

Memo

Aan

Jurre de Vries / F. Brils Rijkswaterstaat

Datum

21 december 2023

Ons kenmerk

11209267-005-ZKS-0002

Aantal pagina's

1 van 13

Contactpersoon

Lynnyrd de Wit, Arjen Haag, Thijs van Kessel (reviewer)

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 7728

E-mail

Lynnyrd.deWit@deltares.nl

Onderwerp

Review baggercijfersprognose Waddenzee

Korte samenvatting

Het opstellen van een accurate prognose van baggervolumes in de Waddenzee is complex omdat er veel invloeden op de baggervolumes zijn die lastig voorspelbaar zijn. Dit gaat dan om bijvoorbeeld morfologische systeemveranderingen, aanpassingen aan het systeem zoals een vaargeulverdieping en de invloed van een overgang van contract/aannemer op de baggercijfers. Op schaal van de hele Waddenzee middelen de verschillende onzekerheden elkaar deels uit, maar hoe meer je inzoomt op een deelsysteem hoe groter de relatieve onzekerheid in een prognose zal zijn. Ons advies is om de prognose te blijven opstellen op objectieve wijze met een statische methode zoals ARIMA, op basis van de historische baggercijfers. Het wordt aanbevolen om aan de ARIMA prognose onderbouwt een expert judgement component toe te voegen aan de voorspelling en de bandbreedte daaromheen voor verwachte veranderingen die niet (volledig) opgepikt zijn door ARIMA zoals: trends in baggervolumes per deelgebied door natuurlijke morfologische veranderingen; invloeden van geulverlegging; verdieping of aanpassing onderhoudspeil; of veranderingen in baggermethode of stortlocatie.

Elke prognose is afhankelijk van de kwaliteit van de data die gebruikt wordt bij het opstellen van een prognose. Daarom is het belangrijk om te zorgen voor een zo eenduidig mogelijke tijdreeks aan baggercijfers voor verschillende contractperiodes en verschillende baggermethodes door de voorgestelde verbeteringen uit (De Wit 2022) te implementeren. Tot slot worden enkele opties gegeven tot nader onderzoek naar enkele mogelijkheden om de prognose nog verder te verbeteren.

1 Inleiding

Sinds 2012 worden prognoses gemaakt van baggerhoeveelheden in de Waddenzee. De analyse en prognose draagt bij aan twee hoofddoelen:

- 1) De controle of de baggerhoeveelheden in de toekomst de verwachtingen overschrijden die genoemd zijn in het Natura2000-beheerplan. Mocht in de toekomst sprake zijn van eventuele structurele overschrijding van het totale gemiddelde baggervolume (van RWS en derden), dan zal een actualisatie plaatsvinden door middel van een nieuwe toetsing van de effecten van het onderhoudsbaggerwerk op de instandhoudingsdoelstellingen.

- 2) Optimaal vaarwegbeheer- en beleid: eventuele aanpassingen op basis van huidige trends en toekomstscenario's. Bijvoorbeeld het overwegen van schepen met een andere diepgang, een andere verspreidingsstrategie of morfologische ingrepen.

Twee nevendoelen zijn:

- 3) De programmering door RWS van de baggerhoeveelheden en –kosten voor de komende jaren (N.B. dit was de aanleiding om met de prognoses te starten in 2012, op verzoek van RWS GPO).
- 4) De raming voor het baggercontract en de contractvorming (keuze tussen regie en prestatie). De raming staat weliswaar in verband met de (financiële) programmering uit punt 1 voor de lange termijn, maar de prognose zou eventueel geactualiseerd kunnen worden.

De prognoses tussen 2012 en 2021 zijn gebaseerd op de 'methode Mulder', hetgeen een analyse en lineaire extrapolatie is van de gemeten baggerhoeveelheden in combinatie met morfologische inzichten (Mulder, 2012). Methode Mulder is eenvoudig (lineaire trends worden verondersteld), maar wordt handmatig uitgevoerd en is daardoor ook enigszins subjectief. Vanaf 2022 worden de baggercijferprognoses gemaakt met een regressiemodel ARIMA (Brils, 2021). Dit gebeurt automatisch en is daarmee niet meer subjectief. Het ARIMA model is echter wel complexer waardoor het meer als een 'black box' kan gaan functioneren. Als input in het ARIMA model worden alleen de tijdreeksen van de baggercijfers gebruikt en geen anders fysische invoervariabelen zoals waterstand, golven, zoetwaterafvoer saliniteit. Dit in tegenstelling tot het regressiemodel wat in 2014-2019 is onderzocht (Van den Boogaard en Van Kessel, 2016 en 2018).

Binnen Rijkswaterstaat zijn vragen, en soms wat scepsis over de betrouwbaarheid, gerezen over de baggercijferprognoses voor de Waddenzee. De voorspellingen zijn soms moeilijk te interpreteren, hebben vrij grote onzekerheidsmarges en onjuiste voorspellingen kunnen een onjuist beeld geven wat moeilijk uit te leggen kan zijn aan een breder publiek. Deze memo beschrijft een review over de huidige aanpak voor het opstellen van baggercijferprognoses in de Waddenzee. Om dubbel werk te voorkomen wordt in deze review waar mogelijk gebruikt gemaakt van voorgaand werk medio 2014-2019 omtrent de stroomlijning van de prognose van baggerhoeveelheden in de Waddenzee zoals samengevat in (Mulder 2019). Er wordt een analyse gegeven van de verschillende invloeden die de complexiteit van de baggercijferprognose bepalen. De statistische methode ARIMA die momenteel gebruikt wordt bij het opstellen van de prognose wordt tegen het licht gehouden. Concluderend wordt er een advies gegeven over hoe om te gaan met de baggercijferprognose voor de Waddenzee met enkele aandachtspunten ter verbetering.

