

Piping in getijdenzand - Hoogheemraadschap Delfland

Impactanalyse van kennisontwikkeling



Piping in getijdenzand - Hoogheemraadschap Delfland
Impactanalyse van kennisontwikkeling

Auteur(s)

Marc Hijma
Bas Knaake

Piping in getijdenzand - Hoogheemraadschap Delfland
Impactanalyse van kennisontwikkeling

Opdrachtgever	Hoogheemraadschap van Delfland
Contactpersoon	Sophia Luijendijk
Referenties	n.v.t.
Trefwoorden	Piping, getijdenzand, kering, overstromingskans, geologie, machine learning

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	18-03-2025
Projectnummer	11211044-002
Document ID	11211044-002-BGS-0001
Pagina's	28
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
	Marc Hijma Bas Knaake	

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0			
	Marc Hijma	Huub de Bruijn	Ane Wiersma
	Bas Knaake		

Samenvatting

In de afgelopen jaren is vastgesteld dat getijdenzand minder pipinggevoelig is dan rivierzand, het type zand waarvoor de pipingrekenregel van Sellmeijer is afgeleid. Dit betekent dat de berekende overstromingskans van keringen rustend op getijdenzand op basis van deze rekenregel te groot is. Het Hoogheemraadschap Delfland wil de recente kennis over piping in getijdenzand gaan meenemen in hun beoordeling van de keringen. Specifiek is Deltares gevraagd voor het:

1. Een kaart met voorkomen getijdenzand binnen Delfland, met daarop ook de locatie van de primaire en regionale keringen.
2. Nakijken van de afgekeurde trajecten (3 stuks) of deze op basis van het voorkomen van getijdenzand goedgekeurd kunnen worden. Tevens controle van de doorlatendheidswaarde en de d_{70} .
3. Verder wordt Deltares gevraagd rekening te houden met een controle van de gebruikte invoerparameters op piping, met name doorlatendheid.

De analyse laat zien dat bij de keringen vrijwel al het zand dat binnen 4 m onder maaiveld begint uit getijdenzand bestaat. In het westelijk deel van het beheergebied bestaat het bovenste zand onder de kering soms uit strand- en vooroeverafzettingen, deze kunnen niet tot getijdenzand gerekend worden. Voor het getijdenzand kan een minimale sterktefactor van 1,4 toepast worden. Een deel van het getijdenzand zal uit getijdenplaatafzettingen bestaan, deze zijn in het geheel niet-pipinggevoelig. Op basis van deze studie is geen onderscheid te maken tussen getijdenplaat- en getijdengeulzand.

Voor de drie afgekeurde regionale keringen geldt dat hoge waarden voor doorlatendheid zijn gebruikt, dit zou zeker geoptimaliseerd kunnen worden. Dit geldt overigens ook voor de reeds goedgekeurde locaties. Voor twee locaties wordt geadviseerd de boezem niet te diep te baggeren, om voldoende intredeweerstand te behouden. Laatste onzekerheden kunnen weggenomen worden middels het plaatsen van peilbuizen en een aantal sonderingen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Voorkomen getijdenzand	8
2.1	Methode	8
2.1.1	Gebruikte data	8
2.1.2	Toekennen stratigrafie	8
2.1.3	Vaststellen aanwezigheid getijdenzand	9
2.1.4	Afgeleide karakteristieken uit boringen en sonderingen	10
2.1.5	Slibgehalte in boringen	12
2.2	Resultaten	12
3	Nadere analyse afgekeurde trajecten	20
3.1	RK218-350 bij de Tedingerbreekpolder, Leidschendam	21
3.1.1	Data-analyse	21
3.1.2	Advies	22
3.2	RK202-2560 bij Berkel en Rodenrijs	22
3.2.1	Data-analyse	22
3.2.2	Advies	23
3.3	RK207-570 bij Hoornwijck, Rijswijk	23
3.3.1	Data-analyse	23
3.3.2	Advies	24
4	Controle van de gebruikte invoerparameters	25
5	Discussie en conclusies	26
5.1	Discussie voorkomen getijdenzand	26
5.2	Conclusies	26
5.2.1	Het vervaardigen van een kaart met het voorkomen van getijdenzand binnen Delfland	26
5.2.2	Een nadere, kwalitatieve, analyse van drie afgekeurde regionale keringen	27
5.2.3	Een controle van de gebruikte invoerparameters voor piping voor alle keringen	27
	Literatuurlijst	28

1 Inleiding

In Nederland wordt de overstromingskans door het faalmechanisme piping met name gebaseerd op uitkomsten van de rekenregel van Sellmeijer¹. Deze regel is hoofdzakelijk afgeleid uit schaalproeven in het laboratorium op homogeen zand met een d_{70} -bereik van 150-430 μm . In Nederland liggen echter vele dijken op zand dat is afgezet is in een gebied met getijdenwerking (getijdenzand) en dit zand is gemiddeld fijner dan 150 μm en wordt daarnaast gekenmerkt door de aanwezigheid van slib in het zand. Recent onderzoek heeft aangetoond dat dit type zand gemiddeld ruim twee keer minder gevoelig is voor piping dan de rekenregel van Sellmeijer aangeeft (Projectteam Hedwigepolder, 2023). Voor directe toepassing in de praktijk zijn deze recente inzichten verwerkt in een concrete aanpak, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen getijdenplaat-(beslisregel, niet-pipinggevoelig) en getijdengeulafzettingen (minimale extra sterktefactor van 1,4). Het Expertise Netwerk Waterkeringen heeft zijn vertrouwen uitgesproken in deze aanpak².

Het toepassen van deze aanpak in gebieden met keringen op getijdenzand levert een flinke reductie van de overstromingskans op. Hierbij wordt opgemerkt dat de extra sterkte volgend uit het 'Piping in getijdenzand'-project in zijn geheel veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van een fijne, cohesieve fractie in het zand. In gebieden met getijdenzand spelen echter meer aspecten een rol die tezamen kunnen resulteren in nog lagere overstromingskansen. Denk hierbij aan aspecten als tijdsafhankelijkheid van de belasting in relatie tot de piegegroeisnelheid en het meenemen van meerlaagsheid en anisotropie van het zandpakket.

Getijdenzand is in grote delen van Nederland aanwezig onder zowel de primaire als regionale keringen. In het beheergebied van Hoogheemraadschap Delfland liggen vrijwel alle keringen op getijdenafzettingen, al hoeft dit zeker niet altijd zand te zijn (Figuur 1-1). Het hoogheemraadschap wil de recente kennis over piping in getijdenzand gaan meenemen in hun beoordeling van de keringen. Specifiek is Deltares gevraagd voor:

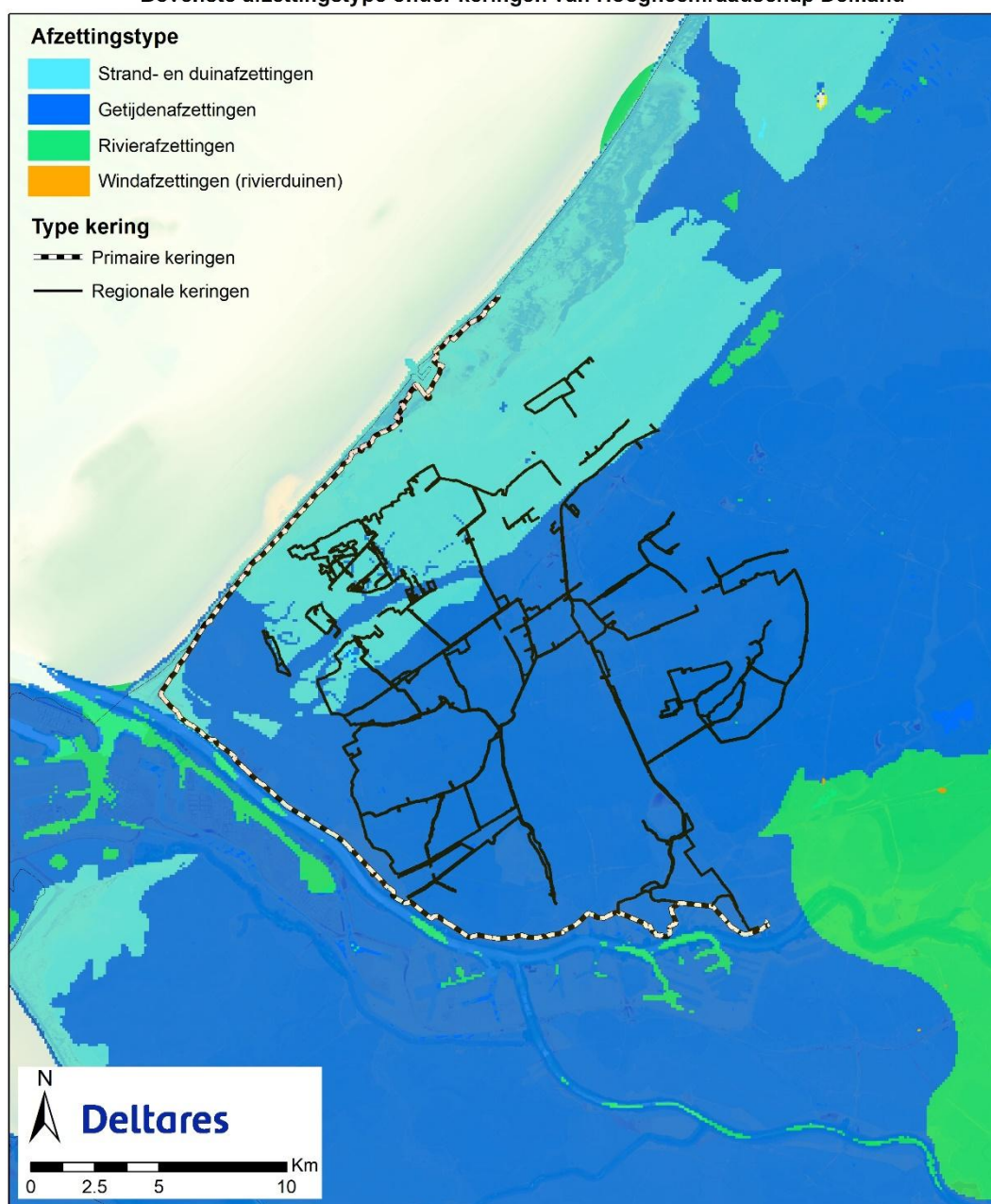
1. Een kaart met voorkomen getijdenzand binnen Delfland, met daarop ook de locatie van de primaire en regionale keringen.
2. Nakijken van de afgekeurde trajecten (3 stuks) of deze op basis van het voorkomen van getijdenzand goedgekeurd kunnen worden. Tevens controle van de doorlatendheidswaarde en de d_{70} .
3. Verder wordt Deltares gevraagd rekening te houden met een controle van de gebruikte invoerparameters op piping, met name doorlatendheid.

