



RWS INFORMATIE

Verslag RWS Marktconsultatie & Challenge

Machine-Learning model voor Golfparameters

Datum	23 juni 2026
Uitgegeven door	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Zaaknummer	31219005
Versie	1
Status	DEFINITIEF

Inhoudsopgave

1.	Inhoudsopgave	2
2.	Inleiding	3
2.1	Doel van de marktconsultatie	3
2.2	De opdracht	3
2.3	Doel van dit verslag	3
3.	Terugkoppeling werkwijze	4
4.	Resultaten Marktconsultatie	5
4.1	Aantal inzendingen en pitches	5
4.2	Modelstrategieën	5
4.3	Gemeenschappelijke Thema's en Innovaties.....	5
4.4	Samenvatting per Modelcategorie	7
4.5	Algemene Observaties	8
5.	Conclusie	10
5.1	Vervolg Meervoudig Onderhands.....	10

1 Inleiding

In het kader van het AI Impulsprogramma voor waterbewegingsmodellen (AIWaM) heeft Rijkswaterstaat een marktconsultatie uitgevoerd voor de ontwikkeling van een machine-learning (ML) model voor golfparameters op de Noordzee. Het doel is om een model te ontwikkelen dat snel, betrouwbaar en operationeel inzetbaar is, dat significante golfhoogte (Hm0) en deiningshoogte (HE10) voorspelt met name tijdens extreme weersomstandigheden. Dit model moet 51 ensemble-members kunnen verwerken binnen 1 uur en aansluiten op de bestaande operationele keten van Rijkswaterstaat.

De documentatie van deze Marktconsultatie is beschikbaar op TenderNed onder de naam "RWS Challenge Machine-Learning model voor Golfparameters", waar ook dit document wordt gepubliceerd.

1.1. Doel van de marktconsultatie

Rijkswaterstaat zoekt naar innovatieve oplossingen door samenwerking met de markt om een veerkrachtiger watersysteem te realiseren. Deze Challenge nodigt geïnteresseerde partijen uit om een snelle methode te ontwikkelen die, op basis van invoerparameters zoals wind, golfparameters (Hm0, HE10) voor Noordzeelocaties berekent met minimale afwijking ten opzichte van metingen. Bij succes kan een vervolgtraject worden gestart.

1.2. De opdracht

De opdracht is om een AI-model te ontwikkelen dat, getraind op meerjarige meetreeksen (Hm0, HE10) en invoerdata (bodempligging, windvelden, golfrandvoorwaarden, waterstands- en stromingsvelden), golfparameters voor Noordzeelocaties voorspelt.

Zie ook de documentatie van deze Marktconsultatie is beschikbaar op TenderNed, waarna eerder al is verwezen.

1.3. Doel van dit verslag

Dit verslag biedt een samenvattend overzicht van de doorlopen procedure, de inzendingen, de Pitches met als doel inzicht te geven in de diversiteit aan benaderingen, modellen, en operationele oplossingen die de markt te bieden heeft.

2 Terugkoppeling werkwijze

De aankondiging is op 26 mei 2026 gepubliceerd via TenderNed en het DigiShape platform.

Op 1 juni 2026 heeft een Informatiebijeenkomst via Teams plaatsgevonden. De marktconsultatie met een Challenge en het doel dit op te volgen met een Meervoudig onderhandse uitvraag (MVO) om het beoogde product te verkrijgen.

Op 15 juni was de sluiting voor het insturen van het Plan van Aanpak. In totaal zijn er 14 inzendingen ontvangen van diverse marktpartijen, variërend van gespecialiseerde wateradviesbureaus tot Data- en AI-experts. Dit aantal was aanzienlijk hoger dan verwacht.

Op de DigiShape dag van 19 juni 2026 hebben alle inzenders een Pitch gehouden. Deze bestond uit 3 minuten toelichting op het PvA, gevolgd door enkele vragen gesteld door vertegenwoordigers van RWS en Deltares.

De planning is om op 23 juni het verslag marktconsultatie te publiceren, waarin aangegeven wordt of een vervolgtraject gestart wordt.

Bij random navraag tijdens de Digishape-dag geven deelnemers aan dat het een uitdaging was om alle gevraagde aspecten te benoemen in 2x4 en pitch van 3 minuten.

3 Resultaten Marktconsultatie

3.1. Variëteit inzendingen

De 14 inzendingen tonen een breed spectrum aan benaderingen, variërend van klassieke ML-modellen tot geavanceerde deep learning-architecturen. Hieronder een categorisatie op basis van de gekozen modelstrategieën en operationele inzet.

