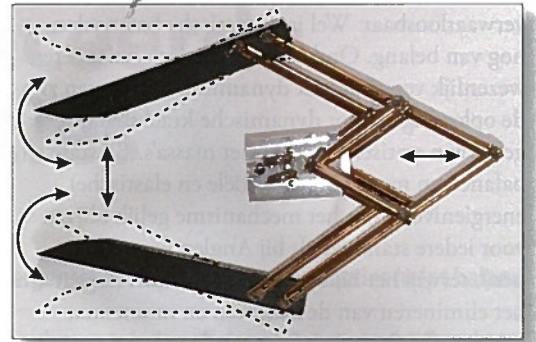


Afbeelding 7. a) Balanceren van vier massa's met zes pantografen; b) Resultaat na samenvoeging van de zes pantografen.



Afbeelding 8. Balansarchitectuur van negen gecombineerde pantografen.

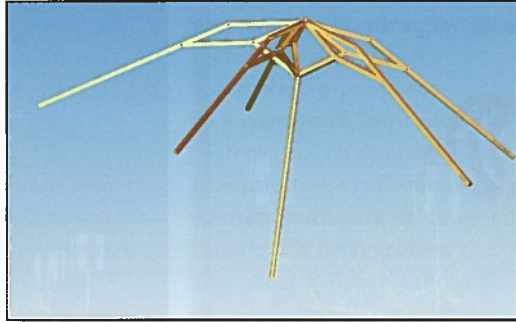
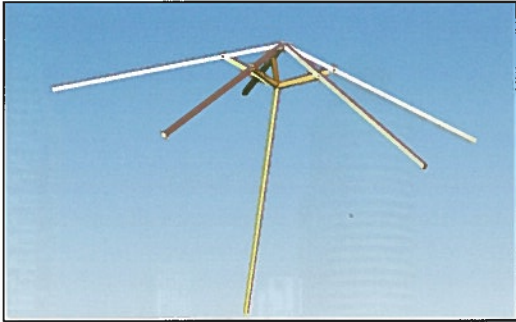
De balansarchitecturen van afbeeldingen 6, 7, en 8 kunnen worden gebruikt voor de synthese van bruikbare gebalanceerde mechanismen. De balansstructuren kunnen hiervoor op vele manieren worden toe- en aangepast. Bijvoorbeeld stangen kunnen door tandwielen worden vervangen, of worden weggelaten, of worden samengevoegd met anderen. Zolang de kinematica onveranderd blijft, is het resulterende mechanisme te balanceren.



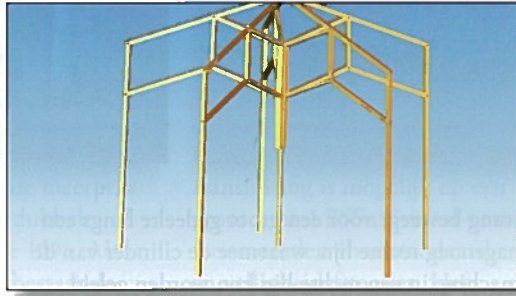
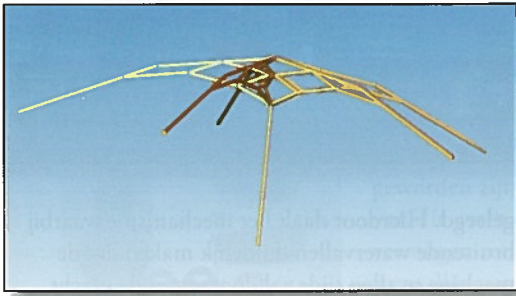
Afbeelding 9. Dynamische kracht- en momentgebalanceerde gripper voor zowel parallelle als precisie grijpbewegingen, gebaseerd op het model van afbeelding 7b.