De volgende drie hoofdstukken beschrijven achtereenvolgens de werkzaamheden en resultaten voor deze punten. Het afsluitende hoofdstuk bediscussieert de uitkomsten en geeft enkele aanbevelingen voor vervolgstappen.

¹ [Schematiseringshandleiding Piping](#)

² [ENW Advies Handreiking Piping in Getijdenzand](#)

Bovenste afzettingstype onder keringen van Hoogheemraadschap Delfland



Figuur 1-1 Ligging van de primaire en regionale keringen in het beheergebied van het Hoogheemraadschap Delfland en het afzettingstype direct onder de keringen. De verbreiding van de afzettingstypes is gebaseerd op het geologisch model GeoTOP van de Geologische Dienst van Nederland (Stafleu et al., 2013). Dit is een regionaal model en de lijngrenzen moeten daarom niet als 'harde' data beschouwd worden. De onzekerheid rondom de ligging van de lijngrenzen is afhankelijk van de datadichtheid en varieert naar schatting tussen de 100 en 500 m.

2 Voorkomen getijdenzand

2.1 Methode

2.1.1 Gebruikte data

Voor het bepalen van het voorkomen van getijdenzand binnen Delfland is gebruik gemaakt van geologische boringen en geotechnische sonderingen beschikbaar via DINOloket en de BRO. Binnen een buffer van 100 meter is rondom alle primaire en secundaire keringen een extractie gemaakt van beide datasets. Binnen dit zoekgebied waren er circa 13500 boringen en 5700 sonderingen beschikbaar voor analyse.

Aan sonderingen, en ook veel boringen, is standaard geen geologische stratigrafie toegekend waardoor het niet mogelijk is om op basis van deze gegevens het lokale voorkomen van getijdenzand te bepalen. Daarom is met behulp van het 3D-voxelmodel GeoTOP (Stafleu et al., 2013) een stratigrafielabel toegekend aan alle boringen en sonderingen. Dit roept wellicht de vraag op waarom GeoTOP niet direct gebruikt wordt voor het maken van een analyse van het voorkomen van getijdenzand. Een dergelijke analyse is zeker te maken met GeoTOP, en ook met diepte-informatie, maar deze zal niet bruikbaar zijn voor het beoordelen van keringen omdat: 1) GeoTOP een regionaal model is en op lithoklasseniveau lokaal te weinig detailinformatie geeft; 2) GeoTOP geen gebruik heeft gemaakt van sonderingen, terwijl binnen het beheergebied veel sonderingen voorkomen en deze veel informatie omvatten en 3) GeoTOP geen informatie geeft over voorkomen van sliblaagjes en percentages slib in het zand.

Voor de analyse is in alle gevallen uitsluitend gebruik gemaakt van de toegekende stratigrafische labels, ook als boringen al een stratigrafie in de beschrijving beschikbaar hadden. De al beschikbare stratigrafie in boringen is in veel gevallen al verouderd waardoor deze minder betrouwbaar wordt geacht dan de meest recente GeoTOP-modellering.

2.1.2 Toekennen stratigrafie

GeoTOP is een 3D-voxelmodel dat de stratigrafische en lithologische opbouw van de ondergrond tot maximaal 50 meter onder NAP in voxels van 100 x 100 x 0,5 meter weergeeft (Stafleu et al., 2013). Hierdoor is voor elk relevant dieptebereik met betrekking tot piping een geologische stratigrafische eenheid toe te kennen aan boringen en sonderingen waarmee het voorkomen van getijdenzand in kaart kan worden gebracht. De stratigrafie van GeoTOP is toegekend aan de boringen en sonderingen met behulp van GeoST Python (<https://deltares-research.github.io/geost>).

Het principe van het toekennen is schematisch weergegeven in Figuur 2-1. De lithologie in boringen wordt per laag beschreven (Figuur 2-1: "Lith") met een diepteligging van de top en de basis van de laag. GeoTOP geeft op elke x,y-locatie de opbouw van stratigrafische eenheden in een kolom met voxels van elk 0,5 m dikte. Voor elke boring is gekeken binnen welke voxelkolom van GeoTOP de boring ligt. Zo is er dus naast elke boring, als het ware een GeoTOP "boring" van de stratigrafie gemaakt (Figuur 2-1: "Strat"). Vervolgens is op basis van de stratigrafie in de voxelkolom een stratigrafie aan lagen in de boring toegekend. Wanneer een verticale grens tussen stratigrafische eenheden binnen een laag van een boring viel, is deze laag opgeknipt in het gedeelte wat binnen de eenheid boven de grens valt en wat binnen de eenheid onder de grens valt, zonder dat de laagattributen zijn veranderd.

Voor sonderingen was het principe van toekennen hetzelfde als boringen met als verschil dat bij sonderingen de plaatselijke weerstand en wrijving in de ondergrond vrijwel continu, op elke 2 cm diepte, is gemeten. Hierdoor was het alleen nodig de stratigrafie van GeoTOP op diepte toe te kennen aan de gemeten sondeerwaarden en hoefden geen lagen opgeknipt te worden.

Strat	Lith	Top	Basis	Dikte	A	B	C	D	E
NAWA	k	0	0,3	0,3					
	z	0,3	0,7	0,4					
NIHO	v	0,7	1	0,3					
	k	1	1,3	0,3					
NAWO									
	z	1,3	3,3	2,0					
	z	3,3	4,4	1,1					
EC									
	z	4,4	4,9	0,5					
	k	4,9	5,5	0,6					
	z	5,5	6,5	1,0					
NIBA	v	6,5	6,8	0,3					
KR	z	6,3	10	3,7					

Figuur 2-1. Overzicht van de koppeling tussen geologische stratigrafie ("Strat") en lithologie in boringen ("Lith") en de verschillende afgeleide karakteristieken uit de analyse (A t/m E). A) Diepte ten opzichte van maaiveld van de eerste getijdenzandlaag van dikker dan 0,5 m. B) Cumulatieve dikte van alle zandlagen die zijn gelabeld als getijdenzand. C) Dikte van aaneengesloten getijdenzandlagen vanaf het resultaat van A. D) Dikte van aangesloten zandlagen vanaf het resultaat van A van alle typen zand. E) Deklaagdikte, gedefinieerd als dikte tussen maaiveld en top van het zand als resultaat van A.

2.1.3 Vaststellen aanwezigheid getijdenzand

Voor het vaststellen van de aanwezigheid van getijdenzand in sonderingen, zijn de gemeten sondeerwaarden eerst omgezet naar een lithologie. Dit is gedaan met behulp van GeoST, op basis van de conusweerstand en het wrijvingsgetal waarbij een empirische relatie van Robertson (2010) wordt gebruikt om een zogeheten "soil type index" te berekenen (I_{SBT} ; zie vergelijking 1). De berekende I_{SBT} is vervolgens omgezet naar lithologie volgens Tabel 2-1.

$$I_{SBT} = \sqrt{(3.47 - \log(\frac{qc}{pa}))^2 + (\log Rf + 1.22)^2} \quad (1)$$

waarbij:

- qc = Conusweerstand [Mpa]
- Rf = Wrijvingsgetal = $(fs / qc) \times 100$ [%]
- fs = Plaatselijke wrijving [Mpa]
- pa = atmosferische druk = 0.1 Mpa

Tabel 2-1. Vertaling van de berekende I_{SBT} volgens Robertson (2010) naar lithologie.

I_{SBT}	Lithologie
>3.6	Organisch, Veen
2.95 – 3.6	Klei
2.6 – 2.95	Silt mix – kleiige silt tot siltige klei
2.2 – 2.6	Zand mix – siltig zand tot zandige silt
<2.2	Zand – schoon zand tot siltig zand

Holoceen getijdenzand wordt in Nederland gerekend tot de Formatie van Naaldwijk (TNO-GDN, 2025). Alle zandlagen in de boringen en de sonderingen die deze stratigrafische eenheid toegekend hebben gekregen, met uitzondering van de Laagpakketten van Zandvoort en Schoorl (zie Stratigrafische Nomenclator: <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator>), zijn gerekend tot getijdenzand. Bij boringen zijn alle lagen meegerekend die als hoofdcodering zand hebben volgens de NEN5104 normering. Bij de sonderingen is alles gerekend als zand wat als codering “Zand” of “Zand mix” heeft gekregen ($I_{SBT} < 2.6$; Tabel 2-1).

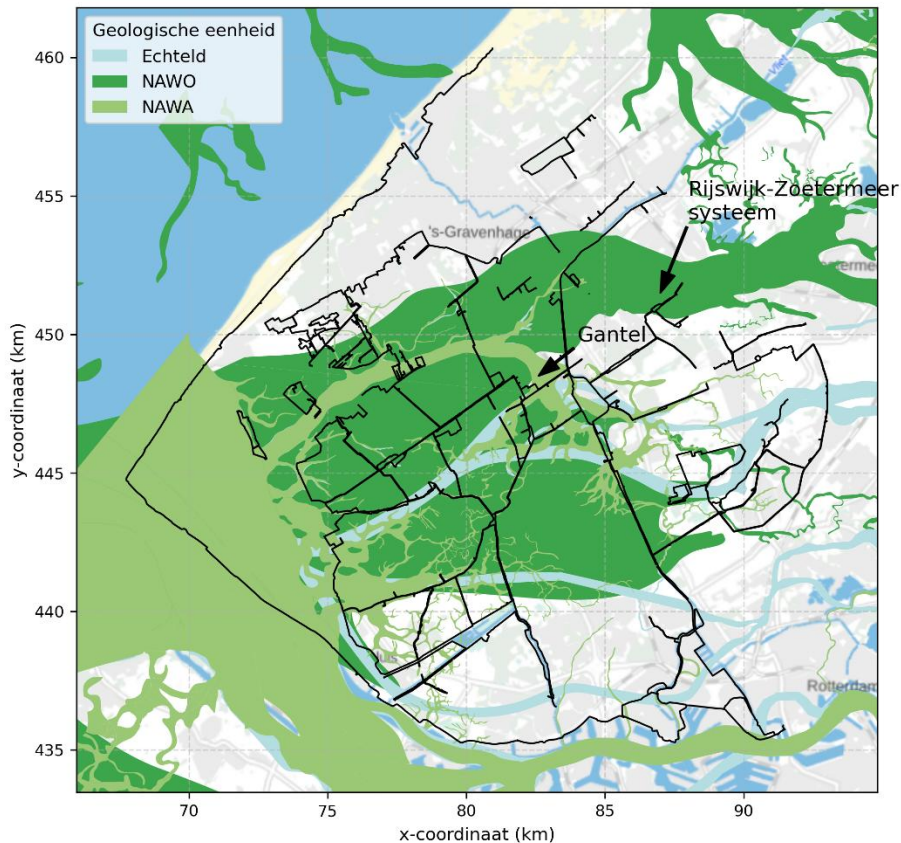
2.1.4 Afgeleide karakteristieken uit boringen en sonderingen

Bij de analyse zijn de volgende karakteristieken afgeleid uit de boringen en sonderingen. Hiervan is een overzicht gegeven in Figuur 2-1 (A t/m E), waarbij van elke afgeleide schematisch is weergegeven wat het inhoudt. Let wel: er is niet gecorrigeerd voor een verhoogd maaiveld ter plaatse van een kering, dus onder een kering liggen horizontale lagen altijd dieper ten opzichte van maaiveld dan naast de kering.

