

Een kritische analyse van mogelijke oplossingsrichtingen voor de waterproblematiek in het Panamakanaal

Rogiers Boris

Scriptie voorgedragen tot het behalen

van de graad van

Master in de Nautische Wetenschappen

aan de Hogere Zeevaartschool

Promotor: prof. T. Notteboom

Academiejaar 2024-2025

Woord vooraf

Met veel dankbaarheid kijk ik terug op het traject dat heeft geleid tot deze masterproef. Het schrijven ervan was niet alleen een intellectuele uitdaging, maar ook een persoonlijk groeiproces.

Allereerst wens ik mijn promotor, Professor Theo Notteboom, oprecht te bedanken. Tijdens een kort overleg bracht hij dit onderwerp onder mijn aandacht. Wat begon als een eerste verkenning, groeide al snel uit tot een diepgaand onderzoek dat mijn kijk op het vakgebied aanzienlijk heeft verbreed. Daarnaast wens ik hem te bedanken voor de begeleiding, expertise en het geduld gedurende het schrijven van mijn bachelor scriptie alsook van deze master thesis. Zijn waardevolle feedback heeft mijn scripties aanzienlijk verbeterd.

Na het schrijven van mijn bachelor scriptie “De toekomst van het Panamakanaal in het licht van de waterproblematiek”, kreeg ik tijdens de zomervakantie de unieke kans om samen met mijn ouders en broer Panama te bezoeken. Tijdens deze reis voeren we met een toeristenboot van de Pacifische kant door de Miraflores- en Pedro Miguel-sluizen, en vervolgens door de Culebra Cut. Het was heel impressionant om dit van dichtbij te kunnen bezichtigen. Aan boord sprak ik met de loods die mij enthousiast doorverwees naar het Simulation, Research, and Development Maritime Training Center (SIDMAR). De dag nadien bezocht ik dit centrum, waar ik contactgegevens kreeg die mijn onderzoek verrijkten. Deze unieke ervaring blijft mij bij als een bijzondere herinnering die mijn interesse in het Panamakanaal heeft versterkt en mijn onderzoek verrijkt heeft met nieuwe inzichten en inspiratie.

Daarnaast gaat mijn dank uit naar mijn ouders, die mij gedurende mijn hele academische loopbaan onvoorwaardelijk hebben gesteund. Hun vertrouwen in mijn kunnen was een constante bron van motivatie. Een bijzonder woord van dank gaat uit naar mijn grootmoeder. Op haar respectabele leeftijd van 90 jaar is zij nog steeds een voorbeeld van leergierigheid en levenslust. Haar kritische blik bij het nalezen van mijn tekst en haar nuchtere opmerkingen waardeer ik ten zeerste.

Tot slot wil ik mijn vrienden bedanken voor de bijzondere vriendschappen die zijn ontstaan tijdens onze tijd aan de Hogere Zeevaartschool. Deze band betekent veel voor mij en heeft mijn studietijd onvergetelijk gemaakt. Ik koester de gedeelde herinneringen en hoop dat onze vriendschappen nog lang mogen blijven bestaan.

Hartelijk dank.

Samenvatting

Deze masterproef onderzoekt de impact van de droogte op het Panamakanaal en evalueert mogelijke oplossingsrichtingen om de waterzekerheid te verbeteren. In 2023 werd Panama geconfronteerd met de droogste omstandigheden sinds het begin van de metingen, dat leidde tot historisch lage waterstanden in het Gatúnmeer en een vermindering van de transitcapaciteit van het kanaal. De studie brengt in kaart hoe maatregelen zoals transitbeperkingen, cross-filling, tandempassage en inzet van waterbesparende bassins worden toegepast. Daarnaast wordt het geplande Rio Indio reservoir als structurele lange-termijnoplossing geanalyseerd. De alternatieven worden beoordeeld op basis van praktische haalbaarheid, ecologische en maatschappelijke impact, hoeveelheid waterbesparing en effect op de transitcapaciteit. Uit een multicriteria-analyse blijkt dat het combineren van technologische innovaties met infrastructuuruitbreidingen noodzakelijk is om het kanaal duurzaam te beheren. De studie besluit dat investeringen in waterbeheer cruciaal zijn om de economische en logistieke functie van het kanaal te garanderen, zonder de ecologische en sociale balans uit het oog te verliezen.

A critical analysis of possible solutions to the Panama Canal water problems

This master thesis examines the impact of drought on the Panama Canal and evaluates possible solution approaches to improve water security. In 2023, Panama faced its driest conditions since records began, which led to historically low water levels in Lake Gatún and a reduction in the canal's transit capacity. The study maps how measures such as transit restrictions, cross-filling, tandem passage and deployment of water-saving reservoirs are being applied. In addition, the planned Rio Indio reservoir is analysed as a long-term structural solution. The alternatives are assessed based on practical feasibility, ecological and social impact, amount of water savings and impact on transit capacity. A multi-criteria analysis shows that combining technological innovations with infrastructure expansions is necessary to manage the canal sustainably. The study concludes that investment in water management is crucial to ensure the economic and logistical function of the canal, without losing sight of the ecological and social balance.

Inhoudstafel

Lijst van figuren	vi
Lijst van tabellen	viii
Lijst van afkortingen	ix
1 Inleiding	1
2 Panamakanaal	3
2.1 Algemene info	3
2.2 Geschiedenis.....	5
2.2.1 De Spanjaarden	5
2.2.2 De Fransen.....	5
2.2.3 De Amerikanen	5
2.2.4 De Panamezen	6
3 Probleemomkadering	7
3.1 Droogte.....	7
3.2 Oorzaak van de droogte.....	9
3.2.1 Klimaat	9
3.2.2 Meteo – El Niño	10
3.2.2.1 Normale omstandigheden.....	10
3.2.2.2 El Niño	11
3.2.2.3 La Niña	12
3.2.2.4 Impact op Panama	13
3.2.3 Scheepvaart door het Panamakanaal	14
3.2.4 Andere waterverbruikers van Gatúnmeer	16
3.2.4.1 Drinkwater.....	16
3.2.4.2 Waterkrachtcentrale.....	16
3.3 Gevolgen van de waterschaarste	16
3.3.1 Kanaal.....	16

3.3.2	Scheepvaart	17
3.3.3	Drinkwater, fauna en flora.....	17
4	Huidige situatie	19
4.1	Waterniveau en neerslag	19
4.2	El Niño	21
4.3	Transitcapaciteit	22
4.4	Financiële inkomsten.....	24
5	Onderzoeksmethode	27
6	Beoordelingscriteria	29
6.1	Praktisch	29
6.2	Financiële haalbaarheid.....	30
6.3	Ecologische impact	31
6.4	Maatschappelijke impact.....	32
6.5	Waterbeheer	34
6.6	Impact op transitcapaciteit	34
6.7	Gradaties van oplossingen.....	35
7	Oplossing 1: Cross-filling	36
7.1	Praktisch	36
7.2	Financieel	37
7.3	Ecologisch	37
7.4	Maatschappelijk	38
7.5	Waterbeheer	38
7.6	Impact op de transitcapaciteit.....	38
7.7	Beoordeling	39
8	Oplossing 2: Tandempassage	40
8.1	Praktisch	40

8.2	Financieel	41
8.3	Ecologisch	41
8.4	Maatschappelijk	42
8.5	Waterbeheer	42
8.6	Impact op transitcapaciteit	42
8.7	Beoordeling	43
9	Oplossing 3: Recuperatie bassins, Neo-Panamaxsluizen	44
9.1	Praktisch	45
9.2	Financieel	45
9.3	Ecologisch	45
9.4	Maatschappelijk	46
9.5	Waterbeheer	46
9.6	Impact op transitcapaciteit	46
9.7	Beoordeling	47
10	Oplossing 4: Waterrecuperatie tussen de dubbele sluisdeuren	48
10.1	Praktisch	49
10.2	Financieel	49
10.3	Ecologisch	49
10.4	Maatschappelijk	49
10.5	Waterbeheer	49
10.6	Impact op transitcapaciteit	50
10.7	Beoordeling	50
11	Oplossing 5: Transitrestricties	51
11.1	Praktisch	51
11.2	Financieel	51
11.3	Ecologisch	52

11.4	Maatschappelijk	53
11.5	Waterbeheer	53
11.6	Impact op transitcapaciteit	53
11.7	Beoordeling	54
12	Oplossing 6: Baggeren	55
12.1	Praktisch	55
12.2	Financieel	56
12.3	Ecologisch	57
12.4	Maatschappelijk	57
12.5	Waterbeheer	57
12.6	Impact op transitcapaciteit	58
12.7	Beoordeling	58
13	Oplossing 7: Extra reservoir	59
13.1	Praktisch	60
13.2	Financieel	60
13.3	Ecologisch	61
13.4	Maatschappelijk	61
13.5	Waterbeheer	62
13.6	Impact op transitcapaciteit	62
13.7	Beoordeling	63
14	Analyse	64
14.1	Neutraal gewicht	64
14.2	Economisch gewicht	66
14.3	Ecologisch en sociaal gewicht.....	67
14.4	Onmisbare factor	68
14.5	Algemene analyse	69

14.5.1	Sensitiviteitsanalyse	69
14.5.2	Bubbeldiagram	71
14.5.3	Radardiagrammen	73
15	Conclusie	78
16	Bibliografie	80

Lijst van figuren

Figuur 1	Overzicht Panamakanaal, Sluizen en cruciale punten	4
Figuur 2	Vergelijkende karakteristieken van de Panamakanaaluitbreiding	6
Figuur 3	Stroomgebied van het Panamakanaal voor de bouw	7
Figuur 4	Stroomgebied van het Panamakanaal na de bouw	8
Figuur 5	ENSO, Neutrale fase in de Stille Oceaan.....	11
Figuur 6	ENSO, El Niño fase in de Stille Oceaan	12
Figuur 7	ENSO, La Niña fase in de Stille Oceaan	13
Figuur 8	Wereldwijd effect van El Niño op neerslag	14
Figuur 9	Verdeling waterverbruik van het stroomgebied Panamakanaal voor fiscaal jaar 2024.....	15
Figuur 10	Gatúnmeer waterniveau van 09-2021 tot 04-2025 in feet.....	19
Figuur 11	Gemiddeld waterniveau van het Gatúnmeer per jaar van 1965 tot 2024 in feet.	20
Figuur 12	Jaarlijkse regenval in Panama van 2015 tot 2024 in millimeter	21
Figuur 13	Grafiek van de maandelijkse afwijking van zeewateroppervlakte temperatuur van de gemiddelde temperatuur in de Niño 3.4 zone in de Stille Oceaan	22
Figuur 14	Aantal transits per jaar per type schip van 2022 tot 2024.....	23
Figuur 15	De totale inkomsten van de PCA van 2019 tot 2024 in miljard Panamese Balboa (=US-dollars)	25
Figuur 16	<i>Cross-filling</i> principe	36
Figuur 17	Beoordeling <i>cross-filling</i> op een schaal van 1 tot 5	39
Figuur 18	Tandempassage en maximale lengte voor Panamaxsluizen	40
Figuur 19	Beoordeling tandempassage op een schaal van 1 tot 5	43
Figuur 20	Neo-Panamaxsluizen aan de Stille Oceaan met aan de rechterkant de recuperatie bassins	44
Figuur 21	Beoordeling water recuperatie bassins van de Neo-Panamaxsluizen op een schaal van 1 tot 5.....	47

