



Waterschap Rivierenland
t.a.v. dhr A.A.Koopal
Postbus 599
4000 AN Tiel

Datum: 23-5-2019

Betreft: Aanvullende advisering/ second opinion op concept eindrapportage Overwaard en effecten op de molens.

Beste mijnheer Koopal,

Op 23-4-2019 is ons rapport toegestuurd waarin we nader ingaan op de gevolgen van een voorgenomen peilverlaging van de Lage Boezem van de Overwaard. Op 13 mei 2019 is dit rapport besproken bij u op het waterschapskantoor. Naast vertegenwoordigers van het waterschap waren hierbij aanwezig vertegenwoordigers van de eigenaar (SWEK, heren Wisse en Sangers) en de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (dhr. Troost).

De algemene uitkomst/ conclusie hierbij was dat onderschreven werd dat het verhogen van de opleiders een positieve invloed zal hebben op het functioneren van de molens bij de voorgenomen peilverlaging van de Lage Boezem. Tevens kwam naar voren dat de invloed van het peil van de Hoge Boezem ook zeer bepalend is voor het functioneren van de molens.

Het rapport vroeg ook om een verduidelijking van het feit dat sommige molens lichter gaan draaien en sommigen het juist zwaarder gaan krijgen. Dit punt zou inzichtelijker moeten worden gemaakt door meer inzicht te geven in de theorie achter de werking van een scheprad. Dit alles resulteerde in een extra uitvraag van onderzoek.

In het aanvullende onderzoek gaan we eerst in op het functioneren van een scheprad, waarom dient een opleider op de juiste hoogte te worden gekozen en wat zijn de invloeden van het lagere Lage Boezempeil op de molens.

Hierbij zijn op verzoek diverse scenario doorgerekend uitgaande van de huidige stand van de Lage Boezem met diverse peilen voor de hoge boezem en de voorgenomen situatie met een lager peil van de Lage Boezem in combinatie met diverse peilen van de Hoge Boezem.

In de rapportage is e.e.a. nader uitgewerkt.



Aanbeveling

Het is duidelijk dat de voorgenomen peilverlaging van invloed is op het functioneren van de molens van de Overwaard. De verlaging zal tot gevolg hebben dat de capaciteit van de molens lager zal worden.

In grote lijnen kan worden geconcludeerd dat wijzigingen in het peil van de Hoge Boezem een veel groter effect heeft op de benodigde windkracht waarop de molens kunnen functioneren dan wijzigingen in het peil van de Lage Boezem.

De molens van de Overwaard zijn op dit moment nog steeds in staat om te functioneren als boezemmolens. De molens hebben zo al bijna 3 eeuwen kunnen functioneren. Dit is een heel belangrijk gegeven. De molens en ook het gehele waterbouwkundige complex van de kinderdijk is beschermd als Unesco Werelderfgoed. Het kunnen functioneren van de molens binnen hun totale context is een belangrijk cultuur-historisch gegeven. Dit punt zou ons inziens dan ook zwaar moeten wegen in de totale afweging van keuze van toekomstige waterpeilen.

Met de peilverlaging van de Lage Boezem is het goed om een gemiddeld peil te kiezen voor de Hoge Boezem die kan voldoen aan de volgende eisen (e.e.a. gezien vanuit de context van de molens en het molencomplex):

- De molens moeten goed kunnen functioneren
- De molens moeten het niet (veel) zwaarder krijgen om te malen dan thans het geval is
- Vanuit de cultuur- historie is het belangrijk dat de molens blijven functioneren als werkende molens die nog steeds water naar de Lek uit kunnen malen, een situatie die al bijna 3 eeuwen in stand is gehouden

Bij de peilverlaging van de Lage Boezem kunnen de molens blijven functioneren wanneer de opleiders zullen worden verhoogd. Wanneer dit niet gebeurt zal het scheprad wel rond draaien maar dan heel weinig water uitmalen.

De keuze van het gemiddelde peil van de Hoge Boezem is van belang. **Bij een keuze van 0,20 plus NAP** zullen de molens het vaak erg zwaar krijgen. Er zal dan veel wind nodig zijn om de molens te laten functioneren en **de hoeveelheid potentiële maaldagen neemt af.**

Bij een keuze van 0,20 min NAP krijgen de molens het makkelijker dan nu het geval is 9 wanneer ook de opleider wordt verhoogd, anders blijft de situatie gelijk). Echter in dat geval zal er vrijwel geen sprake zijn van het effectief water uit kunnen malen op de Lek. **De functie van de molens zoals deze drie eeuwen heeft bestaan komt dan feitelijk ten einde, de**



molens komen dan in een soort rondmaalcircuit te staan, een cultuur historisch grote aantasting.

Bij een keuze van NAP is een goed compromis te bereiken. Samen met de hogere opleiders die per molen op een juiste hoogte moeten worden gedimensioneerd zullen de molens het niet veel zwaarder krijgen dan nu het geval is.

Bij dit peil zijn de molens nog steeds instaat om water uit te malen richting de Lek. Hiermee zal dan ook de historische maalfunctie van eeuwen kunnen worden gewaarborgd.

Gevolgen voor de molens.