- Diepte ten opzichte van maaiveld van de eerste getijdenzandlaag van dikker dan 0,5 meter. Hierbij is uitsluitend gekeken naar onafgebroken zandlagen van 0,5 m of dikker. Kleine verstoringen door bijvoorbeeld dunne kleilagen waren hierbij niet toegestaan.
- Cumulatieve dikte van alle zandlagen die zijn gelabeld als getijdenzand volgende uit de methode beschreven in paragraaf 2.1.3. Hierbij hoeven de zandlagen niet onafgebroken te zijn en mogen dus afgewisseld zijn met bijvoorbeeld klei- of veenlagen. Vanuit pipingperspectief is met name de aanwezigheid van eventuele stoorlagen (klei en/of veen) relevant. Dit is echter moeilijk kwantitatief vast te stellen binnen deze hoeveelheid boringen en sonderingen. Voor pipinganalyse zijn met name de diktes uit C en D van belang.
- Dikte van de aaneengesloten getijdenzandlaag vanaf de top van het getijdenzand (resultaat A). Net zoals bij A, waren ook hier geen verstoringen van andere lagen toegestaan. Dit resultaat wordt in paragraaf 2.2 samen genomen met D en dus niet los gepresenteerd. Het wordt wel meegeleverd als resultaat aan Hoogheemraadschap Delfland.
- Dikte van de aangesloten zandlaag vanaf de top van het getijdenzand (resultaat A) waarbij ook geen verstoringen in de zandlaag waren toegestaan. Hierbij zijn alle types zand meegerekend omdat getijdenzand direct aansluitend voor kan komen op bijvoorbeeld fluviatiel zand.
- Deklaagdikte, gedefinieerd als de dikte tussen maaiveld en de top van het getijdenzand (resultaat A), ook als hierbinnen nog andere zandlagen voor komen. Dit resultaat wordt gecombineerd met A gepresenteerd.

Omdat de boringen en sonderingen lokale puntmetingen zijn, is er ook een ruimtelijke voorspelling gemaakt van de dikte van het getijdenzand op basis van het resultaat van B. Deze voorspelling is gemaakt met behulp van een “gradient boost regression” (GBR)

machine-learning algoritme. Hierbij werd getraind op locatie (x,y-coördinaten) van boringen en sonderingen in combinatie met geologische informatie afkomstig uit karteringen, omdat hierbij het uitgangspunt is dat dit sturend zal zijn voor de te verwachte dikte van getijdenzand. Hierbij is de methode gevolgd van Van Onselen & Knaake (2024). De toegevoegde geologische informatie bestond uit de geologische en geomorfologische kaart (beschikbaar via www.dinoloket.nl) en meer specifieke karteringen van (getijden)geuleenheden binnen Delfland afkomstig uit het “Kust-GIS” (Pierik et al., 2016), deze zijn weergegeven in Figuur 2-2.



Figuur 2-2. Gekarteerde Holocene zandige geusystemen van de Laagpakketten van Walcheren (NAWA, getijdenzand) en Wormer (NAWO, getijdenzand) afkomstig uit “KustGIS” (Pierik et al., 2016) en de Formatie van Echteld (rivierzand) afkomstig uit Cohen et al. (2012).

Gradient boosting is een machine-learning algoritme dat verschillende beslisbomen maakt en de resultaten van verschillende bomen combineert om het voorspellend vermogen te verbeteren. Het bouwt de beslisbomen in sequentie op waarbij het leert van fouten uit de vorige om deze zoveel mogelijk te verkleinen. Resultaten van Van Onselen en Knaake (2024) lieten zien dat dit het meest geschikte algoritme was voor dit type voorspelling in termen van “mean squared error” (MSE) op de validatiedata (zie stappenplan hieronder).

Bij het maken van de dikte voorspelling zijn de volgende stappen gevolgd:

1. Selectie maken van boringen en sonderingen die dieper reiken dan 4 meter beneden maaiveld. Bij deklagen dikker dan 4 meter is de kans op piping zeer klein en daarom is dit dieptebereik relevant³. Daarnaast geldt met name voor boringen dat ze vaak niet dieper dan 4 m gaan. Een dieptecriterium van 4 m zorgt er ook voor dat een oververtegenwoordiging van ondiepe metingen niet leidt tot een bias in de uitkomsten.

³ Zie DIV, 2024. Handelingsperspectief tussenresultaten Piping en Macrostabieliteit, De Innovatieversneller.

2. De uiteindelijke diktevoorspelling is het gemiddelde van 10 verschillende voorspellingen met behulp van de GBR, waarbij elke keer de dataset willekeurig werd gesplitst in trainings- en validatiedata:
 - a. Willekeurig opsplitsen van de dataset in 80% trainingsdata en 20% validatiedata. Respectievelijk waren de gemiddelde en mediane absolute fout van de voorspelling met de GBR 1.05 en 0.33 meter.
 - b. Trainen van de GBR (Scikit-learn GradientBoostRegressor).
 - c. Het getrainde model toepassen op punten in een vast grid van 100 x 100 meter resolutie.
3. Berekenen van het gemiddelde van de voorspellingen en de gemiddelde lokale standaarddeviatie.

2.1.5 Slibgehalte in boringen

Voor piping is de aanwezigheid van sliblaagjes relevante informatie, omdat de aanwezigheid hiervan de doorlatendheid verkleint en hiermee de kans op piping verlaagt. Hierom is ook een analyse gedaan naar de aanwezigheid van sliblaagjes in boringen. Op basis van eventuele bijmenging van silt in zandlagen en op basis van beschreven kenmerken zoals “gelaagdheid”, “silt- en/of kleilagen” of “sliblagen”, welke beschikbaar zijn bij boringen, is een kwalitatieve kans bepaald voor de aanwezigheid van sliblaagjes. Hierbij is uitsluitend gebruik gemaakt van de boringen, omdat dit soort informatie niet beschikbaar is voor sonderingen. Ook is vanwege het empirisch afleiden van lithologie in sonderingen niet vast te stellen of er ook daadwerkelijk sprake is van bijmenging van silt.

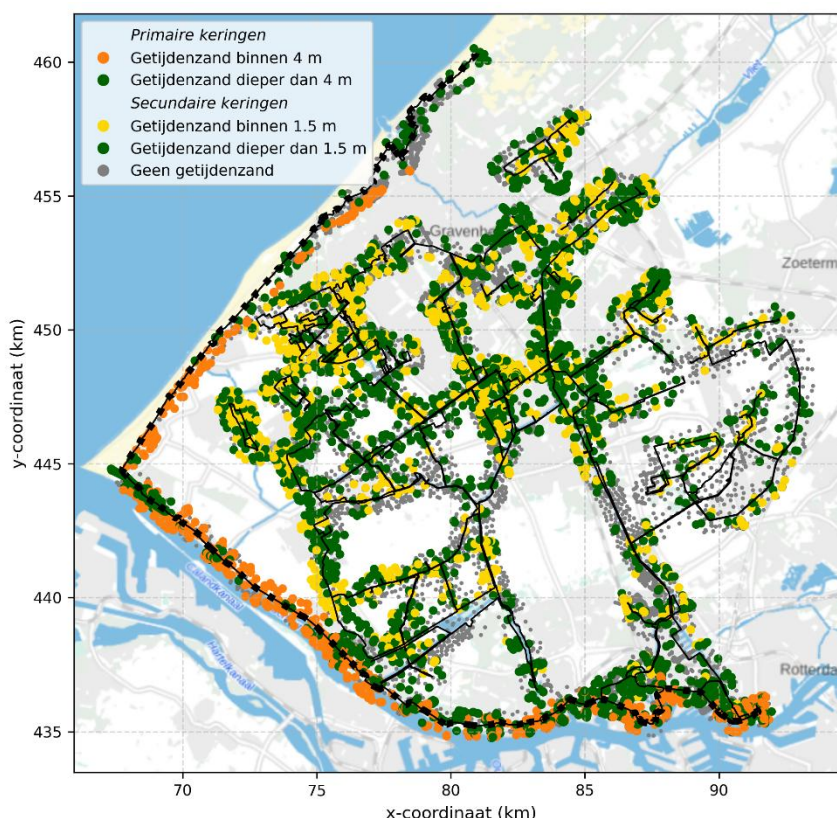
De kwalitatieve kans op sliblaagjes is bepaald door per boring eerst de ratio te berekenen hoeveel procent van de totale dikte van de getijdenzandlaag (Figuur 2-1 B) als bijmenging K3, S3 of S4 (NEN5104 norm) heeft. Ook is op basis van beschreven kenmerken gekeken of er daadwerkelijk gelaagdheid is waargenomen. Vervolgens is de kwalitatieve kans bepaald volgens onderstaande kansen:

1. **Geen**
Boringen zonder getijdenzand.
2. **Laag**
Boringen met getijdenzand maar zonder bijmenging K3, S3 of S4 en zonder waargenomen gelaagdheid.
3. **Gemiddeld**
Boringen waar minder dan 50% van de totale dikte van de getijdenzandlaag (Figuur 2-1 B) bijmenging K3, S3 of S4 heeft en zonder waargenomen gelaagdheid.
4. **Hoog**
Boringen waar meer dan 50% van de totale dikte van de getijdenzandlaag (Figuur 2-1 B) bijmenging K3, S3 of S4 heeft en zonder waargenomen gelaagdheid.
5. **Hoog met waarneming**
Boringen waar meer dan 50% van de totale dikte van de getijdenzandlaag (Figuur 2-1 B) bijmenging K3, S3 of S4 heeft en met waargenomen gelaagdheid.

