

Memo

Aan RIVM/ AERIUS
Van Mark Bolech en Jerry Gé
Onderwerp 060.67566 Onderzoek ophoogfactoren
binnenvaartsluizen

www.tno.nl
mark.bolech@tno.nl
+31613018020

Datum
1 juli 2026
Onze referentie
TNO-2026-16003

Inleiding

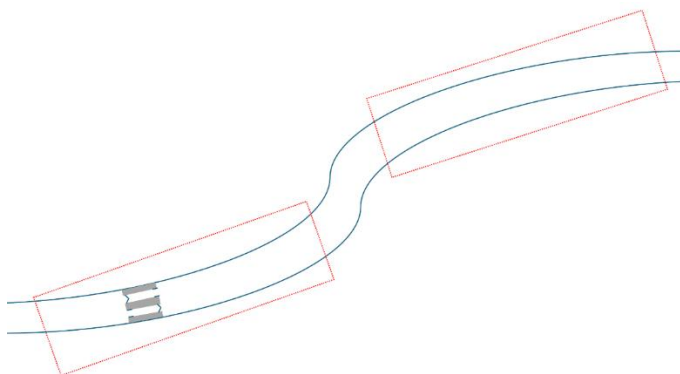
In de Emissieregistratie voor de binnenvaart wordt de afgelopen drie jaar gebruik gemaakt van activiteitsdata op basis van de AIS (voor *Automatic Identification System*) signalen die de schepen uitzenden. Voor AERIUS biedt dit gegeven de interessante optie om uit deze gegevens af te leiden waar het scheepsverkeer meer of minder dan gemiddeld emissies veroorzaakt (bijvoorbeeld bij binnenvaart sluizen). Met dat inzicht kunnen de gehanteerde factoren gevalideerd worden, of -als dat nodig mocht blijken- bijgesteld worden.

Momenteel wordt er in AERIUS Calculator een factor toegepast bij projectberekeningen rond sluizen, om te verrekenen dat in de buurt van zo'n sluis enig oponthoud kan ontstaan omdat niet alle schepen meteen geschikt kunnen worden. Typisch zal een schip eerst vaart minderen, eventueel enige tijd wachten (als het druk is), de sluis invaren en geschikt worden en tenslotte de reis vervolgen. De beschikbaarheid van de activiteitsdata (per schip) voor een aantal jaren, maken het mogelijk om zeer precies vast te stellen hoeveel de emissies veranderen doordat een sluis in het traject zit. Tegen die achtergrond ontstond de vraag om, vergelijkbaar met wat eerder gebeurde voor de zeesluis in IJmuiden ("Factoren zeesluis IJmuiden" TNO 2024), de in AERIUS toegepaste factoren voor binnenvaart sluizen nader te onderzoeken. Daarbij wordt zowel de hoogte van factoren als de spreiding in factoren tussen de verschillende binnenvaartsluizen tegen het licht gehouden.

In het navolgende worden de vragen zoals die in "Notitie onderzoek methodiek factoren binnenvaartsluizen" (RIVM, December 2024) werden opgevoerd, in volgorde beantwoord. Daarbij zijn de dezelfde nummers gebruikt. Na oplevering van de memo kwam de vraag om naast de hoeveelheid emissies, ook de warmte-inhoud van de uitlaatgassen (die de pluimstijging beïnvloedt) mee te nemen. Om die reden is een extra hoofdstuk over dit onderwerp als hoofdstuk 6 toegevoegd.

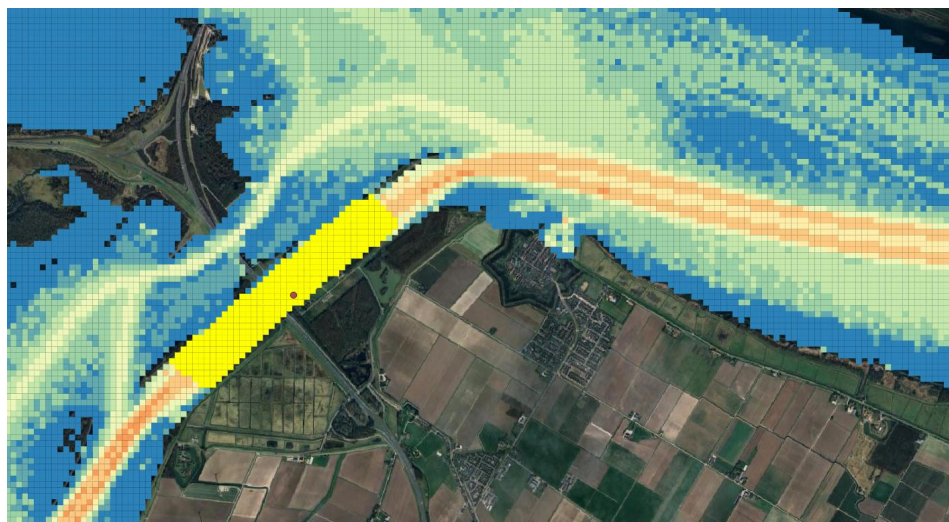
1. Bepaling van factoren uit emissies op basis van AIS-data

In deze studie heeft TNO een vergelijking gemaakt van specifieke emissies (per afstand) over vaarwegsegmenten met daarin de sluis in vergelijking met gelijk lange naastgelegen segmenten waarin de schepen 'normaal' verder varen. Door de scheepvaartemissies (in massa per afstand) in de diverse paren van segmenten op dezelfde vaarweg te vergelijken, wordt meteen duidelijk hoeveel de emissies veranderen in en rond de sluis.



Figuur 1.1: Schetsmatige weergave van de paren geospatiale rechthoeken (conceptueel, hier zonder specifieke lengte) waarin binnenvaartemissies vergeleken worden. De blauwe lijnen geven de oevers van de vaarweg weer, het linker segment bevat een (tweerichtings)sluis.

Doordat in de AIS data voor binnenvaart een véél hogere ruimtelijke resolutie wordt gehaald dan bij zeevaart, zijn de uitdagingen met gridcellen -zoals we die eerder zagen bij de zeesluis IJmuiden- veel kleiner. Factoren voor (geselecteerde) binnenvaartsluizen in Nederland zijn in de basis op dezelfde manier te bepalen zoals eerder gedaan voor de zeesluizen te IJmuiden.



Figuur 1.2: Illustratie van de ruimtelijke verdeling van emissies (oplopend van blauw, via groen-gelig naar oranje) voor binnenvaart, geplotted op gridcellen van 50 bij 50 meter. Het rode rondje ligt centraal in het complex van de Volkeraksluizen, terwijl het gebied waarin de emissies **met** sluis werden berekend, geel is weergegeven.

2. De onderzochte sluizen

Om een breed spectrum van emissieveranderingen door binnenvaartsluizen te krijgen werden 12 sluizen geselecteerd waar relatief veel schepen doorheen varen (ten minste 10.000 passages per jaar). Hierbij is ook gelet op sluizen die relatief veel vertraging opleveren.

Tabel 2.1: Lijst van onderzochte binnenvaartsluizen.

Sluis	Plaats op ranglijst economische schade in 2022 (Panteia, 2023)	Aantal passages in 2022 (Panteia, 2023)
Volkeraksluizen	2	86.679
Krammersluizen	3	33.846
Kreekraksluizen	4	56.581
Grave, sluis	5	12.445
Oranjesluizen	6	35.548
Prinses Beatrixsluis	7	41.814
Prinses Maximasluizen	16	14.826
Oostersluis	17	10.542
Gaarkeukensluis	19	11.808
Sambeek, sluis	20	21.154
Prins Bernardsluis	21	20.877
Maasbracht, sluis	22	17.028

Het “Eindrapport multimodale infrawijzer” (Panteia, 2023) geeft een ranglijst van sluizen die door vertragingen de grootste economische schade veroorzaakten in het jaar 2022. Nummers 2 t/m 7 zijn geselecteerd als drukke sluizen met veel vertraging, en rangnummers 16, 17 en 19 t/m 22 als representatieve drukke sluizen die geen bovenmatige wachttijden hebben. Nummer 1 werd niet geselecteerd omdat die sluis (Terneuzen) inmiddels is vervangen door een nieuwe die véél groter is, en nummer 18 viel af tussen 16 en 22 omdat die sluis (Delden) véél minder schepen schut.