Bij een verlaging van de Lage boezem met 15 centimeter tot 0,90 min NAP en een gemiddelde waterstand van de Hoge Boezem van NAP moeten de volgende aanpassingen aan de opleiders worden uitgevoerd om de molens ook in de toekomst goed te laten functioneren. (in het rapport **Peilverlaging Lage Boezem Overwaard, effecten op het functioneren van acht monumentale boezemmolens, april 2019** is e.e.a. meer tot in detail uitgewerkt)

Peil Hoge Boezem waarbij de molens efficiënt malen bij een peil lage boezem min 0,90 min NAP en peil hoge boezem NAP gemiddeld		
Molen	Drempelhoogte thans t.o.v. NAP	Te laag [cm]
1	-0,975	34
2	-0,930	38
3	-0,970	45
4	-0,730	23
5	-0,940	37
6	-1,060	36
7	-1,050	29
8	-0,620	0

Bij zeven molens zijn aanpassingen van de opleiders en bijbehorende wachtdeuren noodzakelijk. De opleider van molen 8 is in het verleden al eens verhoogd. Daar hoeft niets aan te gebeuren. Deze aanpassingen lopen van 23 centimeter tot 45 centimeter. Het verschil komt doordat in het verleden de molens zijn verzaakt, of dat bij aanpassingen aan het scheprad de tating is gewijzigd.

Bij het gemiddelde Hoge Boezempeil zullen deze aanpassingen zich onder water bevinden en dus niet zichtbaar zijn. De aanpassingen zijn reversibel. Er zal naar onze mening dan ook geen sprake zijn van een aantasting van de cultuur historisch waarde. Juist door de aanpassing zal



de cultuur historische waarde van de gehele molen en het werkende molencomplex behouden kunnen blijven bij de voorgenomen wijzigingen van waterpeilen.

Wanneer consensus wordt verkregen over de toekomstige voorgenomen waterpeilen wordt geadviseerd om per molen een plan op te stellen dat dan ook kan worden gebruikt voor een eventuele vergunningsprocedure.

Hoogachtend,

Ing. G.J. van Reeuwijk



Bijlage: Samenvatting en aanvullingen op het rapport Peilverlaging Lage Boezem Overwaard, effecten op het functioneren van acht monumentale boezemmolens

Aanleiding

In het rapport Peilverlaging Lage Boezem Overwaard, effecten op het functioneren van acht monumentale boezemmolens, april 2019 over de gevolgen van de voorgestelde peilverlaging van de Lage Boezem van de Overwaard voor het maalgedrag van de molens is vrij uitputtend de werking van schepraders uit de doeken gedaan.

Toch blijkt bij de bespreking ervan op 13 mei 2019 dat het op punten niet duidelijk genoeg is geweest, omdat sommige conclusies bevreemding blijken op te wekken.

Met name de gewenste hoogte van de opleider en het benodigde vermogen, voor het hoger brengen van een hoeveelheid water, lijken verwarring te geven. Er was behoefte aan een nadere uitleg van de effecten die optreden bij het veranderen van de waterpeilen bij het functioneren van een traditioneel door molens aangedreven scheprad.

Ook was er de behoefte om extra berekeningen uit te laten voeren naar de effecten van de voorgenomen peilverlaging Lage boezem met diverse mogelijke peilen van de Hoge Boezem. Deze rapportage gaat op bovengenoemde punten nader in en kan als zodanig worden beschouwd als een aanvulling op de eerder genoemde rapportage.

Conclusies

- Bij een goed ontworpen scheprad moet de opleider even hoog zijn als de opvoerhoogte. (gemeten t.o.v. het polderpeil)
- Als zowel het bovenwater als het benedenwater evenveel stijgen of dalen blijft de opvoerhoogte gelijk en blijft de hoogte van de opleider (eenmaal goed gekozen) juist.
- Wanneer alleen het bovenwater of het benedenwater stijgt of daalt, is er sprake van een andere opvoerhoogte en is er ook een andere hoogte van de opleider vereist.
- Dergelijke wijzigingen vereisen eigenlijk een verstelbare opleider, maar in het geval van de molens van de Overwaard kan worden volstaan om de hoogte van de opleider gelijk te maken aan de *gemiddelde* opvoerhoogte.
- De voorgestelde peilverlaging van de Lage Boezem geeft een grotere opvoerhoogte en maakt dus een hogere opleider (in de meeste gevallen) noodzakelijk.
- Van zeven molens is de opleider thans lager dan de opvoerhoogte. Bij gelijk blijven van het peil van de Hoge Boezem wordt deze fout groter en wanneer het peil van de Hoge Boezem evenveel zou dalen als het peil van de Lage Boezem blijft deze fout hetzelfde.
- **Peilverlaging van de Hoge Boezem heeft tot gevolg dat de molens het gemakkelijker gaan doen, maar de kans dat ze dan echt kunnen meehelpen om water van de Lage Boezem in de Lek te krijgen wordt daarmee kleiner. Dit was**