2.2 Resultaten

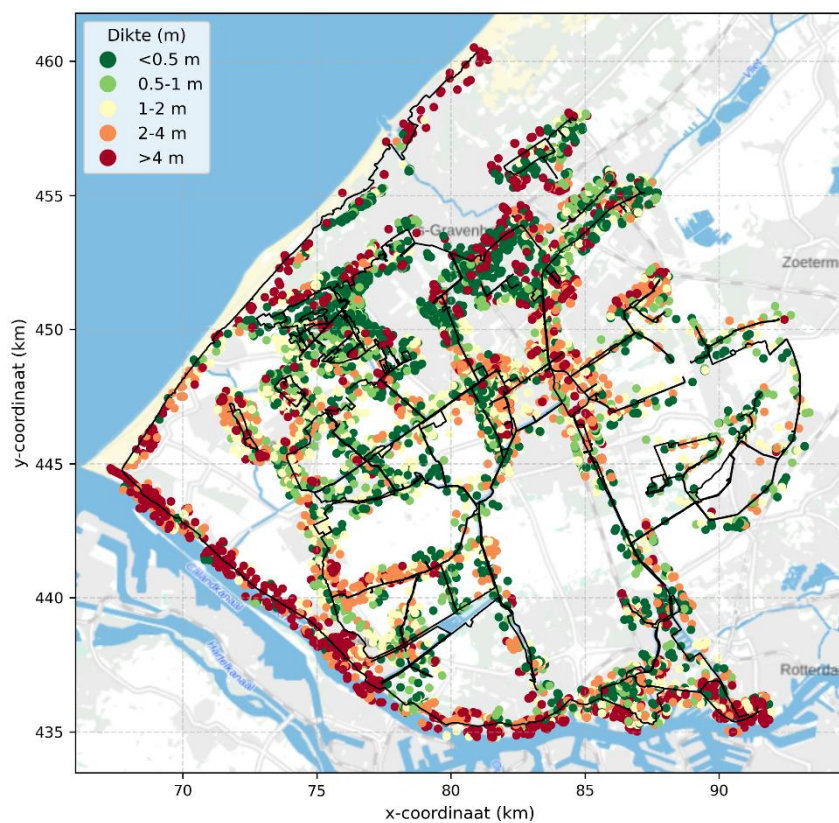
Binnen vrijwel het hele gebied van Delfland is getijdenzand aangetroffen in de boringen en sonderingen (Figuur 2-3). Het aantal boringen en sonderingen waarin geen getijdenzand is aangetroffen neemt toe richting het oosten van het beheergebied van Hoogheemraadschap Delfland. Als er getijdenzand voorkomt, wordt langs de primaire keringen in het grootste deel van de boringen en sonderingen het getijdenzand aangetroffen in de eerste 4 meter beneden maaiveld. Algemeen kan worden aangenomen dat het risico op piping in dieper gelegen getijdenzand zeer klein is voor primaire keringen (DIV, 2024). Voor regionale keringen geldt

dat bij deklagen dikker dan 1,5 m de kans op piping nihil is (STOWA, 2015; er zijn hierbij wel enkele voorwaarden waaraan voldaan moet worden). Lokaal verspreid bevinden zich over het hele gebied enkele boringen en sonderingen waar de top van het getijdenzand binnen 1,5 m vanaf maaiveld ligt maar in de meeste boringen en sonderingen langs regionale keringen wordt het getijdenzand dieper aangetroffen. Langs de Nieuwe Maas bij Rotterdam bevindt zich een relatief groot cluster met boringen en sonderingen waar het eerste getijdenzand op meer dan 4 meter diepte wordt aangetroffen. Ook in de buurt van de kust bevinden zich twee van dit soort clusters, bij Hoek van Holland en bij Den Haag, beiden in het gebied met strand- en duinafzettingen (Figuur 1-1).

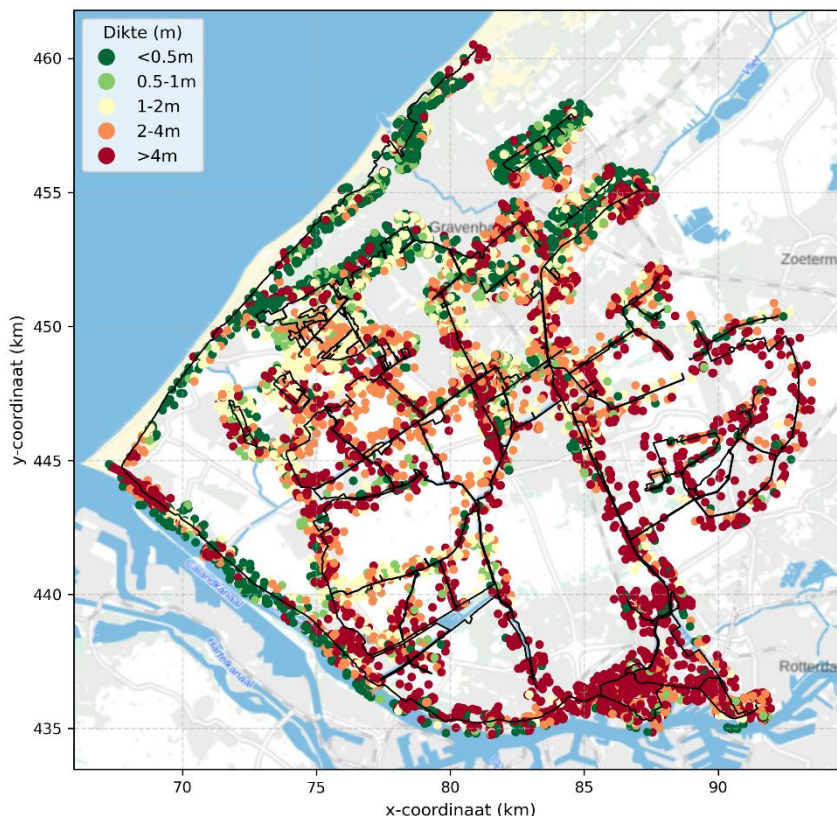


Figuur 2-3. Boringen en sonderingen waar langs de primaire keringen binnen 4 meter vanaf maaiveld getijdenzand voorkomt (oranje) en langs de regionale keringen binnen 1,5 meter vanaf maaiveld (geel), waar het eerste voorkomen van getijdenzand dieper is dan 4 meter beneden maaiveld (groen) en waar geen getijdenzand in voor komt (grijs). Dit is inclusief getijdenzandlagen van 0,5 m of dunner. Als het getijdenzand binnen 4 m (primaire keringen) of 1,5 m (regionale keringen) voorkomt, kan de extra weerstandsfactor van 1,4 gebruikt worden.

De dikste getijdenzandpakketten worden aangetroffen bij de primaire keringen langs de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg (Figuur 2-4). Hier worden in het overgrote deel van de boringen en sonderingen diktes van meer dan 4 meter aangetroffen. In de rest van het Delfland gebied hebben relatief grotere diktes (>2 m) een vrij lokaal voorkomen. Met name in het gebied rondom Den Haag is bij de meeste secundaire keringen de aangetroffen dikte van het getijdenzand minder dan 1 meter. Een vergelijking met Figuur 2-3 laat zien dat als getijdenzand binnen 4 meter beneden maaiveld wordt aangetroffen, de dikte meestal beperkt is tot enkele meters. De grotere diktes rondom Den Haag gelden voor getijdenzandpakketten die dieper dan 4 meter beneden maaiveld beginnen. Die zijn relatief oude getijdenafzettingen (Laagpakket van Wormer) die onder strand- en duinafzettingen worden aangetroffen (Figuur 1-1).



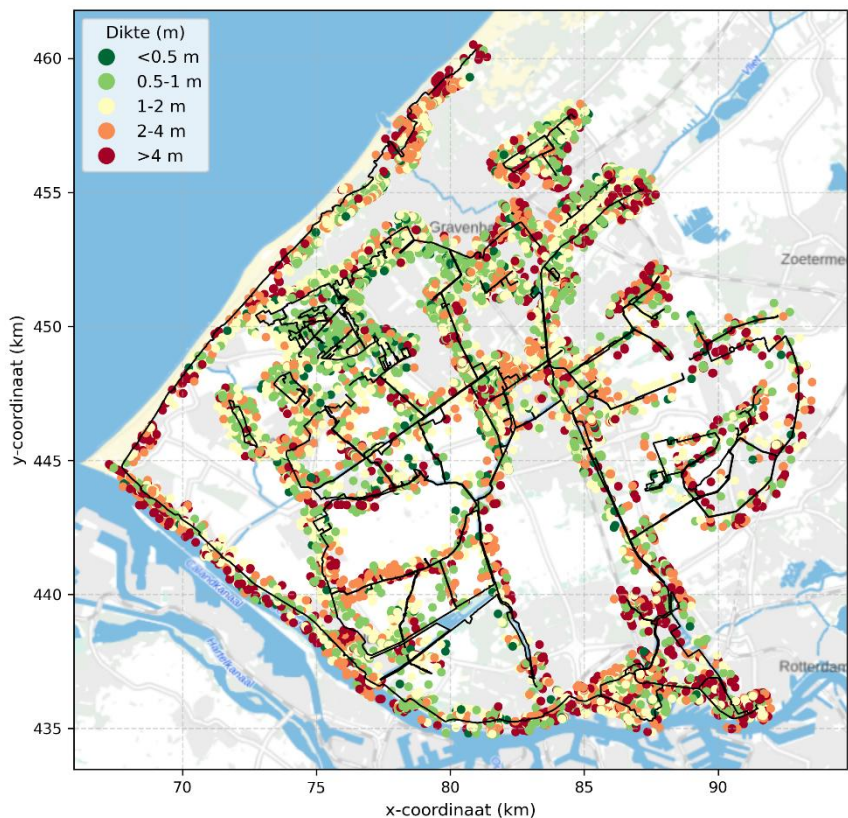
Figuur 2-4. Cumulatieve dikte van het getijdenzand (Figuur 2-1 B) in de boringen en sonderingen.



Figuur 2-5. Deklaagdikte (Figuur 2-1 A en E) in de boringen en sonderingen wanneer de eerste getijdenzandlaag een dikte heeft van meer dan 0,5 m.