Figuur 22	Waterrecuperatie van tussen de dubbele sluisdeuren.....	48
Figuur 23	Beoordeling waterrecuperatie tussen dubbele sluisdeuren op een schaal van 1 tot 5.....	50
Figuur 24	Beoordeling transitrestricties op een schaal van 1 tot 5.....	54
Figuur 25	Beoordeling baggeren op een schaal van 1 tot 5.....	58
Figuur 26	Rio Indio reservoir project	59
Figuur 27	Beoordeling extra reservoir op een schaal van 1 tot 5	63
Figuur 28	Totale score van elke oplossing zonder en met gewicht, schaal zonder 5-25, schaal met 1-5.	65
Figuur 29	Vergelijkende blokdiagram van verschillende gewichten met een schaal van 4 tot 20.....	70
Figuur 30	Bubbeldiagram, x-as implementatietijd, y-as haalbaarheid beide op een schaal van 1 tot 5, bubbelgrootte is hoeveelheid water bespaard per dag in miljoen liter ...	71
Figuur 31	Radarplot van drie zuinigste wateroplossingen, score zonder gewicht	73
Figuur 32	Radarplot van alle besproken oplossingen zonder gewicht	74
Figuur 33	Radarplot 1, combinatie van drie oplossingen zonder gewicht	75
Figuur 34	Radarplot 2, combinatie van drie oplossingen zonder gewicht	76

Lijst van tabellen

Tabel 1	Vershil tussen zoet-, brak- en zoutwater uitgedrukt in zoutdeeltjes per biljoen	18
Tabel 2	Vershil in transits en verscheepte tonnage tussen 2022 en 2024	24
Tabel 3	Vergelijkende tabel van de tolkosten van het Panamakanaal per ton en per transit in de periode 2019–2024.....	26
Tabel 4	Beoordelingsschaal voor het praktische criterium	30
Tabel 5	Beoordelingsschaal voor het financiële criterium.....	31
Tabel 6	Beoordelingsschaal voor het ecologische criterium.....	32
Tabel 7	Beoordelingsschaal voor het maatschappelijk criterium	33
Tabel 8	Beoordelingsschaal voor het waterbeheer criterium	34
Tabel 9	Gewogen gemiddelde met neutraal gewicht	64
Tabel 10	Gewogen gemiddelde met economisch gewicht	66
Tabel 11	Gewogen gemiddelde ecologisch en sociaal gewicht	67
Tabel 12	Gewogen gemiddelde onmisbare factor gewicht	68
Tabel 13	Sensitiviteitsvergelijking, verschillende standpunten	69
Tabel 14	Waterbesparing per oplossing op basis van beschikbare gegevens	72

Lijst van afkortingen

PCA	Panama Canal Authority
SIDMAR	Simulation, Research, and Development Maritime Training Center
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
EIA	Environmental Impact Assessment
WHO	World Health Organization
GUPC	Grupo Unidos por el Canal
LPG	Liquefied Petroleum Gas
ppt	Parts per trillion (delen per biljoen)
PC/UMS	Panama Canal Universal Measurement System (volume uitgedrukt in ton gebruikt om tolheffingen te berekenen voor het Panamakanaal)
BCG	Boston Consulting Group
BBP	Bruto binnenlands product

1 Inleiding

Het Panamakanaal vormt een strategische schakel in de wereldhandel. Jaarlijks passeren duizenden schepen deze verbinding tussen de Atlantische en de Stille Oceaan, hierdoor speelt het kanaal een cruciale rol in het mondiale logistieke netwerk. De werking van het kanaal is afhankelijk van zoetwatervoorraden uit het Gatúnmeer en Alajuelameer. Door toenemende klimatologische schommelingen en terugkerende droogteperiodes, zoals die van 2023 en 2024, komt deze werking steeds vaker onder druk te staan. Het dalende waterpeil heeft directe gevolgen voor de transitcapaciteit, betrouwbaarheid en economische haalbaarheid van het kanaal.

De klimaatverandering en het El Niño fenomeen leiden tot langere droge seizoenen, verhoogde verdamping en een structurele vermindering van de neerslag. Hierdoor komt niet alleen de scheepvaart in het gedrang, maar ook de drinkwatervoorziening en het lokale ecosysteem. De Panama Canal Authority heeft reeds tijdelijke maatregelen genomen, zoals transit- en diepgangrestricties, maar structurele lange-termijnoplossingen dringen zich op.

Deze masterproef onderzoekt welke oplossingsrichtingen het meest geschikt zijn om het waterverbruik van het Panamakanaal duurzaam te beheren. De centrale onderzoeksvraag luidt: Welke maatregelen kunnen de waterzekerheid van het Panamakanaal verhogen zonder de ecologische, economische en maatschappelijke balans te verstoren?

De onderzoeksmethode bestaat uit een combinatie van literatuuronderzoek, technische analyse en een kwalitatieve beoordeling van de impactfactoren. Deze aanpak zorgt voor een diepgaand inzicht in het onderwerp vanuit meerdere perspectieven.

De opbouw van deze masterproef volgt een logische structuur die de lezer stap voor stap meeneemt doorheen het probleem, de analyse en de evaluatie van mogelijke oplossingen. In hoofdstuk 2 wordt gestart met een algemene toelichting over het Panamakanaal, dit omvat: de geografische ligging, de werking en de historische achtergrond. Dit biedt de noodzakelijke context om het belang en de kwetsbaarheid van het kanaal beter te begrijpen. Hoofdstuk 3 behandelt het probleemkader, de oorzaken ervan en de gevolgen voor de verschillende gebruikers van het kanaal en het meerwater. Daarbij wordt specifiek ingezoomd op de impact

voor de scheepvaart, de drinkwatervoorziening en het ecosysteem. In hoofdstuk 4 wordt de actuele situatie geanalyseerd aan de hand van recente data over neerslag, waterniveaus, operationele maatregelen en financiële inkomsten van de PCA. Hoofdstuk 5 beschrijft de gehanteerde onderzoeksmethode, waarin zowel literatuuronderzoek als praktijkgerichte informatie worden gecombineerd.

Vervolgens worden in hoofdstuk 6 de beoordelingscriteria uitgewerkt die zullen worden gebruikt om de mogelijke oplossingen te analyseren. Deze criteria omvatten: praktische haalbaarheid, financiële haalbaarheid, ecologische impact, maatschappelijke impact, waterbeheer en de invloed op de transitcapaciteit van het kanaal. Elk criterium wordt afzonderlijk gedefinieerd en gekwantificeerd om een objectieve beoordeling mogelijk te maken.

In hoofdstukken 7 tot en met 13 worden de zes oplossingsrichtingen afzonderlijk behandeld. Per hoofdstuk wordt telkens de maatregel technisch toegelicht en beoordeeld volgens de zes criteria. Onder de voorgestelde maatregelen bevinden zich cross-filling, tandempassage, waterrecuperatie via bassins, recuperatie van het water tussen de dubbele sluisdeuren, transitrestricties, baggeren en de aanleg van een bijkomend reservoir.

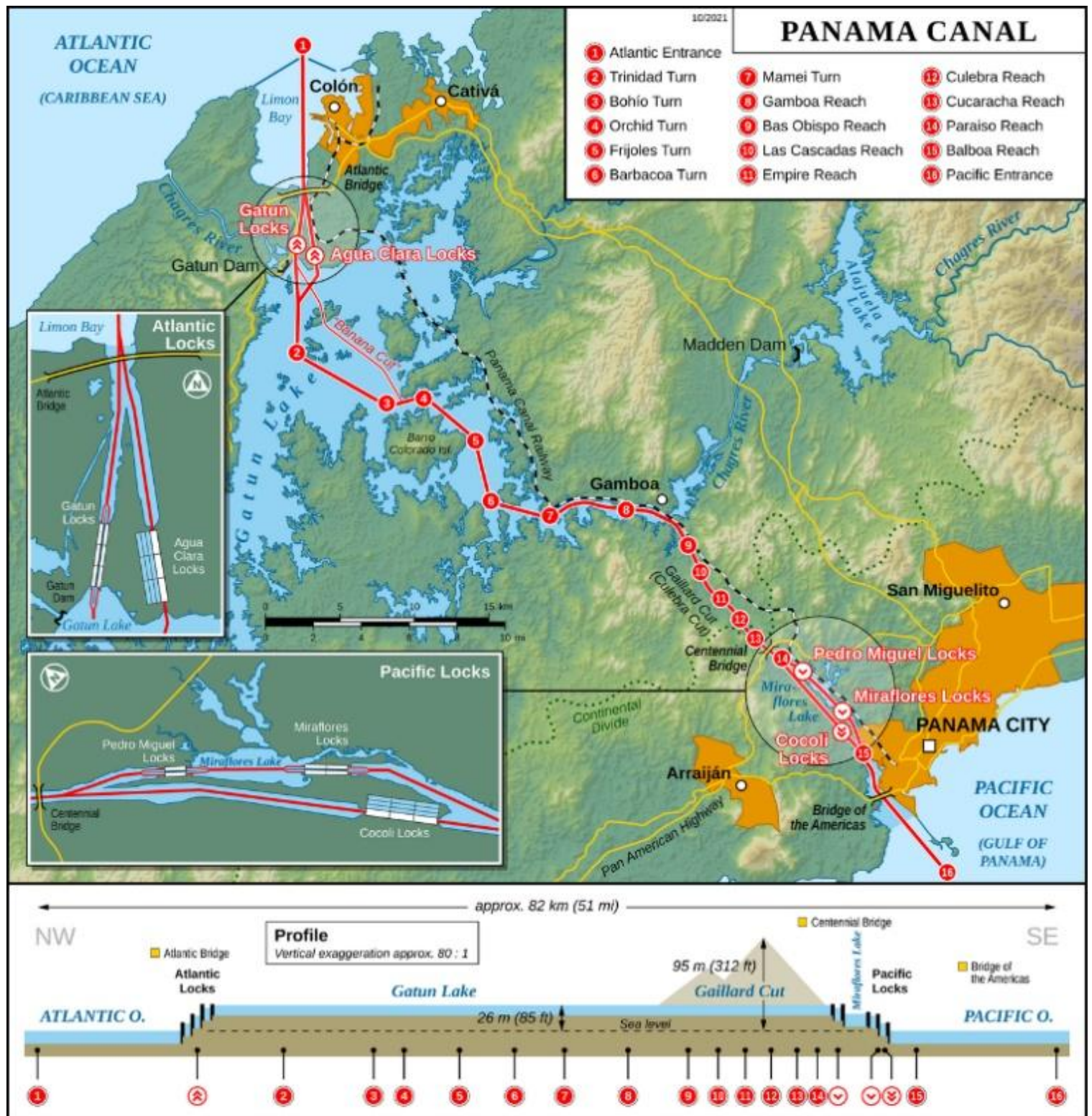
Hoofdstuk 14 biedt een geïntegreerde analyse waarbij de verschillende oplossingen worden vergeleken aan de hand van een multicriteria-analyse. Er worden meerdere scenario's doorgerekend waarbij de criteria verschillend gewogen worden, bijvoorbeeld vanuit een ecologisch, economisch of pragmatisch standpunt. De resultaten worden gevisualiseerd aan de hand van onder meer een bubbelgrafiek en radarplots.

