

Memo

Aan
Zjev Ambagts (prov. Zuid-Holland)

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
16 september 2015	1221102-000-ZKS-0003	7
Van	Doorkiesnummer	E-mail
Frank Kleissen	+31(0)88335 8291	frank.kleissen@deltares.nl

Onderwerp
Toetsing hydraulisch rekenmodel.

Toetsing hydraulisch rekenmodel van de Getijturbines Brouwersdam

1 Inleiding

Naar aanleiding van de vraag vanuit de provincie Zuid-Holland en Rijkswaterstaat¹ heeft Deltares een analyse uitgevoerd van het hydraulisch rekenmodel dat door Pro-Tide-NL is ontwikkeld. Het hydraulisch rekenmodel heeft de vorm van een Excel spreadsheet en berekent de debieten door de turbines van de geplande getijcentrale in de Brouwersdam en de daaruit voortvloeiende waterstandvariaties in het Grevelingen. Tijdens de analyse is ook gebruik gemaakt van het document waarin de rekenmethode in detail is uitgewerkt ten behoeve van het ontwerp van de turbines².

Het doel van deze analyse is het toetsen van het rekenmodel met daarbij de centrale vraag of, en zo ja in welke mate, het rekenmodel van toepassing is voor deze case.

Het rekenmodel is op 3 september 2015 aangeleverd door Jacob van Berkel van Pro-Tide-NL (*TPP_Br'dam_Annual_Energy_Calc_V4(10min&turbmodel).xls*)

2 Analyse van het rekenmodel

2.1 Invoer parameters van het rekenmodel

Het rekenmodel bestaat uit 1 spreadsheet. De belangrijkste modelparameters en bijbehorende waarden zijn:

¹ 1221102-000-ZKS-0002-e-Toetsing hydraulisch rekenmodel.msg

² Meijnen, R., and Arnold, J., (2015) TPP-Brouwersdam: Conceptual Design and Comparison of Two Propeller Turbine Configurations Report version 03-09-2015

Datum
16 september 2015

Ons kenmerk
1221102-000-ZKS-0003

Pagina
2/7

# turbines	24
Turbine eff.	80%
Gate close @ >	3.7
Gate close @ <	-44.6
Upper test-mark	5
Lower test-mark	-45
Turbine degree of reaction f	0.67
Conduit loss coefficient	1.25
Max. Turb.Power	2355

Van het aantal turbines (*# turbines*), *Gate close/open* zijn voor elke variabeel twee opties meegegeven die als mogelijke waarden in te voeren zijn.

De *Upper test-mark* en *Lower test-mark* zijn waterstandscriteria waar de waterstand in de Grevelingen aan moeten voldoen. Deze criteria zijn afkomstig van de Topeisen Peilbeheer Grevelingenmeer (concept 15 januari 2015). Deze specificeren een gemiddelde verticale getijslag van 50cm, een gemiddelde waterstand van -0.2mNAP, waarbij afwijkingen naar boven tot 0.1 NAP en naar beneden tot -0.5 mNAP 5% de tijd zijn toegestaan.

De *conduit loss coefficient* en de *maximum turbine power* hebben beide twee mogelijke waarden. Uit het document blijkt dat deze beide waarden gekoppeld zijn aan het type turbine dat wordt doorgerekend (Duct of Venturi).

Vervolgens zijn er een aantal onafhankelijke variabelen die dienen als input van het model.

Nsea Water level (in cm): dit is de waterstand in de Noordzee, dus buitengaats van de Brouwersdam. In de begeleidende mail van Jacob van Berkel staat dat dit metingen betreft van Brouwershavense Gat. De tijdreeks dekt een periode van 365 dagen (2009). Deze gegevens zou voldoende nauwkeurig moeten zijn. Niet kan worden beoordeeld of dit een 'typisch' jaar is en representatief voor een langjarig gemiddelde situatie.

Decade: Dit is het expliciete tijdstap nummer.

Day : deze lopende tijd is afgeleid van Decade en is gespecificeerd als $\text{Decade}/(24 \cdot 6)$, dus dit betekent een tijdstap van 10 minuten. Deze tijdstap kan niet in het spreadsheet worden veranderd omdat de tijdreeksen van de waterstanden van de Noordzee ook per 10 minuten zijn gegeven. Dit betekent ook dat een tijdstap onderzoek in dit kader niet kan worden uitgevoerd en het effect van de tijdstap op de resultaten niet worden bepaald.