Afbeelding 9 toont een volledig dynamisch gebalanceerde gripper die is afgeleid van de balansarchitectuur van afbeelding 7b. Door het middelste parallelogram met scharnier S van afbeelding 7b te bewegen, maakt de gripper een precisiegriep door de vingers te roteren. Door het meest rechtse parallelogram in afbeelding 9 te bewegen maakt de gripper een parallelle griep. Vanwege de symmetrie zijn voor beide grijpbewegingen ook alle reactiemomenten volledig gebalanceerd. Het voordeel van een dynamisch gebalanceerde gripper is dat wanneer het door een robot heen en weer wordt bewogen, het niet begint te bungelen. Het laten uitbungelen van de gripper veroorzaakt al snel veel wachttijd voor robots. Net zoals een gebalanceerd mechanisme geen reacties uitoefent op de omgeving, hebben omgekeerd reactiekrachten van de omgeving (bijvoorbeeld van de robot) ook geen invloed op de beweging van het gebalanceerde mechanisme zelf. Een andere belangrijke eigenschap is dat de gripper is gebalanceerd zonder toevoeging van contramassa's zoals in afbeelding 1 of in afbeelding 5. Het mechanisme is inherent gebalanceerd, i.e. het is zodanig ontworpen dat het van zichzelf gebalanceerd is. Door dynamische balans al in de beginfase van het ontwerpproces te onderzoeken, sterker nog, door het ontwerpproces te laten leiden door dynamische balanseigenschappen, kan toevoeging van nadelige massa worden voorkomen.

Een toepassing waar statische balans van belang is zijn de reuzenparasollen van afbeelding 10. Deze op het oog normale in-en-uit-klap-systemen verschillen in de manier van inklappen waarbij de top naar boven beweegt. De mechanismen in afbeeldingen 10a, b, en c, zijn gebaseerd op de balansarchitecturen van respectievelijk afbeeldingen 3b, 6b, en 7b. Door de balans kunnen de parasollen groot en zwaar worden uitgevoerd, maar toch met de minste moeite in en uit worden

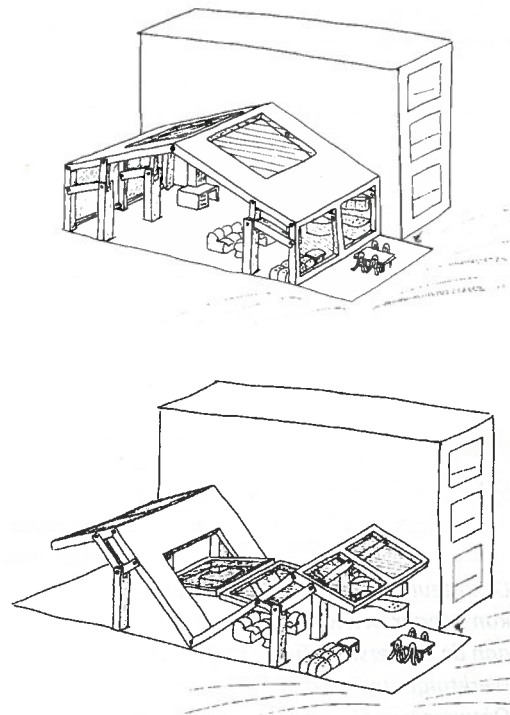


Afbeelding 10. Gebalanceerde reuzenparasollen die vrijwel krachteloos in en uit kunnen worden geklapt.



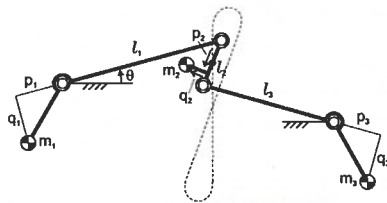
geklapt. Een diameter van 10 meter is zomaar mogelijk. Deze constructies zijn daarom ook prima toepasbaar bij bijvoorbeeld bewegende daken en luifels. Het mechanisme van afbeelding 10c heeft twee bewegingsmogelijkheden, waardoor het kan transformeren van een grote parasol boven het terras tot een afgesloten tent, bestand tegen regen en wind (afb. 10d). Handig voor het vlug 'binnenzetten' van tuinmeubels en dergelijke.

Door een gebouw te construeren uit gebalanceerde pantografen, zou je met slechts één hand het hele gebouw kunnen om-, uit- of inklappen. Afbeelding 11 toont het concept van het Binnenstebuiten-huis. Van het op het eerste gezicht normale huis is iedere zijde een grote gebalanceerde pantograaf, uitgestrekt over verschillende spanten in lengterichting. Hierdoor kan de nok eenvoudig naar beneden worden getrokken waar bij de muren omhoog bewegen. Ineens is binnen buiten geworden, en buiten binnen. Wanneer tuimeldakramen, die gebalanceerd tuimelen, worden opengezet, is er een doorgang van de ene naar de andere zijde van het huis.