3. Resultaten

In onderstaande tabel 3.1 worden de uitkomsten van het onderzoek gepresenteerd. In de kolommen staan van links naar rechts: de naam van de bekeken sluis, de geografische coördinaten, de stikstof-oxide-emissies in de rechthoek met sluis, de bijbehorende emissies in de nabijgelegen referentierechthoek en tenslotte de fractie van emissies **met**, gedeeld door emissies **zonder**. De precieze locaties van de rechthoeken op de kaart worden aan het eind van deze memo per sluis afgebeeld op een satelliet-opname van het betreffende gebied. Daarbij zijn er steeds twee afbeeldingen van hetzelfde gebied, waarop in geel de rechthoeken zijn weergegeven. In de ene toont de rechthoek de sluis (met een rood rondje aangegeven) en het andere plaatje laat juist het referentiegebied een eindje verderop zien. Omdat de vaarwegfragmenten met en zonder sluis precies dezelfde lengte hebben, is de verhouding tussen geëmitteerde massa met en zonder, gelijk aan de verhouding in emissies per kilometer met en zonder sluis. Uit de tabel wordt direct duidelijk dat de onderzochte sluizen in plaats van een ophoging, juist aanleiding geven tot een **verlaging** van de emissies per kilometer. Er is wel enige spreiding, en waardoor die wordt veroorzaakt is vooralsnog onbekend. Zeker bij de sluizen in Maasbracht, met het hoogste verval (11,8 m) van alle sluizen in Nederland is een wat langere verblijftijd in de kolk waarschijnlijk. Maar, eigenlijk laten alle twaalf sluizen een emissie**vermindering** zien. Dat komt waarschijnlijk door een uitgekend systeem waarbij de vaarsnelheid van de binnenvaart wordt afgestemd op de schuttijden van de sluizen. Er is een soort groene golf (genaamd [blauwegolfverbindend](#)) voor binnenvaartschepen op een bepaald traject (dat wordt afgestemd met en door Rijkswaterstaat). De gemiddeld lagere snelheden bij het binnenvaren van de sluiskolk en de verplichting om de schroef in de sluiskolk uit te zetten, gecombineerd met beperkt hulpvermogen aan boord van binnenvaartschepen (o.a. de generator-set voor

elektriciteit) vertalen zich dan meteen in lage emissies per kilometer vergeleken met varen op kruissnelheid. Bij de modellering van emissies tijdens het schutten is aangenomen dat de hulpmotoren (zoals de generator-set) gewoon draaien en de aandrijfmotor stationair draait (op 10% van het maximale brandstofverbruik; “Meten op Schepen” Topsector Logistiek (2023)). Bij zeeschepen is het vermogen dat nodig is voor het manoeuvreren voor de sluis en ook het hulpvermogen relatief veel hoger.

Tabel 3.1: Geconstateerde NO_x emissies (uit ER 2023) met en zonder sluis en de verhouding daartussen

Sluis	Noorderbreedte	Oosterlengte	NO _x emissies met sluis (ton)	NO _x emissies zonder sluis (ton)	F _{sluis/zonder}
Volkeraksluizen	51,689905	4,408999	46,29	71,76	0,645
Krammersluizen	51,661882	4,160972	22,38	27,36	0,818
Kreekraksluizen	51,449874	4,231807	46,32	55,91	0,829
Grave, sluis	51,769334	5,737912	4,167	5,445	0,765
Oranjesluizen	52,381777	4,962240	10,29	14,17	0,726
Prinses Beatrixsluis	52,015325	5,110740	9,157	14,767	0,620
Prinses Maximasluizen	51,808834	5,455432	4,408	4,899	0,900
Oostersluis	53,227092	6,593871	1,826	2,719	0,672
Gaarkeukensluis	53,248977	6,311940	3,688	4,786	0,771
Sambeek, sluis	51,640179	5,984604	7,972	9,991	0,798
Prins Bernardsluis	51,903229	5,455039	6,751	11,130	0,607
Maasbracht, sluis	51,143374	5,881890	5,591	6,572	0,851

4. Vergelijking met oude factoren

Wanneer de in deze studie gevonden factoren worden gelegd naast de eerdere (aangeduid als “klassiek”) blijkt er een significant verschil. Waar eerder werd uitgegaan van een **ophoogfactor**, wordt nu juist een **verlaging** gevonden. Omdat de verschillen soms fors zijn (zie Tabel 4.1) is het de moeite waard om de verschillen nader te bekijken en te evalueren. Factoren voor binnenvaartsluizen worden tot nog toe met een vaste formule berekend (“Methode emissiebepaling binnenvaartschepen bij sluizen,” TNO en RWS, **2015**). Aannames daarin: **1)** de vaarsnelheid van alle binnenvaartschepen is 15 km/h (dat was destijds óók de aanname in ER), **2)** de wachttijd bedraagt altijd een half uur (een aanname uit het BIVAS systeem) en **3)** de ophoogfactor is omgekeerd evenredig met de dubbele kolk lengte (iets meer dan de maximale lengte van een schip dat nog net veilig in de sluis past). Op basis van AIS werd de **geschatte** vaarsnelheid vervangen door de werkelijk vastgestelde snelheid, is de **geschatte** verblijftijd ingewisseld voor de werkelijke passeertijd van de vaarwegsegment-lengte waarin de emissies werden gemodelleerd, en wordt, in plaats van 2 maal de kolk lengte (zoals in figuur 4.2), gekeken naar een **vaarwegsegment**

van 2,1 km lang (ongeveer de trajectlengte met lagere snelheden; zie figuur 4.3), met precies in het midden van dat traject de sluis/ sluisen. Dat wil zeggen dat naast de sluis(kolk(en)) óók een traject van ongeveer 900 meter voor en na de sluis wordt meegeteld. Het idee hierachter is dat de schipper door [sluisplanning](#) weet hoe laat het schip geschtut kan worden, en dus het schip de laatste afstand rustig laat "uitdrijven" tot voor de sluisingang (met lagere emissies), en na de sluis gaat het ook niet meteen 'vol gas,' want rustig versnellen kost minder brandstof (en ook hier met lagere emissies). Het trajectdeel voor en na de sluis laat atypische, lage vaarsnelheden zien. Dit contrasteert met de "klassieke" aannames dat het schip met 15 km/h aan komt varen, dan **vol** in de ankers moet om binnen ongeveer één scheepslengte tot stilliggen te komen (om een aanvaring met de sluisdeuren te voorkomen), daarna in een half uur het sluisencomplex passeert en een paar honderd meter verderop alweer op referentiesnelheid ligt.

Tabel 4.1: Klassieke en op AIS gebaseerde factoren voor de verschillende sluisen, inclusief de gemiddelde wachttijd voor de betreffende sluis in 2022.

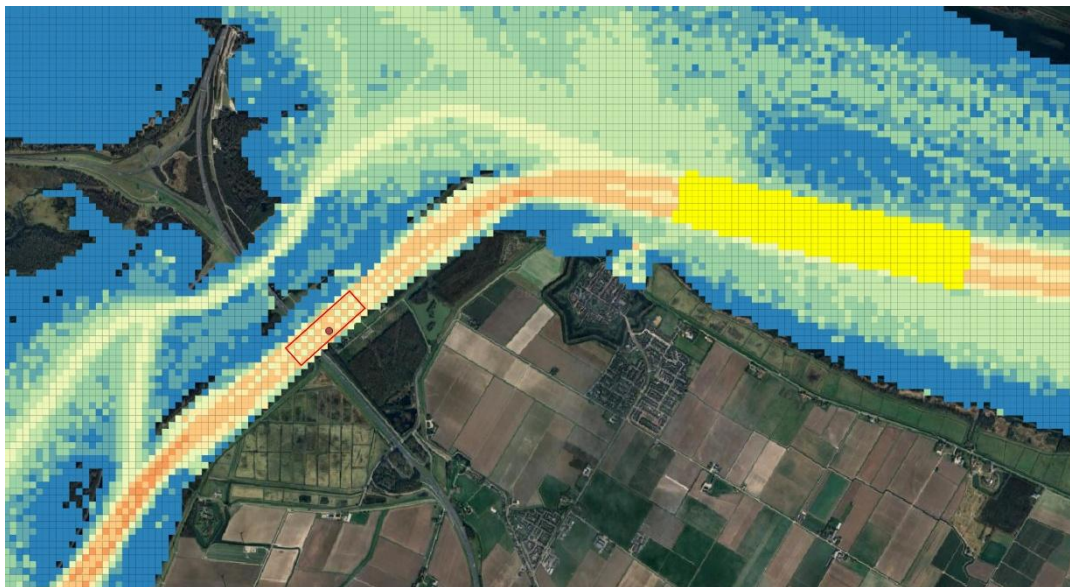
Sluis	Kolkbreedte/m	Kolklengthe/m	Ophoogfactor klassiek	Ophoogfactor AIS	<wachttijd> (min) *
Volkeraksluisen	24,1	329	2,00	0,65	12
Krammersluisen	24	285	2,31	0,82	32
Kreekraksluisen	24	320	2,06	0,83	6
Grave, sluis	16	142	4,63	0,77	44
Oranjesluisen	18	95	6,93	0,73	9
Prinses Beatrixsluis	25	291	2,26	0,62	4
Prinses Maximasluisen	18	200	3,29	0,90	6
Oostersluis	16	194,8	3,38	0,67	7
Gaarkeukensluis	16	190	3,46	0,77	5
Sambeek, sluis	16	238,5	2,76	0,80	3
Prins Bernardsluis	18	350	1,88	0,61	2
Maasbracht, sluis	15,6	137,5	4,79	0,85	2