2.2 Waterstandcriterium

De waterstand in de Grevelingen wordt berekend aan de hand van een waterbalans. Met een eventueel verhang wordt geen rekening gehouden. Het spreadsheet test vervolgens of de berekende waterstand in de Grevelingen voor de periode van 365 dagen binnen de criteria van maximaal 5 en minimaal -45 cm blijft of niet. Waterstanden buiten dit criterium zijn 5% van de tijd toegestaan. Het percentage van de tijd waarbij de berekende waterstand hoger dan 5 of lager dan -45 cm is wordt berekend aan de hand van het aantal tijdstappen waarbij dit het geval is. Volgens het rekenmodel komt dit zo'n 5% van de tijd voor. In het rekenmodel is het criterium voor sluiten 3.7 en -44.6 cm respectievelijk, maar als de schuiven volgens het model op dat moment sluiten kan in theorie de waterstand in het model nooit boven het gestelde criterium uit komen. Dat dit toch gebeurt heeft te maken met de expliciete tijdstap. Immers, zodra het model een waterstand uitrekent die buiten dit criterium valt wordt het debiet door de

turbine op nul gezet en kan de waterstand niet verder veranderen. Het laatste debiet dat is uitgerekend voordat de schuiven sluiten werken nog wel door gedurende de rekentijdstap waardoor de waterstand buiten het waterstandcriterium kan vallen. Hoe groter de tijdstap hoe groter dit effect op de waterstand.

2.3 Berekening van de waterstand in het Grevelingen

Een van de belangrijkste berekening die in het spreadsheet wordt uitgevoerd is de vergelijking die de waterstand in de Grevelingen uitrekent. Hiervoor wordt de volgende vergelijking gebruikt (rechtstreeks uit het spreadsheet model afgeleid):

Voor de cell D20:

$D19 + 100 * B\$1 * K19 * 600 / 110000000$

D19 is de waterstand van de vorige tijdstap (in cm)

B1 is het aantal turbines en K19 de Gate flow (dat is het debiet in m³/s, van de vorige tijdstap).

Het getal 600 komt overeen met de tijdstap in secondes. En 110000000 is het aangenomen wateroppervlak van de Grevelingen. Dit komt overeen met 110 km² (omgewerkt tot m²). Het wateroppervlak van de Grevelingen wordt door Vrijling et al (2008)³ gerapporteerd als 117km² bij een waterstand op NAP. Ook wordt 10800 ha. wel gehanteerd als wateroppervlak (Factsheet-Grevelingenmeer). Het wateroppervlak is afhankelijk van de waterstand en daar is in de berekeningen geen rekening mee gehouden. Dit betekent dat de nauwkeurigheid van de verandering van het wateroppervlak met de tijd tot ongeveer 6% kan oplopen. Het debiet door de turbines is evenredig met de wortel van het waterstandsverschil hetgeen betekent dat de nauwkeurigheid van het debiet door de turbines hierdoor ongeveer maximaal zo'n 3% is.

In de waterbalans wordt ook geen rekening gehouden met de instroom van zoetwater. Volgens Nolte (2010) is de afstroming vanuit de polders ongeveer 0.4 m³/s. Volgens het rekenmodel stroomt er tot ongeveer 100 m³/s water per turbine, dus in totaal 2400 m³/s, hetgeen betekent dat de fout die gemaakt wordt door de instroom vanuit de omliggende polders niet mee te nemen verwaarloosbaar is. Dit geldt ook voor de verdamping en neerslag die ook in de orde van millimeters per dag bedragen.

Het rekenmodel gaat er ook van uit dat alle veranderingen ten gevolge van de instroom en uitstroom zonder vertraging optreden. De getijgolf heeft echter wel een bepaalde snelheid waardoor waterstandsverschillen kunnen optreden. Die voortplantingssnelheid kan worden uitgerekende door \sqrt{gh} (g de valversnelling, 9,81 m/s² en h de waterdiepte in m). De gemiddelde waterdiepte in de Grevelingen is ongeveer 5,4 m en dat levert een voortplantingssnelheid op van ongeveer 7 m/s. Bij een aangenomen lengte van de Grevelingen van 23 km geeft dit ongeveer 50 minuten reistijd. Als de getijslag (dubbeldaags getij) in de Grevelingen 50cm (bij de Brouwersdam) is geeft dit gemiddeld een waterstandsverhoging/verlaging van ongeveer 8.5 cm/uur. Dat betekent dat gedurende de 50 minuten het waterstandsverschil tussen het westen en oosten tot ongeveer 7cm kan oplopen (hierbij zijn factoren als windopzet, reflectie van golven niet meegenomen). De Topeisen zijn gerelateerd aan de waterstand in het midden van de Grevelingen (locatie meetpaal BOM1) en op dat punt kan het waterstandsverschil met het westen en oosten van het meer maximaal