Tot slot wordt er in hoofdstuk 15 een conclusie geformuleerd die enerzijds antwoord biedt op de centrale onderzoeksvraag en anderzijds de meest duurzame en effectieve strategieën bespreekt, om de waterzekerheid van het Panamakanaal op lange termijn te garanderen.

2 Panamakanaal

2.1 Algemene info

Het Panamakanaal is één van de meest ingenieuze en impressionantste bouwwerken die de mensheid ooit heeft gebouwd. Volgens de 'American Society of Civil Engineers' verdient dit technisch wonder een plaats tussen de zeven wereldwonderen van de moderne wereld (Abdulhafedh, 2017). Het kanaal strekt zich uit over de volledige landengte van Panama en verbindt zo de Atlantische met de Stille Oceaan en is maar liefst 82 kilometer lang. Door haar strategische ligging is het één van de belangrijkste maritieme routes ter wereld en heeft het een zeer grote invloed op de wereldhandel. Het Panamakanaal heeft twee soorten sluizen: de oude, kleinere sluizen voor Panamaxschepen, genaamd Pedro Miguel en Miraflores langs de kant van de Stille Oceaan en Gatún langs de Atlantische kant en de nieuwe, grotere voor Neo-Panamaxschepen respectievelijk Cocoli en Agua Clara. Dit sluizencomplex maakt het mogelijk om schepen 26 meter boven zeeniveau te tillen. Via het kunstmatig aangelegde Gatúnmeer steken ze de landengte van Panama over. Een doorvaart duurt gemiddeld tien uur, een aanzienlijke tijdwinst in vergelijking met een vaart rond het Zuid-Amerikaans continent. Het kanaal bespaart ongeveer 8.000 nautische mijl bij een reis van New York naar San Francisco (Abdulhafedh, 2017). Bij de bouw van het kanaal was er ongeveer 268 miljoen kubieke meter aan graafwerken nodig (Panama Canal Authority, 2025d). Het kanaal heeft toen begin twintigste eeuw \$375 miljoen gekost wat omgerekend met inflatie overeenstemt met \$8,6 miljard (LetsBuild, 2015). Er passeren dagelijks 36 à 38 schepen door het kanaal, goed voor een totaal van 14.000 schepen op jaar basis, die samen 1.920 verschillende haven aanlopen. De veiligheid van het kanaal wordt gevrijwaard door de verplichte beloodsing. De loodsen volgen een 14-jarige opleiding, dit zorgt voor het lage verkeersongevallenratio van maar 0,01% (Vega, 2020). Het Panamakanaal is eigendom van de Panamese staat en wordt beheerd door de Panama Canal Authority (PCA). Zij staan in voor de totale werking en onderhoud van het kanaal (Panama Canal Authority, 2025e).



Figuur 1 Overzicht Panamakanaal, Sluizen en cruciale punten

Bron: Römer (2023)

2.2 Geschiedenis

2.2.1 De Spanjaarden

Het idee om een kanaal te bouwen in Centraal Amerika kwam van de Spanjaarden. Een twintigtal jaar nadat Christoffel Columbus Amerika ontdekte, begin 16de eeuw, had Vasco Nuñez de Balboa al door dat de twee oceanen maar door een klein stuk land werden gescheiden. Zij hebben echter nooit verdere stappen ondernomen om effectief iets te bouwen (Panama Canal Authority, 2025c; Scott, 1913).

2.2.2 De Fransen

Later rond 1881, was het Frankrijk die als eerste een poging ondernam. De Franse ingenieur Ferdinand de Lesseps, die ook het Suezkanaal in Egypte aanlegde, werd aangesteld voor de bouw. Zijn plan was om een kanaal op zeeniveau te maken. Zes jaar later stapte hij hiervan af omdat het hoogteverschil te groot was. Er werd besloten om sluizen te bouwen die door Gustave Eiffel moesten ontworpen worden. De vulkanische ondergrond en het tropisch regenwoud bleken moeilijk terrein te zijn om in te werken waardoor de bouw trager verliep dan verwacht. Daarenboven hadden de werknemers te kampen met tropische ziektes zoals malaria en gele koorts. Er zijn naar schatting 20.000 werknemers omgekomen tijdens deze eerste bouwperiode van zeven jaar. Door de vele tegenslagen is Lesseps niet veel verder geraakt dan wat graafwerken. In 1888 werden de bouwwerken gestopt, het bedrijf “Compagnie Universelle du Canal Interocéanique” van Lesseps was failliet (Avery, 2001; Panama Canal Authority, 2025f; Scott, 1913).

2.2.3 De Amerikanen

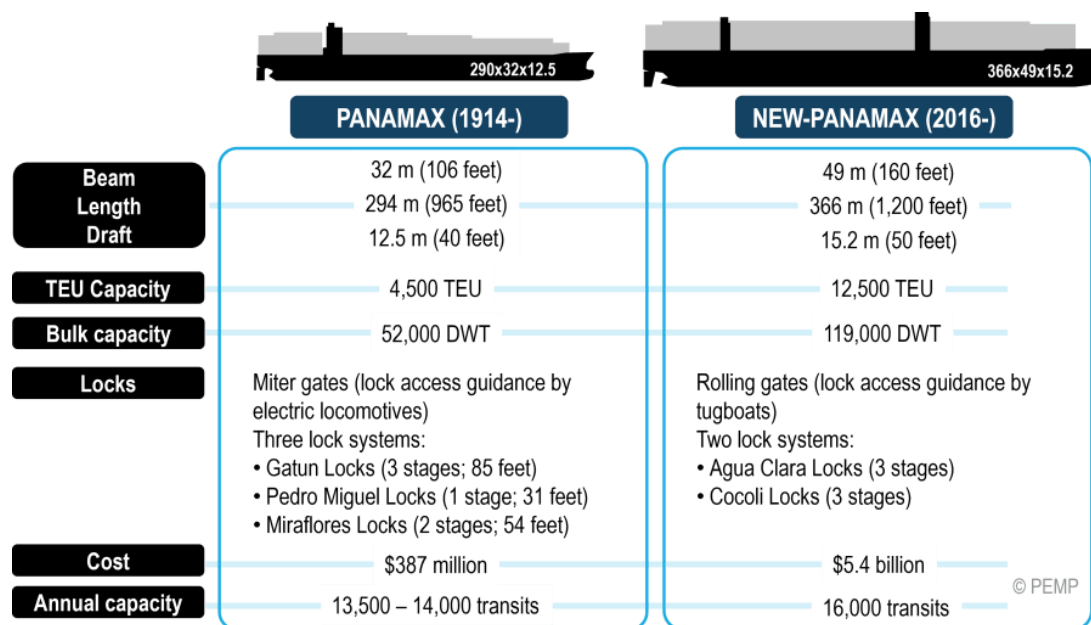
Onder het bewind van de Amerikaanse president Theodore Roosevelt werd onderzocht wat de meest geschikte locatie was voor de aanleg van een kanaal tussen de Stille en de Atlantische Oceaan. Hieruit bleek dat het Panamakanaal verder afwerken waar de Fransen gestopt waren de beste optie was. Panama, dat toen nog een provincie was van Colombia, ontving van Roosevelt militaire steun in ruil voor het mogen bouwen van het kanaal. In 1904 herstart de VS de bouw onder supervisie van luitenant-kolonel George Washington Goethals. Het plan was om een dam te bouwen in de Chagres rivier zodat het kunstmatige Gatúnmeer zou ontstaan waardoor de graafwerken aanzienlijk verminderd werden. Dat in combinatie met drie sluizen

zou de passage makkelijker moeten maken. Na negen jaar graaf- en bouwwerken was het kanaal eindelijk afgewerkt in 1914. Een inspanning geleverd door 48.000 arbeiders waarvan er 5000 het leven lieten (Panama Canal Authority, 2025a; Scott, 1913).

2.2.4 De Panamezen

In 1999 schonk de VS het Panamakanaal aan Panama en stopte alle inmengingen. Twee jaar eerder had de overheid van Panama de overheidsinstantie ‘Panama Canal Authority’ of ‘PCA’ in het leven geroepen om het kanaal te beheren/exploiteren.

In 2006 keurde de Panamese president, Martín Torrijos, de bouw van de Expansie van het kanaal goed. Ze beginnen aan de bouw van twee nieuwe, grotere sluizen sets alsook het verbreden en verdiepen van het huidige kanaal. Hierdoor kunnen de schepen met de Neo-Panamax dimensies, zo’n anderhalf keer groter, een doorvaart maken. Bij deze uitbreiding worden er ook waterbassins aan de sluizen voorzien voor een beter watermanagement. Het einde van de bouw was gepland voor 2014, honderd jaar na de opening van het kanaal. Door allerlei vertragingen en stakingen is de oplevering pas in 2016 een feit. Het hele project had een prijskaartje van \$5.25 miljard (Notteboom et al., 2019; Sabonge, 2014; Zielinski, 2018).