2 Samenvatting voorgaand werk 2014-2019 over de stroomlijning van de baggercijferprognose in de Waddenzee

In 2014 is gestart met het "stroomlijnen" van de prognose van baggerhoeveelheden in de Waddenzee. Er zijn verschillende analyses uitgevoerd en meerdere workshops met experts gehouden. Een Rijkswaterstaat memo uit 2019 (Mulder 2019) vat de uitkomsten van deze stroomlijning beknopt samen. Uit deze memo (Mulder 2019) worden hieronder de belangrijkste bevindingen en de aanbevelingen samengevat.

2.1 Beschouwde voorspelmethodes 2014-2019 stroomlijning voorspelling baggervolumes Waddenzee

Er zijn zes verschillende voorspelmethodes beschouwd in de analyses van 2014-2019. Deze zijn ofwel statistisch van aard ofwel fysisch-procesmatig. Beide methoden kunnen in combinatie met expert-judgement toegepast worden of in combinatie met elkaar.

1. **Methode Mulder** (Mulder, 2012). Deze methode is vooral statistisch van aard en relatief eenvoudig, en wordt gecombineerd met morfologische expert judgement. Voor de methode Mulder zijn van diverse jaren evaluaties gedaan van de betrouwbaarheid door de prognose en realisatie te vergelijken. Het relatieve verschil tussen prognose en realisatie neemt af naarmate het baggervolume toeneemt omdat lokale over- en onderschattingen uitmiddelen op het totaal. Een baggervolume van 10.000 m³ heeft een mogelijke afwijking van +/- 1000%, een volume van 100.000 m³ heeft een mogelijke afwijking van +/- 100% en een volume van 1 miljoen m³ heeft een mogelijke afwijking van +/- 10%. Voor het totale baggervolume van RWS in de Waddenzee, ca. 3 miljoen m³ per jaar, is de afwijking ca. +/- 3 %. Dit geldt dan voor de eerste jaren van de prognose.

2. **Regressiemodel** (Van den Boogaard en Van Kessel, 2016 en 2018). Deze methode is statistisch van aard met fysische invoervariabelen zoals waterstand, significante golfhoogte, zoetwaterafvoer, saliniteit die gecorreleerd worden aan de baggervolumes. De methode bevat een relatief complex regressiemodel, waarmee diverse statistische parameters berekend kunnen worden. Het regressiemodel kent momenteel een betrouwbaarheid die vergelijkbaar is met de methode Mulder, omdat ook hier de trend in de tijd de beste verklarende variabele is. Het model kan wellicht iets beter voorspellen met de extra parameters als invoer, maar de verklarende parameters die gehanteerd worden (waterstand, significante golfhoogte, zoetwaterafvoer, saliniteit) zijn op zich niet goed te voorspellen. Het zou eventueel mogelijk zijn met het regressiemodel een bandbreedte van de baggervolumes te bepalen door een Monte Carlo analyse uit te voeren met een range aan mogelijke input parameters.

3. **SURFTREND** (Fioole, 2014, 2015). De methode is zuiver statistisch van aard, waarbij detectie plaats vindt van breuken in lineaire trends. Hoe betrouwbaar deze methode is voor baggervolumes is niet bekend.

4. **ASMITA/Drempelmodel** (Wang et al, 2003). De methode is gebaseerd op fysische processen, gecondenseerd tot een relatief eenvoudige formule voor sedimentatie op een drempel. De sedimentatie is m.n. afhankelijk van het verschil tussen de werkelijke (gebaggerde) diepte en de (ongestoorde) evenwichtsdiepte op de drempel. Dit model is meer geschikt om langjarige trends in de natuurlijke ontwikkeling van een deelsysteem in de Waddenzee te onderzoeken en wat minder voor een algehele baggercijferprognose voor de gehele Waddenzee.

5. **Geulbaggermodel** (Mulder, 2018). De methode is gebaseerd op fysische processen, met empirische kennis, en teruggebracht naar een eenvoudige formule voor sedimentatie. Het kent een eenvoudige schematisering van het geulprofiel in ruimte en tijd. De sedimentatie is m.n. afhankelijk van het verschil in oppervlakte tussen het werkelijke (gebaggerde) dwarsprofiel en het (ongestoorde) evenwichtsprofiel. Dit model is toegepast op de vaargeul Holwerd-Ameland en bleek in staat om de gemiddelde stijgende trend tot 2010 goed te kunnen voorspellen. Echter voor individuele jaren waren er afwijkingen van 50-100% van het baggervolume en de grote toename tussen 2010-2016 kwam niet terug in de resultaten. Voor andere geulen en systemen is dit model niet toegepast.

6. **Delft3D**. De methode bestaat uit een mathematisch-fysisch procesmodel dat tijdsafhankelijk en ruimtelijk in een 3 dimensionaal rooster toegepast kan worden. Het is een software-pakket van Deltares voor hydrodynamica, transport van sediment en morfodynamiek. Dit is een complexe en duurdere aanpak, die vooral geschikt is voor lokale geul-aanpassingen en voor betrouwbare voorspellingen is uitgebreide kalibratie nodig met veel data.

2.2 Conclusies en aanbevelingen 2014-2019 stroomlijning voorspelling baggervolumes Waddenzee

De conclusie in 2019 was dat de voorspelling van baggervolumes het beste gebaseerd kan zijn op een combinatie van statistische analyse en fysische inzichten, die gebaseerd zijn op waargenomen en/of gemodelleerde ontwikkelingen. In alle gevallen is morfologische kennis op macro- en mesoschaal een voorwaarde voor inzicht en eventuele modellering. Deze kennis wordt in het morfologisch onderzoeksprogramma verzameld en geanalyseerd, o.a. in de vorm van een rapportage per kombergingsgebied. De conclusie van de boordeling is dat er niet één methode de voorkeur verdient en dat een combinatie van methoden en kennis toegepast moet worden afhankelijk van de situatie.