3.2. Modelstrategieën

De inzendingen tonen een breed spectrum aan benaderingen, onderverdeeld in de volgende 6 hoofdcategorieën:

Categorie	Aantal Inzendingen	Kenmerken	Voorbeelden van Benaderingen
Gradient Boosting Modellen	3	Snelle, uitlegbare modellen met focus op feature engineering en stormgewogen loss.	LightGBM, XGBoost, combinaties met neurale netwerken.
Tijdreeksmodellen	5	Modellen die temporele afhankelijkheden in golfdata benadrukken.	LSTM, TCN, Temporal Fusion Transformer (TFT).
Vision Transformers	2	Modellen die 2D-rasters (bijv. windvelden) als afbeeldingen verwerken.	Vision Transformer, Swin Transformer.
Hybride Modellen	2	Combinaties van tijdreeks- en ruimtelijke modellen.	CNN + LSTM, TFT + spatial attention + TFT.
Foundation Modellen	1	Voorgeïnformeerde modellen die zonder training kunnen worden toegepast.	Chronos-Bolt, Moirai, TimesFM.
Modulaire Pipelines	1	Stapsgewijze benadering (temporaal → ruimtelijk → spatiotemporeel).	Modulaire opbouw met afzonderlijke training per module.

3.3. Gemeenschappelijke Thema's en Innovaties

Focus op Extreme Condities

- Stormprestaties: Bijna alle inzendingen benadrukken het belang van goede prestaties tijdens stormen ($Hm0 > 2m$, $HE10 > 0.5m$). Dit wordt bereikt door:

- Stormgewogen loss-functies (bijv. extra gewicht voor extreme waarden).
- Oversampling van stormdata om het model beter te trainen op zeldzame, maar kritieke situaties.
- Aparte evaluatie van piekprestaties (bijv. Peak Error als stopcriterium).

Onzekerheidsmodellering

- Ensemble-voorspellingen: Meerdere inzendingen gebruiken 51 ECMWF-EPS members om onzekerheid te kwantificeren.
- Probabilistische output: Sommige inzendingen bieden kansverdelingen (bijv. via quantile regression of Monte Carlo Dropout).
- Skill Score: Alle inzendingen richten zich op het overtreffen van persistence (seizoensgemiddelde).

Operationele Inzetbaarheid

- Containerisatie: De meeste inzendingen leveren het model op als Docker container voor eenvoudige implementatie.
- Reproduceerbaarheid: Gebruik van vaste seeds (42), pyproject.toml, en uv.lock voor deterministische resultaten.
- MLOps-pipelines: Veel inzendingen gebruiken MLFlow, DVC, of CodeCarbon voor experiment-tracking en energie-monitoring.
- Integratie met RWS-systemen: Sommige inzendingen benadrukken integratie met RWSOS/FEWS.

Data- en Feature Engineering

- Fysisch geïnformeerde features: Gebruik van fetch-weighted wind integrals, golfrandvoorwaarden (TPAR), en historische metingen.
- Ruimtelijke decompositie: Toepassing van SVD, 2D-patches, of hiërarchische patch merging voor efficiënte verwerking van windvelden.
- Lagged variables: Gebruik van historische data (tot 10 dagen terug) voor betere voorspellingen.

Schaalbaarheid

- Multi-location: De meeste modellen zijn ontworpen voor opschaling naar meerdere locaties (bijv. 10 Noordzeelocaties).
- Modulaire architecturen: Sommige inzendingen gebruiken een modulaire opzet voor flexibele uitbreiding.

3.4. Samenvatting per Modelcategorie

3.4.1. Gradient Boosting Modellen (3 inzendingen)

- Benadering: Gebruik van LightGBM of XGBoost voor snelle, uitlegbare voorspellingen.
- Sterke punten:
 - Snelheid: Inferentie in seconden voor 51 ensemble-members.
 - Eenvoud: Makkelijk te trainen en te onderhouden.
 - Stormprestaties: Gebruik van stormgewogen loss en oversampling.
- Toepassing:
 - Geschikt voor snelle operationele inzet waar interpretatie belangrijk is.
 - Beperking: Minder geschikt voor complexe ruimtelijke patronen.
 -

3.4.2. Tijdreeksmodellen (5 inzendingen)

- Benadering: Gebruik van LSTM, TCN, of Temporal Fusion Transformer (TFT) voor temporele afhankelijkheden.
- Sterke punten:
 - Temporele modellering: Geschikt voor golfopbouw en -afname over tijd.
 - Flexibiliteit: Kan meerdere outputvariabelen (Hm0, HE10) tegelijk voorspellen.
 - Stormprestaties: Gebruik van stormgewogen loss en Peak Error als stopcriterium.
- Toepassing:
 - Ideaal voor tijdsafhankelijke processen zoals golfdynamica.
 - Beperking: Minder geschikt voor ruimtelijke patronen zonder aanvullende features.

3.4.3. Vision Transformers (2 inzendingen)

- Benadering: Gebruik van Vision Transformer (ViT) of Swin Transformer om 2D-rasters (windvelden, waterstand) als afbeeldingen te verwerken.
- Sterke punten:
 - Ruimtelijke context: Natuurlijke verwerking van windpatronen en deiningsgolven.
 - Attention-mechanisme: Legt automatisch verbanden tussen verre en nabije windvelden.
 - Snelheid: Inferentie in seconden voor 51 ensemble-members.
 - Literatuurondersteuning: ViTs zijn bewezen succesvol in golfmodellering.
- Toepassing:
 - Geschikt voor ruimtelijke patronen (bijv. deiningsgolven afkomstig van verre stormen).
 - Beperking: Minder focus op tijdreeksdata zonder aanvullende modellen

Opmerking: Één inzending combineert Swin Transformer met Temporal Fusion Transformer (TFT) voor een hybride benadering (ruimtelijk + temporeel).