* gemiddelde wachttijd tot werkelijke schutting in 2022, uit "Eindrapport multimodale Infrawijzer," Panteia (2023)

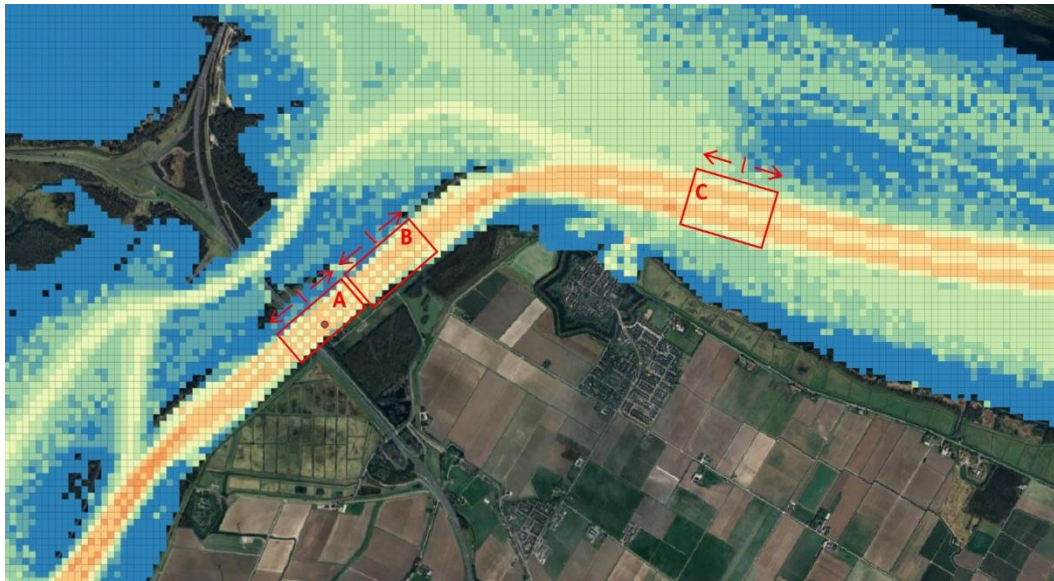
In het geciteerde onderzoek van Panteia bleek trouwens dat in 2022 de gemiddelde wachttijden voor schutting bij vrijwel **alle** sluisen beduidend minder dan 30 minuten waren (slechts 3 van de 75 onderzochte sluisen zaten boven 30 minuten. De "vertragingskampioen 2022," te weten sluis Terneuzen, is inmiddels grootscheeps vernieuwd en heeft nu veel minder vertraging). Hoe dan ook, blijkbaar gaat het passeren van een sluisencomplex -gemiddeld genomen- zo snel dat effectief geen hogere emissie per kilometer resulteert. De gevonden hogere emissies op een open vaarwegsegment ten opzichte van die op even lange stukken met sluisencomplex laten dat eenduidig zien. Dat ligt zeer waarschijnlijk aan de blauwe golf die ervoor zorgt dat de afhandeling van schepen door de sluis rustig (met lage snelheid) maar soepel en vlot (relatief korte verblijftijd) verloopt. In de sluis(kolk) zelf moet de schroef verplicht uit (aandrijfmotor ontkoppeld) en rest een beperkte uitstoot voor de hulpmotoren (vooral de generator-set) en de stationair (10%) draaiende **aandrijfmotor** (met beperkte uitstoot, maar door de lage motorlast wel minder schoon (in uitstootmassa per volume brandstof)). De totale scheepsemissies tijdens het schutten

komen -afhankelijk van het type schip en bedrijf- op circa 20 tot 25% uit van emissies op normale bedrijfssnelheid.

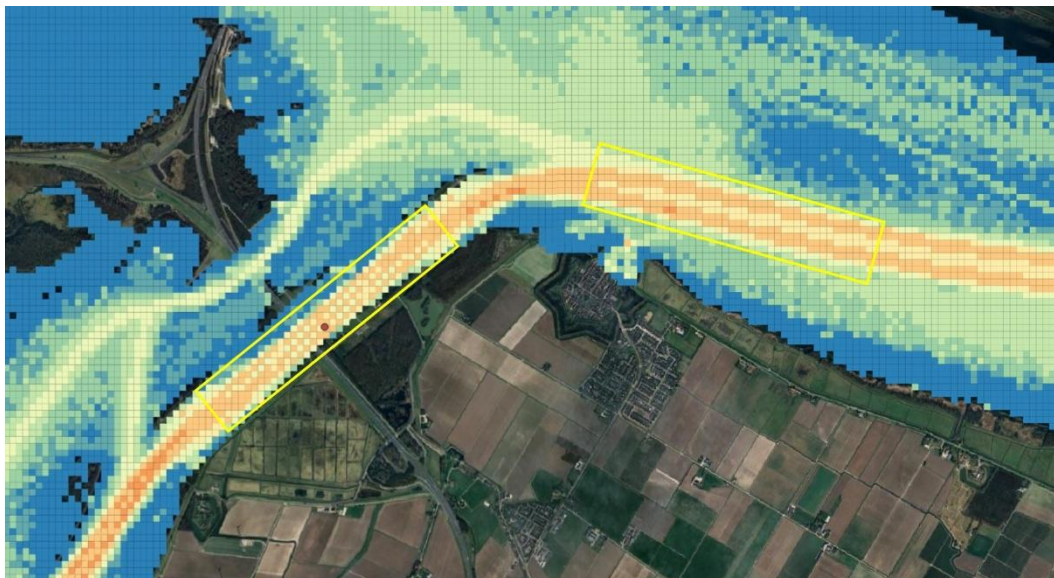
Opmerkelijk is dat op de NO_x-verdelingsplaatjes die voor deze memo zijn gemaakt, bij niet **één** sluis de eigenlijke sluiskolk(en) opgemerkt kan/ kunnen worden door lokaal hogere emissies. Wel zijn bij sommige sluizen de zogenoemde vaarlanen en mogelijk ook wachtstijgers herkenbaar omdat daar (uiterst lokaal) een jaargemiddeld iets hoger emissieniveau wordt gemodelleerd. Merk bij figuur 4.1 op dat dit figuur het complement is van figuur 1.2. In figuur 4.1 is juist het referentie-vaarwegsegment geel gekleurd. Maar de sluiskolken zelf zijn eigenlijk **niet** te herkennen (hoe donkerder oranje, hoe hoger de lokale emissie (van NO_x in dit geval)). De drie routes naar, door en weg van de drie sluiskolken (elk 24 meter breed $\approx$ halve breedte van 1 gridcel) weg zijn vrij eenvoudig herkenbaar. Ook de vaarlanen verder van de sluis verwijderd (zowel links als rechts van het gele referentiegebied) zijn heel duidelijk te herkennen. Voorts is te zien dat het traject verderop, waar de vaart er weer (of bij nadering sluis: nog) in zit **wel** hogere emissies laat zien (donker zalmkleurig in de linkerbenedenhoek en ook noordoostelijk van de sluiskolken in de 'binnenbocht' richting het Hollandschdiep, iets noordwestelijk van Willemstad (de stervormige vesting)).



Figuur 4.1: Ruimtelijke verdeling van NO_x-emissies in 2023 (oplopend van blauw, via groen-gelig naar oranje) rond de Volkeraksluizen. Het rode rondje ligt in het sluizencomplex. In geel het referentievaarwegsegment zonder sluis. De rood omlijnde rechthoek (voor de 3 sluiskolken samen $\approx$ 660 m x 150 m) die het rode rondje insluit, geeft het gebied aan waar het huidige AERIUS een opgehoogde emissie modelleert.



Figuur 4.2: Grafische weergave van hoe de huidige methodiek voor factoren uit zou pakken voor de Volkeraksluis. De lengte van de drie in rood aangegeven rechthoeken (l) is tweemaal de kolkengte (ca. 660 m). De emissies in rechthoek A gedeeld door die in rechthoek B zou de ophoogfactor opleveren. Deze blijkt echter een heel lichte verlaging (ongeveer 0,95) in plaats van een ophoging op te leveren. De snelheid in B is duidelijk lager dan de kruissnelheid. Eerlijker zou zijn om emissies in rechthoek A te vergelijken met die in rechthoek C. Maar, dat zou helemaal voorbij gaan de verlaagde snelheid in B en een overeenkomstig deeltraject aan de andere kant van de sluis B' (niet ingetekend). De lengte van B'+A+B telt op tot ongeveer 2 km.



Figuur 4.3: Grafische weergave van traject van oponthoud (met sluis) met een lengte van 2 km, en het overeenkomstige traject zonder oponthoud (het referentietraject). De lengte van het traject met duidelijk lagere snelheden blijkt ook goed toepasbaar op de andere onderzochte sluizen. De paarsgewijze afbeeldingen per sluis van de vaarwegsegmenten waarin emissies met en zonder sluis werden bepaald (aan het einde van deze memo) laten dat ook zien.