De volgende methode/werkwijze wordt geadviseerd voor de prognose van baggerhoeveelheden. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen onderhouds- en aanlegbaggerwerk.

Voor onderhoudsbaggerwerk worden de volgende stappen geadviseerd:

- 1) Een statistische analyse van de gemeten baggerhoeveelheden. Alleen indien er voor een specifieke baggerlocatie een opvallende verandering (toename) van het baggervolume heeft plaatsgevonden wordt stap 2 als verdiepingsstap geadviseerd.
- 2) Beoordeling van het verloop van de gemeten baggerhoeveelheden aan de hand van morfologische kennis op basis van waarnemingen. Dit moet een verklaring geven voor het verleden en een indicatie voor de toekomst. Het betreft hier: inzicht in ontwikkeling van het zwevend-stofgehalte; inzicht in geulgedrag; inzicht in ontwikkeling van het kombergingsvolume. Beschikbaarheid van bodemonsters en beunmonsters op reguliere basis is nodig voor inzicht in de sedimentsamenstelling. Indien behoefte is aan meer voorspelkracht kan stap 3 genomen worden.
- 3) Inzet van een extra model, met de keuze voor een specifiek model afhankelijk van de geschatte meerwaarde:
 - a. Regressiemodel, mits hiervoor een procesindicator als stuurvariabele bekend is.
 - b. Drempelmodel
 - c. Geulmodel
 - d. Delft3D model

Voor aanlegbaggerwerk worden de volgende stappen geadviseerd:

- 1) Is sprake van een verruiming van een reeds gebaggerde geul dan kan men zowel een eenvoudig procesmodel (bijvoorbeeld het drempelmodel of het geulmodel) als Delft3D inzetten. De keuze is afhankelijk van de complexiteit van het systeem, de reeds aanwezige kennis en van de omvang van het baggerwerk.
- 2) Voor een nieuw te graven geul geldt min of meer hetzelfde, maar omdat hier de waterbeweging sterk kan veranderen zal men eerder geneigd zijn het Delft3D model toe te passen.
- 3) In het geval van een haven(bekken)uitbreiding is eveneens de inzet van zowel eenvoudige als complexe modellen mogelijk. Ook hier is de afweging afhankelijk van de complexiteit en omvang van de ingreep.

N.B. In alle gevallen van aanlegbaggerwerk kan men “gedwongen” worden de meest geavanceerde methoden toe te passen, omdat dit vereist wordt vanuit wet- of regelgeving. Echter ook de meest complexe modellen kunnen nog niet erg betrouwbare (< 10%) voorspellingen maken vanwege de complexiteit van de stroming en morfologie van het geul-plaatsysteem in de Waddenzee. Een betrouwbaarheid van ca. 50% is waarschijnlijk wel haalbaar bij uitgebreide kalibratie op metingen van de lokale stroming, zwevend stof gehalten, bodemontwikkeling, baggervolumes en sedimentsamenstelling. Vaak zal een geavanceerd

proces-gebaseerd model zoals Delft3D in combinatie met grondige data analyse van beheercijfers en historische bodemligging toegepast worden. Dit waren de conclusies en aanbevelingen uit 2014-2019 voor een stroomlijning van de voorspelling van de baggercijfers in de Waddenzee. Deze memo zal nu doorgaan met een review over de huidige aanpak voor het opstellen van baggercijferprognoses en eindigen met een advies over een goede voorspelmethode voor de Waddenzee.

3 Analyse complexiteit prognose baggercijfers

Er spelen verschillende facetten die de complexiteit bepalen van baggercijferprognoses. Enerzijds is daar het fysisch morfologisch systeem met haar complexiteit en onvoorspelbaarheid en anderzijds is daar de menselijke invloed van toegepaste baggermethode, de baggeraar, het baggercontract en de wijze van registratie van de baggercijfers. Daarbij is er onderscheid tussen sedimenttransport (van zand en slib) en baggeronderhoud. Natuurlijk sedimenttransport is de aandrijvende kracht voor baggeronderhoud, maar hiernaast zijn nog andere belangrijke factoren (zoals interventiepeil, baggermethode, fasering, retourstroming na verspreiding, ...). De natuurlijke processen en menselijke invloeden, en hun interacties worden hieronder toegelicht om de complexiteit van de prognose van baggercijfers af te pellen. Zo kan beter inzichtelijk gemaakt worden of een verandering van baggervolume wordt veroorzaakt door natuurlijke variaties of trends in het fysisch morfologisch systeem of door menselijke invloeden rondom de uitvoering en registratie van het onderhoud.

Appendix A illustreert de complexiteit van veranderingen in de baggercijfers in de Waddenzee met enkele voorbeelden van externe fysieke invloeden en menselijke invloeden op de baggercijfers. In de twee paragrafen hieronder worden beiden toegelicht.

3.1 Externe fysieke invloeden op de baggercijfers

Het morfologisch systeem van de Waddenzee is complex. Seizoensvariaties in sedimenttransport en langjarige trends ten gevolge van de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee veranderen op lange termijn waardoor kombergingsvolumes en transportcapaciteiten zich aanpassen. Het opschuiven van een wantij, natuurlijke geulverplaatsingen en natuurlijke aanzanding/aanslibbing of verdieping zijn voorbeelden van langjarige trends die invloed hebben op de baggercijfers maar waarvan lastig te voorspellen is of en hoe sterk deze doorzetten in de toekomst. De Waddenzee bestaat uit meer zandige gebieden en meer slibrijke gebieden wat nog weer complexiteit toevoegt omdat beiden sedimenttypen zich morfologisch anders gedragen met een ander bezink- en erosiegedrag en ook qua baggerinspanning verschillend zijn. Daarbij zijn er nog seizoensvariaties in weersomstandigheden zoals bijvoorbeeld stormen, getij, estuariene circulatie die ook de baggercijfers beïnvloeden en vrijwel onmogelijk te voorspellen zijn. Aanpassingen aan het fysieke systeem zoals het verdiepen van een vaarweg (bijvoorbeeld Boontjes) of een geulverlegging (bijvoorbeeld Holwerd-Ameland) kunnen zorgen voor een abrupte trendbreuk in de baggercijfers die vergelijking met cijfers uit het verleden en vertaling naar de toekomst ingewikkelder maken.