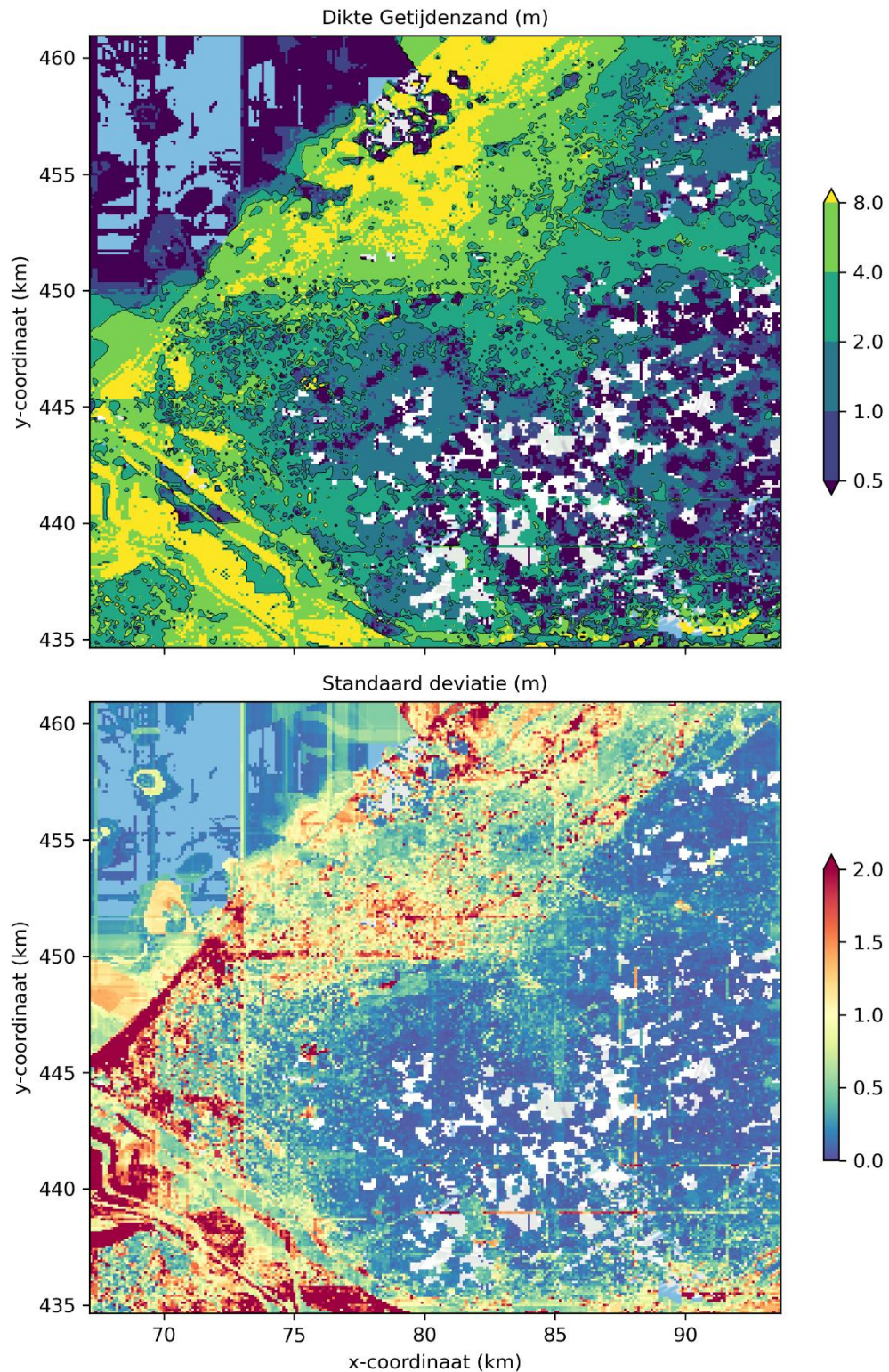
De deklaagdikteresultaten (Figuur 2-5) laten zien dat in grote delen van Delfland, met name in het oosten en zuidoosten, deklaagdiktes van meer dan 4 meter worden aangetroffen. Het verschil in patroon tussen Figuur 2-5 en Figuur 2-3 wordt veroorzaakt doordat in veel gevallen de eerste getijdenzandlaag in de eerste 4 meter dunner dan 0,5 m is.

Bij de dikte van de aaneengesloten zandlaag (Figuur 2-6) is met name het verschil opvallend met de cumulatieve dikte van het getijdenzand langs de kering aan de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg. Ondanks dat hier in veel boringen en sonderingen meer dan 4 meter getijdenzand wordt aangetroffen (Figuur 2-4), is de aaneengesloten dikte van de eerste zandlaag dikker dan 0,5 meter in veel boringen en sonderingen tussen de 0,5 en 2 meter. Dit duidt erop dat zandlagen in dit gebied relatief vaak afgewisseld zijn met klei- en/of veenlagen.



Figuur 2-6. Dikte van de aangesloten zandlaag vanaf de top van het zand (Figuur 2-1 D) in de boringen en sonderingen.

Net zoals bij de cumulatieve dikte van het getijdenzand (Figuur 2-4) hebben relatief grotere diktes (>2 m) van aaneengesloten zandlagen meer lokale voorkomens (Figuur 2-6). Bijvoorbeeld tussen Den Haag en Delft zijn relatief veel boringen en sonderingen aanwezig, waarin aaneengesloten diktes van 2 meter of meer worden aangetroffen. In sommige gevallen staat dit zand ook in contact met diepere zandlagen zoals Holocene fluviaal zand van de Formatie van Echteld. De dikte van de aangesloten zandlaag (Figuur 2-1 D) kan dus lokaal groter zijn dan die van de cumulatieve dikte van het getijdenzand (Figuur 2-1 B).



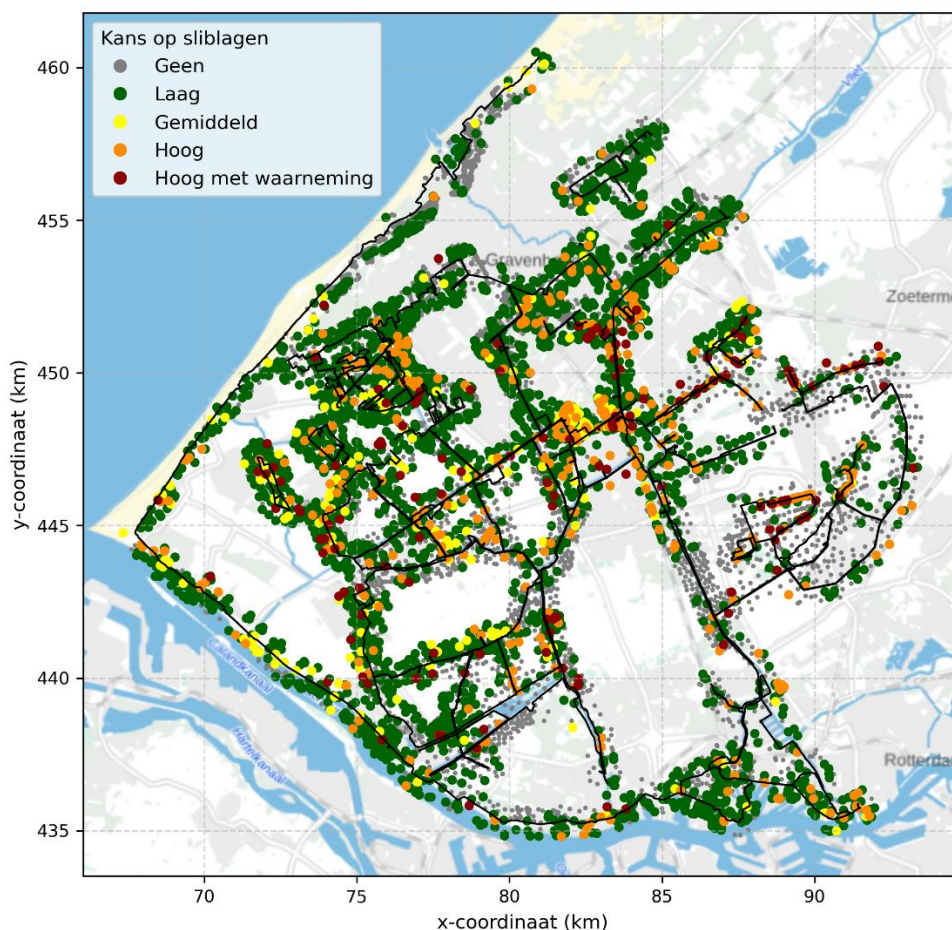
Figuur 2-7. Bovenste paneel: Voorspelde dikte van het getijdenzand op basis van Gradient Boost Regression (zie paragraaf 2.1.4) inclusief de 2 en 4 meter dikte contourlijnen. Onderste paneel: Standaarddeviatie van de voorspelde dikte.

De voorspelde dikte van het getijdenzand in het Delfland gebied (Figuur 2-7) laat een aantal duidelijke patronen zien die over het algemeen goed overeenkomen met de ligging van gekarteerde Holocene geulsystemen (Figuur 2-2). De grootste diktes ($>4 \text{ m} \pm 2 \text{ meter}$) zijn

zoals verwacht te zien langs Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg waar in het Laat Holocene een geulsysteem actief was (Pierik et al., 2017). Dit heeft geleid tot relatief dikke pakketten getijdenzand, behorend tot het Laagpakket van Walcheren. Ook de vertakkingen van dit geulsysteem (Figuur 2-2), zoals de Gantel en de vertakking vanuit de Nieuwe Waterweg naar het oosten (ter hoogte van x 75 km, y 440 km), zijn duidelijk zichtbaar in de voorspelde dikte (Figuur 2-7). Binnen deze geulsystemen is de voorspelde dikte vrijwel altijd tussen de 2 en 4 meter $\pm$ 1 meter. Ditzelfde geldt voor het "Rijswijk-Zoetermeer systeem" (Figuur 2-2). Dit is echter een ouder systeem (Hijma et al., 2009) en het zand wordt tot het Laagpakket van Wormer gerekend.

Opvallend zijn de grote voorspelde diktes aan de kust bij Den Haag (Figuur 2-7), die te maken hebben met de aanwezigheid van de eerder beschreven dikke pakketten oudere getijdenafzettingen onder de strand- en duinafzettingen.

De diktevoorspelling heeft een gemiddelde standaarddeviatie van circa 1 meter en de onzekerheid wordt groter met een toename van de mogelijke dikte. De standaarddeviatie is het grootst langs de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas en het gebied bij de kust bij Den Haag waarbij deze oploopt tot meer dan 2 meter. Binnen geulsystemen als de Gantel en het Rijswijk-Zoetermeer systeem ligt de standaarddeviatie lager en dichtbij de gemiddelde standaarddeviatie. De relatieve mediane standaarddeviatie bedraagt 17%.