³ Vrijling, J.K., van Duivendijk, J., Jonkman, S.N., Gilles, A. en Mooyaart, L.F., Getijcentrale In De Brouwersdam: een verkennende studie, Concept Eindrapport, mei 2008, TU Delft

ongeveer 3.5 cm zijn. Wel is het zo dat het midden representatief is voor de gemiddelde waterstand in de Grevelingen waardoor vergelijken met de waterstandscriteria wel is gerechtvaardigd en de verschillen met de door de kombergingsaannname berekende waterstand maximaal enkele centimeters zijn.

De eenheid van het tweede deel van de vergelijking is $(\text{m}^3/\text{s}) \cdot (\text{sec}/\text{tijdstep})/\text{m}^2$, hetgeen overeenkomt met meter per tijdstep. De factor 100 die is toegevoegd rekent het aantal meters om in cm.

Of the schuif dicht of open staat wordt bepaald door:

J19: schuif dicht (FALSE/TRUE), als deze TRUE is dan betekent dat J19=1, dus dan is de flow = 0. Of de schuif open of dicht staat wordt bepaald door :

$\text{OR}(\text{AND}(\text{D27} > \$B\$3, \text{A27} > \text{D27}), \text{AND}(\text{D27} < \$B\$4, \text{A27} < \text{D27}))$

D27 = waterstand in de Grevelingen

A27 = Nsea , de waterstand in de Noordzee (vanuit de gegeven tijdreeks bij Brouwershavense Gat).

\$B\$3= waterstand verschil waarboven sluiting plaatsvindt (nu 3.7 cm)

\$B\$4= waterstand waar beneden schuif ook dicht staat. (nu -44.6 cm)

Dus als de waterstand in de Greveling hoger is dan het hoogste sluitingscriterium en de waterstand van de Noordzee is hoger dan die in de Grevelingen, dan sluit de schuif en wordt het debiet 0. Het tweede deel geeft ook TRUE (dus schuif dicht) als de waterstand in de Grevelingen lager is dan het laagste sluitingscriterium (hier -44.6 cm) en de waterstand in de Noordzee lager dan die in de Grevelingen. Als een van beide TRUE is (of beide, maar dat laatste is niet mogelijk) dan is het hele resultaat TRUE en is de schuif dus dicht. In alle andere gevallen is de schuif dus open (resultaat FALSE). Dit betekent dat de waterstand in de Greveling niet hoger zou mogen worden dan de het criterium van 3.7 cm, maar tevens ook niet lager dan -44.7 cm. De vergelijking met de Noordzee waterstand geeft aan dat wanneer, in het eerste geval, water in de Noordzee hoger is dan in de Grevelingen de schuif inderdaad dicht moet omdat anders water vanuit de Noordzee naar binnen zou stromen en dus de waterstand nog hoger zou worden. Het criterium is in het rekenmodel goed geïmplementeerd. Dat er toch waterstanden berekend worden die buiten de criteria vallen heeft te maken met de expliciete integratie en de grootte van de tijdstep.

2.4 Debieten door de turbines

De berekening van het debiet door een turbine is vervolgens de voornaamste input die de verandering in de waterstand in de Grevelingen bepaald. Deze wordt uitgerekend (voor cel K19):

$$(1 - J19) \cdot 64 \cdot \text{SQRT}(2 \cdot 9.81 \cdot \text{ABS}(H19) / \$B\$8 \cdot (1 - \$B\$7)) \cdot \text{SIGN}(H19)$$

Als deze wordt omgezet in een vergelijking dan is dat :

$$64 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{|\Delta H|}{f_l}} (1 - T_r)$$

De (1-J19), die niet in de vergelijking staat maar wel in het spreadsheet, staat voor een schuif open of dicht. Het teken van H19 (de functie SIGN(H19)) staat voor of de waterstand in Noordzee hoger is dan Grevelingen (positief – is stroming naar binnen) of andersom (negatief is stroming naar buiten), dit is nodig voor de waterbalans in de Grevelingen. f_l is de 'conduit loss coefficient' waaraan de waarde 1.25 is toegekend. De T_r is de 'turbine degree of reaction'. In het rekenmodel is de waarde 0.67 (2/3) toegepast. Deze vergelijking is ook afgeleid door Meijnen en Arnold (2015)². Dat document laat zien dat de reactiegraad de verhouding bepaalt tussen het waterstandverschil (eigenlijk het heersende drukverschil) H_s en H_r . H_r is de energie toegevoegd of onttrokken door de rotor. In het document wordt in de afleiding van vergelijking 10 aangenomen dat de verliescoëfficiënt C gelijk aan 1 is. Deze valt hierdoor uit de vergelijking. In hoofdstuk 2.3 wordt wel vermeld dat de waarde voor C voor de getijcentrale in de Brouwersdam voor de Duct opstelling 1.25 is en voor de Venturi opstelling 1.35. Deze waarden komen overeen met waarden die in het spreadsheet voor f_l worden verondersteld. Dit betekent dat het rekenmodel consistent is met de vergelijkingen in het document. Of deze waarden correct zijn kan niet worden nagegaan.