3.2 Menselijke invloeden op de baggercijfers

Verandering van baggermethodes, verspreidingsstrategieën, interventiepeil en fasering van het baggerwerk hebben invloed op de baggercijfers en vermoedelijk de vergelijking van

baggercijfers tussen verschillende jaren. Een wisseling van aannemer kan leiden tot inzet van een andere manier van baggeren met andere equipment en andere bemanning. Een wisseling van contracteisen kan leiden tot prikkels voor andere en/of meer of minder baggerinspanningen. Een wisseling van aannemer lijkt in het verleden wel eens geleid te hebben tot een verminderde inspanning aan het einde van een contract. Een wisseling van contract is in het verleden wel eens gepaard gegaan met een andere voorgeschreven methode van volume bepaling. Al deze zaken hebben invloed op de baggercijfers en zijn niet altijd helder. Voor deze menselijke invloeden op de baggercijfers geldt echter wel dat het mogelijk is om deze invloed scherper in beeld te krijgen. Dit in tegenstelling tot de externe fysische invloeden op de baggercijfers waarvan de invloed op de baggercijfers veel lastiger kwantitatief te maken is.

Een ander aspect van menselijke invloed op de baggercijfers is de wijze van registreren van de baggervolumes. Er wordt nu een hybride boekhouding gevoerd met een combinatie van beunvolumes (van een sleephopperzuiger) en in-situ baggervolumes (overige baggermethodieken). Het volume van sediment hangt echter sterk af van de dichtheid en de dichtheid in-situ is anders dan de dichtheid in het beun. In-situ baggervolumes en beunvolumes zijn daardoor niet altijd goed vergelijkbaar. Daarbij geldt dat de wijze van registratie van het baggervolume, bijvoorbeeld de overgang naar de halve bol methode voor beunvolume, invloed kan hebben op de gerapporteerde volumes. In 2022 heeft Deltares advies (De Wit 2022) gegeven over een meer eenduidige registratie van de baggercijfers. De historische reeks van baggercijfers heeft echter wel bovengenoemde aandachtspunten en is hierdoor beïnvloed. Elke prognose is afhankelijk van de kwaliteit van de input data, dus wordt het aanbevolen om de meer eenduidige registratie van de baggercijfers te gaan hanteren en de historische baggercijfers te corrigeren voor het verschil in in-situ volumes en beunvolumes.

4 Analyse toepassing ARIMA methode voor baggercijferprognose

Sinds de vorige analyse (Mulder 2019), beschreven in hoofdstuk 0, is er een nieuwe prognose methode ontwikkeld (Brils, 2021). Deze is gebaseerd op de Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) methodiek, een geavanceerd model voor tijdreeksanalyse uit de statistiek. In dit hoofdstuk kijken we naar de theoretische en praktische achtergrond van deze methode, om te kunnen duiden of deze juist toegepast wordt en ook in de toekomst gebruikt zou kunnen worden.

4.1 Achtergrond ARIMA

De ARIMA methode bouwt op verschillende aparte statistische methodes die gezamenlijk toegepast worden om zo tot een betere prognose te kunnen komen:

- AR (Auto Regression): bepaalt een relatie tussen een bepaalde observatie en een aantal andere (eerdere) observaties, bijv. een trend
- I (Integrated): wordt gebruikt om de tijdserie stationair te maken voor een betere analyse en prognose
- MA (Moving Average): kijkt naar een voortschrijdend gemiddelde en het verschil tussen deze en observatie(s)

Vaak is het gewicht van de AR component groter op de korte termijn en wordt de MA component belangrijker naarmate er verder naar de toekomst gekeken wordt. Dat is echter niet altijd het geval, en de ontwerper van een specifiek ARIMA model heeft daar ook controle over door middel van verschillende parameters die ingesteld kunnen worden. Meer informatie over de specifieke implementatie voor baggercijferprognoses is te vinden in Brils (2021).

4.2 Huidige implementatie ARIMA

De ARIMA methode heeft als voordeel dat deze objectief is, oftewel niet meer afhankelijk van de subjectieve keuzes van de persoon die de prognoses maakt (zoals in methode Mulder). Echter, dat betekent ook dat expert judgement van bijvoorbeeld een verwachte stijgende of dalende trend door externe invloeden in ARIMA niet meegenomen wordt. Een voordeel van de huidige voorspellingen is dat er ook een betrouwbaarheidsinterval bij de prognose wordt bepaald.

De huidige implementatie is geanalyseerd met betrekking tot de theoretische achtergrond van de ARIMA methode en hier zijn geen aanmerkingen op, naast de opmerkingen die eerder al gedaan zijn (Brils, 2021; hoofdstukken 4 en 5), die onderschreven worden. Namelijk:

- De data wordt niet geschikt geacht voor directe toepassing van de ARIMA methode vanwege opeenvolgende nul-metingen in maandelijks data en te weinig data bij gebruik van jaarlijkse data. Deze wordt daarom eerst omgerekend tot een maandelijks voortschrijdend gemiddelde waarde. Dit betekent echter wel dat (1) er potentiële informatie in het ruwe signaal verloren gaat en (2) er dubbele middeling plaatsvindt aangezien de methode zelf ook al een voortschrijdend gemiddelde berekend (de MA component). Dit betekent niet dat de toepassing verkeerd of slecht is, maar er dient wel rekening gehouden te worden met deze effecten. De grootste invloed hiervan is waarschijnlijk dat grote en/of abrupte veranderingen niet goed meegenomen kunnen worden.
- Gerelateerd aan het bovenstaande punt wordt geadviseerd om het voortschrijdend gemiddelde van een veelvoud van 12 maanden (i.e. één jaar) te gebruiken, om seizoens-effecten uit te filteren. Wederom dient hier rekening mee gehouden te worden bij de interpretatie van de resultaten; seizoens-effecten, ook als deze wel verwacht worden, zullen hierdoor ook minder goed zichtbaar zijn in de prognose. De keuze voor een periode van 12 maanden zorgt voor minder “uitdamping” dan wanneer deze op 24 of 36 maanden gezet zou worden en lijkt daarom een goede keuze.
- Zoals ook in dit document aangegeven, hebben de ARIMA parameters uiteraard ook invloed op de resultaten en zijn er (zoals bij elke methode) mogelijkheden tot verbetering. Er wordt een tweetal aanbevelingen gedaan, om tot betere parameter selectie en/of modellen te komen (beide gerelateerd aan de wiskundige methode om tot model selectie te komen; namelijk het meenemen van modellen met vergelijkbare scores en het beter berekenen van de score zelf). Aangezien dit relatief complexe inhoudelijke aspecten van ARIMA betreft, wordt voor meer details verwezen naar Brils (2021). Ze worden onderschreven, hoewel verwacht wordt dat andere zaken (zoals veranderingen in externe fysieke invloeden en sprongen in menselijke invloeden zoals benoemd in Hoofdstuk 3) een grotere invloed op de prognoses hebben en dus wellicht meer aandacht verdienen.

ARIMA is als statistische, en daarmee data-gedreven, methode sterk afhankelijk van de beschikbare data. Wanneer er weinig data beschikbaar is voor bepaalde locaties dan zijn alle statistische methodes (en dus ook ARIMA) minder geschikt. Op deze locaties dient men extra voorzichtig te zijn met de interpretatie van de ARIMA resultaten en is er waarschijnlijk een grotere rol weggelegd voor ‘expert judgement’.

Recent zijn ook onzekerheidsmarges, of betrouwbaarheidsintervallen, toegevoegd aan de prognose. Deze geven een goed beeld van de onzekerheid die inherent is aan dit systeem, volgend uit eerder beschreven zaken in deze memo. De marge is berekend door een zogeheten ‘hindcast’; een voorspelling waarbij gedaan is alsof historische meetdata niet beschikbaar was zodat vervolgens de fout van deze voorspelling berekend kan worden. Dit is een gedegen en veelgebruikte methode in de statistiek. Het berekenen van de absolute (of relatieve) fout in eerdere voorspellingen, voor een bepaalde tijdshorizon (i.e. aantal maanden

of jaren vooruit), geeft een goede eerste indicatie van de mogelijke fout bij een nieuwe voorspelling, waarbij meetdata daadwerkelijk nog niet beschikbaar zijn. Dit geeft gebruikers meer informatie om op te handelen.

De huidige implementatie geeft echter slechts een enkele marge; er zou ook gewerkt kunnen worden richting meerdere, gekwantificeerde marges of betrouwbaarheidsintervallen (e.g. 90, 95, 99%). Maar het belangrijkste bij het gebruik van de marge(s) is dat de gebruiker deze begrijpt en er mee om kan gaan. Onzekerheidsmarges kunnen een vals gevoel van zekerheid geven; het is namelijk nog steeds mogelijk dat de werkelijkheid zich buiten de marges zal bevinden. Aan de andere kant kunnen ze een gebruiker ook juist een te groot gevoel van onzekerheid geven (zeker bij grote marges), waardoor deze niet in staat is om een beslissing te nemen. Dit zijn gelukkig wel zaken waar aan gewerkt kan worden, door middel van samenwerken met collega's die comfortabel zijn met onzekerheden en/of het volgen van specifieke trainingen. Als de kennis rondom gebruik aanwezig is dan geven onzekerheidsmarges meer inzicht en kunnen deze helpen bij beter onderbouwde beslissingen.

Ongeacht de implementatie, zijn resultaten afhankelijk van ARIMA modelgedrag en modelkeuzes in fits die bij een verschuiving in de data of in de prognoseduur tot andere prognoses kan leiden. De huidige implementatie is volledig geautomatiseerd, en daarmee objectief, maar is wel gebaseerd op eerdere keuzes. Dit zal echter bij zo goed als elke methode het geval zijn (los van de keuze voor een methode op zich), en dus niet per se een nadeel van ARIMA.

4.3 Andere aspecten en alternatieven

Elke statistische methode is alleen zo goed als de data waarop deze gebaseerd is. In het vorige hoofdstuk zijn verschillende aspecten beschreven die hier invloed op hebben. Duidelijk is dat het niet alleen een complex natuurlijk systeem is, maar ook dat er veel menselijke invloeden zijn, zowel op het systeem zelf als op de data van de baggercijfers. Echter is dit waarschijnlijk nog steeds de meest betrouwbare data voor het maken van een prognose. In voorgaand advies (De Wit 2022) zijn enkele belangrijke aanbevelingen gedaan om de tijdreeks van baggercijfers zo eenduidig mogelijk te registreren, dit zou als bijkomend voordeel het opstellen van een prognose verbeteren.

De enige manier om de potentieel negatieve invloed van deze data te beperken is om (ook) andere data te gebruiken, als deze beschikbaar is op een ruimte- en tijdschalen waarop deze nodig zijn. In hoofdstuk 3 zijn verschillende methodes beschreven die (ook) gebruik maken van andere data. Er is, voor zover bekend, echter nog niet gekeken naar een model op basis van kunstmatige intelligentie (artificial intelligence of machine learning). Gezien de complexiteit van het systeem en de beschikbare data is het echter de vraag of dit tot veel betere (i.e. meer nauwkeurige) resultaten zou leiden. Er zou wel een voorzet op gemaakt kunnen worden door alvast potentieel relevante data(collectie) te onderzoeken, zodat er over een paar jaar de mogelijkheid bestaat tot het opzetten van zo'n model. Een volledige beschouwing hiervan is buiten de scope van de huidige analyse. Er kan echter wel gesteld worden dat dit een substantiële inspanning zou vergen. Aangezien ook onzeker is in hoeverre het de resultaten van de baggercijferprognoses zou verbeteren, zou dit het waarschijnlijk alleen waard zijn als het binnen een groter programma omtrent inzicht in het systeem geplaatst zou kunnen worden.