Afbeelding 11. Concept van het Binnenstebuiten-huis, een huis waar binnen en buiten gelijk aan elkaar worden (www.kineticart.nl/bbh).

Balanceren van een vierstangenmechanisme

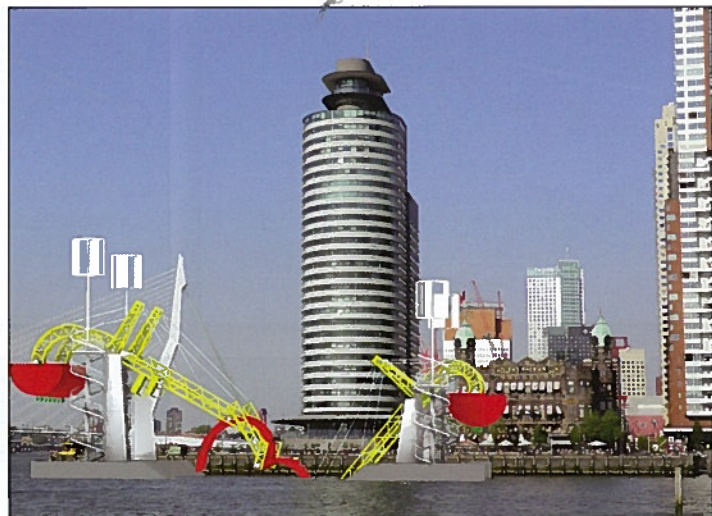
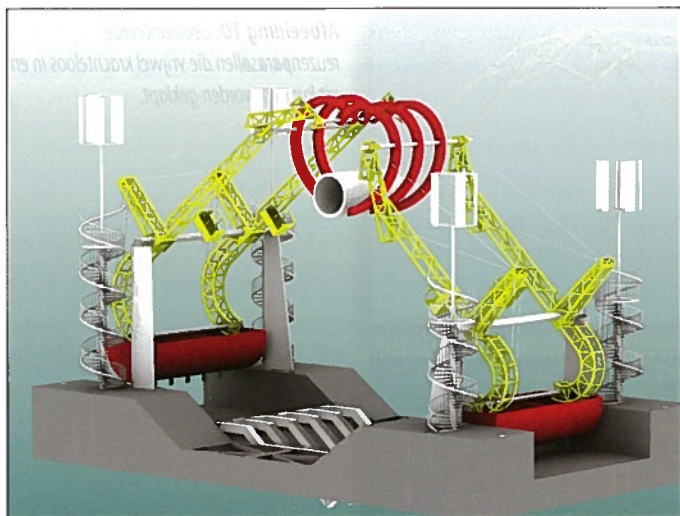


$$\begin{aligned}
 p_1 l_2 m_1 - (l_2 - p_2) l_1 m_2 &= 0 \\
 q_1 l_2 m_1 - q_2 l_1 m_2 &= 0 \\
 p_3 l_2 m_3 - p_2 l_3 m_2 &= 0 \\
 q_3 l_2 m_3 - q_2 l_3 m_2 &= 0
 \end{aligned}$$

Fig. 12. Krachtbalancing van het vierstangenmechanisme van Watt.

Het parallellogrammechanisme waaruit een pantograaf bestaat kan worden gezien als een vereenvoudigd vierstangenmechanisme. Van een generiek vierstangenmechanisme heeft iedere stang een onafhankelijke lengte. Ook deze mechanismen zijn te balanceren, bijvoorbeeld het mechanisme in afbeelding 12. Dit mechanisme is bekend als het rechtgeleidingsmechanisme waarmee James Watt de stoommachine sterk verbeterde. Het middelste punt van de middelste





Afbeelding 13. De Taaie Tiller is een machine die de kijker aanmoedigt de moed nooit op te geven. Windaangedreven tilt de machine een 32-ton wegende last op uit het water, neemt het mee de hoogte in, waar het losraakt, valt en met een grote plons terug in het water komt, waarna de machine het telkens opnieuw probeert (www.kineticart.nl/taaietiller).