Uit deze analyse blijkt dus dat de vergelijkingen die in het rapport worden afgeleid voor het debiet door de turbines overeenkomen met de berekeningen in het rekenmodel. In feite wordt de hoogte energie omgezet in een kinetische energie met een verliesfactor C en een onttrekking van de energie door de turbines.

De factor 64 in de vergelijking vertegenwoordigt A_s , de oppervlakte van de doorlaatopening. 64 betekent voor een cirkel vormige opening een diameter van ongeveer 9 meter. Deze doorsnede is ook in het ontwerpdocument opgenomen. Dus wat dat betreft komt ook hier de vergelijking in het spreadsheet overeen met de vergelijking die in het document is opgenomen.

Dus het berekende debiet lijkt op het eerste gezicht in orde. De vergelijkingen zijn afgeleid van de omzetting van hoogte energie naar kinetische energie met daarin een verliesfactor en een *turbine degree of reaction*, die een deel van de energie wegneemt omdat energie wordt onttrokken voor de energieproductie. Deze *degree of reaction* is in de aangeleverde versie gezet op 2/3 hetgeen het maximale vermogen oplevert volgens het bijgeleverde document.

2.5 Aannames in het model

In het model wordt een constant wateroppervlak verondersteld. Dit wateroppervlak zal echter afhangen van de waterstand en kan tot 6% variëren ten opzichte van het aangenomen wateroppervlak. Dit kan mogelijk leiden tot een foutmarge in de berekening van de debieten van maximaal zo'n 3%.

Er wordt een expliciete rekenmethode toegepast waardoor de berekende waterstand hoger of lager kan uitpakken ten opzichte van het sluitingscriterium. Het effect van de tijdstap in dit expliciete schema is wel dat er bij sluiting een maximum vertraging in kan zitten van 10 minuten. Dit heeft tot gevolg dat de maximale waterstand hoger uitpakt dan het criterium van sluiten. De maximale waterstand die wordt berekend is dan ook 6.12 cm, ten opzichte van het gestelde maximum van 3.7, een verschil van 2.4 cm. Ook naar beneden levert dit een verschil (-46.25 en -45) van 1.25 cm. Bij een kleinere tijdstap zal ook dit verschil kleiner worden. Dit betekent dat percentages dat het rekenmodel uitrekent voor overschrijding van het criterium niet representatief hoeven te zijn voor wat er in de werkelijkheid gebeurt omdat de overschrijding een gevolg is van de expliciete tijdstap. Als de responsetijd van de schuiven ongeveer overeenkomt met de expliciete tijdstap, dan kan dit effect mogelijk gezien worden als

de tijd die nodig is om de schuiven te sluiten. In een dergelijk geval is de over/onderschrijding in het rekenmodel wel dichterbij de werkelijke situatie.

De getijamplitude in de Grevelingen wordt in het spreadsheet uitgerekend door de minimale en maximale waterstand over een periode van 63 tijdstappen (iets meer dan 10 uur) van elkaar af te trekken. Deze getijslag wordt voor elke rekentijdstap berekend. Over deze tijdreeks wordt vervolgens een gemiddelde getijslag bepaald. Echter de berekende gemiddelde amplitude moet eigenlijk bepaald worden door de amplitude per getijslag uit te rekenen en te delen door het aantal getijslagen. Het rekenmodel rekent een gemiddelde getijslag uit van 44.7 cm, terwijl de methode die per getijslag de amplitude bepaalt een gemiddelde getijslag oplevert van 44.0 cm. Dit is relatief een klein verschil maar geeft wel aan dat de berekening van de gemiddelde getijslag een nauwkeurigheid kent van ongeveer 1,5%.