4.4 ARIMA methode voor baggercijferprognoses in de Waddenzee

De huidige methode is juist geïmplementeerd en heeft gezorgd voor de gewenste objectiviteit. Er kan, zeker op lokaal niveau, een behoorlijk grote onzekerheid in de prognoses zitten, welke vooral veroorzaakt wordt door de complexiteit van het systeem (inclusief de invloed van menselijk handelen en de daaraan gerelateerde betrouwbaarheid van de data). Echter is er

geen duidelijk alternatief voorhanden, mede omdat elk alternatief ook beïnvloed wordt door deze complexiteit.

Uiteindelijk is het aan de gebruikers om aan te geven hoe bruikbaar en nuttig de baggercijferprognoses zijn. Er is theoretisch weinig aan te merken op de huidige implementatie. Er zou meer aandacht besteed kunnen worden aan onzekerheden, zowel het bepalen ervan als het voorzien van deze informatie. Gezien de inherente onzekerheden zal het belangrijk blijven om expert judgement toe te passen op de interpretatie van de resultaten, zeker op lokaal niveau. Het verbeteren (en uitbreiden) van de beschikbare data is een belangrijk aspect voor de toekomst.

5 Conclusies en aanbevelingen review baggercijferprognose

Het opstellen van een accurate prognose van baggervolumes is complex. De invloed van belangrijke factoren in veranderingen in de baggervolumes, zoals morfologische systeemveranderingen, aanpassingen aan het systeem zoals een vaargeulverdieping en de invloed van een overgang van contract/aannemer op de baggercijfers zijn notoir moeilijk accuraat te voorspellen. Zelfs indien een kwalitatief hoogwaardige voorspelling gemaakt wordt van elk van de genoemde invloedfactoren op het baggervolume, zal deze een bandbreedte in de orde van een factor +/- 2 hebben. Deze afhankelijkheid en beperking zal altijd de kwaliteit van een prognose blijven achtervolgen. De recent toegevoegde onzekerheidsmarges geven wel inzicht hierin. Op systeemniveau van de hele Waddenzee zullen de verschillende onzekerheden elkaar deels uitmiddelen en zal een prognose minder bandbreedte hebben, maar zeker op deelsysteemniveau wordt de bandbreedte van een prognose steeds significanter (Mulder 2019).

De stelregel 'less is more', geldt ook voor het opstellen van een baggercijferprognose van de complexe Waddenzee. Toevoegen van extra parameters waar de prognose op is gebaseerd maakt de prognose niet automatisch beter. De complexiteit wordt bepaald door het inherent complexe fysisch-morfologische systeem zelf, maar ook door de invloed van menselijk handelen en daaraan gerelateerde betrouwbaarheid van de data. Het is aan te bevelen om de baggercijferprognose daarom zo eenvoudig mogelijk te houden, met duidelijke toelichting over de bandbreedte en achtergronden in keuzes bij het opstellen van de prognose.

Concluderend is ons advies als volgt:

- Blijf de baggercijferprognose op zo objectief mogelijke wijze maken via een statistische methode o.b.v. historische baggercijfers zoals ARIMA.
- Voeg aan de prognose expliciet een expert judgement component toe om belangrijke invloedfactoren in veranderingen in de baggervolumes mee te nemen. Onderbouw deze expert judgement volumes bij het maken van de prognose zodat duidelijk is waar deze op stoelt en achteraf bepaald kan worden of de aannames in de expert judgement juist waren. Op deze wijze wordt zowel de kwaliteit van de prognoses verbeterd alsmede het vertrouwen van mensen in de prognose. Neem in de expert judgement component zowel fysisch morfologische veranderingen mee als de verwachte menselijke invloeden op de baggercijfers. In de expert judgement dient op zijn minst een inschatting gegeven te worden voor de volgende factoren:
 - Trend in baggervolumes per deelgebied door natuurlijke morfologische veranderingen (voor zover nog niet opgepikt door ARIMA);
 - Invloeden van geulverlegging, verdieping of aanpassingen in onderhoudspeil op het baggervolume per deelgebied;
 - Invloeden van verandering in baggermethode of stortlocatie;

- N.B. van elk van de genoemde factoren kan de inschatting zijn dat deze nul invloed heeft op de baggercijferprognose, maar dan is dat ook expliciet gemaakt.
- Voeg aan de bandbreedte die ARIMA zelf bepaald ook een expert judgement bandbreedte toe om zo mensen beter te informeren over de kwaliteit van de prognose en onrealistische verwachtingen hierover tegen te gaan. Een overgang in contract en aannemer zal dan bijvoorbeeld leiden tot een hogere bandbreedte. Daarnaast is onzekerheidsinformatie niet voor iedereen direct te begrijpen en wordt daarom aanbevolen om ervoor te zorgen dat alle gebruikers om kunnen gaan met deze informatie.
- Zorg voor een zo eenduidig mogelijke tijdreeks aan baggercijfers voor verschillende contractperiodes en verschillende baggermethodes door het Deltares advies over registratie baggervolumes (De Wit 2022) te implementeren, want betrouwbare cijfers zijn de basis voor een goede prognose.