5. Conclusie en aanbeveling

De gevonden verhoudingen tussen emissies in vaarwegsegmenten van gelijke lengte met en zonder sluizencomplex kunnen goed verklaard worden. Het is duidelijk dat er bij de onderzochte sluizen geen verhoging van emissies is rond de sluizen, ook niet wanneer die sluizen wel vaak wachttijden veroorzaken (een “file” van schepen voor de sluis), zoals het geval is bij de bovenste zes sluizen in tabellen 1 en 2. Gemiddeld over alle twaalf de onderzochte sluizen, blijkt de verhouding tussen emissies per kilometer met sluis 0,75 keer zo hoog als per kilometer zonder. Op basis van de inmiddels beschikbare gegevens kan worden vastgesteld dat sommige aannames in de eerder gehanteerde formule (“Methode emissiebepaling binnenvaartschepen bij sluizen,” TNO en RWS, 2015), niet volledig representatief waren voor de feitelijke omstandigheden. Ook al waren deze aannames destijds gebaseerd op de best beschikbare inzichten en methodieken. De nu beschikbare **echte** activiteit data van schepen geven aanleiding om de onderliggende parameters te herzien en waar nodig te actualiseren, zodat de berekeningen beter aansluiten bij de huidige praktijk.

Bedenk hierbij dat de op AIS gebaseerde emissiebepaling in hoge spatiale resolutie informatie geeft over de echte actuele vaarsnelheid, de werkelijke passeertijd alsook de grootte van het vaarwegsegment waarin emissies duidelijk afwijken van gewoon varen. Gezien de stand van de techniek destijds valt de opstellers van de eerdere methodiek overigens niets te verwijten. Het nu beschikbare volledige inzicht in de werkelijke vaarsnelheden van binnenvaartschepen, biedt ook de mogelijkheid om de nauwkeurigheid van de emissie per km te verbeteren. Het kan de moeite waard zijn om voor de relevante CEMT klassen te onderzoeken of de werkelijk vastgestelde vaarsnelheden betere emissievoorspellingen opleveren en of het waarde toevoegt om die aangepaste snelheden in een volgende versie van AERIUS te implementeren.

Gezien de beperkte spreiding ($s = 0,10$ bij een gemiddelde van 0,75), lijkt het verantwoord om één enkele verlagingfactor voor alle binnenvaartsluizen in Nederland toe te passen. Alternatief zouden voor elke sluis apart individuele factoren vastgesteld kunnen worden, waardoor het model veel complexer zou worden. Gezien de beperkte emissies waarover het de facto gaat (een kleine fractie van een lagere emissie dan op open vaarweg), moet aangenomen worden dat dit niet de moeite waard is.

Aanbevolen wordt verder om het vaarwegsegment waar middenin de sluis ligt, en waaraan een lagere emissie wordt toegekend een lengte van 2 kilometer te geven. Met de op AIS gebaseerde emissies zou onderbouwd kunnen worden om die lengte nog groter te kiezen, maar dat is mogelijk een te radicale breuk met de eerdere methodiek, en een lengte van 2 km lijkt een goed compromis, dat in ieder geval de lagere emissies bij naderen en het wegvaren van de sluis voldoende meeneemt.

6. Warmte-inhoud van de uitlaatgassen

Dit hoofdstuk is aan de oorspronkelijke notitie toegevoegd om ook de effecten van de geconstateerde lagere snelheden bij het passeren van binnenvaartsluizen op de warmte-inhoud van de uitlaatgassen mee te nemen. Op basis van gepubliceerde emissiecijfers uit de Emissieregistratie wordt (zoals in eerdere paragrafen beschreven) geconcludeerd dat bij het passeren van een sluis de verbrandingsemissies (o.a. NO_x) niet toenemen (zoals eerder werd aangenomen) maar juist afnemen (ca. 25% lager ten opzichte van de emissies bij op kruissnelheid varen). De verlaging wordt toegeschreven aan het betrekkelijk vloeiend passeren van de sluis bij -gemiddeld genomen- beperkte snelheden ten opzichte van gewoon varen. In deze paragraaf wordt nader onderzocht wat die constatering voor invloed heeft op de warmte-inhoud van de uitlaatgassen. Die warmte-inhoud heeft invloed op de stijghoogte van de pluim uitlaatgassen en kan dus belangrijke invloed hebben op de verspreiding en later depositie van schadelijke bestanddelen uit de uitlaatgassen.

Aandrijfvermogen van binnenvaartschepen bij passeren sluis

Bij normaal varen op een vaarwegsegment heeft het binnenvaartschip een normale kruissnelheid. Daarvoor is het normale aandrijfvermogen nodig en dat zorgt voor een standaard warmte-inhoud van de uitlaatgassen (de basis-getallen zoals in AERIUS worden toegepast). Uit de rapportage “Meten op schepen”¹ is bekend dat de fractie vermogen die ‘normaal’ wordt toegepast om het schip op niet-stromend water zijn gewone snelheid te geven, vaak rond de 40% van het maximale vermogen is. Bij dit bescheiden percentage is belangrijk op te merken dat er vaak een zwaardere motor wordt gekozen voor een schip om flexibiliteit in toekomstige inzet te houden. Wanneer het schip bijvoorbeeld ook als koppelverband ingezet moet kunnen worden, of zwaar beladen de Rijn stroomopwaarts moet kunnen, is véél meer vermogen nodig dan nodig is om rustig door een kanaal te kunnen varen. Boven op het aandrijfvermogen (hier dus geschat op gemiddeld 40%) zullen één of meer hulpmotoren (hier in het bijzonder de generator die boord-elektriciteit opwekt) op een vast werkpunt aanstaan. Daarvoor wordt gemiddeld 13% toeslag aan vermogen geteld. Het totaal van aandrijf- en hulpvermogen komt zo op 53% van het maximale vermogen van de hoofdmotor.

Zodra het schip in de buurt van een sluis/ sluizencomplex komt (vanaf circa 1 km voor de sluis) zal het vaart minderen, rustig richting sluis manoeuvreren en (eventueel nog onderbroken door stilliggen als er wachttijd/ oponthoud is) deze met zeer lage snelheid binnenvaren. Tijdens vaart minderen zal het aandrijfvermogen van het schip terug worden geregeld van rond de 40% tot tussen 10 en 5% om zeer beheerst naar een ligplaats net buiten de sluis te varen of (als de timing precies goed was, en de sluisdeuren al open waren) direct naar een ligplaats in de sluiskolk. Gedurende deze operatie blijft de generator gewoon draaien. Effectief gaat het totale vermogen bij nadering van een sluis dus terug van ongeveer 53% naar ongeveer 20%. Afhankelijk van het te overbruggen hoogteverschil duurt het schutten zelf tussen de 10 tot 15 minuten en in deze periode draait de aandrijfmotor stationair, terwijl de schroef verplicht uit moet (i.v.m. veiligheid). De aandrijfmotor hoeft alleen nog de interne verliezen te overwinnen om te blijven draaien, dat komt overeen met een vermogensfractie van ongeveer 5% van het maximale aandrijfvermogen. In totaal gebruikt het schip in deze fase zo’n 18% van het maximale aandrijfvermogen. Na het schutten en openen van de sluisdeuren, kan het schip weer versnellen. Om ongelukken met andere schepen (en vooral kleine recreatievaartuigen) te voorkomen moet dit beheerst gebeuren. Het schip komt om die reden rustig op gang en zal na ongeveer een halve kilometer weer vrijwel de normale kruissnelheid hebben bereikt. In deze fase wordt het vermogen dus langzaam verhoogd van 18% naar de ‘gewone’ 53% die bij de normale kruissnelheid hoort.

Warmte-inhoud van de uitlaatgassen

De in het bovenstaande beschreven vermogensregimes waar schepen doorheengaan wanneer ze een sluis passeren hebben ook gevolgen voor de warmte-inhoud van de uitlaatgassen. Moderne dieselmotoren hebben een rendement van circa 40-50%. Zo’n 50 tot 60% zijn dus verliezen, waarvan ongeveer 25% in de uitlaatgassen terecht komt en bij lage motorlast tot 30% in koelwaterverlies². Voor AERIUS lijkt het nu het meest praktisch om de warmte-inhoud als volgt in vaartoestanden rond een binnenvaartsluis te splitsen:

¹ J.M. de Ruiter, A. Bhoraskar, en N.E. Ligterink, “Meten op Schepen”, TNO 2023 R12671v2

² Douglas R Carroll “Energy efficiency of vehicles,” SAE International, 2024 eBook, Second edition.

Tabel 6.1: Overzicht van veranderende warmte-inhoud van de uitlaatgassen bij normaal varen in vergelijking met de verschillende fases bij het passeren van een sluis.