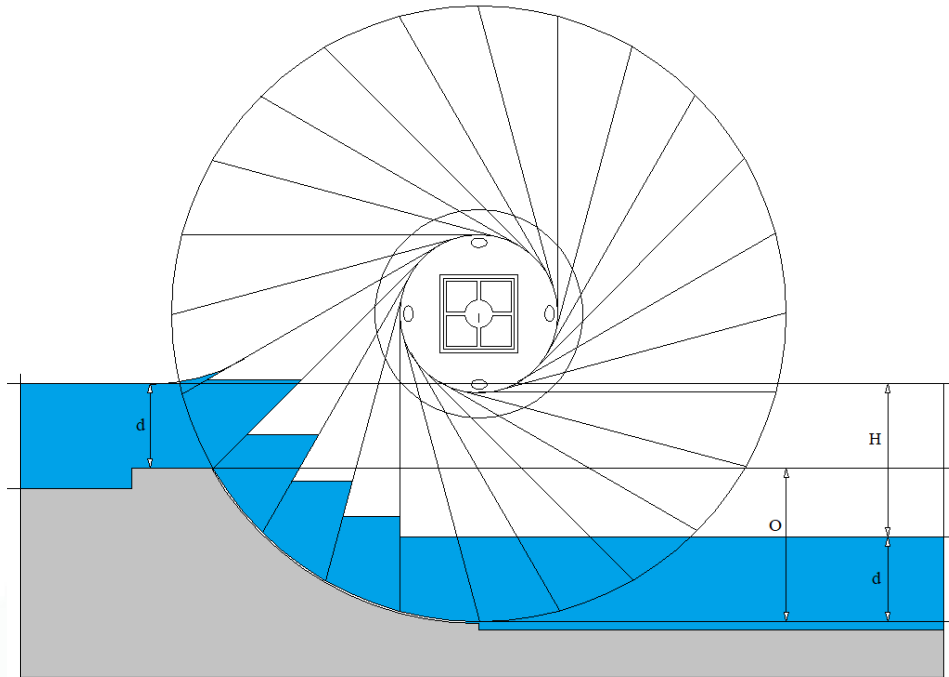
nu juist de meerwaarde van de molens van de Overwaard tegenover die van de Nederwaard. Mede uit cultuur- historisch oogpunt lijkt het belangrijk dat dit verschil zichtbaar zal blijven.

- Peilverlaging van de Lage Boezem heeft vooral tot gevolg dat de molens minder water gaan geven.
- De verminderde opbrengst heeft enerzijds als effect dat de molens het lichter krijgen, maar de grotere opvoerhoogte heeft aan de andere kant als effect dat ze het zwaarder krijgen. Deze beide effecten heffen elkaar bij de huidige voorgestelde peilen min of meer op; sommige molens krijgen het iets zwaarder en andere iets lichter.
- Dat de peilverlaging niet voor alle molens hetzelfde uitpakt komt vooral doordat het niveau van de onderzijde van de schepraderen (het tastpunt) overal weer anders is en in mindere mate doordat de schepraderen niet overal even groot zijn.
- Voor iedere molen kan worden berekend bij welke tasting het scheprad het meeste vermogen heeft. Voor iedere molen komt hier wat anders uit, maar de verschillen zijn niet heel groot. Bij een hogere stand van de Hoge Boezem wordt deze tasting (waarbij het grootste vermogen optreed) ook groter.
- We zien dan dat in de huidige situatie de molens gemiddeld het meest optimaal werken bij een Hoge Boezempeil van NAP. Bij het verlagen van de Lage Boezem naar 0,90 min NAP zal dat zijn bij een stand van de Hoge Boezem van 0,20 min NAP (dit zonder aanpassing van de opleiders van de molens). Echter in dat geval is uitmalen op de Lek vrijwel niet meer mogelijk.
- Wanneer de Hoge Boezem in de nieuwe situatie met de lagere Lage Boezem op NAP zal worden vastgesteld dan moeten de opleiders gemiddeld circa 23 cm worden verhoogd. Bij een gemiddelde stand van de Hoge Boezem op 0,20 plus NAP moeten de opleiders dan 43 cm worden verhoogd. Dit komt dan vrijwel overeen met de huidige hoogte van de opleider van molen nr 8.
- **In grote lijnen kan worden geconcludeerd dat wijzigingen in het peil van de Hoge Boezem een veel groter effect heeft op de benodigde windkracht dan wijzigingen in het peil van de Lage Boezem.**
- Het bepalen van de windkracht, nodig voor het openen van de wachtdeuren, is alleen mogelijk wanneer er van iedere molen en van ieder scheprad een grafiek wordt gemaakt waar de draaisnelheid wordt uitgezet tegen het door het wiekenkruis geleverde moment en van het door het scheprad gevraagde moment. Hiervoor zullen zeer veel metingen nodig zijn.
- Om iets te kunnen zeggen over de effecten van de peilverlaging zijn deze grafieken helemaal niet nodig, want bepaald kan worden of de molen het zwaarder of lichter krijgt door de opbrengst te vermenigvuldigen met de opvoerhoogte. Een groter getal geeft aan dat er meer wind nodig is en een kleiner getal geeft aan dat er minder wind nodig is.



Toelichting op de berekeningen van de effecten van de peilwijzigingen op het maalgedrag van de molens van de Overwaard.