2.6 Gegeneerd vermogen van de turbines

Op basis van de debieten worden nog een aantal parameters afgeleid, waarbij de belangrijkste het vermogen van de turbine is. Deze wordt bepaald door $(H_r \cdot Q \cdot \rho \cdot g) \cdot (\text{turb. eff.})$, met een maximum vermogen (van 2355 kW). In het spreadsheet wordt een dichtheid van het water op 1000 verondersteld en g op 10. Dus ook hierdoor wordt een kleine fout in de berekening van het vermogen gemaakt in de orde van enkele procenten. Wanneer het water, dat wat zout zal zijn bij een dergelijke getijcentrale, een hogere dichtheid heeft dan compenseert dat voor het verschil tussen g (9.81) en de waarde 10. (verschil van 2%). Twee procent van 1000 is 20 en de dichtheid van zout water kan rond de 1020 kg/m³ zijn. In een dergelijk geval is de fout die gemaakt wordt in de berekening gering.

Het rendement van de turbine in het rekenmodel is constant verondersteld (80%), terwijl in het rapport is aangegeven dat het rendement van beide types een functie is van het debiet. Deze functie geeft aan dat beneden ongeveer 130 m³/s het rendement naar 0 gaat. Dit lijkt in eerste instantie niet overeen te komen met het turbine vermogen dat wordt uitgerekend en dat lineair afhankelijk is van het debiet, met een constant rendement. Dit zou betekenen dat er voor de lagere debieten teveel turbine power wordt berekend. Na een analyse van de data in het rekenmodel blijkt dat dit tot ongeveer 30% kan bedragen. Tijdens het overleg van 15 september is door Pro-Tide aanvullende informatie verstrekt, waarin de fabrikant van de turbines heeft aangegeven dat voor lagere debieten, waarbij de rotatiesnelheid van de turbines afneemt, de efficiëntie van 80% ook gehaald wordt. In dat geval zijn de berekeningen in het spreadsheet wel correct.

3 Conclusie

Vergelijking in het rekenmodel komen overeen met de vergelijkingen zoals die in het document zijn afgeleid.

Instroom, verdamping en regenval zijn in de waterbalans niet meegenomen, maar deze spelen slechts een zeer geringe rol bij de bepaling van debieten en waterstandvariaties in de Grevelingen.

Het wateroppervlak is nu aangenomen als 110 km², maar ook zijn waardes gerapporteerd tussen 108 en 117 km². Dit kan leiden tot een foutenmarge in de waterstandsverandering van

maximaal 6%. Dit heeft als gevolg dat de fout die gemaakt wordt in de debieten door de turbines kunnen oplopen tot maximaal zo'n 3%.

Response tijd van de verandering van de waterstand in het Grevelingen tussen het westen en oosten is ongeveer 50m minuten en de resulterende waterstandsverschillen zijn dusdanig (enkele centimeters) dat de berekeningen op basis van komberging redelijkerwijs kunnen worden vergeleken met een gemiddelde waterstand in de Grevelingen (vertegenwoordigd door de meetpaal BOM 1 in het midden van de Grevelingen).

De berekening van de gemiddelde getijslag (als uitvoerparameter) in de Grevelingen is niet geheel correct omdat niet per getijslag een amplitude wordt berekend en vervolgens een gemiddelde voor alle getijslagen wordt berekend. Dit levert een verschil op van ongeveer 1.5%. Dit betekent bij een getijslag van 50cm een verschil van ongeveer 0.7cm.

De power berekeningen van de turbines lijken geen rekening te houden met de afhankelijkheid van de efficiency met het debiet, zoals die in het rapport van Meijnen en Arnold (2015) zijn opgenomen. Beneden $130\text{m}^3/\text{s}$ lijken de turbines geen vermogen meer te kunnen leveren, terwijl ze dit volgens het spreadsheet model wel doen. Wanneer deze relatie wel wordt meegenomen, dan levert dit ongeveer 30% minder vermogen op dan in eerste instantie door het rekenmodel berekend. Recente informatie heeft aangegeven dat de efficiëntie van 80% ook gehaald wordt voor lagere debieten. Aannemende dat dit het geval is zijn de berekeningen in het spreadsheet wel correct.

Kritisch zijn wel de berekeningen van de debieten door de turbines, die worden bepaald door de energieverliezen van de turbines. In hoeverre de coëfficiënten nauwkeurig zijn is op basis van de gegeven informatie niet vast te stellen. In de documentatie staat geen referentie vermeld waar de verliescoëfficiënten en de zogenaamde reactiegraad op gebaseerd zijn. Verificatie van deze coëfficiënten is dan ook geen onderdeel van deze review.

Auteur: Dr. Ir. Frank Kleissen, 16-9-2015



Reviewer: Ir. Theo van der Kaaij, 16-9-2015