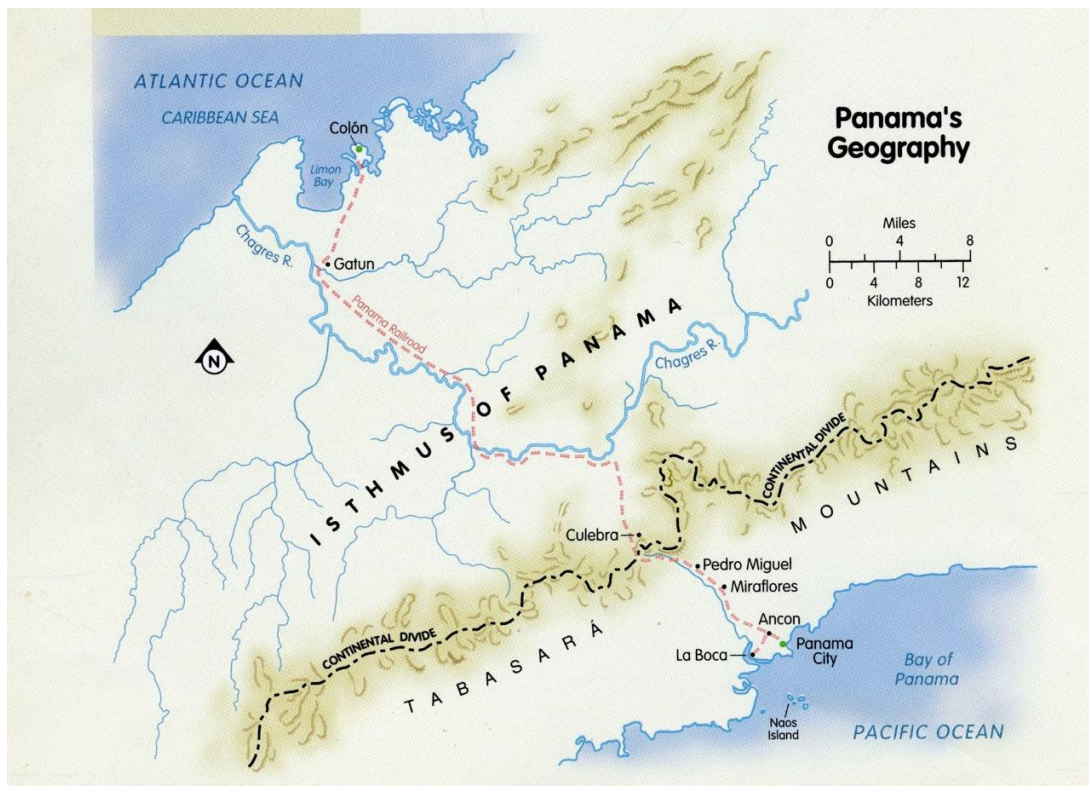
Figuur 2 Vergelijkende karakteristieken van de Panamakanaaluitbreiding

Bron: Notteboom et al. (2019)

3 Probleemomkadering

3.1 Droogte

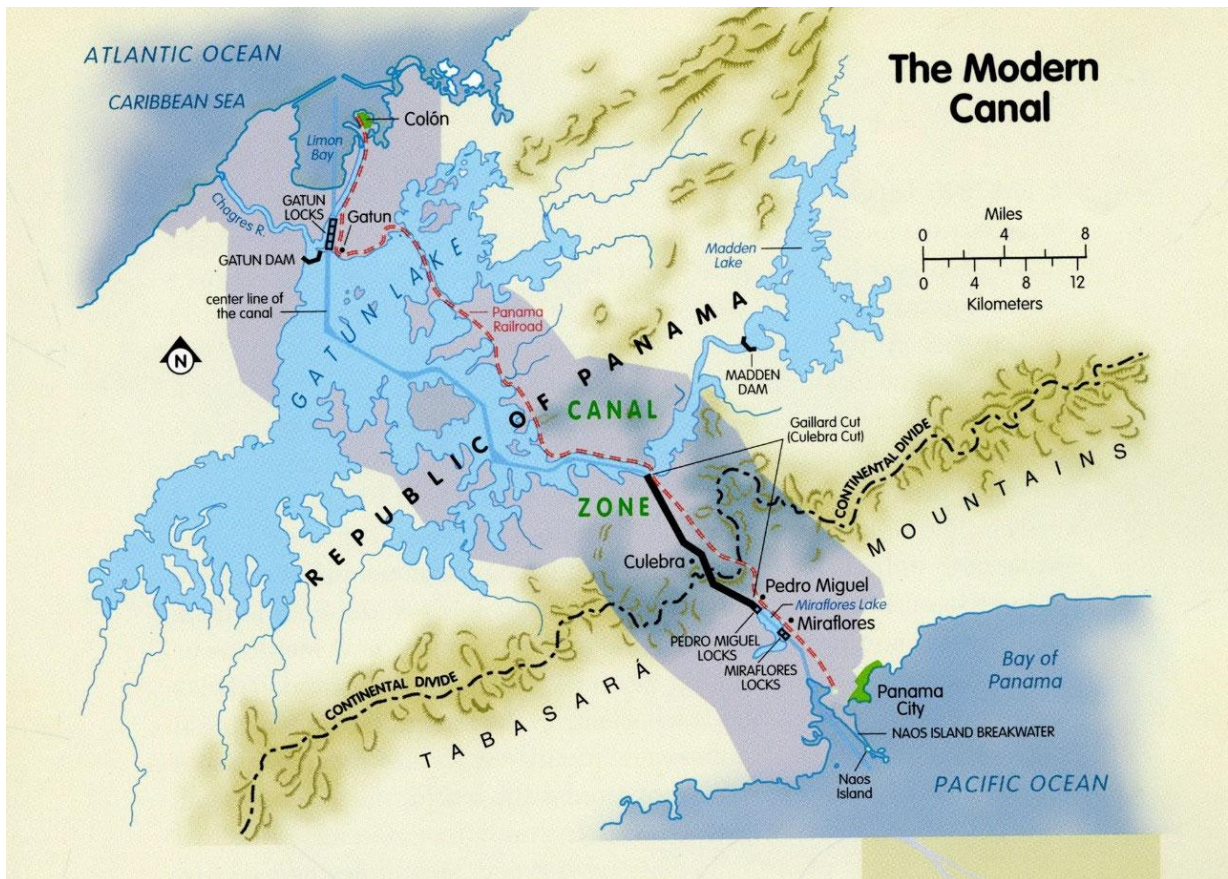
Door het Panamakanaal stroomt zoetwater afkomstig van het Gatúnmeer en Alajuelameer, deze meren voorzien ook de sluizen van water. De werking van het kanaal is dus sterk afhankelijk van regenval. Deze twee reservoirs zijn misschien wel de vitaalste onderdelen van het kanaal. Zij zorgen dat er altijd voldoende water ter beschikking is opdat het kanaal operationeel kan blijven. Het Gatúnmeer is het hoofdreservoir en maakt deel uit van het kanaal zelf. Schepen leggen in totaal 82 kilometer af waarvan maar liefst 51 kilometer over dit meer (Abdulhafedh, 2017). Het Gatúnmeer is een kunstmatig meer dat werd gevormd door de bouw van de gelijknamige Gatún stuwdam in de Chagres rivier. De dam is aan de Atlantische kant dichtbij de Gatún sluizen en heeft een maximaal operationeel waterpeil van 26,6 m (Carse, 2017). De dam creëert een wateroppervlakte van 431 km² en een watervolume van 5,4 kubieke kilometer met een gemiddelde diepte van 12,7 meter (World Lake Database, 2025). De rivieren, Gatún, Trinidad en Ciri Grande, monden uit in het Gatúnmeer, dat resulteert in een drainagegebied van maar liefst 2.313 km², ongeveer even groot als Vlaams-Brabant (Wikipedia, 2025).



Figuur 3 Stroomgebied van het Panamakanaal voor de bouw

Bron: TravelArk (2017)

Het tweede waterreservoir, het Alajuelameer is eveneens een kunstmatig meer gecreëerd door de Madden stuwdam die verder stroomopwaarts ligt op de Chagres rivier. Het meer heeft een maximawaterpeil van 76,8 m. In dit meer monden vier rivieren uit namelijk: Chagres, Pequeni, Boqueron en Indio-Este. Dit zorgt voor een drainagegebied van 1026 km². Het Alajuelameer dekt 40% van het zoetwaterverbruik van het Panamakanaal (Larson & Albertin, 1984).



Figuur 4 Stroomgebied van het Panamakanaal na de bouw

Bron: TravelArk (2017)

Ondanks dat Panama één van de natste landen ter wereld is, kampt het met een droogteprobleem (Olujinmi, 2023; The World Bank, 2024). In 2023 heeft Panama haar droogste jaar ooit gekend sinds de metingen in 1950. In oktober 2023 was er 41% minder neerslag, dat zorgde voor een uitzonderlijk laag waterniveau van het Gatúnmeer, zie

Figuur 10 (Rodríguez, 2023c).

3.2 Oorzaak van de droogte

3.2.1 Klimaat

Klimaatverandering is wereldwijd een belangrijk probleem met verstrekkende gevolgen. Het is een gevolg van de verschuivingen in temperaturen en weerpatronen op lange termijn. De opwarming van de aarde wordt voornamelijk veroorzaakt door menselijke activiteiten zoals het verbranden van fossiele brandstoffen, ontbossing en bepaalde industriële praktijken waarbij broeikasgassen zoals kooldioxide en methaan vrijkomen. Deze gassen houden warmte vast in de lagere atmosfeer van de aarde, wat leidt tot opwarming van de aarde (Verheggen, 2020).

Hier volgen enkele belangrijke gevolgen van deze klimaatverandering.

De gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak is sinds de industriële revolutie (1850-1900) met ongeveer 1,45°C gestegen. Het noordpoolgebied heeft de grootste opwarming doorgemaakt en de temperatuur op het land is over het algemeen meer gestegen dan de temperatuur op zee (World Meteorological Organization (WMO), 2024a).

Klimaatverandering heeft grote gevolgen voor het milieu: woestijnen breiden zich uit, hittegolven en bosbranden komen steeds vaker voor en gletsjers en zee-ijs trekken zich terug. Intense stormen, droogtes en andere extreme weersomstandigheden nemen ook toe.

Zelfs als de wereldwijde inspanningen om de opwarming in de toekomst in te tomen succesvol zijn, zullen sommige gevolgen onomkeerbaar zijn en nog eeuwen doorwerken, zoals oceaanopwarming, verzuring van het zeewater en zeespiegelstijging. Klimaatverandering brengt risico's met zich mee, zoals meer overstromingen, extreme hitte, voedsel- en waterschaarste, ziekten en economische verliezen, menselijke migratie en conflicten (Europese Commissie, z.d.).

De Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) beschouwt klimaatverandering als de grootste bedreiging voor de wereldwijde gezondheid van de 21e eeuw (World Health Organization, 2018). In hun laatste "Climate change and health report" stellen ze dat 3,6 miljard mensen in omstandigheden leven die zeer kwetsbaar zijn door de gevolgen van klimaatveranderingen (World Health Organization, 2023).