Eerst een objectieve prognose met ARIMA opstellen o.b.v. de historische baggercijfers en dan een subjectieve expert judgement toevoegen voor invloeden die niet door ARIMA opgepikt zijn, lijkt wellicht tegenstrijdig. Ook maakt dit het opstellen van een prognose complexer. Toch is dit in onze optiek noodzakelijk om de kwaliteit van de baggercijferprognose in de Waddenzee te verhogen en deze geschikt te maken voor de doelen waarvoor deze opgesteld zijn: controle van de verwachte baggerhoeveelheden met het N2000-beheerplan en optimaal vaarwegbeheer- en beleid en tevens de programmering van de baggerkosten en baggercontract in de toekomst. Toevoegen van expert judgement maakt de prognose weliswaar enigszins subjectief, maar door dit expliciet en onderbouwt te doen voor invloeden die missen in de ARIMA prognose en deze ook mee te communiceren bij het afgeven van een prognose geeft dit de ontvanger en gebruiker van de baggercijferprognose meer houvast en vertrouwen.

Opties tot onderzoek naar mogelijkheden om de prognose nog verder te verbeteren:

- Het is bekend dat meteo condities zoals een jaar met meer of minder golven of meer of minder zoetwaterafvoer invloed hebben op de baggercijfers. Deze fysische parameters zijn echter niet te voorspellen. Het is wel mogelijk om uit de historische datareeksen deze invloeden uit regressie analyses af te leiden en hiermee een opgeschoonde tijdreeks te bepalen. De tijdreeks kan ook gecorrigeerd worden voor menselijke invloeden zoals geulverlegging, verdieping en verandering in baggermethode. Indien deze opgeschoonde tijdreeks in ARIMA gevoerd wordt kan een verbeterde voorspelling verkregen worden voor een representatief gemiddeld jaar. Het wordt aanbevolen om bijvoorbeeld middels een afstudeer- of stageopdracht uit te zoeken of hiermee de voorspellingen van ARIMA significant verbeteren.
- In een afstudeer- of stageopdracht zou ook uitgezocht kunnen worden, eventueel in combinatie met bovenstaande optie tot verbetering van de ARIMA input tijdreeksen, of toepassing van een model op basis van kunstmatige intelligentie (artificial intelligence of machine learning) tot nauwkeurigere prognoses zou leiden.

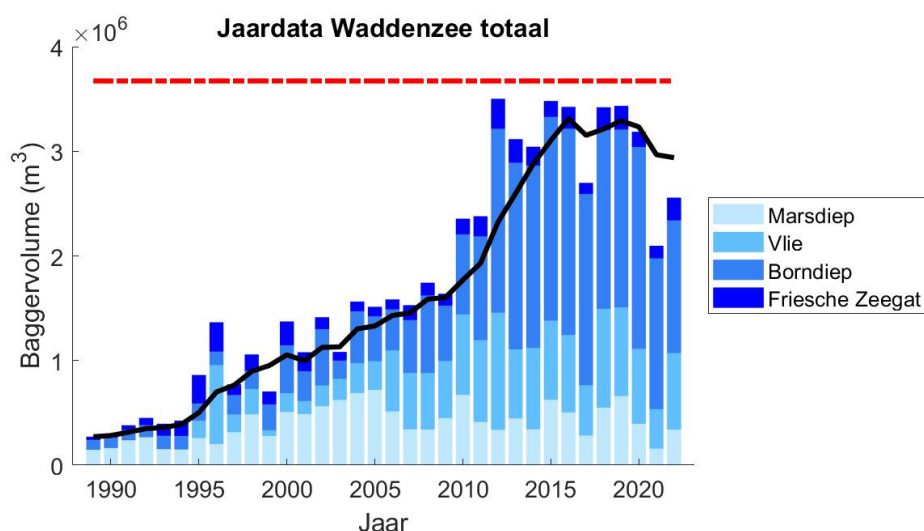
6 Referenties

- Brils, F., 2021. An analysis of Dredging Volumes in the Dutch Wadden Sea, Intern report, Rijkswaterstaat-WVL
- Fioole, A., 2014. Gebruikte tools. CIV IGA-Zuid. Powerpoint presentatie.
- Fioole, A., 2015. Handleiding SURFTREND.
- Mulder, H., 2012. Onderbouwing toekomstige baggerinspanning Waddenzee voor IHP. RWS-WVL. Notitie van 21 oktober 2012.
- Mulder, H.P.J., 2018. Een model voor de verklaring en prognose van baggervolumes in een getijdegeul. Toepassing op de vaarweg bij Holwerd. Versie 0.1, 28-5-2018, Concept.
- Mulder, H.P.J., 2019, Keuze prognosemethode baggerhoeveelheden Waddenzee. Voorstel voor methode en werkwijze. Memo Rijkswaterstaat (definitieve versie), 7 mei 2019
- Van den Boogaard, H. en T. van Kessel, 2016. Regressieanalyse voor prognoses baggerhoeveelheden Waddenzee. Memo Deltares. Kenmerk 1220032-000-ZKS-0002. 7 juli 2016
- Van den Boogaard, H. en T. van Kessel, 2018. Memo prognose baggerhoeveelheden Waddenzee. Deltares. Kenmerk 11202177-000-ZKS-0015. 18 december 2018.
- Van Kessel, T., 2018. Verslag workshop baggerhoeveelheden 2018. Gehouden 4 oktober 2018. Deltares. Kenmerk 11202177-000-ZKS-0014. 18 december 2018.
- Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken and B.A. Kornman, 2003. A model for predicting dredging requirement in the Westerschelde. International Conference on Estuaries and Coasts, November 9-11, 2003, Hangzhou, China.
- Wit, L. de en D. Mastbergen, 2022, Registratie baggerwerkzaamheden in de Waddenzee, Deltares, Kenmerk 11208040-012-ZKS-0001, 21 december 2022.