Hoogte opleider



Figuur 1 Een scheprad in werking. Merk op dat het oppervlak van het water tussen de schoepen in ieder vak even groot is. *D rechts (lage peil) is gelijk aan d links (hoge peil). H is de opvoerhoogte. O is de hoogte van de opleider boven de onderzijde van het scheprad.*

Van groot belang is dat wordt begrepen wat de invloed is van de opleider bij het functioneren van een scheprad.. De stroomsnelheid van het water in het scheprad wordt gedictieerd door de snelheid van het scheprad zelf. Omdat het tijd kost om een massa water te versnellen of te vertragen kan worden aangenomen dat de stroomsnelheid van het water, even voor en even na het scheprad, niet veel zal verschillen met de snelheid van het water in het scheprad zelf. Omdat er altijd evenveel water in als uit het scheprad gaat volgt hieruit dat de natte doorsnede van het water vlak voor en vlak na het scheprad even groot moet zijn. Aangezien de krimp daar even breed is volgt daaruit dat de natte doorsneden, voor en na het scheprad, ongeveer even hoog moeten zijn. Met andere woorden: **de hoogte dat het water boven de bovenzijde (drempel) van de opleider staat is even groot als de tassing (d).**

Uit de bovenstaande figuur volgt dan dat de opvoerhoogte (H) even groot is als de hoogte van de opleider (O), want $d+H= O+d$. **Conclusie: De opleider dient even hoog te zijn dan de opvoerhoogte.**

Bij het bouwen van een nieuwe molen is de opvoerhoogte meestal een gegeven. Voor een goed ontwerp hoeft men dus alleen de opleider (O) even hoog te maken als de opvoerhoogte



(H). Als het bovenwater lager staat dan het waterpeil in de figuur zal de molen gemakkelijker op gang kunnen komen, maar eenmaal op toeren wordt het water toch ter hoogte (d) over de drempel geworpen en moet de molen dus met de oude opvoerhoogte werken. De molen profiteert (behalve bij het aanlopen) dus niet van lagere boezemstanden en eigenlijk is de opleider dus te hoog.

Als het bovenwater hoger staat (hoogte van de opleider plus de tasting, $H + d$) wil het bovenwater boven de dan te lage opleider in het scheprad dringen. Het wordt dan steeds door de bladen teruggeworpen en dit gaat gepaard met veel spatten en energieverlies.

Een scheprad komt dan ook het meest tot zijn recht bij een vaste opvoerhoogte. Als de hoogte van de opleider eenmaal goed is gekozen dan blijft deze ook goed bij peilverschillen, mits de peilen boven en beneden evenveel stijgen en dalen, want dan blijft de opvoerhoogte gelijk.

Anders wordt het wanneer alleen het peil van het bovenwater of het benedenwater anders wordt. Dan zou er eigenlijk een verstelbare opleider moeten zijn. Rond 1900 is die dan ook uitgevonden en wel door de waterbouwkundige Hendrik Paul, die er octrooi op kreeg.

Zijn opleider bestond uit een serie horizontaal scharnierende kleppen. Bij laag bovenwater gingen alle kleppen open, maar bij stijgend bovenwater begonnen de onderste kleppen zich te sluiten omdat het water daar terug wilde stromen. De gesloten kleppen gingen zodoende deel uit maken van de opleider. Deze uitvinding heeft weinig navolging gekregen omdat de werking van de kleppen spoedig werd gesaboteerd door opgemalen waterplanten die rond de kleppen bleven hangen. Bovendien werden er toen al niet veel meer nieuwe schepradgemalen gebouwd.

Opleider bij de Overwaard

De gewenste hoogtes van de opleiders (O) zijn dan ook gemakkelijk te bepalen aan de hand van de voorgestelde peilen. Bij een peil van de Lage Boezem van NAP – 0,75 en een peil van de Hoge Boezem van +0,20, NAP, of -0,20 bedraagt de opvoerhoogte en gewenste hoogte van de opleider respectievelijk 0,95 m, 0,75 m en 0,55 m.

Bij een peil van de Lage Boezem van NAP -0,90 worden al deze maten 0,15 m groter, respectievelijk 1,10 m, 0,90 m en 0,70 m.

Gewenste drempelhoogte		LB -0,75 m			LB -0,90 m		
		HB +0,20 m	HB 0	HB -0,20 m	HB +0,20 m	HB 0	HB -0,20 m
Molen 1	-0,975	-0,705	-0,905	-1,105	-0,555	-0,755	-0,955
Molen 2	-0,930	-0,620	-0,820	-1,020	-0,470	-0,670	-0,870
Molen 3	-0,970	-0,586	-0,786	-0,986	-0,436	-0,636	-0,836
Molen 4	-0,730	-0,570	-0,770	-0,970	-0,420	-0,620	-0,820
Molen 5	-0,940	-0,643	-0,843	-1,043	-0,493	-0,693	-0,893
Molen 6	-1,060	-0,770	-0,970	-1,170	-0,620	-0,820	-1,020
Molen 7	-1,050	-0,825	-1,025	-1,225	-0,675	-0,875	-1,075
Molen 8	-0,620	-0,690	-0,890	-1,090	-0,540	-0,740	-0,940
Gem. 1-7	-0,95	-0,67	-0,87	-1,07	-0,52	-0,72	-0,92



We zien dat in de huidige situatie waarbij de lage boezem op 0,75 min NAP staat een voor de molens gunstige situatie bestaat bij een Hoge Boezem die gelijk ligt aan NAP.