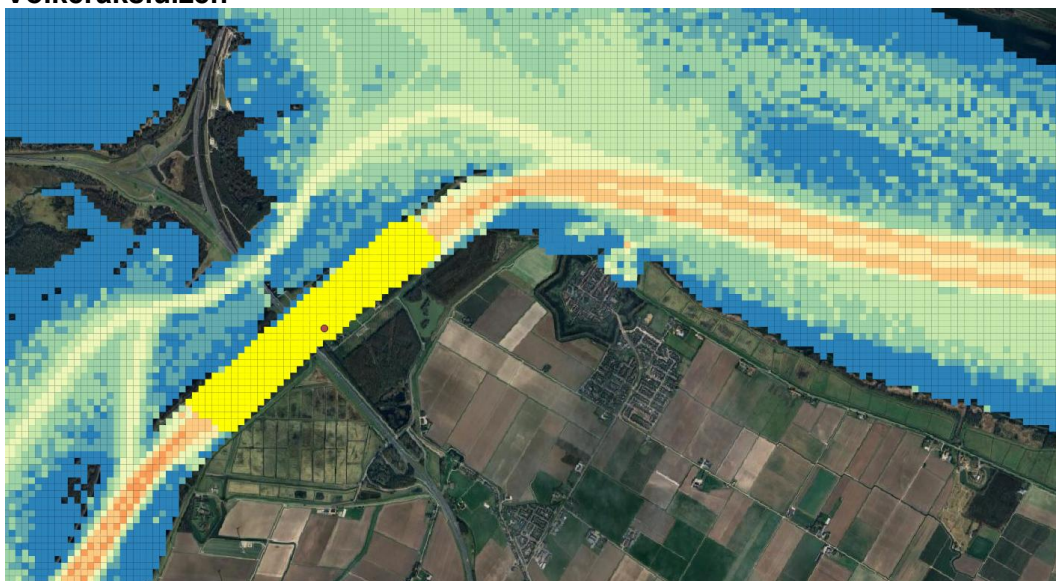
Toestand	Warmte-inhoud uitlaatgassen	Toelichting
Kruissnelheid normaal varen	Exhaust gas heat (EGH) AERIUS	De warmte-inhoud zoals 'standaard' voor een bepaald schip in AERIUS
Schip nadert sluis (ca 1 km)	0,69 x EGH	Gemiddeld (53 tot 20) 36,5% i.p.v. 53% P_{max} $36,5\% / 53\% = 0,69$
Schip wordt geschut (in de kolk)	0,34 x EGH	Circa 18% i.p.v. 53% P_{max} $18\% / 53\% = 0,34$
Schip verlaat sluis en versnelt	0,67 x EGH	Gemiddeld (18% tot 53%) 35,5% i.p.v. 53% P_{max} $35,5\% / 53\% = 0,67$

Hierbij is aangenomen dat het verlies, dat via de uitlaatgassen verdwijnt, constant blijft wanneer de aandrijfmotor lager wordt belast. In de praktijk is dit afhankelijk van vele factoren (type motor, het snelheidsprofiel waarmee de schipper de vaarsnelheid verandert), maar deze vereenvoudigde aanname is zonder verdere verfijning goed genoeg om een onderbouwde afschatting van de warmte-inhoud van de uitlaatgassen en de daarmee gekoppelde pluimstijging te kunnen berekenen.

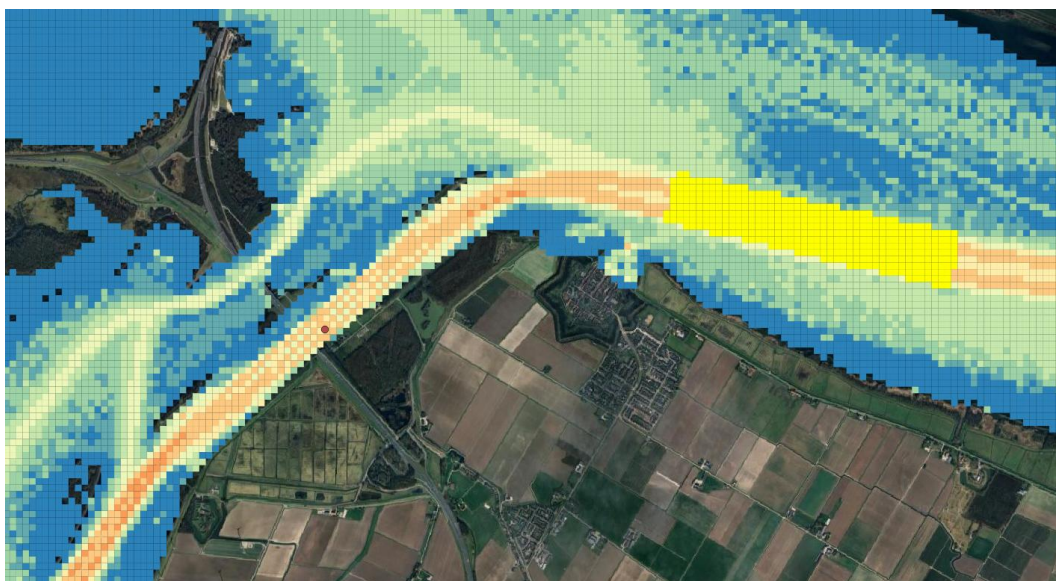
7. Onderzochte vaarwegsegmenten

Op de navolgende pagina's worden de (meestal) rechthoekige gebieden waarin emissies werden vastgesteld en de berekende emissie-intensiteiten geprojecteerd op satellietbeelden. Er is voor gezorgd dat steeds een gelijke vaarwegafstand (van ongeveer 2,1 km) wordt ingesloten door de (in geel gemarkeerde) gebieden. Per pagina wordt boven het beeld van het gebied met sluis en daaronder dat met het vergelijkingsgebied zonder sluis getoond. De getallen onder de plaatjes geven de massa NO_x (ton) die in Emissieregistratie 2023 in het desbetreffende gele gebied werd vastgesteld.