Ook Panama ontkomt niet aan de greep van de klimaatverandering. Door de opwarming van de aarde verandert het neerslagpatroon in Panama drastisch, dat heeft grote gevolgen voor de watervoorziening. De gemiddelde temperatuur in het land is al met 0,35°C gestegen ten opzichte van 1980-1999 en tegen 2071-2100 wordt een verdere stijging van 3 tot 6°C verwacht. Deze opwarming leidt tot grotere neerslagvariabiliteit, waardoor regenval onvoorspelbaarder

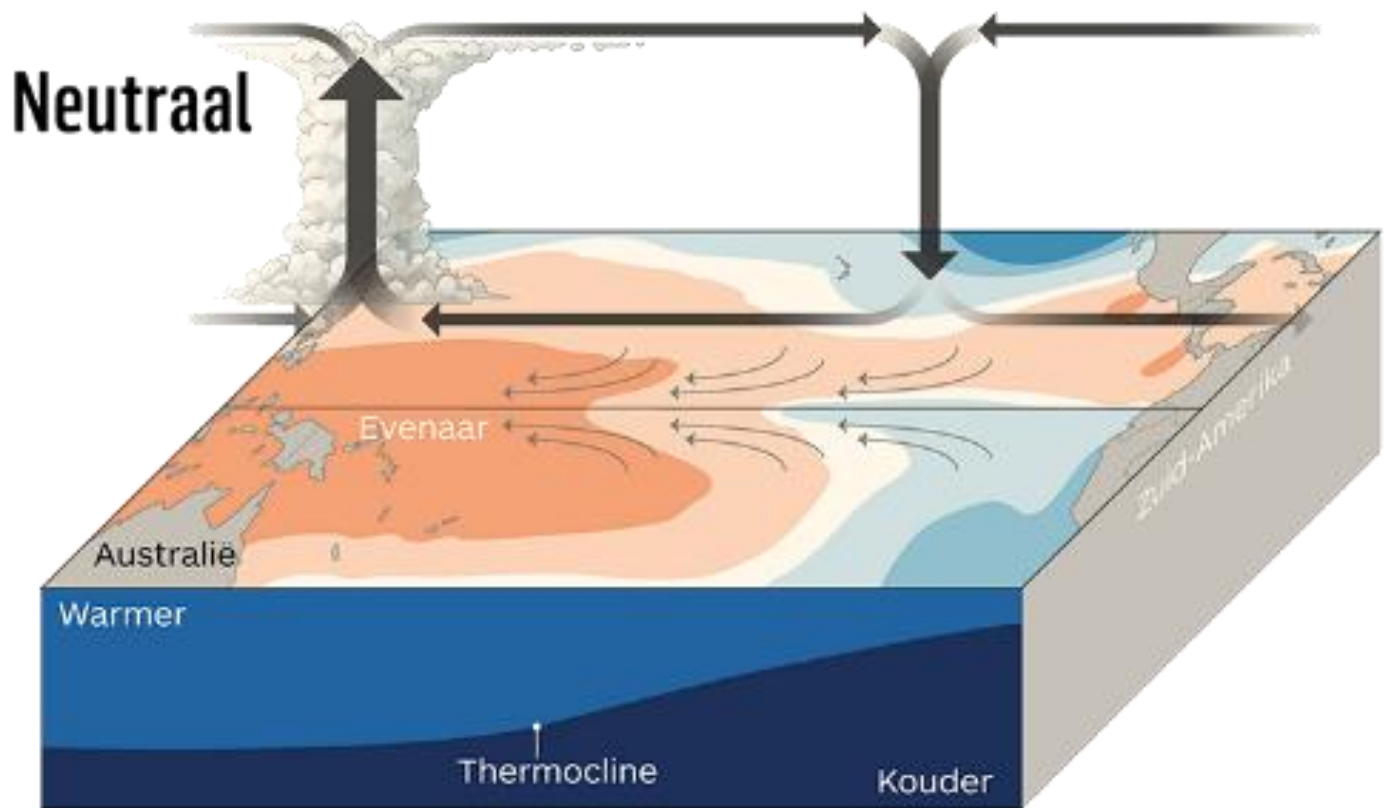
wordt en droge periodes langer en intenser zijn. Een afname van zomerse neerslag en een intensivering van de midden-zomerse droogte zullen de beschikbaarheid van waterbronnen verder onder druk zetten (LI & FORD, 2019). Naast de verandering in neerslag zal deze hogere temperatuur ook voor meer verdamping zorgen van het water in de meren. Dit is nefast voor het watermanagement. Alleen al in 2024 was verdamping van reservoirwater goed voor 13% van het totale waterverbruik.

3.2.2 Meteo – El Niño

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is een eeuwenoud klimaatverschijnsel dat zich in de Stille Oceaan ter hoogte van de evenaar afspeelt. Het fenomeen verwijst naar de wisselwerking tussen oceaan en atmosfeer, waarbij het oceaanwater periodiek opwarmt of afkoelt. Er zijn 3 verschillende fases: de neutrale, El Niño en La Niña. El Niño en La Niña zijn respectievelijk de warme en koele fase van het terugkerend klimaatpatroon in de tropische Stille Oceaan. Dit patroon verschuift onregelmatig elke twee tot zeven jaar en brengt voorspelbare veranderingen in de oceaanoppervlaktetemperatuur met zich mee, waardoor de wind- en regenpatronen over de tropen worden verstoord (Scaife et al., 2019).

3.2.2.1 Normale omstandigheden

Als er gekeken wordt naar de normale omstandigheden in de Stille Oceaan dan valt op dat deze continu in beweging is. De zon warmt de bovenste laag van het zeewater op. De passaatwinden, dit zijn tropische luchtstromen, die zich verplaatsen van de tropen richting de evenaar en op hun pad afgebogen worden richting het westen. Deze passaatwinden duwen het opgewarmde water in westelijke richting. In het oosten wordt de oppervlakte weer aangevuld met koeler zeewater langs onder. Dit fenomeen heet ‘opwelling’. In het westen zorgt het warmer oppervlaktewater voor een warme opstijgende lucht, die neerdaalt en oostwaarts keert en zo nieuwe passaatwinden vormt. Hierdoor kent het oosten van Azië een nat klimaat en het westen van Amerika een droog klimaat (Evers & Editing, 2023; National Oceanic and Atmospheric Administration, z.d.).

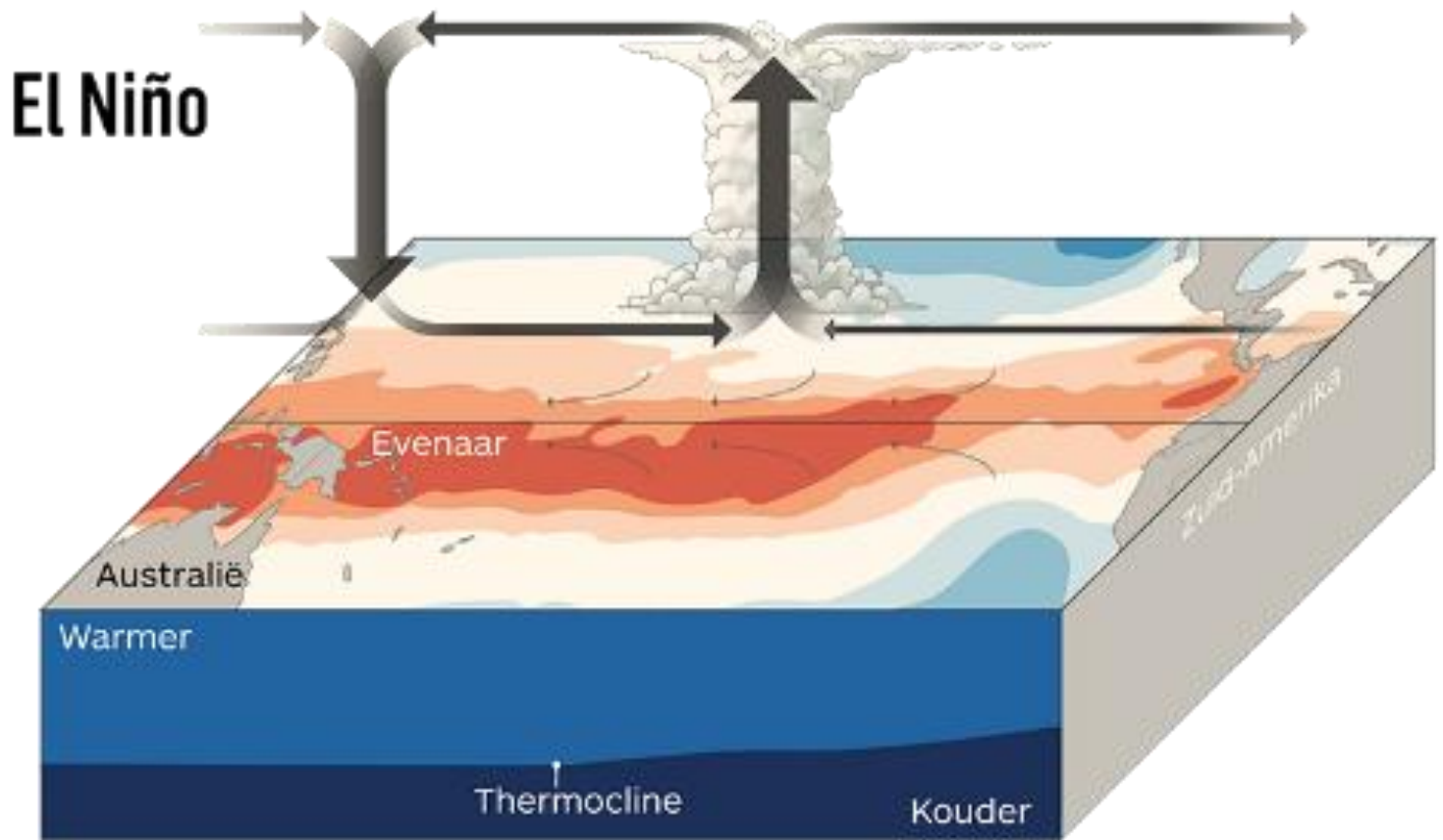


Figuur 5 ENSO, Neutrale fase in de Stille Oceaan

Bron: Vahaeghe et al. (2023)

3.2.2.2 El Niño

Door het complexe samenspel tussen de oceaan en de atmosfeer, dat de oceaan opwarmt, worden passaatwinden afgezwakt en dat er minder koud water opwelt in het oosten. Hierdoor wordt het warme water over heel de oceaanbreedte ter hoogte van de evenaar verdeelt en wordt de oceaan globaal ook warmer. De fase waarin het oceaanwater warmer is wordt El Niño genoemd. El Niño duurt gemiddeld 6 maanden met zijn hoogtepunt in december, vandaar ook zijn naam ‘kerstkind’ (Met Office, z.d.; NASA earth observatory, 2009; NOS, 2023).