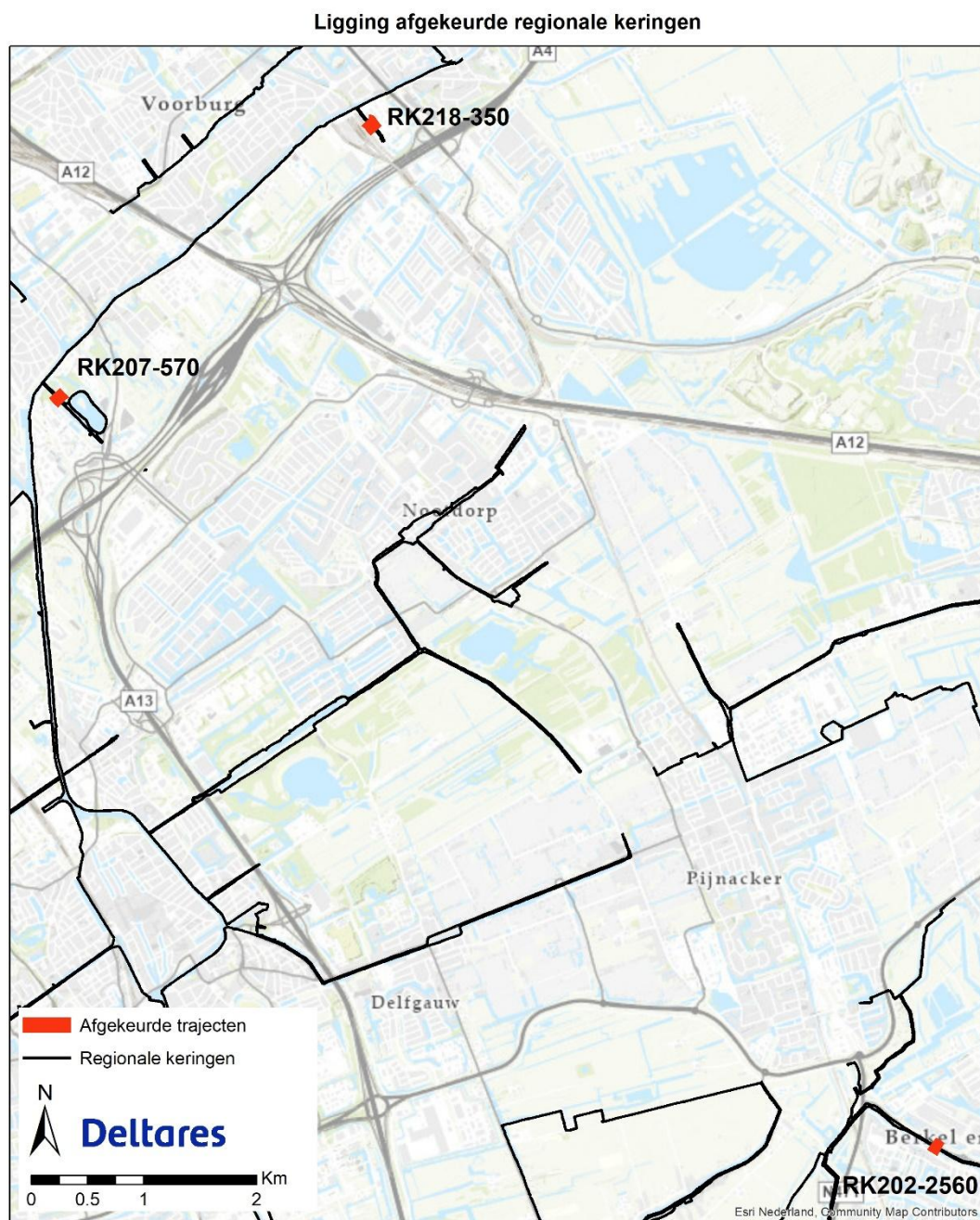


Figuur 2-8. Kwalitatieve kans op sliedlagen afgeleid uit de boringen (zie paragraaf 2.1.5) in het Delfland gebied.

De kans op sliblagen is in het grootste deel van het Delfland gebied laag (Figuur 2-8). Wel is op basis van een vergelijking met Figuur 2-2 te zien dat de kans op sliblagen vrijwel uitsluitend groter wordt (gemiddelde kans of hoger) binnen de grenzen van de gekarteerde geulsystemen richting het binnenland zoals de Gantel en het Rijswijk-Zoetermeer systeem. Langs de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas is de kans op sliblagen over het algemeen laag, wat er op duidt dat het getijdenzand daar relatief homogeen is.

3 Nadere analyse afgekeurde trajecten

Door het Hoogheemraadschap is aangegeven dat drie trajecten van de regionale keringen initieel zijn afgekeurd: RK218-350, RK202-2560 en RK207-570 (Figuur 3-1). Van deze trajecten zijn Excel-sheets en beoordelingsrapportages aangeleverd die gebruikt zijn voor het berekenen van de overstromingskansen door piping. Voor dit rapport zijn voor elk traject de beschikbare ondergrondgegevens bekeken en de Excel-sheets gecontroleerd. Hieronder worden de bevindingen voor elk traject apart gepresenteerd.



Figuur 3-1 Ligging van de afgekeurde trajecten van de regionale keringen.

3.1 RK218-350 bij de Tedingerbroekpolder, Leidschendam

3.1.1 Data-analyse

De afgekeurde kade ligt tussen de Goo Wetering en een NS-onderhoudslocatie. Bij het afgekeurde deel ligt de kruin van de kade rond 0,3 m NAP, terwijl het achterland rond -1,2 m NAP ligt. Het boezempeil ligt op 0,08 m NAP, het polderpeil op -1,93 m NAP en er is gerekend met een kwelweglengte van 10,4 m.

Volgens het GeoTOP-model begint het Hollandveen tussen -2,5 en -3 m NAP, met daarboven getijdenafzettingen van de Formatie van Naaldwijk, laagpakket van Walcheren. Eventueel voorkomend zand kan daar dus tot het getijdenzand gerekend worden. Uit het GeoTOP-model volgt de verwachting dat het Laagpakket van Walcheren hier vooral uit klei bestaat. Lokaal wordt verwacht dat het Hollandveen afwezig is door erosie. Onder het Hollandveen kan zand voorkomen van het Laagpakket van Wormer of het Laagpakket van Zandvoort (beide Formatie van Naaldwijk). Het eerste zand kan tot het getijdenzand gerekend worden, het tweede zand niet. Het Laagpakket van Zandvoort zal hier vooral uit strandwal- en strandafzettingen bestaan (geen getijdenzand).

Er zijn geen boringen en sonderingen beschikbaar direct langs het afgekeurde traject in DINOloket. In het toetsrapport (RPS, 2021) staat één boring (mbk7_07) en één sondering (54702_12) op de kade van dit traject. In de boring (die representatief wordt geacht in het rapport) begint een 0,4 m dikke veenlaag op -3,1 m NAP. Onder het veen zit een 1,9 m dikke zandlaag. Boven het veen ligt tussen -1,9 en -2,7 m NAP een matig fijne zandlaag met daarin wat puin. Beide zandlagen bestaan uit getijdenzand. In de sondering zit het veen wat ondieper en is de ondiepe zandlaag niet aanwezig. De zandlaag onder het veen is wel aanwezig.

Ten noorden van het traject komen daarnaast veel archeologische boringen voor. Het maaiveld ligt daar wat hoger, maar de diepere boringen laten vooral klei zien boven het Hollandveen. Aan de bovenkant van de klei komt vaak een tweede veenlaag voor (rond -1 m NAP). De boring ten zuiden van het traject (B30G0869) laat onder de verstoringslaag aan maaiveld ook geen zand zien. Onder het Hollandveen wordt af en toe wel zand aangetroffen.

De belangrijkste parameters die gebruikt zijn voor de beoordeling zijn opgenomen in Tabel 3-1. In deze tabel zijn ook enkele opmerkingen geplaatst bij deze parameters.

Tabel 3-1 Opmerkingen bij gebruikte parameters tijdens de beoordeling voor traject RK218-350

	Dikte deklaag (m)	Dikte zandlaag (m)	Kh zandlaag (m/s)	d ₇₀ zandlaag (µm)
Beoordeling	0,27	0,8	5×10^{-5}	150
Opmerking	De dikte van de deklaag in het toetsrapport is gelijkgesteld aan de afstand tussen de bodem van de sloot in het achterland en het getijdenzand. Dat is logisch. Onderkant deklaag komt overeen met potentiële top van de Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren.	Dikte is door de beoordelaars afgeleid uit boring mbk7_07.	Komt neer op 4,3 m/dag. Dit is hoog voor een dunne zandlaag van het Laagpakket van Walcheren. Verwachting is dat deze eerder tussen 1-2 m/dag zal liggen.	Is de laagste waarde die ingevuld mocht worden, dus begrijpelijke keuze. Voor getijdenzand ligt de d ₇₀ vaak rond 110-130 µm.

3.1.2 Advies

De boring beschrijft zand boven het Hollandveen. Dit zand bevat wat puin door menselijke activiteiten (bebouwing, schuurtjes, enz.), maar is zeer waarschijnlijk wel natuurlijk afgezet. In dat geval is het getijdenzand, behorend tot het Laagpakket van Walcheren.

Het is een dunne zandlaag die in de nabijgelegen sondering niet aangetroffen wordt. De laterale verbreiding lijkt daarmee beperkt. Er is op basis van de beschikbare data niet vast te stellen of het getijdengeul- of getijdenplaatafzettingen betreft. Voor het getijdenzand kan de factor 1,4 gebruikt worden.

In combinatie met de verwachte lage doorlatendheid en de forse intredeweerstand vanuit de Goo wetering richting het zand zal de kans op piping zeer klein zijn. Belangrijk hierbij is wel om de Goo wetering niet te diep uit te baggeren; de afstand tussen de bodem van de wetering en de top van het getijdenzand moet zo groot mogelijk zijn. Als check zou een peilbuis geplaatst kunnen worden om vast te stellen of het boezemwater in contact staat met het getijdenzand.

3.2 RK202-2560 bij Berkel en Rodenrijs

3.2.1 Data-analyse

De afgekeurde kade ligt langs de Klapwijkse Wetering. De kruin van de kade ligt rond -2,2 m NAP, het achterland bestaat na een smalle strook rond -4,6 m NAP uit een waterpartij rondom eilanden met woningen. De bodem van de waterpartij ligt op -5,5/-5,6 m NAP (Sophia Luijendijk, persoonlijke communicatie). Het boezempeil ligt op -2,44 m NAP, het polderpeil op -5,6 m NAP en er is gerekend met een kwelweglengte van 33,5 m.