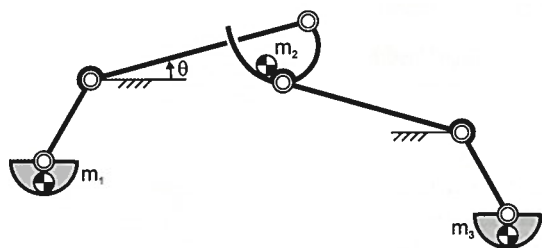
stang beweegt voor een groot gedeelte langs een nagenoeg rechte lijn, waarmee de cilinder van de machine in een rechte lijn kon worden geleid.

Dit Watt-mechanisme is gebruikt in de machine 'de Taaie Tiller' van afbeelding 13, die de auteur in samenwerking met journalist en schrijver H.J.A. Hofland ontwikkelde. Het Watt-mechanisme is opgebouwd uit bouwkraanconstructies die op pilaren rusten die 28 bij 13 meter uit elkaar staan op een drijvend ponton van 40 bij 22 meter. Met grote tanden wordt een 32-ton wegende last (Ø3 m betonnen buis, 6 m lang) uit het water getild en 18 meter omhoog gebracht. Bovenin keren de tanden om waardoor de last loskomt, valt, en met een grote plons in het water terecht komt. De Taaie Tiller is gebaseerd op de mythologie van Sisyphus, de Griekse held die als straf tot in lengte van dagen een rotsblok tegen een helling omhoog moet rollen. Telkens wanneer hij bijna boven is, ongtlipt het hem, het blok rolt naar beneden en hij moet opnieuw beginnen. Deze machine eert Sisyphus als onversaagde optimist die van geen opgeven weet. In plaats van straf en nederlaag, het doorzettingsvermogen en de triomf van de grote plons.

geleegd. Hierdoor daalt het mechanisme waarbij bruisende watervallen duidelijk maken dat de machine te allen tijde zal doorzetten de macht over de last te herpakken. Afhankelijk van de windkracht zal de Taaie Tiller ongeveer één keer per dag plonsen. Samen met de bedrijven Hollandia en Ternet uit Krimpen a/d IJssel en Masévon uit Hardenberg is het de bedoeling de Taaie Tiller in Rotterdam te realiseren en te plaatsen.

Referenties

- [1] Scheiner, C. 1631, *Pantographice, seu ars delineandi res quaslibet per parallelogrammum lineare seu cavum, mechanicum, mobile: libellis duobus explicata, & demonstrationibus geometricis illustrata quorum prior epipedographicen, sive planorum, posterior stereographicen, seu solidorum aspectabilium vivam imitationem atque projectionem edocet.* Rome.
- [2] Scheiner, C. 1653, *Prattica del parallelogrammo da disegnare*, Bologna.
- [3] Menschaar, H. F., Ariens, A. B., Herder, J. L., Bakker, B. M., 2006, *Five-Bar Mechanism With Dynamic Balancing Means And Method For Dynamically Balancing A Five-Bar Mechanism*, Patent number: WO 2006/080846
- [4] Van der Wijk, V., Herder, J.L., 2010, *On the development of low-mass force balanced manipulators*, In: *Jadran Lenarčič, Michael M. Stanisic, Advances in Robot Kinematics, Proceedings of the IFToMM 12th Int. Symposium on Advances in Robot Kinematics*, pg.411-420, Springer, ISBN 978-90-481-9261-8.



Afbeelding 14. Een container gevuld met 120 m³ water wordt aan weerszijde gebruikt als variabele balansmassa om de last te balanceren en om de machine te bewegen.

De Taaie Tiller wordt aangedreven door wind. Wanneer de last moet worden opgepakt uit het water, dan spuiten vier windmolens twee grote containers vol met water, 120 m³ in elke. Deze containers zijn variabele balansmassa's die gebruikt worden om de last te balanceren en omhoog te tillen (afb. 14). Nadat de last bovenin is gekomen en is gevallen, worden de containers

De auteur Volkert van der Wijk is beeldend kunstenaar (www.kineticart.nl) en promovendus aan de Universiteit Twente bij de afdeling Werktuigbouwkundige Automatisering, leerstoel Ontwerp van Mechanismen en Robotica van prof. dr. J.L. Herder. In 2008 won hij de Wim van der Hoek Constructeursprijs voor het beste afstudeerwerk op het gebied van werktuigbouwkundige construeren.