Volkeraksluizen

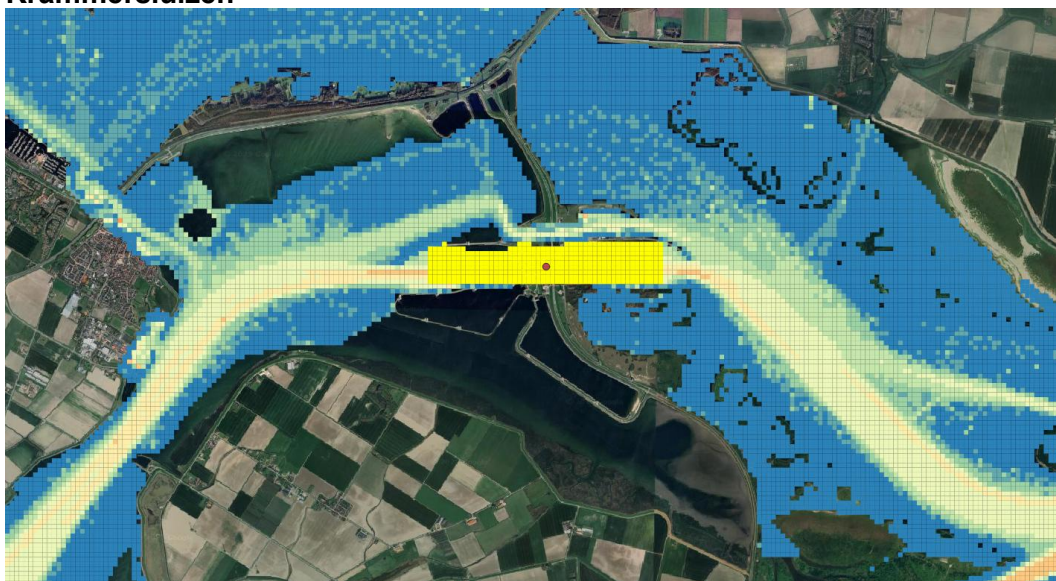


46,29

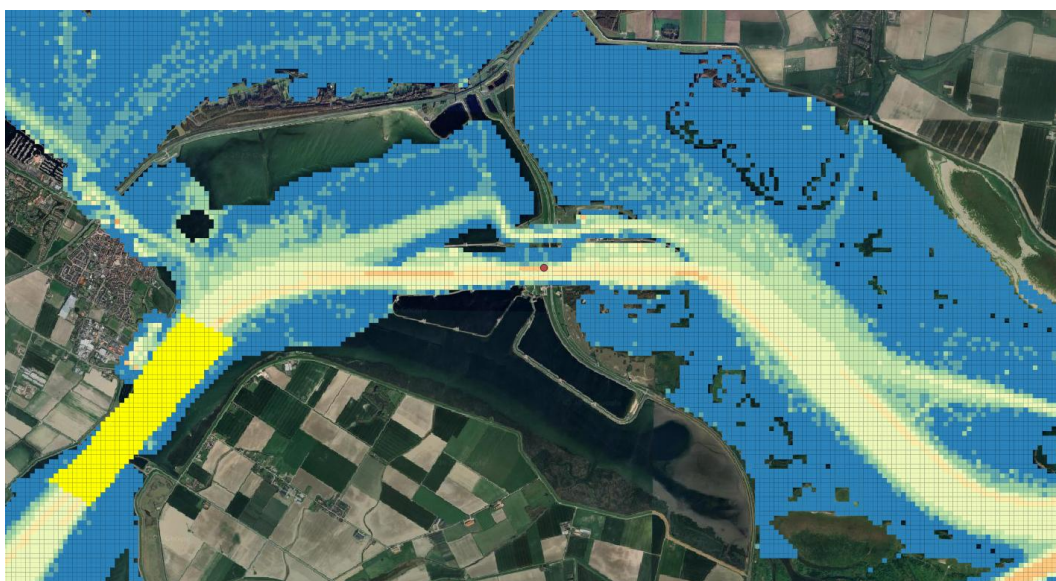


71,76

Krammersluizen

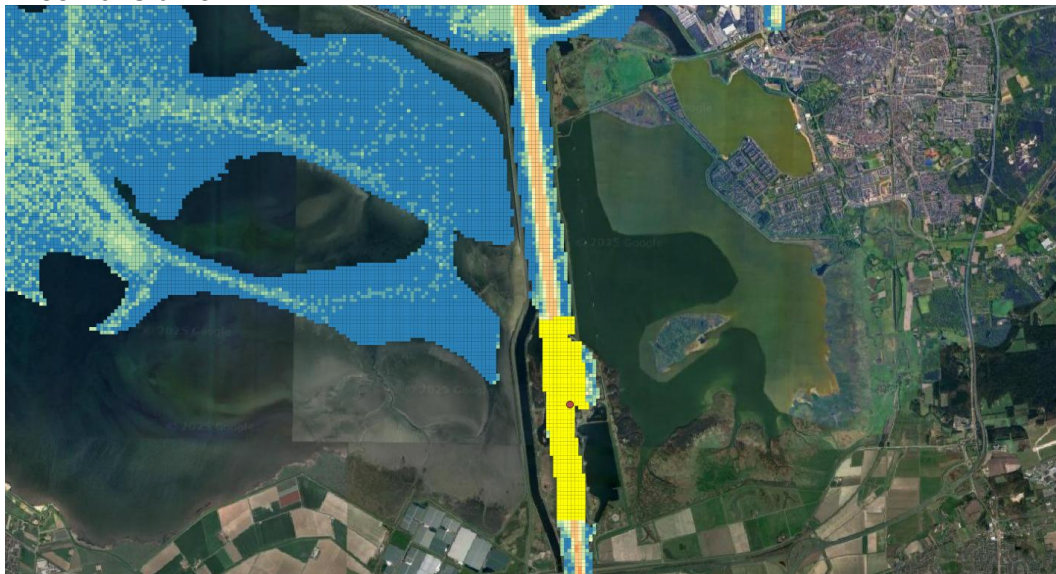


22,38

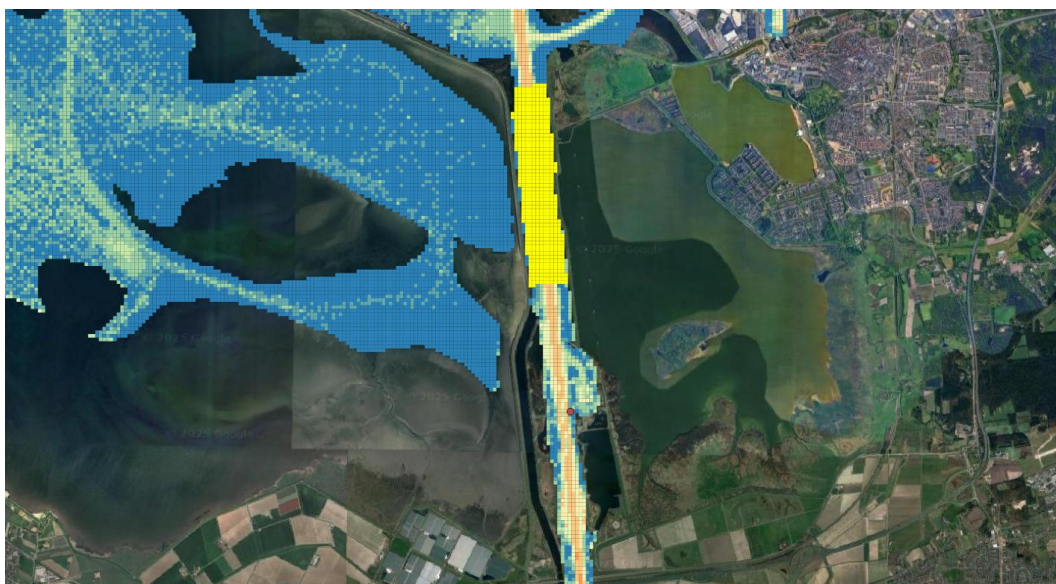


27,36

Kreekraksluizen



46,32



55,91

Grave, sluis

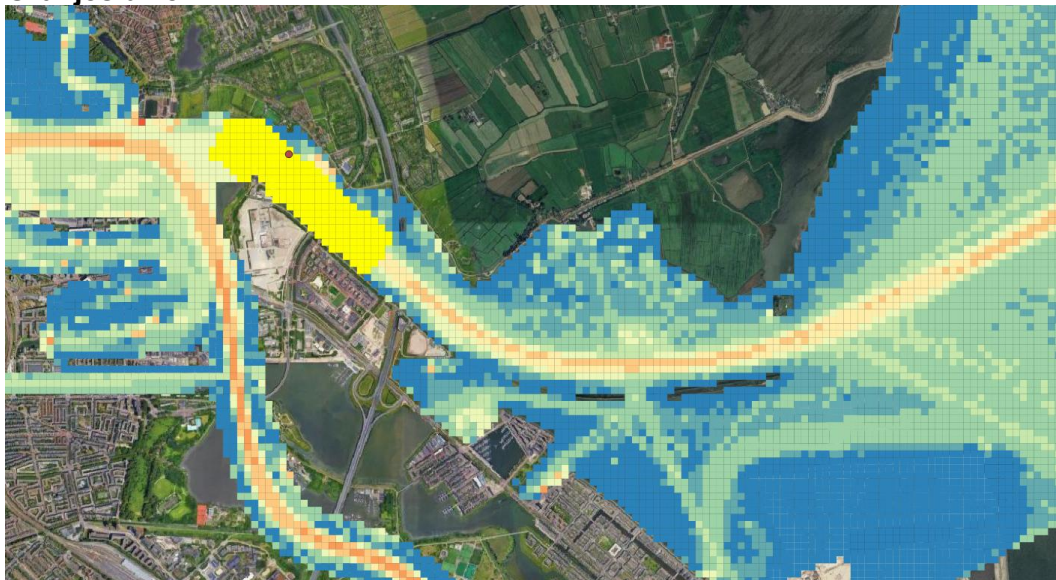


4,17