Invloed van de wijziging van het peil van de Lage Boezem in relatie tot de verschillende mogelijke peilen van de Hoge Boezem

In bovenstaande kolom is de gewenste hoogte van de opleider van de verschillende molens uitgerekend. Uitgangspunt hierbij is het kiezen van een hoogte waarbij de molen het beste functioneert. Wanneer de opvoerhoogte van het polderwater het beste aansluit op hoogte waarop de molen het water het best kan uitmalen dan zal de molen bij een bepaalde windsnelheid het meest optimaal functioneren. Uit bovenstaande uiteenzetting blijkt dat de molen niet lichter gaat draaien wanneer de opvoerhoogte lager is dan de opvoermogelijkheid van de molen. Echter wanneer de opvoerhoogte hoger zal worden dan de opvoermogelijkheid van de molen dan zal deze zwaarder gaan draaien en toch niet meer water uit gaan malen.

Wanneer we de huidige situatie met hoogte van de opleiders, een peil van de Lage Boezem van 0,75 meter min NAP gaan analyseren bij de drie onderzochte peilen van de Hoge Boezem (0,2 plus NAP, NAP en 0,20 min NAP) dan is de volgende conclusie te trekken (molen nr 8 houden we hier even buiten beschouwing want deze heeft al een aangepaste opleider).

We zien dan dat in de **huidige situatie** de molens **gemiddeld** het meest optimaal werken bij een Hoge Boezempeil van NAP. Bij het **verlagen van de Lage Boezem naar 0,90 min NAP** zal dat zijn bij een stand van de Hoge Boezem van 0,20 min NAP.

Wanneer de Hoge boezem in de nieuwe situatie met de lagere Lage boezem op NAP zal worden vastgesteld dan moeten de opleiders gemiddeld circa 23 cm worden verhoogd. Bij een gemiddelde stand van de hoge boezem op 0,20 plus NAP. Moeten de opleiders dan 43 cm worden verhoogd. Dit komt dan vrijwel overeen met de huidige hoogte van de opleider van molen nr 8.

Vermogen scheprad

De vraag die bij de eerste uitvraag werd gesteld was wat de gevolgen zouden zijn voor de molens door de peilverlaging van 15 cm van de Lage Boezem. De uitkomst was als volgt:

- Alle molens gaan minder water geven.
- Omdat de opvoerhoogte groter wordt moeten ook de opleiders hoger worden.
- Sommige molens krijgen het iets lichter en sommige wat zwaarder. Gemiddeld gezien heeft de peilverlaging niet veel invloed op de benodigde windkracht.

Bij de bespreking van het rapport werd het door sommigen vreemd gevonden dat sommige molens het gemakkelijker gingen krijgen, terwijl de opvoerhoogte groter werd. De verklaring daarvoor is vrij simpel want het nuttig vermogen van een scheprad is gelijk aan het aantal m^3/min maal de opvoerhoogte. Als de opbrengst net zo veel kleiner wordt als de opvoerhoogte groter blijft het vermogen gelijk. Bij een lagere stand van de Lage Boezem wordt de opvoerhoogte groter, maar de tasting van het scheprad, en dus de ook de capaciteit of opbrengst, wordt kleiner. De opbrengst (Q) is gelijk aan: $n \times b \times d \times \pi \times (D-d)$, waarin n het toerental, b de breedte van de krimp, d de tasting en D de diameter van het scheprad. Hij kan



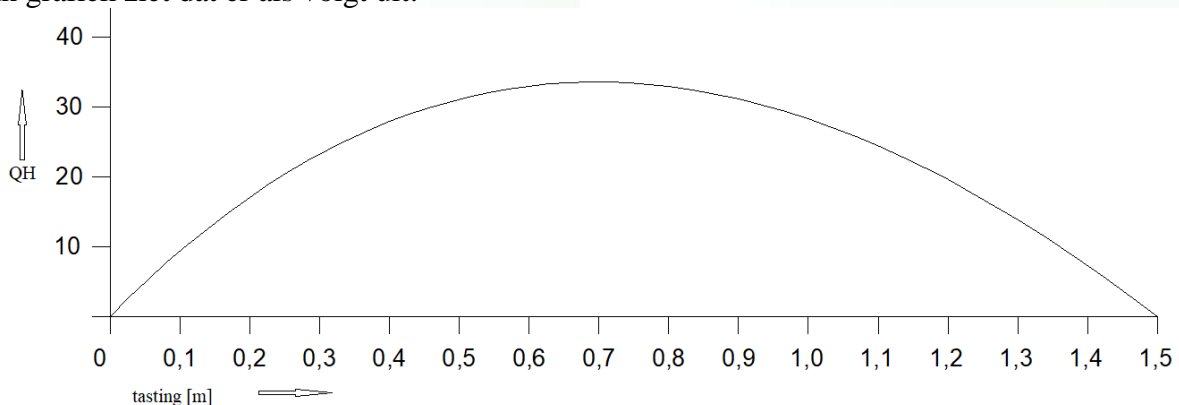
overigens ook worden bepaald uit tekening 1, want het oppervlak van het water tussen twee schoepen kan worden opgemeten. Vermenigvuldigd met de krimpbreedte geeft dit de hoeveelheid water in 1 vak. Omdat er 24 vakken zijn wordt er per omwenteling 24 maal deze hoeveelheid opgebracht. Bij gelijk toerental is Q dus alleen afhankelijk van d. Ook de opvoerhoogte is een functie van d, zodat het vermogen ($=Q \times H$) ook een functie is van d.