A Illustratie complexiteit baggercijfers Waddenzee

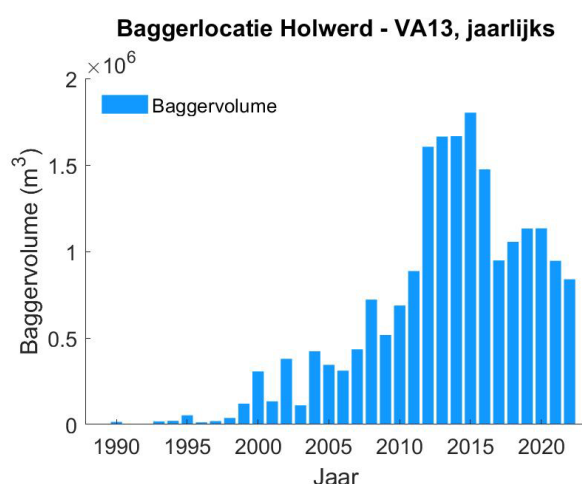
Hieronder staan enkele figuren met historische baggerhoeveelheden die illustreren hoe sterk de baggercijfers kunnen veranderen in de tijd door externe fysische omstandigheden en menselijke invloeden. Als de historische baggerhoeveelheden al zo complex te verklaren zijn, laat dat zien hoe ingewikkeld het is om hiervoor een prognose te maken.

In het eerste figuur, Figuur 6.1, worden de baggercijfers van de totale Waddenzee getoond. Duidelijk zichtbaar is een groeiende trend in baggervolumes, maar de snelheid in groei van het totale volume is niet constant in de tijd, er zijn ook jaren met een afname, en ook de verschillende deelgebieden groeien niet allemaal even snel. Na de sterke toename in 2012 lijkt er een plateau in baggervolume zichtbaar met de laatste twee jaar 2021-2022 zelfs weer een afname. De interessante vraag wordt dan hoe 2023 en verder er uit gaan zien. De grootste toename is zichtbaar voor het Borndiep en wordt veroorzaakt door de toegenomen baggerinspanning in de vaarweg Holwerd Ameland.



Figuur 6.1 Jaardata historische baggercijfers totale Waddenzee 1989-2022, exclusief havens en Eems-Dollard (bron: Rijkswaterstaat, <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@259275/jaarrapportage-baggerwerkzaamheden/>)

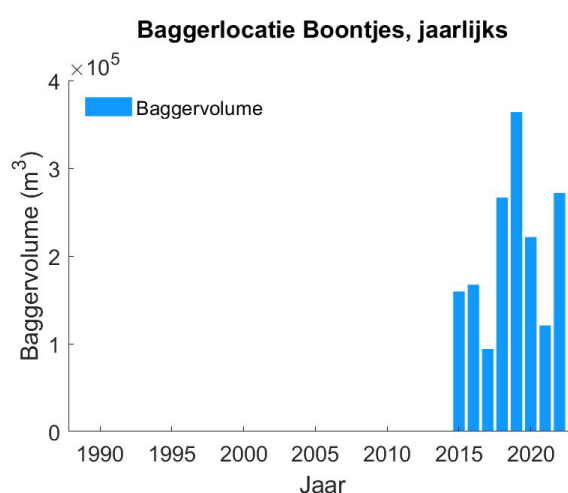
Figuur 6.2 laat de baggervolumes in het eerste deel van de vaarweg Holwerd Ameland zien: Holwerd-VA13. Dit is het deel met de hoogste baggervolumes. Grofweg de helft van het totale baggervolume in de Waddenzee (exclusief havens en Eems-Dollard) wordt hier gebaggerd. De overgangen in baggercontract en aannemer in 2010, 2016, 2022 vallen tegelijk met sprongen in het baggervolume in dit deel. Dat kan te maken hebben met de toegepaste baggermethode, maar ook prikkels in het contract, een andere voorgeschreven manier van baggervolume registratie (na 2022), een andere manier van bodempeilen (wel of niet de fluid mud laag aanpeilen) of uitstellen van baggeren of juist inhaalwerk kunnen een rol spelen. Een overgang in baggercontract blijkt dus te kunnen samengaan met een forse toename in baggervolume (na 2010) maar ook met een forse afname in baggervolume (na 2016). Tegelijkertijd, los van de sprongen rondom een overgang in baggercontract, is er een meerjarige trend van toename in baggervolume zichtbaar in dit gebied welk veroorzaakt wordt door veranderingen in het fysisch morfologische systeem. Ook aanpassingen in de bereikbaarheidsopgaven spelen een rol in de toename in baggervolume. Duidelijk mag zijn dat de combinatie van een meerjarige trend met sprongen van ongeveer een factor twee rondom contractovergangen het opstellen van een nauwkeurige prognose nogal bemoeilijkt.



Figuur 6.2 Jaardata historische baggercijfers Holwerd-VA13 1989-2022 (bron: Rijkswaterstaat, <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@259275/jaarrapportage-baggerwerkzaamheden/>)

De baggervolumes van de Boontjes in Figuur 6.3 illustreren hoe een menselijke ingreep in de vaarweg invloed kunnen hebben op de baggercijfers. In 2012 is een drempel in de Boontjes verwijderd om deze beter geschikt te maken voor de scheepvaart. Vanaf 2015 worden er behoorlijke volumes gebaggerd in de Boontjes. Bij de Glinder tot slot wordt na 2022, sinds de overgang naar een nieuwe aannemer, een andere baggermethode toegepast, namelijk ploegen. Voor deze methode is het ingewikkeld om een precies volume te bepalen omdat het sediment niet opgepakt wordt door het baggerwerktuig maar beneden in het water verplaatst wordt. Dit geldt ook voor water injectie baggeren. Dit illustreert dat een overgang naar een andere baggermethode het opstellen van een prognose ingewikkeld kan maken.

De getoonde voorbeelden van sterke veranderingen in de historische baggercijfers door externe fysische omstandigheden en menselijke invloeden illustreren hoe complex het is om een nauwkeurige prognose op te stellen.



Figuur 6.3 Jaardata historische baggercijfers Boontjes 1989-2022 (bron: Rijkswaterstaat, <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@259275/jaarrapportage-baggerwerkzaamheden/>)