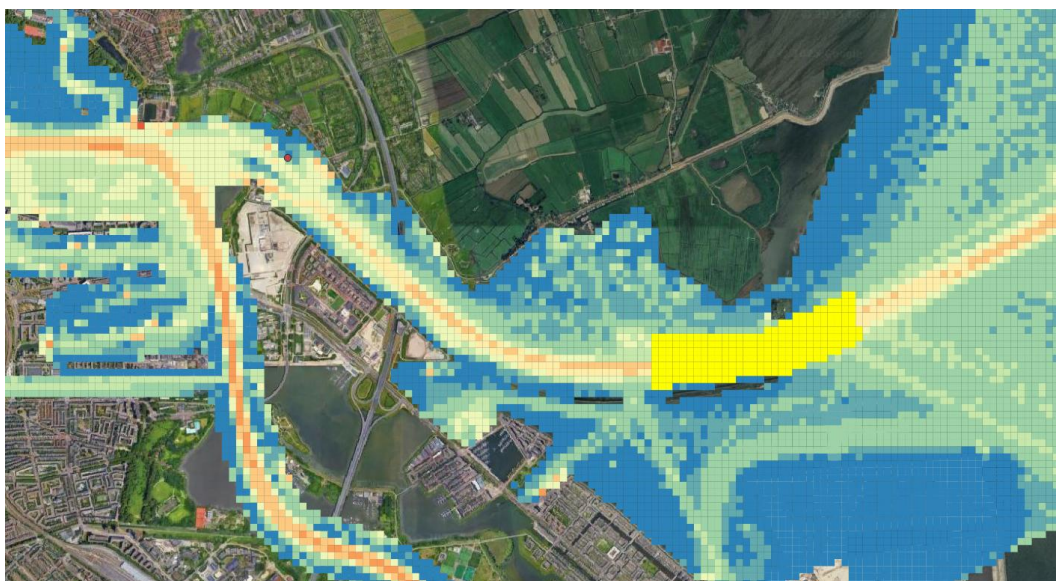


5,45

Oranjesluizen



10,29

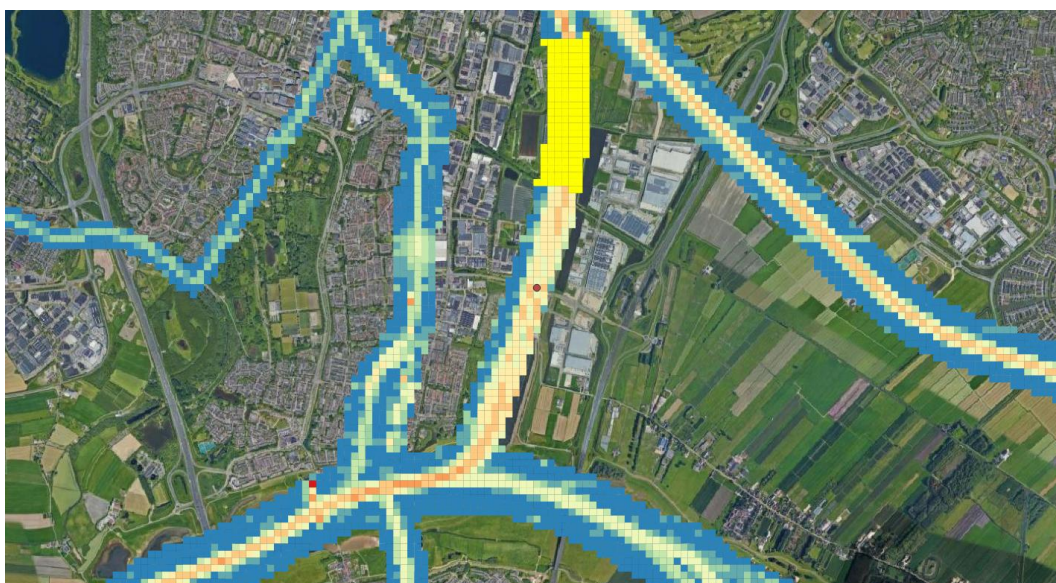


14,17

Prinses Beatrixsluis

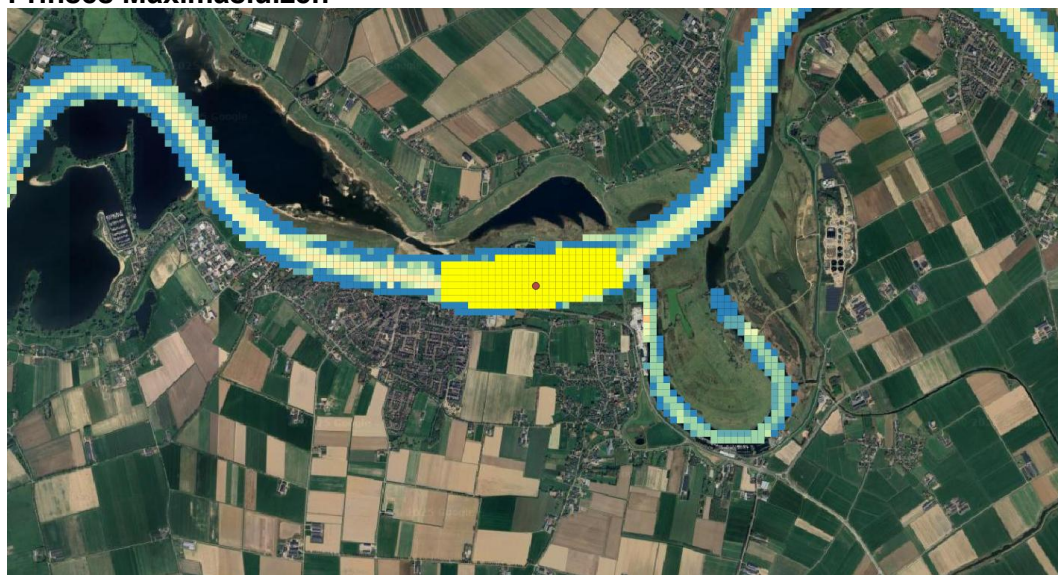


9,16

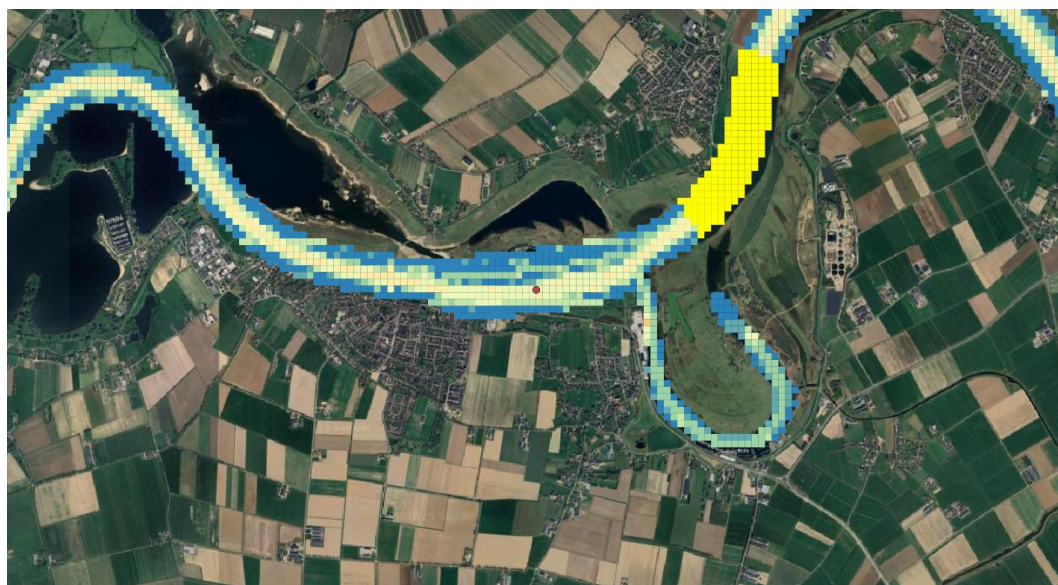


14,77

Prinses Maximasluizen



4,41



4,90

Oostersluis



1,82



2,72

Gaarkeukensluis

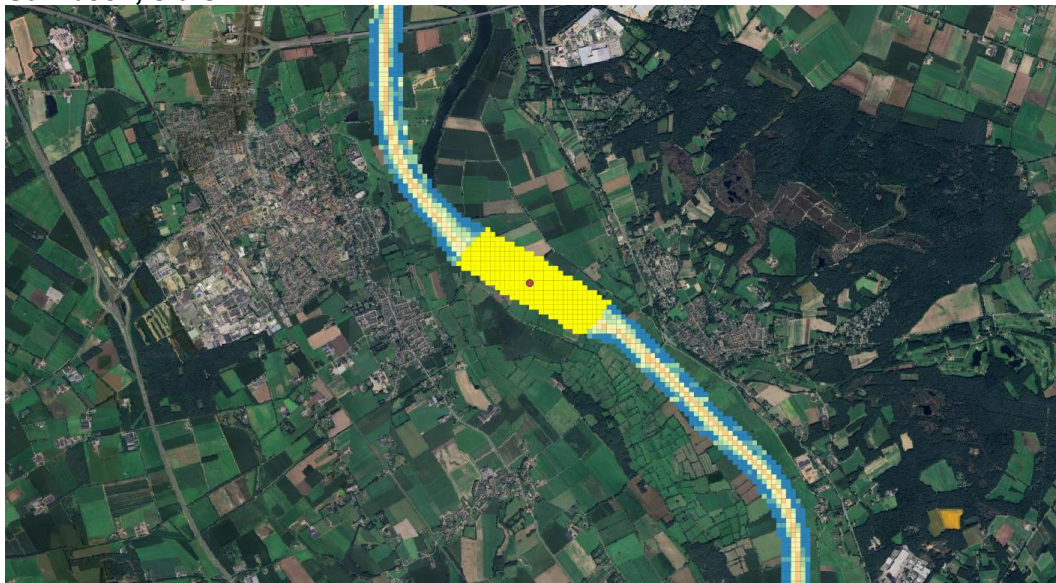