Wanneer het benedenwater zo laag staat dat een scheprad net droog staat is de opvoerhoogte maximaal. Als we deze opvoerhoogte Z noemen, is Z dus gelijk aan het hoogteverschil tussen het bovenwater en het tastpunt van het scheprad. Bij stijgend benedenwater neemt de tasting (en dus de opbrengst) toe en zal de opvoerhoogte kleiner worden. Stel dat $Z = 1\frac{1}{2}$ m, $n = 6$ omwentelingen/minuut, $b = 0,6$ m en $D = 6$ m dan kan de volgende tabel worden gemaakt:

Tasting (d) [m]	Opbrengst (Q) [m ³ /min]	Opvoerhoogte (H)= Z-d [m]	Vermogen (P)= Q×H
0	0	1,5	0
0,1	6,67	1,4	9,34
0,2	13,12	1,3	17,06
0,3	19,34	1,2	23,21
0,4	25,33	1,1	27,87
0,5	31,10	1,0	31,10
0,6	36,64	0,9	32,98
0,7	41,96	0,8	33,56
0,8	47,05	0,7	32,94
0,9	51,91	0,6	31,15
1,0	56,55	0,5	28,27
1,1	60,95	0,4	24,38
1,2	65,14	0,3	19,54
1,3	69,10	0,2	13,82
1,4	72,83	0,1	7,28
1,5	76,34	0	0

Te zien is dat het nuttig vermogen bij de maximale opvoerhoogte ($=Z$) eerst nul is omdat de tasting (en daarom de opbrengst) dan nul is. Bij de bij maximale tasting ($=Z$) en opbrengst is het vermogen weer nul wordt omdat de opvoerhoogte nul is.

In grafiek ziet dat er als volgt uit:





De formule voor Q×H is $P = n \times b \times d \times \pi \times (D-d) \times (Z-d)$. Voor het bepalen van het maximale vermogen is hiervan alleen het deel $d(D-d)(Z-d)$ van belang. $d(D-d)(Z-d) = dDZ - Dd^2 - Zd^2 + d^3 = d^3 - (D+Z)d^2 + DZd$. De waarde van d, waarbij QH maximaal wordt, kan worden gevonden door de eerste afgeleide van deze functie gelijk aan nul te stellen $\rightarrow 3d^2 - 2(D+Z)d + DZ = 0$. De oplossing kan met de a,b,c-formule worden gevonden: $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$; a is gelijk aan 3, $b = 2(D+Z)$ en $C = DZ$. In dit voorbeeld is de tasting waarbij QH maximaal wordt gelijk aan $d = \frac{15 - \sqrt{117}}{6} = 0,697$ m. Dit geldt alleen voor dit voorbeeld, maar voor iedere molen van de Overwaard is een tasting te bepalen waarbij het nuttig vermogen maximaal is. Voor de bepaling van dit maximum moet Z bekend zijn = de stand van de Hoge Boezem ten opzichte van de onderzijde van het scheprad. Bij iedere andere stand van de Hoge Boezem is Z daarom weer anders en de tasting waarbij QH maximaal wordt dus ook. In de onderstaande tabel staat voor drie verschillende peilen van de Hoge Boezem aangegeven bij welke tasting het product QH maximaal wordt, met daarachter vermeld bij welke stand van de Lage Boezem die tasting zal optreden.

Tasting waarbij QH maximaal is.								
Molen	Tastpunt	Diameter scheprad	HB +0,20	LB	HB NAP	LB	HB -0,20	LB
1	-1,655	6,60	0,853	-0,802	0,769	-0,886	0,683	-0,972
2	-1,570	6,60	0,818	-0,752	0,733	-0,837	0,646	-0,924
3	-1,536	6,56	0,803	-0,733	0,718	-0,818	0,630	-0,906
4	-1,520	6,50	0,796	-0,724	0,710	-0,810	0,623	-0,897
5	-1,593	6,62	0,828	-0,765	0,743	-0,850	0,656	-0,937
6	-1,720	6,60	0,880	-0,840	0,797	-0,923	0,711	-1,009
7	-1,775	6,58	0,902	-0,873	0,820	-0,955	0,735	-1,040
8	-1,640	6,62	0,956	-0,684	0,763	-0,877	0,677	-0,963

Zoals viel te verwachten wordt de tasting waarbij QH maximaal wordt bij een lagere stand van de Hoge Boezem kleiner. Voor iedere molen wordt deze tasting weer bij een andere stand van de Lage Boezem bereikt. Dit komt alleen doordat de diameters van de schepraderen niet overal gelijk zijn en vooral doordat de onderzijde van de schepraderen (tastpunt) ten opzichte van NAP overal verschillend is.

Stand Hoge Boezem

De stand van de Hoge Boezem heeft veel meer impact op de molens dan de stand van de Lage Boezem. Als het peil van de Lage Boezem hoger wordt dan wordt de opbrengst groter, maar de opvoerhoogte kleiner. Andersom wordt bij een lager peil de opbrengst kleiner en de opvoerhoogte groter zodat QH niet veel verandering zal ondergaan.