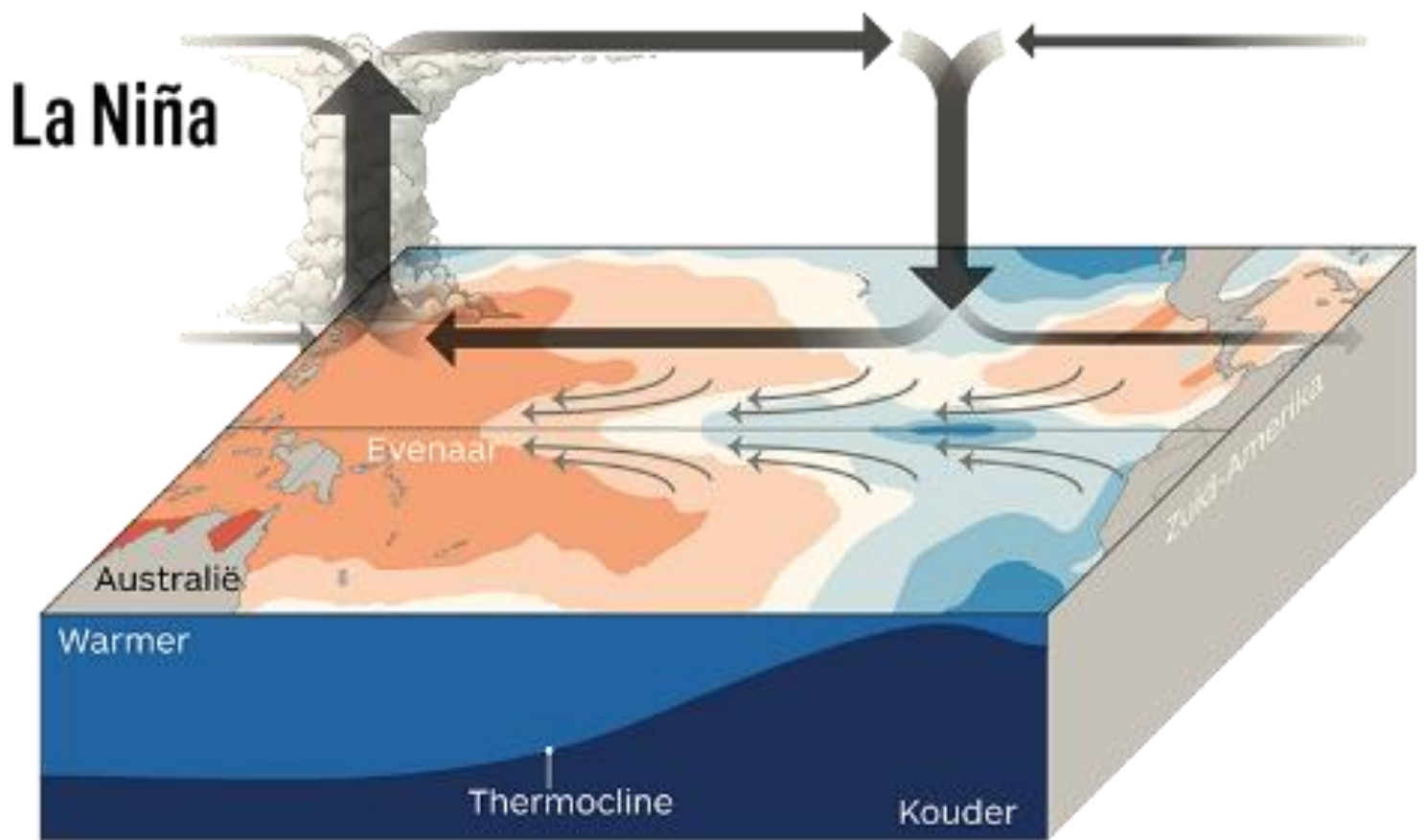
Figuur 6 ENSO, El Niño fase in de Stille Oceaan

Bron: Vahaeghe et al. (2023)

3.2.2.3 La Niña

La Niña, is de tegenhanger van El Niño, dit is de fase wanneer de oceaantemperatuur lager is dan gemiddeld, dit komt voor als de passaatwinden sterker zijn dan normaal. Hierdoor wordt het warme water aan de oppervlakte nog meer naar het westen geduwd en in het oosten welt er nog meer koud oceaانwater op. Zo warmt het westelijk deel van de oceaan verder op en koelt het oostelijk deel verder af. Als gevolg is het warmer en natter in het westen en droger en kouder in het oosten.

Er wordt gesproken over El Niño, als de zee-oppervlaktetemperatuur een halve graad warmer is dan de gemiddelde temperatuur en van La Niña, als de zee-oppervlaktetemperatuur een halve graad kouder is dan gemiddeld. (Met Office, z.d.; NASA earth observatory, 2009; NOS, 2023).



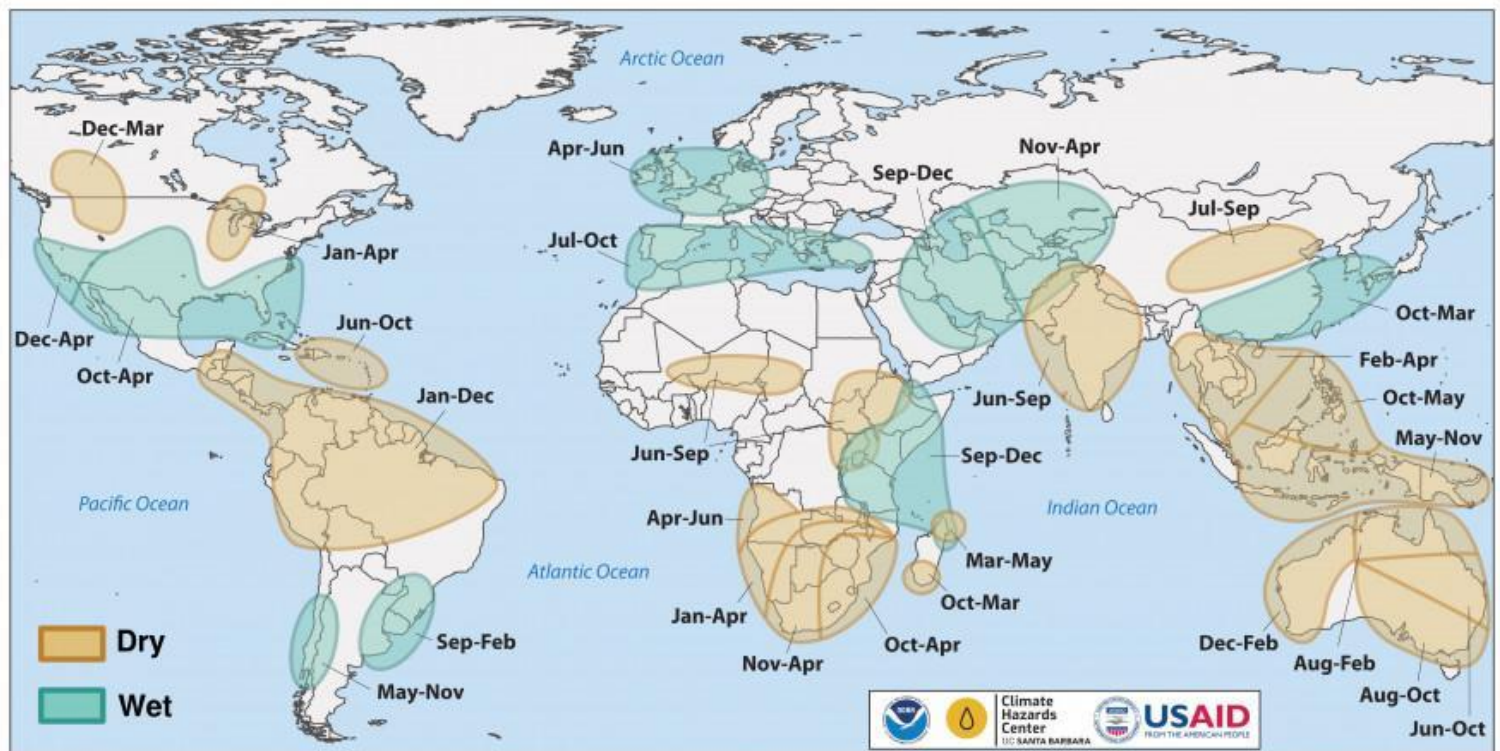
Figuur 7 ENSO, La Niña fase in de Stille Oceaan

Bron: Vahaeghe et al. (2023)

3.2.2.4 Impact op Panama

De klimaatopwarming heeft geen invloed op de wisselwerking tussen El Niño en La Niña, het zorgt er wel voor dat de effecten van El Niño groter worden. Door extra verdamping in de atmosfeer worden drogere periodes nog droger en nattere periodes nog natter, gevolgen hiervan zijn: overstromingen, bosbranden.... La Niña zorgt voor het ontstaan van orkanen boven de Atlantische Oceaan en El Niño voor cyclonen boven de Stille Oceaan.

Zowel El Niño als La Niña zorgen voor de verstoring van het weer op 5 continenten, maar El Niño is wel het hevigst (NOAA, 2024; World Meteorological Organization (WMO), 2024b). In december 2023 bereikte El Niño een hoogtepunt, de sterkste van de vijf laatste El Niño's sinds de metingen. (World Meteorological Organization (WMO), 2024b).



Figuur 8 Wereldwijd effect van El Niño op neerslag

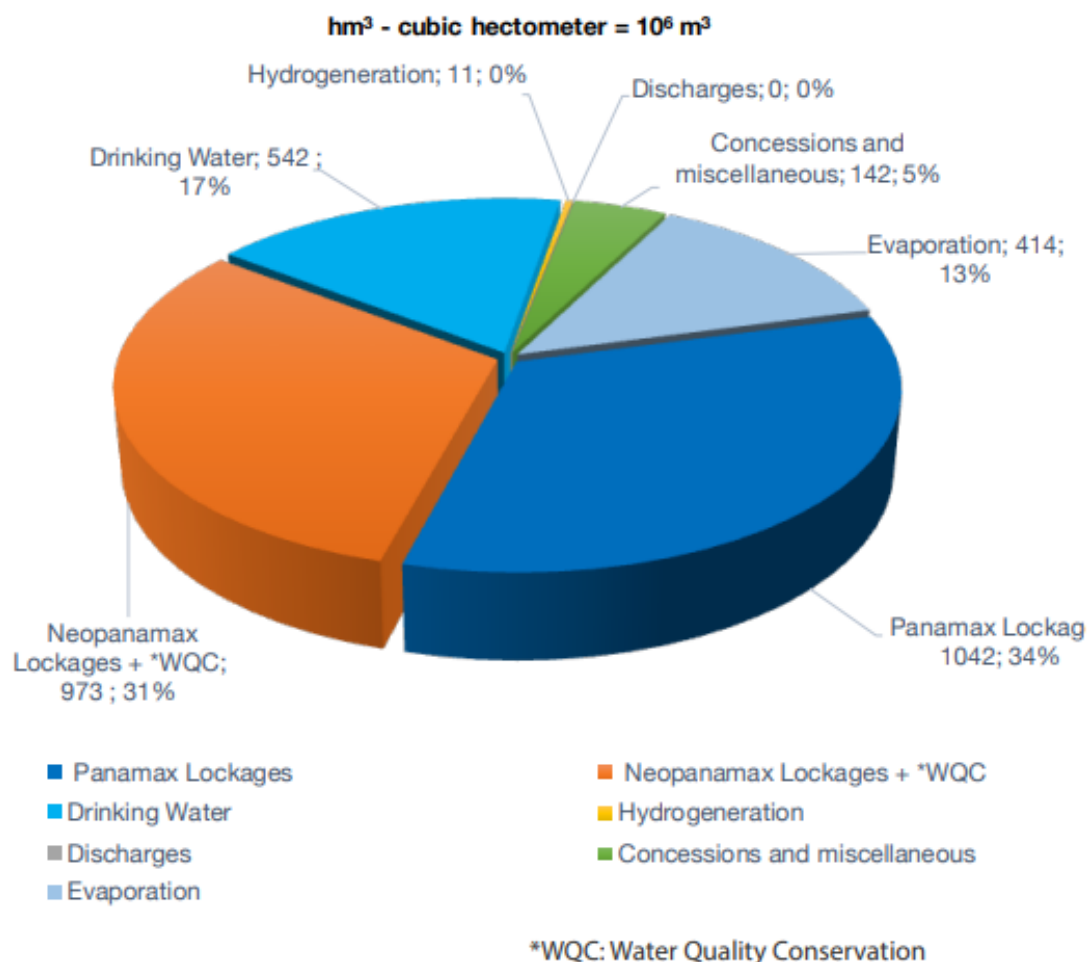
Bron: Famine Early Warning Systems Network (2023)

Op de wereldkaart van Figuur 8 is duidelijk te zien dat El Niño voor meer droogte zorgt in centraal Amerika. Voor het Panamakanaal wil dit dus zeggen intensere en heftigere droogteperiodes.