3,69

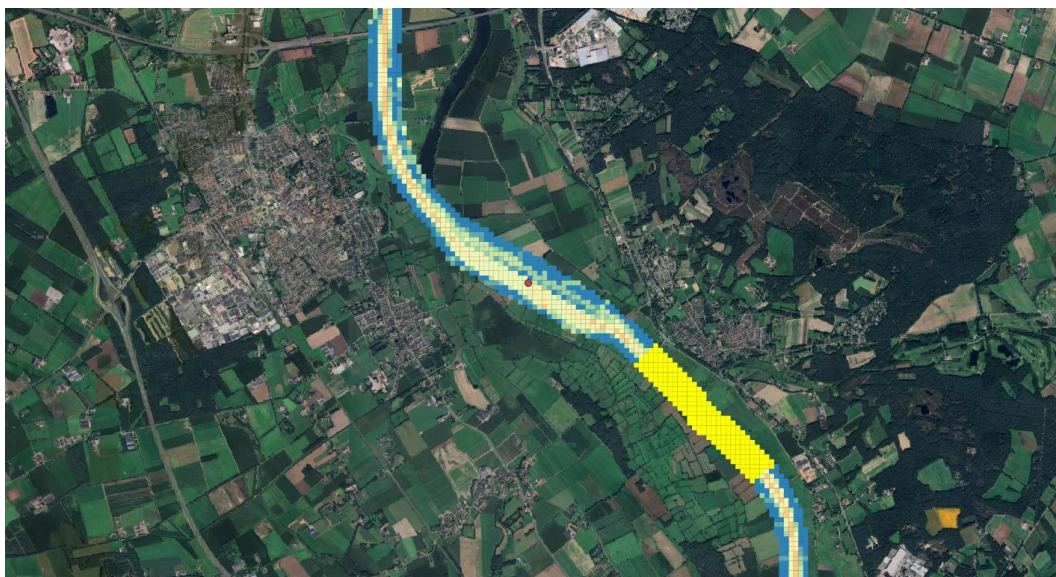


4,79

Sambeek, sluis

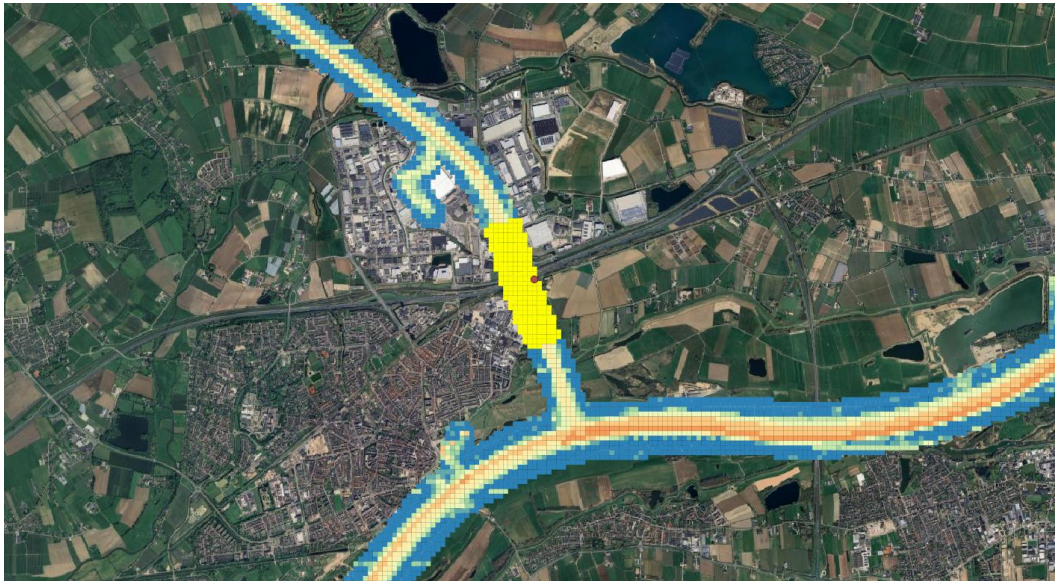


7,97

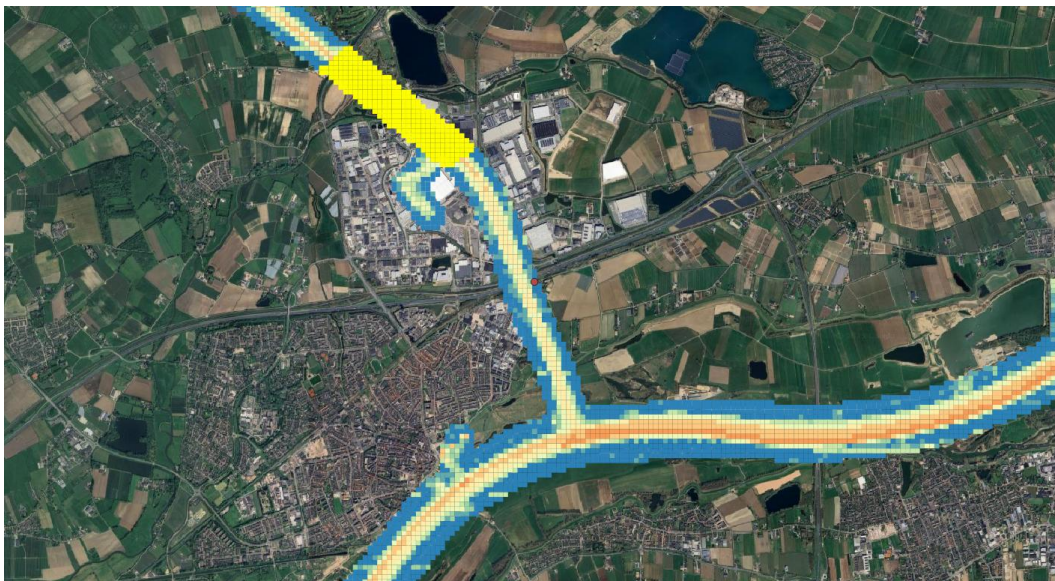


9,99

Prins Bernardsluis

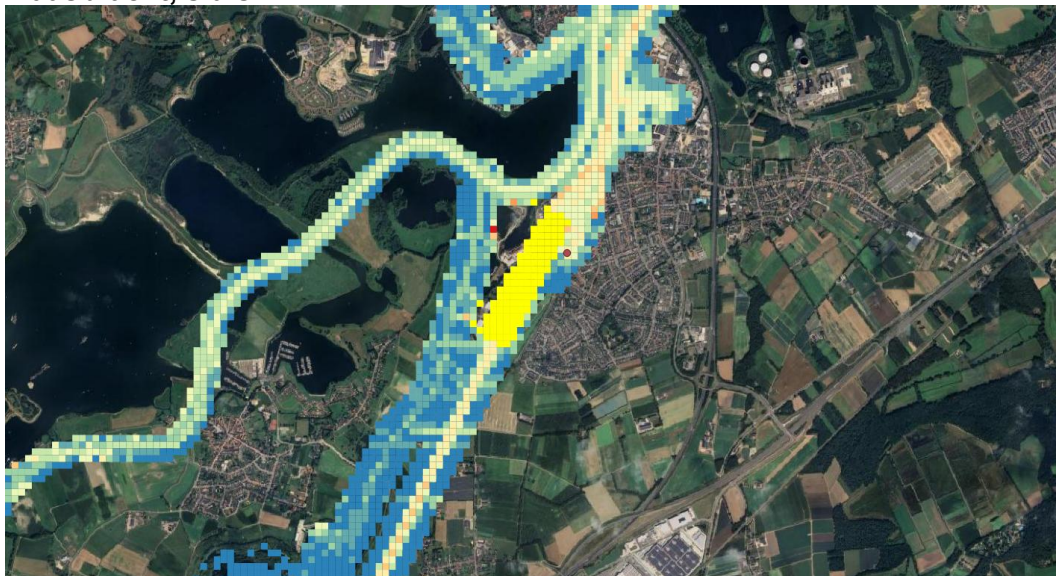


6,75

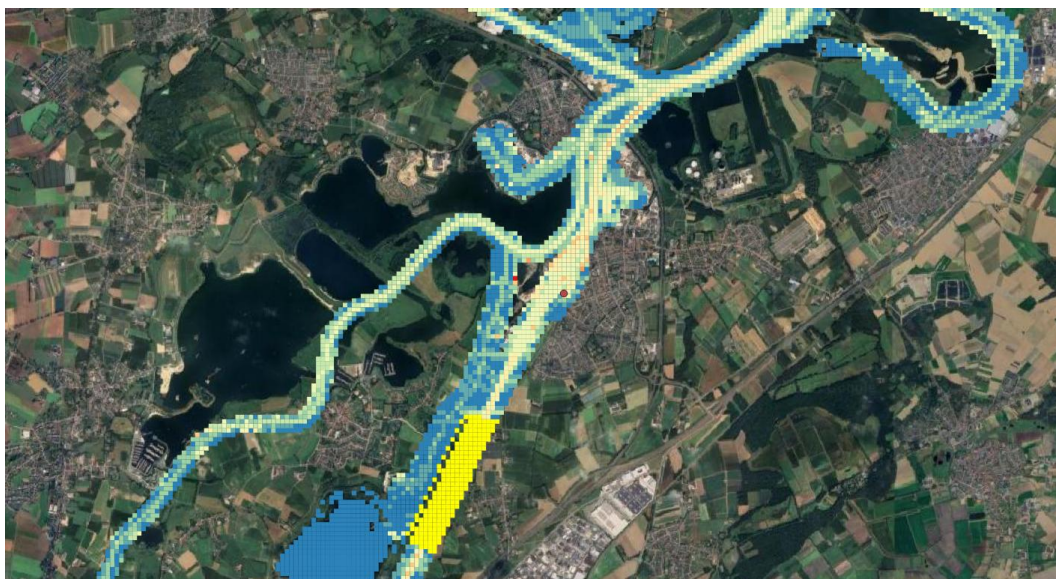


11,13

Maasbracht, sluis



5,59



6,57