De stand van de Hoge Boezem heeft geen gevolgen voor het aantal m³/omwenteling van de schepraderen, maar wel voor de opvoerhoogte. Hoe hoger deze boezem des te zwaarder de molens het krijgen en hoe lager des te lichter. De laatste jaren kwam de gemiddelde stand volgens het waterschap ongeveer overeen met NAP. **Bij een lager peil krijgen de molens het lichter, maar de kans dat de molens dan daadwerkelijk in de Lek kunnen uitmalen kleiner. Het zal dan meer een rondmaalcircuit worden zoals bij de Nederwaard. Het**

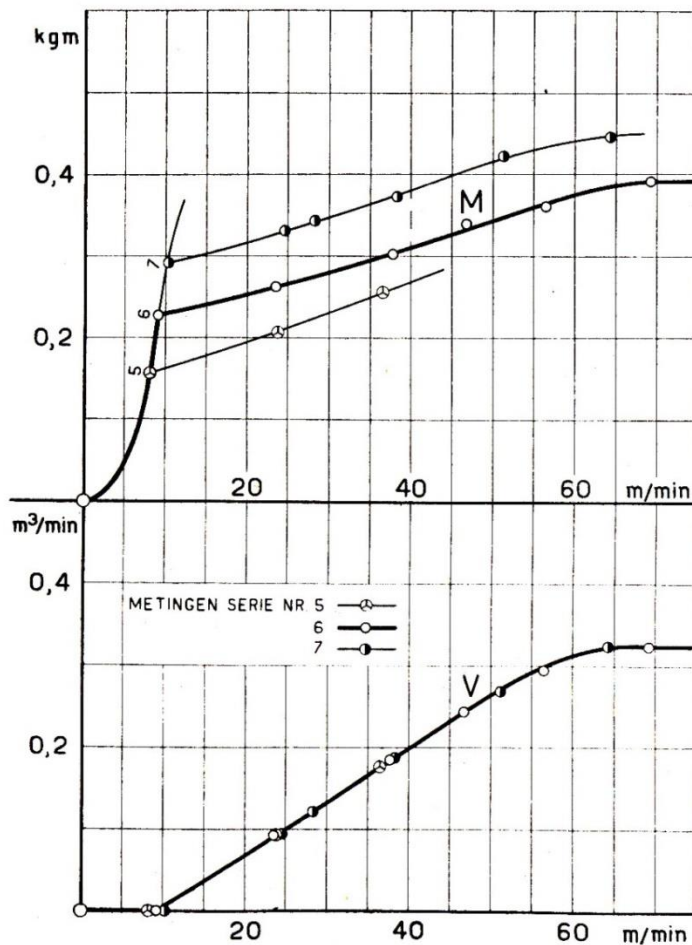


bijzondere van de molens van de Overwaard was nu juist dat ze nog daadwerkelijk mee konden helpen. Dit wordt vanuit historisch oogpunt dan ook cultuur-historisch als zeer waardevol geacht. Alle reden dus om het bestaande regime te handhaven.

Windsnelheid

Vanuit de stichting Werelderfgoed kwam de vraag bij welke windsnelheid de wachtdeuren open gaan. Deze vraag is vanachter het bureau niet te beantwoorden. De energie voor een bepaalde QH moet uiteindelijk door de wind worden geleverd, dus als QH groter wordt zal er ook meer wind nodig zijn. Wel kan worden aangeven of QH groter of kleiner zal worden bij een bepaalde peilverlaging en dat is in het rapport gedaan, want dat moest de gevolgen van de peilverlaging in kaart brengen. Omdat het oude peil en het voorgestelde peil rond het omslagpunt fluctueerde waren de gevolgen niet erg groot. Bij de ene molen nam QH iets toe en bij de andere nam het iets af. De grootste verandering was er in gelegen dat de molens veel minder water gingen geven.

In het verleden zijn er wel diverse proeven gedaan met schepradersen, die ons wat kunnen leren over het gedrag ervan.



Figuur 2 *Verband tussen de omtreksnelheid van een scheprad, de opbrengst en het daarvoor benodigde moment bij drie verschillende peilen van het bovenwater.*

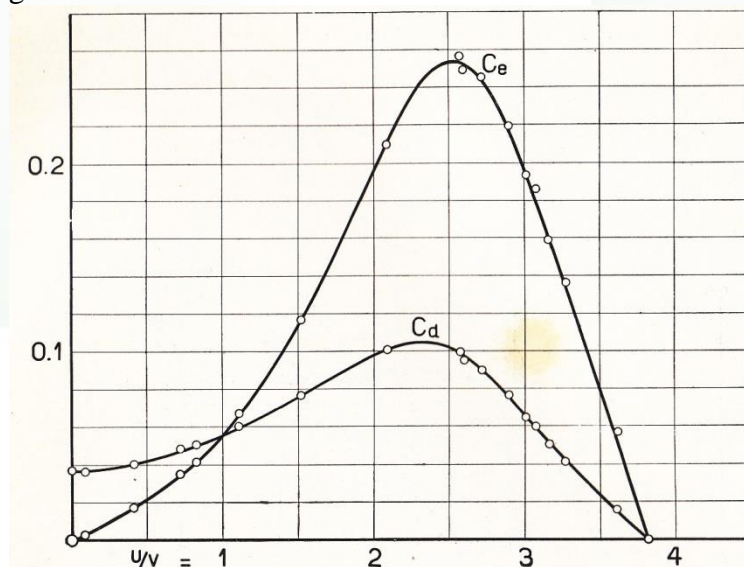
Door ir. A. Havinga zijn er op de T.H. te Delft proeven gedaan met een schepradmodel. De resultaten daarvan werden in 1935 gepubliceerd in een boekje, waaruit de bovenstaande