3.2.3 Scheepvaart door het Panamakanaal

Wanneer een sluis gevuld of geledigd wordt, om een schip hoger of lager te brengen, wordt er water uit een hoger gelegen reservoir in de sluis gelaten, gebruikmakend van de zwaartekracht. Het water dat zich nu in de lager liggende sluis bevindt kan niet zomaar terug naar boven. Externe energie gebruiken zou de enige manier zijn om het water terug naar boven te pompen. Dit is geen optie omdat er dan zout in het zoete Gatúnmeer terecht zou komen. Voor extra toelichting zie 3.3.3. Een natuurlijke aanvoer van zoetwater is dus nodig voor de werking van de sluizen. Het Gatúnmeer en Alajuelameer worden voorzien van zoetwater door de rivieren en de regenval. Deze worden bij normale regenval dagelijks aangevuld met 15 miljard liter vers

water. Door de verminderde neerslag, tijdens de droge maanden van 2023, werd het slechts aangevuld met 7 miljard liter water. Het totale verbruik bedraagt 10 miljard liter per dag, dit omvat de industrie, het drinkwater, de sluizenwerking, de verdamping.... De scheepvaart is met voorsprong de grootste verbruiker. Om 5 schepen door het kanaal te loodsen verbruiken de sluizen 1 miljard liter water, dit is dus per schip 200 miljoen liter water of 80 volle Olympische zwembaden (Knack, 2021; Wikipedia, 2022). Als er gekeken wordt naar het waterverbruik per dag, voor een gemiddelde van 38 schepen dan bedraagt dit 7,7 miljard liter water. Dit is 0,7 kubieke hectometer meer dan de 7 hm³ vers water die werd aangevoerd in de drogere maanden van 2023. Dit verbruik is enkel en alleen voor de scheepvaart. Dus als het verbruik voor een langere periode boven de aanvoer ligt dan is dit nefast voor het waterpeil, met alle bijhorende gevolgen op lange termijn. Metingen tonen aan dat de reserves van de meren alsmaar kleiner worden (Rodríguez, 2023a).



Figuur 9 Verdeling waterverbruik van het stroomgebied Panamakanaal voor fiscaal jaar 2024

Bron: Panama Canal Authority (2024b)

3.2.4 Andere waterverbruikers van Gatúnmeer

3.2.4.1 Drinkwater

Het water van het kanaal, het Gatúnmeer en Alajuelameer is één van de belangrijkste bronnen voor drinkwatervoorziening in Panama, goed voor 2,49 miljoen inwoners of 55% van de bevolking, waaronder ook enkele van de grote steden vallen zoals Panama-City, Colon en San Miguelito (Panama Canal Authority, 2025b; World Population Review, 2024). Volgens een studie van “Netherlands Water Partnership” hebben de Panamezen een hoog drinkwater verbruik. Ze verbruiken dagelijks 507 liter per hoofd van de bevolking, dit is twee en een half keer meer dan het wereldwijde gemiddelde. Uitgerekend voor de huidige bevolking komt dit uit op ongeveer 2,3 miljard liter water per dag, waarvan ongeveer de helft uit het Gatúnmeer komt (*Panama Water Sector Study.pdf*, z.d.; Worldometer, 2024).

3.2.4.2 Waterkrachtcentrale

De waterkrachtcentrale van de Gatún-dam benut de immense watervoorraden van het Gatúnmeer om elektriciteit op te wekken. De centrale draagt bij aan de efficiënte werking van het Panamakanaal en voorziet de omringende regio van stroom. De waterkrachtcentrale speelt een cruciale rol in de ondersteuning van de economische activiteiten in het gebied. Het opwekken van energie verbruikt 115 miljard liter water per jaar, dat stemt overeen met 315 miljoen liter water per dag (Soto, 2010). Dit is het equivalent van 1,6 transits.

3.3 Gevolgen van de waterschaarste

3.3.1 Kanaal

In 2023 was de PCA genoodzaakt maatregelen te treffen om het waterniveau in het Gatúnmeer stabiel te houden. Er zijn toen verschillende beperkingen opgelegd voor de doorgang van schepen, met een vermindering van de capaciteit tot gevolg. Dit was nodig om de continue werking van het kanaal te garanderen. De PCA staat voor een grote uitdaging: het waterniveau van het kanaal op peil houden en tegelijk de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van het kanaal te garanderen om zo hun competitief voordeel in de markt te behouden. Het is duidelijk dat door de droogte het niet meer mogelijk zal zijn om steeds en altijd het kanaal op maximale

capaciteit te laten functioneren. Korte en lange-termijnoplossingen zijn absoluut noodzakelijk om het waterpeil voldoende hoog te houden (Fleury, 2024; Giraldo, 2024).

3.3.2 Scheepvaart

Schepen die door het Panamakanaal willen varen, krijgen beperkingen opgelegd met betrekking tot hun diepgang. Het aantal schepen dat per dag mag doorvaren is lager dan normaal, hierdoor zijn er lange wachttijden aan het kanaal. Containerschepen hebben hier het minste last van, aangezien deze op een vast traject varen en dus lang op voorhand kunnen reserveren. Schepen die geen vaste trajecten hebben, zoals bulkschepen en LPG-schepen, kunnen moeilijker reservaties plannen en ondervinden hiervan het grootste nadeel. De PCA veilt de nog open tijdvensters aan de hoogste bidder. Rederijen zijn bereid aanzienlijk meer te betalen om de wachttijd van hun schepen te beperken. Zo betaalde een Japanse rederij op 8 november 2023, \$4 miljoen extra, voor de doorvaart van hun LPG schip, de doorvaart vond plaats op 15 november (Jankowicz, 2023; The Maritime Executive, 2023). Deze restricties hebben een immense impact op de efficiënte exploitatie van de schepen en zorgen voor hinder bij de reders en hun klanten. Hierdoor wordt het verschepen van goederen duurder en neemt de druk op de scheepsvaartsector toe (Paris, 2023).

De scheepbouwindustrie ondervindt hiervan onrechtstreeks ook de gevolgen. De huidige schepen worden gebouwd volgens duidelijke voorschriften, vooral qua afmetingen, die overeenkomen met de afmetingen van de sluizen. Er wordt getracht om binnen deze voorschriften een zo groot mogelijk laadvermogen te creëren en daarbij de juiste balans te bereiken tussen de snelheid en het brandstofverbruik (Inbound Logistics, 2023). Als deze sluizen niet meer met volle capaciteit kunnen geëxploiteerd worden en er andere vaarroutes moeten gekozen worden, is het dan nog relevant om schepen te bouwen met dimensies op de limieten van de sluizen?

3.3.3 Drinkwater, fauna en flora

Sinds de opening van de grotere sluizen wordt een deel van het water dat gebruikt wordt voor het versluizen gerecupereerd, in plaats van het te laten wegvloeien naar de oceanen. Bij elke sluistransit wordt er zoutwater met zoetwater gemengd in de sluizen, hierdoor wordt het water in de sluizen zouter en een deel hiervan sijpelt door naar het Gatúnmeer. Deze toevoer van

zoutwater in combinatie met het verdampen zorgt voor een verhoogd zoutgehalte in het meer. Tijdens het droge seizoen is er minder neerslag waardoor er minder vers water is om het zoutwater weg te spoelen. In de jaren dat El Niño optreedt wordt dit probleem alleen maar groter. Hierdoor zal het zoetwater in het Gatúnmeer sneller een verhoogd zoutgehalte bereiken, waardoor de drinkwatervoorziening in het gedrang kan komen.

Als het zoutgehalte van het Gatúnmeer stijgt zal dit ook een impact hebben op de biodiversiteit. De vegetatie langs de oevers zal veranderen alsook de organismen in het meer. Naast de impact op de biodiversiteit is er ook een verhoogd risico op de verspreiding van exotisch zeeleven tussen de twee oceanen, wat tot verstoring van beide ecosystemen kan leiden. Volgens een studie uit 2013 zou het zoutgehalte daarvoor alsnog te laag zijn. Ondertussen zijn we al tien jaar verder en is er een stijging van het zoutgehalte vastgesteld. In 2013 was het zoutgehalte 0,06 ppt (delen per biljoen) en in 2023 zitten we rond de 0,25 ppt dat is vier keer zo veel, dus zal er in de toekomst wel rekening mee gehouden moeten worden (Castrellón et al., 2024; Paton, 2024; Wijsman, 2013).