Volgens het GeoTOP-model komt vanaf maaiveld het Laagpakket van Wormer voor (Formatie van Naaldwijk) tot een diepte van circa -11/-12 m NAP. Rond -8/-9 wordt een veenlaag verwacht met daarboven soms zandige klei/kleig zand. Dit zand kan tot getijdenzand gerekend worden. Zand dat voorkomt vanaf een meter of -10 m NAP zal voornamelijk door riviersystemen afgezet zijn en tot de Formatie van Echteld behoren. De kade zelf zal waarschijnlijk uit veen bestaan, mogelijk ook deels uit klei. Ongetwijfeld zal er ook een wegcunet aanwezig zijn voor de Klapwijkseweg.

Er zijn verschillende boringen beschikbaar in het archief van het hoogheemraadschap langs dit traject. Boring HB309-07TE laat een zandlaag zien tussen -6,7 en -9,1 m NAP. Kruinboring HB309-07KR2 is gestaakt op -3,4 m NAP vanwege puin. Aan maaiveld komt een dunne (antropogene) zandlaag voor. Ook kruinboring HB309-06KR2 laat een zandlaag aan maaiveld zien, in dit geval van 0,9 m dik. Rond -6,7 m NAP wordt een dikkere zandlaag aangeboord. In de bijbehorende teenboring (HB309-06TE) begint dezelfde zandlaag op -6,3 m NAP en loopt door tot -9,9 m NAP. Een 3 cm dikke veenlaag scheidt de zandlaag van de volgende zandlaag.

De belangrijkste parameters die gebruikt zijn voor de beoordeling zijn opgenomen in Tabel 3-2. In deze tabel zijn ook opmerkingen geplaatst bij deze parameters.

Tabel 3-2 Opmerkingen bij gebruikte parameters tijdens de beoordeling voor traject RK202-2560.

	Dikte deklaag (m)	Dikte zandlaag (m)	Kh zandlaag (m/s)	d ₇₀ zandlaag (µm)
Beoordeling	0,20	20	1 x 10 ⁻⁴	250
Opmerking	In de beschikbare data begint het zand rond -6,3/-6,7 m NAP. Dit betekent een deklaag van 0,7 m. Vanuit het oogpunt van veiligheid is wellicht een dunnere deklaag geschematiseerd.	Zal gebaseerd zijn op boring 309-06TE. Daar scheidt een dunne veenlaag twee zandpakketten. Als deze veenlaag afwezig is, ontstaat er kortsluiting tussen deze twee zandpakketten. Als vervolgens aangenomen wordt dat het onderste zandpakket tot de Formatie van Echteld behoort, kan de dikte van het zandpakket flink oplopen.	Komt neer op 8,6 m/dag. Voor getijdenzand aan de hoge kant. Wellicht gecombineerd met een verwachte hogere doorlatendheid voor de Formatie van Echteld.	Vrij grof voor een getijdengeul. Wellicht verhoogd door mogelijke aanwezigheid van zand van de Formatie van Echteld.

3.2.2 Advies

Het 20 m dikke geschematiseerde zand zal, indien aanwezig, bovenin uit getijdenzand bestaan en onderin uit rivierzand. Er is op basis van de beschikbare data niet vast te stellen of het getijdengeul- of getijdenplaatafzettingen betreft. Voor het getijdenzand kan de factor 1,4 gebruikt worden.

Hoewel op basis van de beschikbare kartering van riviergeulen in dit gebied geen riviergeul verwacht wordt onder de locatie, is dit echter niet helemaal uit te sluiten. In het geval dat een scheidende veenlaag afwezig is, wordt het mogelijk dat het getijdenzand in contact staat met het onderliggende rivierzand. Om dit uit te sluiten is aanvullend sondeer- of booronderzoek aan te bevelen. Het is daarnaast verstandig de waterpartij niet verder te verdiepen.

3.3 RK207-570 bij Hoornwijk, Rijswijk

3.3.1 Data-analyse

De afgekeurde kade ligt aan de noordoostzijde van een weterring bij het Molenvliet park. De kruin van de kade ligt rond 0,3/0,4 m NAP. Het achterland ligt rond -0,2 tot -0,6 m NAP. Het boezempeil ligt op -0,12 m NAP, het polderpeil op -1,05 m NAP en er is gerekend met een kwelweglengte van 10,7 m.

Volgens het GeoTOP-model begint het Hollandveen tussen -2,5 en -3 m NAP, met daarboven getijdenafzettingen van de Formatie van Naaldwijk, laagpakket van Walcheren. Eventueel voorkomend zand kan tot het getijdenzand gerekend worden. Uit het GeoTOP-model volgt de verwachting dat het Laagpakket van Walcheren hier vooral uit (zandige) klei bestaat. Lokaal wordt verwacht dat het Hollandveen afwezig is door erosie. Onder het Hollandveen kan zand voorkomen van het Laagpakket van Wormer, dit zand kan tot getijdenzand gerekend worden.

Er zijn 2 boringen langs het traject aanwezig in het archief van het hoogheemraadschap (mbk1 en mbt2). Deze boringen laten een vergelijkbaar beeld zien, namelijk een enkele decimeters dikke veenlaag beginnend tussen -3,5 en -3,8 m NAP, met direct op het veen een

zandlaag van 0,2-0,4 m dik. Onder het veen wordt een relatief dik pakket zand aangetroffen, tot dieptes van -8.5/-10,5 m NAP. Dit zand is afgezet door het grote Rijswijk-Zoetermeer getijdengeulsysteem (Hijma et al., 2009).

De belangrijkste parameters die gebruikt zijn voor de beoordeling zijn opgenomen in Tabel 3-3. In deze tabel zijn ook opmerkingen geplaatst bij deze parameters.

Tabel 3-3 Opmerkingen bij gebruikte parameters tijdens de beoordeling voor traject RK207-570.

	Dikte deklaag (m)	Dikte zandlaag (m)	Kh zandlaag (m/s)	d ₇₀ zandlaag (µm)
Beoordeling	0	8,5	$7,76 \times 10^{-4}$	150
Opmerking	Kwelweglengte is rond 10 m, dus waarschijnlijk wordt hier de bodem van de sloot mee bedoeld. Daar kan de deklaagdikte inderdaad erg dun zijn. Dit zand zou dan van het Laagpakket van Walcheren zijn, tenzij de sloot tot -3,5 m NAP reikt. Dan zal het tot het Laagpakket van Wormer kunnen behoren.	Niet helemaal duidelijk waar dit vandaan komt. Het zandpakket van het Laagpakket van Walcheren zal niet dik zijn, van het Laagpakket van Wormer kan het zandpakket tot wel 10 m dik zijn.	Dit komt overeen met 67 m/dag, dit is extreem hoog en niet realistisch voor getijdenzand. Voor grote getijdengeulen zijn in extreme gevallen waarden tot 10 m/dag nog wel mogelijk.	Is de laagste waarde die ingevuld mocht worden, dus begrijpelijke keuze. Voor getijdenzand ligt de d ₇₀ vaak rond 110-130 µm.

3.3.2 Advies

Het aanwezige zand kan tot het getijdenzand gerekend worden. Een belangrijke vraag voor deze locatie is of de veenlaag rond -3,5 m NAP overal aanwezig is. Zo ja, dan is de kans op piping nihil. Als de veenlaag weg is, kan het zand van het Laagpakket van Walcheren direct op het zand van het Laagpakket van Wormer liggen. Hierdoor kan de eerste zandlaag onder de deklaag een aanzienlijke dikte bereiken. Aangezien het zand van het Laagpakket van Wormer hier onderdeel is van het Rijswijk-Zoetermeer getijdengeulsysteem, kan de beslisregel voor getijdenplaatafzettingen niet toegepast worden. De factor van 1,4 kan wel toegepast worden. Ook het meenemen van meerlaagsheid en anisotropie en het uitvoeren van een geohydrologische analyse kan veel uitmaken voor de uiteindelijke berekende overstromingskans.

Het is niet duidelijk waar de geschematiseerde deklaag van 0 m dik van afgeleid is. Dit zou betekenen dat de sloten in het achterland tot -3 m NAP reiken. De gebruikte doorlatendheid is veel te hoog, een logische verwachtingswaarde zou ergens tussen de 2-4 m/dag zijn.

4 Controle van de gebruikte invoerparameters

Het Hoogheemraadschap heeft meerdere Excel-sheets aangeleverd die gebruikt zijn voor de beoordeling van de regionale keringen. Het betreft de sheets DT STPH blad 1, blad 2 en blad 3. Deltares is gevraagd om de invoerparameters te controleren. De belangrijkste parameters worden hier onder in tabelvorm besproken (Tabel 4-1).

Tabel 4-1 Opmerkingen bij de gebruikte invoerparameters.

Parameters	Opmerking
Laagdikte watervoerend pallet	Er zit veel verschil in de gebruikte laagdiktes. In meer dan de helft van de gevallen is de dikte minder dan 2 m, soms zelf minder dan 1 m. Dit zijn óf hele kleine getijdengeulen, maar waarschijnlijker is dat het plaatafzettingen betreft die niet-pipinggevoelig zijn. Dit zou op basis van het beschikbare grondonderzoek in veel gevallen waarschijnlijk eenvoudig vast te stellen zijn. Hierbij is vooral de breed/dikteverhouding van het zandpakket van belang: bij getijdenplaten is het zandpakket relatief dun, maar wel uitgestrekt, terwijl bij getijdengeulen de zandpakketten relatief dik zijn ten opzichte van de breedte. Dit wordt uitgebreider beschreven in het eindrapport van het project <i>Piping in Getijdenzand</i> (Projectteam Hedwigepolder, 2023). Een aantal trajecten heeft diktes van 15 of 20 m voor het watervoerend pakket. Wellicht betreft dit getijdengeulen die in contact staan met onderliggende zandpakketten van de Formaties van Echteld of Kreftenheye. Hier zou nog even goed naar gekeken kunnen worden op basis van (aanvullend) grondonderzoek.
Doorlatendheid zand	Getijdenzand heeft in het algemeen een vrij lage doorlatendheid, omdat het bestaat uit fijne zandkorrels met vaak relatief hoge percentages silt en lutum. Analyse van uitgevoerde HPT-AMPT metingen geeft een mediane horizontale doorlatendheid van 4 m/dag (Hijma, 2020). Daarnaast is er vaak een hoge anisotropiefactor, waardoor de bulkdoorlatendheid nog lager uitvalt. In de Excel-sheet is de laagst gebruikte doorlatendheid 4,3 m/dag, verder wordt vooral 8,6 m/dag gebruikt. Deze waarden zijn mogelijk voor relatief grove, en dikke, getijdengeulen. Deze waarden zijn hoog voor getijdenzandpakketten van hooguit 2 m, zoals gebruikt in de Excel-sheet. HPT-AMPT metingen op getijdenzand laten bijvoorbeeld een mediane horizontale doorlatendheid zien van 4 m/dag en een anisotropiefactor van 4-6 (Hijma, 2020). Voor trajecten RK401 en RK207-570 worden doorlatendheden van meer dan 50 m/dag gebruik. Dit is niet realistisch voor zandpakketten onder regionale keringen en zeker niet voor zand met een d_{70} van 150 μm. Uitgezocht zou moeten worden waarom deze waarden gehanteerd zijn.
d_{70}	In de meeste gevallen wordt 150 μm gebruikt, de minimale waarden die destijds gebruikt mocht worden in de rekenregel. Door het getijdenzandproject is de ondergrens verschoven naar 100 μm. Voor sommige trajecten is daarom nog een aanpassing mogelijk. Een lagere korrelgrootte met dezelfde doorlatendheid leidt overigens tot een lager kritiek verval. Bij trajecten RK109, RK201 en RK202 wordt een d_{70} van 250 μm gebruikt. Dit is relatief grof en komt zelden voor bij getijdenzandafzettingen. Het verlagen van de d_{70} met gelijkblijvende doorlatendheid leidt overigens tot hogere kritieke vervallen.