3.4.4. **Hybride Modellen (2 inzendingen)**

- Benadering: Combinatie van tijdreeks- en ruimtelijke modellen (bijv. CNN + LSTM, TFT + spatial attention).
- Sterke punten:
 - Balans: Combineert ruimtelijke en temporele sterktes.
 - Schaalbaarheid: Modulaire opzet maakt uitbreiding naar meer locaties/parameters eenvoudig.
 - Flexibiliteit: Kan meerdere databronnen integreren (wind, waterstand, stroming).
- Toepassing:
 - Ideaal voor complexe golfdynamica waar zowel ruimte als tijd belangrijk zijn.
 - Beperking: Complexer om te trainen en te onderhouden.

3.4.5. **Foundation Modellen (1 inzending)**

- Benadering: Gebruik van voorgeïnformeerde modellen (bijv. Chronos-Bolt, Moirai, TimesFM) voor zero-shot benchmarking.
- Sterke punten:
 - Snelheid: Direct toepasbaar zonder training.
 - Probabilistische output: Biedt kansverdelingen voor onzekerheid.
 - Innovatie: Nieuwe benadering voor golfvoorspellingen.
- Toepassing:
 - Geschikt voor snelle benchmarking en exploratie.
 - Beperking: Kan minder nauwkeurig zijn voor Noordzee-specifieke data zonder fine-tuning.

3.4.6. **Modulaire Pipelines (1 inzending)**

- Benadering: Stapsgewijze opbouw van temporale → ruimtelijke → spatiotemporele modellen.
- Sterke punten:
 - Flexibiliteit: Elke module kan afzonderlijk worden getraind en geoptimaliseerd.
 - Schaalbaarheid: Makkelijk uitbreidbaar naar meer locaties/parameters.
 - Toekomstbestendig: Modulaire opzet maakt aanpassingen eenvoudig.
- Toepassing:
 - Geschikt voor gefaseerde implementatie en opschaling.

3.5. **Algemene Observaties**

Diversiteit in Benaderingen:

De markt biedt een breed scala aan oplossingen, van klassieke ML-modellen (LightGBM) tot state-of-the-art deep learning (Vision Transformers, TFT). Hybride modellen (combinatie van ruimtelijk en temporeel) zijn populair voor complexe golfdynamica.

Focus op Operationele Inzetbaarheid:

Alle inzendingen voldoen aan de technische randvoorwaarden (rekentijd, hardware, outputformaat).

MLOps en containerisatie zijn standaard in de meeste inzendingen.

Stormprestaties:

Stormgewogen loss, oversampling, en Peak Error als stopcriterium zijn veelvoorkomende technieken om prestaties bij extremen te verbeteren.

Onzekerheidsmodellering:

Ensemble-voorspellingen en probabilistische output zijn belangrijke onderdelen van de meeste inzendingen.

Schaalbaarheid:

De meeste modellen zijn ontworpen voor opschaling naar meerdere locaties en parameters.

4 Conclusie

De 14 inzendingen voor de Challenge ML-model voor Golfparameters tonen een rijke diversiteit aan benaderingen, variërend van eenvoudige, snelle modellen (LightGBM) tot geavanceerde deep learning-architecturen (Vision Transformers, TFT).

Ondanks dat de inzending beperkt werden door omvang (2xA4) en tijd voor de Pitch kan globaal worden gesteld dat alle inzendingen:

- voldoen aan de technische randvoorwaarden (rekentijd, hardware, outputformaat);
- richten zich op operationele inzetbaarheid (MLOps, containerisatie, integratie met RWS-systemen);
- leggen nadruk op prestaties bij extreme condities (stormgewogen loss, oversampling);
- bieden onzekerheidsinformatie (ensembles, probabilistische output).

De markt toont aan om over expertise te beschikken een haalbaar operationeel inzetbaar model te ontwikkelen dat SWAN en TurboSWAN overtreft in snelheid en onzekerheidsinformatie, zonder in te boeten aan nauwkeurigheid.

4.1. Vervolg Meervoudig Onderhands

Gezien de bovenstaande conclusie heeft RWS besloten om een Meervoudig Onderhandse uitvraag te starten voor een Machine-Learning model voor Golfparameters.

Om gebruik te maken van de diversiteit aan oplossingen is RWS voornemens om 3 partijen uit te nodigen voor het vervolgtraject op basis van domein- / golfkennis, kennis in Data & AI en innovatieve waarde. Uitgangspunt is hierbij dat de 3 oplossingen gebaseerd zijn op verschillende modelstrategieën.