grafiek afkomstig is. Bij de metingen 5, 6 en 7 werd het peil van het bovenwater steeds iets verhoogd, terwijl de stand van het benedenwater gelijk werd gehouden. De onderste grafiek geeft de opbrengst van het scheprad weer. Zoals valt te zien is de opbrengst niet afhankelijk van de stand van het bovenwater. Pas bij een omtreksnelheid van 10 m/minuut gaat de wachtdeur open en gaat het scheprad hier water geven. Het aantal m^3/min neemt eerst evenredig toe met het toerental, maar boven een omtreksnelheid van ongeveer 60 m/min neemt de opbrengst niet langer toe en blijft min of meer gelijk.

De stand van het bovenwater heeft veel invloed op de opvoerhoogte en dus op het moment. Zolang de wachtdeur dicht blijft blijkt een scheprad opeens een heel ander werktuig, vergelijkbaar met een waterrem. De kromme die vanuit het nulpunt vertrekt lijkt daarbij wel wat op die van een centrifugaalpomp; het moment neemt met het toerental sterk toe. Zodra de wachtdeur open gaat neemt het moment (= wringing in de as) nog maar langzaam toe. Zoals te verwachten was gaat de wachtdeur bij hoger bovenwater later open, maar de extra snelheid die hier voor nodig is blijkt niet zo groot te zijn. Veel groter is het extra moment dat bij een hoger peil nodig is. Het moment wordt vooral bepaald door de hoeveelheid water in het scheprad en is dus niet zo afhankelijk van het toerental. De toename van het moment wordt vooral veroorzaakt door het uitstroomverlies, dat evenredig is met het kwadraat van de stroomsnelheid.

Het benodigde moment om het scheprad aan te drijven moet uiteindelijk door de wind worden geleverd. Het effect van de wind op de molen kan weer zichtbaar worden gemaakt met een grafiek.



Figuur 3 Verloop van het moment (C_d) en vermogen (C_e) van een molenmodel in een windtunnel.

De bovenste grafiek komt uit het Prinsenmolenboek. Het gaat hier om een proef in een windtunnel met een schaalmodel van een molen. Bij metingen in de praktijk waren de resultaten overigens beduidend slechter, maar het gaat hier even om het principe. Om de resultaten van het model voor grotere molens bruikbaar te maken is hier gewerkt met coëfficiënten voor het moment (C_d) en voor het vermogen (C_p). Op de horizontale as is de verhouding tussen de omtreksnelheid van het wiekenkruis met de windsnelheid uitgezet.



Zoals valt te zien is het vermogen bij stilstand nul, want er wordt nog niets gedaan. Wel oefenen de vier wieken dan een moment uit op de bovenas, dat dan door de vang moet worden opgenomen. Zodra de vang er af gaat neemt de snelheid van de molen toe en ook het moment. Zoals in figuur 2 valt te zien neemt het moment dat het scheprad dan vraagt ook toe. Het grootste (wiekenkruis)moment wordt hier bereikt met een omtreksnelheid die ongeveer 2,3 maal zo groot is als de windsnelheid. Beide momenten zou men in één grafiek kunnen tekenen want de snelheidstoename van het scheprad en wiekenkruis zijn even groot. Als de momentenlijn van het scheprad steiler is dan die van het wiekenkruis dan zullen ze elkaar kruisen, voordat het grootste wiekenkruismoment is bereikt. De molen zal dan van de gang vallen (tot stilstand komen). Mocht de molen door een windvlaag toch een u/v bereiken $> 2,3$ dan wordt de gang stabiel. Dat wil zeggen dat wanneer de belasting iets gaat afnemen door bijvoorbeeld dalend waterpeil, het wiekenkruis dan sneller gaat draaien. Zoals in de grafiek valt te zien wordt door het snellere draaien het moment dat wordt geleverd door het wiekenkruis kleiner. Als het moment even groot is geworden dan het moment dat het scheprad vraagt is er weer evenwicht bereikt. Wordt de belasting van het scheprad groter door bijvoorbeeld stijgend waterpeil dan gaat het wiekenkruis langzamer draaien en neemt het moment van het wiekenkruis weer toe totdat er weer evenwicht is bereikt. Kleine variaties in de belasting worden dus opgevangen door het sneller of langzamer malen van de molen.

Zodra u/v echter kleiner is geworden dan 2,3 wordt de gang onstabiel en zal een iets grotere belasting tot gevolg hebben dat de molen tot stilstand komt. Om weer aan de goede kant van de “bult” te komen is meestal een flinke windvlaag nodig. Dit verklaart waarom er om op gang te komen vaak veel meer wind nodig is dan om aan de gang te blijven.

Voor de molens van de Overwaard is pas te bepalen bij welke windsnelheid de wachtdeur open gaat als beide grafieken beschikbaar zijn. Deze kunnen pas verkregen worden door uitgebreide metingen. Om te voorspellen of de molens door een peilverlaging lichter of zwaarder gaan malen zijn ze echter niet nodig.