5 Discussie en conclusies

5.1 Discussie voorkomen getijdenzand

De relatief grote variatie in de dikte van het getijdenzand (Hoofdstuk 2.2) kan goed verklaard worden vanuit de geologische ontstaansgeschiedenis van het gebied. De grootste diktes komen voor op locaties waar vroeger getijdengeulsystemen actief waren (Figuur 2-2). Ook de kans op sliblagen komt over het algemeen goed overeen met het te verwachten beeld op basis van de ontstaansgeschiedenis. In een getijdenmilieu vormen sliblagen zich met name tijdens de kentering van het getij, waarbij tijdens de periode van stilstaand water klei en silt kan bezinken. Doordat langs de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas er continu sprake was en is van input van rivierwater uit het achterland, staat het niet of minder lang stil waardoor de kans op sliblagen kleiner wordt. Dit in tegenstelling tot geulsystemen als de Gantel en het Rijswijk-Zoetermeer systeem (Figuur 2-2), waarbij de kans op sliblagen hoger is, omdat als gevolg van het ontbreken van input van rivierwater de getijdenwerking dominanter aanwezig is.

Bij de resultaten moeten ook enkele onzekerheden in beschouwing worden genomen. Dit geldt met name voor de voorspelling van de dikte (Figuur 2-7). Het bovenste paneel van Figuur 2-7 geeft de meest waarschijnlijke dikte aan op basis van machine learning, het onderste paneel de standaarddeviatie. De mediane standaarddeviatie van de voorspellingen is 17% van de dikte. Dit betekent dat als een dikte van 10 m voorspeld wordt, 67% van de voorspellingen binnen 10 ± 1.7 m valt en 95% tussen 10 ± 3.4 m. Deze onzekerheid wordt mede veroorzaakt doordat de gebruikte datapunten per voorspelling of binnen de trainingsdata of binnen de validatiedata vallen (zie paragraaf 2.1.4). Een belangrijk deel van de variatie wordt ook veroorzaakt door het dieptebereik van de boringen en sonderingen. Dit geldt met name voor gebieden waar de standaarddeviatie het hoogste is (Figuur 2-7). Bij de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg reiken ondiepe boringen bijvoorbeeld niet tot de basis van het getijdenzand, ondanks dat er een minimale boordiepte van 4 meter is gebruikt, terwijl diepere boringen hier een meer reëel beeld van de dikte geven. Doordat de diepte van boringen lokaal sterk varieert en machine-learning algoritmes (en ook interpolatiemethodes) geen rekening kunnen houden met deze bias, is dit terug te zien in een hoge standaarddeviatie.

Bij het bepalen van de deklaagdikte (Figuur 2-5) is om pragmatische redenen zand van de Laagpakketten van Zandvoort en Schoorl buiten beschouwing gelaten. Omdat dit type zand lokaal zowel op als onder getijdenzand kan voorkomen, is het binnen dit project niet werkbaar gebleken om dit als uitzonderingen te introduceren in de analyse door de grootte van de dataset (zie paragraaf 2.1.1). Dit betekent dat binnen het strand- en duingebied (Figuur 1-1) de deklaagdikte niet altijd klopt. Deze zou apart moeten worden afgeleid voor dit gebied, waarbij dan ook bovengenoemde laagpakketten in beschouwing moeten worden genomen.

5.2 Conclusies

Hieronder worden per gevraagd onderdeel enkele conclusies getrokken.

- 5.2.1 Het vervaardigen van een kaart met het voorkomen van getijdenzand binnen Delfland**
Deze vraag was ingegeven door de recente kennisontwikkeling op het gebied van piping in getijdenzand. Het is gebleken dat getijdenzand gemiddeld meer dan twee keer (met voor de praktijk een factor 1,4 als 5% ondergrens) zoveel weerstand biedt tegen piping dan rivierzand

(Projectteam Hedwigepolder, 2023) en voor de praktijk zijn handvatten ontwikkeld om deze extra weerstand mee te kunnen nemen in een beoordeling⁴. Het is daarom belangrijk om te weten waar getijdenzand voorkomt.

De resultaten laten zien dat onder vrijwel alle keringen getijdenzand de bovenste zandlaag vormt. In al die gevallen mag dus de extra sterktefactor van 1,4 toegepast worden (Projectteam Hedwigepolder, 2023). Indien onderscheid gemaakt kan worden of het in deze gevallen om zand van een getijdenplaat (niet pipinggevoelig) of getijdengeul gaat (factor 1,4), zou het risico op piping lokaal dus nog veiliger kunnen worden beoordeeld. Dit onderscheid is echter alleen te maken op basis van lokale geologische profielen die een beeld geven van de architecturale opbouw van de ondergrond. Dit zou van toegevoegde waarde kunnen zijn als er nog enkele keringen op piping worden afgekeurd na het toepassen van de factor 1,4.

De resultaten geven ook inzicht in de dikte van de deklaag boven het getijdenzand. Voor primaire keringen geldt dat de kans op piping bij deklaagdiktes van meer dan 4 m zeer klein wordt. Er wordt momenteel gewerkt aan een handelingsperspectief voor dikke deklagen (DIV, 2024). Als het definitieve handelingsperspectief beschikbaar komt, kan op de basis van de resultaten in het huidige rapport snel de consequentie voor de beoordeling van primaire keringen vastgesteld worden. Voor regionale keringen geldt dat de kans op piping meestal nihil is bij deklagen dikker dan 1,5 m (STOWA, 2015) en op basis van het huidige rapport kan eenvoudig vastgesteld worden waar deze deklaagdiktes voorkomen.

De zandige afzettingen onder de keringen van de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas worden binnen GeoTOP veelal gerekend tot de Formatie van Naaldwijk en daarmee 'technisch' dus tot getijdenafzettingen. Hierbij wordt de kanttekening geplaatst dat dit wel vaak estuariene of zoetwatergetijdenafzettingen zijn, dus afzettingen die ook onder invloed stonden van rivierafoer. In sommige gevallen kan dit betekenen dat het zand grover of minder slibrijk is dan de gemiddelde getijdenafzetting. Bij de beoordeling van deze kering is het wenselijk dit in het achterhoofd te houden.

5.2.2 Een nadere, kwalitatieve, analyse van drie afgekeurde regionale keringen

Onder al deze keringen zal de bovenste zandlaag bestaan uit getijdenzand en kan de factor 1,4 dus direct toegepast worden. De gebruikte doorlatendheid is steeds hoog ingeschat tijdens de beoordeling, hierbij is nog optimalisatie mogelijk.

5.2.3 Een controle van de gebruikte invoerparameters voor piping voor alle keringen

De dikte van de geschematiseerde zandlaag is vaak minder dan 2 m. Dit zijn óf hele kleine getijdengeulen of getijdenplaatafzettingen. In het algemeen zal de doorlatendheid van dergelijk dunne pakketten vrij laag zijn en in combinatie met de geringe dikte, zal de kans op piping zeer laag worden. De gebruikte doorlatendheid zijn in het algemeen aan de hoge kant.

⁴ Dit rapport is te downloaden via deze pagina: <https://publicwiki.deltares.nl/display/HWBPPiping/Generiek>

Literatuurlijst

- Cohen, K.M., Stouthamer, E., Pierik, H.J. & Geurts, A.H., 2012. Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta. Dept. Fysische Geografie. Universiteit Utrecht, Digitale Dataset. doi: 10.17026/dans-x7g-sjtw.
- DIV, 2024. Handelingsperspectief tussenresultaten Piping en Macrostabieliteit, De Innovatieversneller.
- Hijma, M.P., Cohen, K.M., Hoffmann, G., Van der Spek, A.J.F., Stouthamer, E., 2009. From river valley to estuary: the evolution of the Rhine mouth in the early to middle Holocene (western Netherlands, Rhine-Meuse delta). *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 88 (1), 13-53.
- Hijma, M.P., 2020. Anisotropieonderzoek in gebieden met andere afzettingen, Deltares memo 11202960-002-BGS-0020.
- Pierik, H.J., Cohen, K.M., Stouthamer, E., 2016. A new GIS approach for reconstructing and mapping dynamic late Holocene coastal plain palaeogeography. *Geomorphology*, 270, 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.037>.
- Projectteam Hedwigepolder, 2023. Eindrapport Piping in Getijdenzand Hedwigeproject - Onderzoek naar extra weerstand tegen piping, Deltares/Fugro/WHSD en HWBP rapport 1220-164143.R08.
- Robertson, P.K., 2010. Soil behaviour type from the CPT: an update, 2nd International symposium on cone penetration testing. Cone Penetration Testing Organizing Committee Huntington Beach, pp. 8.
- RPS, 2021. Toetsing regionale keringen DAM - cluster 1, RPS rapport NL202012704-R21-033.
- Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F.S., Gunnink, J.L., Schokker, J., Dambrink, R.M., Hummelman, H.J., Schijf, M.L., 2013. GeoTOP modellering TNO 2012 R10991, TNO - Geological survey of The Netherlands, Utrecht.
- STOWA, 2015. Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen - Module D.
- TNO-GDN, 2025. Formatie van Naaldwijk. In: Stratigrafische Nomenclator van Nederland, TNO – Geologische Dienst Nederland. Geraadpleegd op 07-01-2025 op <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator/formatie-van-naaldwijk>.
- Van Onselen, E.P., Knaake, S.M., 2024. Weak Layer Mapping, Deltares report 11207168-030-GEO-0001.