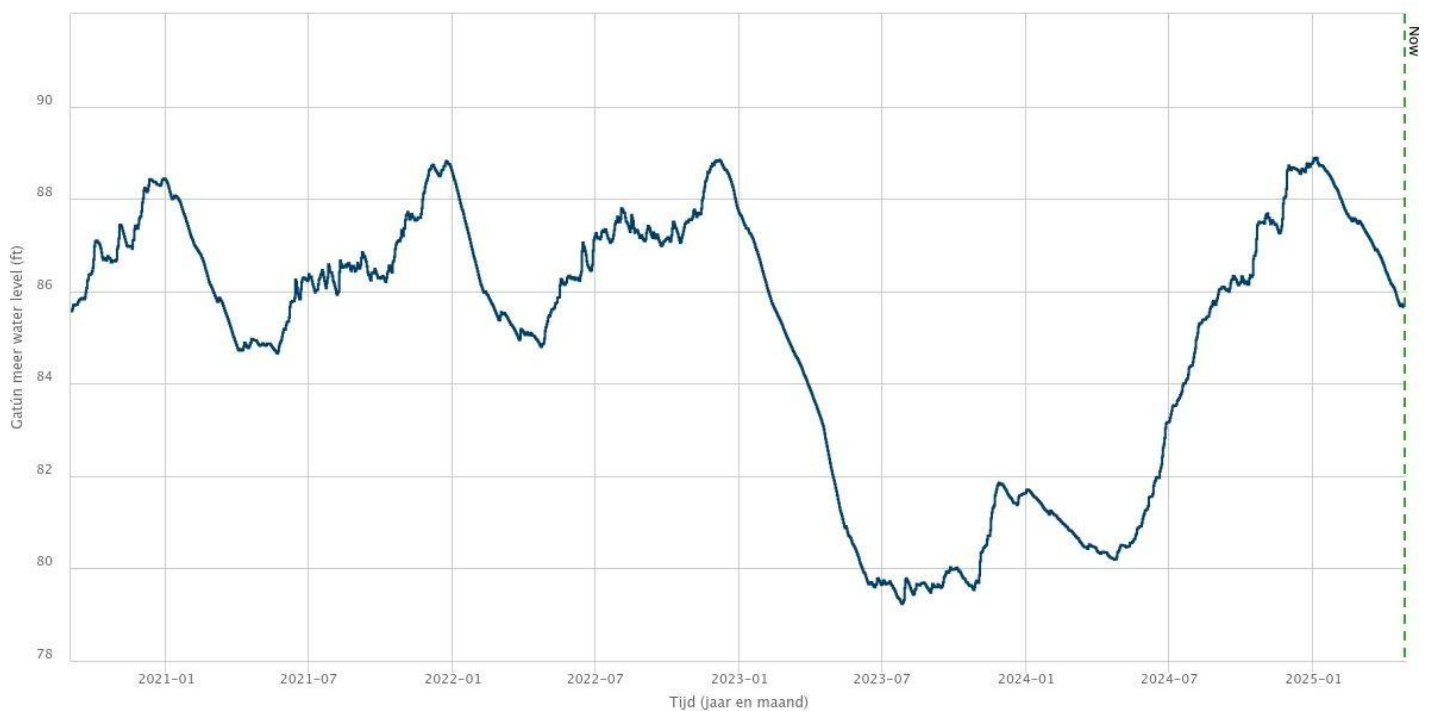
Tabel 1 Verschil tussen zoet-, brak- en zoutwater uitgedrukt in zoutdeeltjes per biljoen
Bron: Eigen werk aan de hand van Montemurno (2022)

	Zoetwater	Brak water	Zeewater
Zout ppt	0,5	0,5 – 30	35 – 38
Delen per Biljoen			

4 Huidige situatie

De acute droogte van 2023 is ondertussen achter de rug. In dit hoofdstuk wordt de huidige situatie, bijna twee jaar na de zware droogte, uitgelegd. We schetsen kort de situatie van het waterniveau in het Gatúnmeer, de neerslag, El Niño toestand, de transitcapaciteit en financiële inkomsten.

4.1 Waterniveau en neerslag



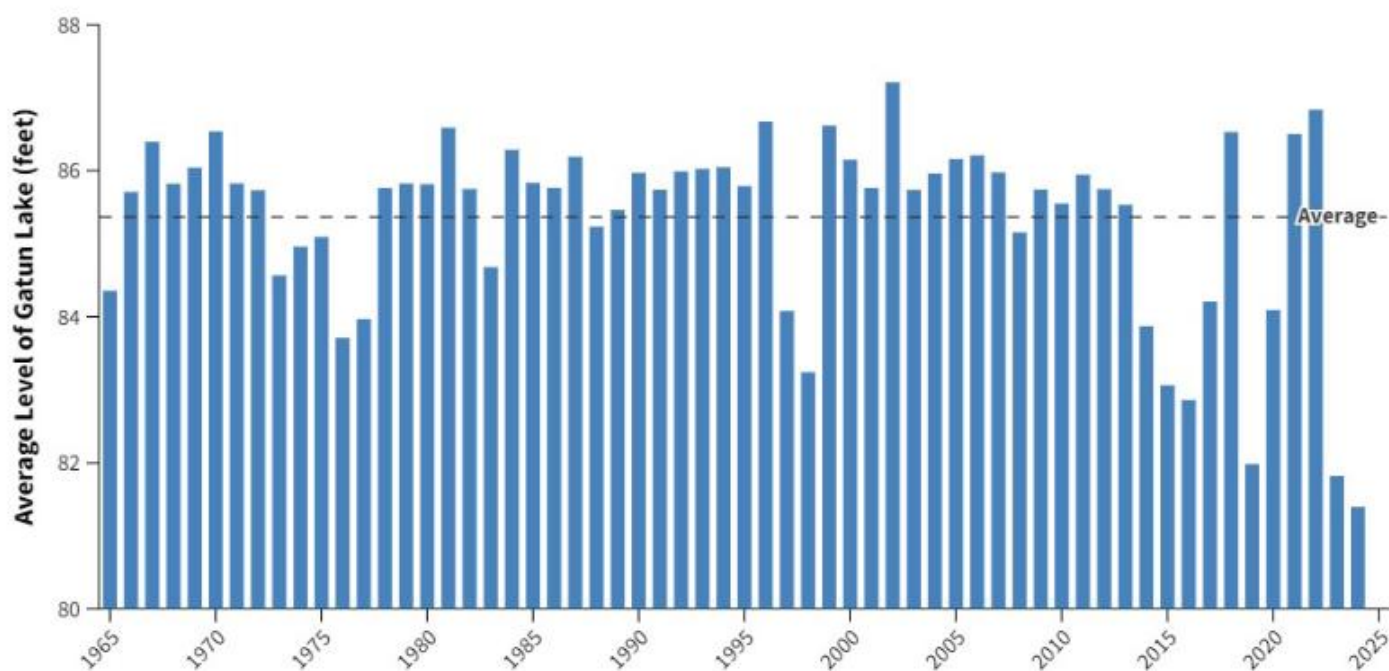
Figuur 10 Gatúnmeer waterniveau van 09-2021 tot 04-2025 in feet

Bron: Canal de Panamá (2025)

In

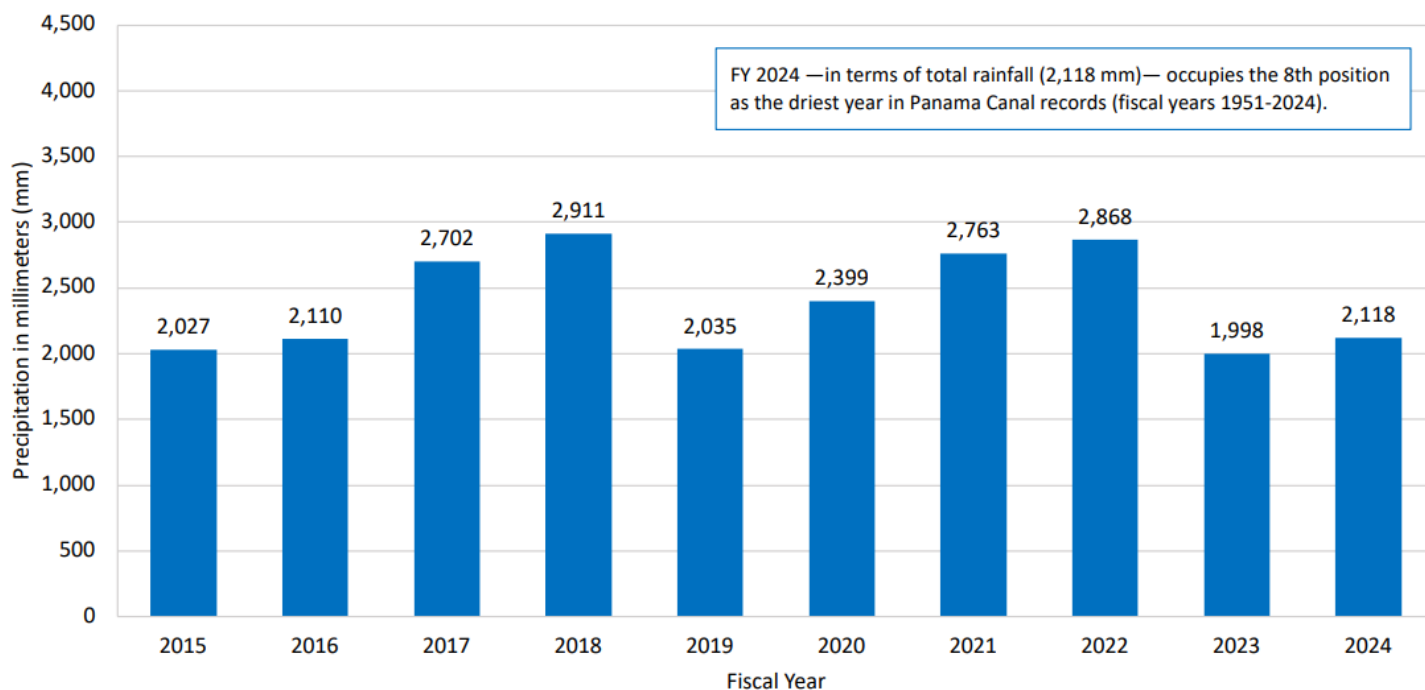
Figuur 10 kan men duidelijk de watercrisis van 2023 en 2024 zien. Het Gatúnmeer, het hoofdreservoir van het Panamakanaal staat historisch laag. Tijdens het regenseizoen van 2024 zien we dat het waterniveau terug nabij het gemiddelde van 85 feet (25,91m) komt. In januari

2025 bereikt het waterniveau een hoogtepunt, sindsdien werd een dalende trend ingezet. Op Figuur 11 is iets opmerkelijk te zien, namelijk dat vanaf 2014 het waterniveau van het Gatúnmeer regelmatig onder het gemiddelde staat. Sinds 2014 zijn er maar 3 jaartallen op 10 jaar tijd waar het waterniveau bovengemiddeld lag. Dit is opmerkelijk want dit gebeurde niet zo frequent in het verleden. De reden waarom dit de laatste jaren gebeurd is waarschijnlijk te vinden in Figuur 12. De jaren met de meeste neerslag 2018, 2021 en 2022 komen overeen met de jaren waarin het waterniveau van het Gatúnmeer boven gemiddeld is. Het laatste decennia valt er duidelijk minder neerslag dan gemiddeld sinds de metingen van 1951. Vijf van de afgelopen tien jaar behoren tot de top acht droogste jaren sinds het begin van de metingen (Panama Canal Authority, 2024b). Er is een sterke correlatie tussen hoeveelheid neerslag en het gemiddelde waterpeil in de waterreservoirs.



Figuur 11 Gemiddeld waterniveau van het Gatúnmeer per jaar van 1965 tot 2024 in feet

Bron: Velić et al. (2025)

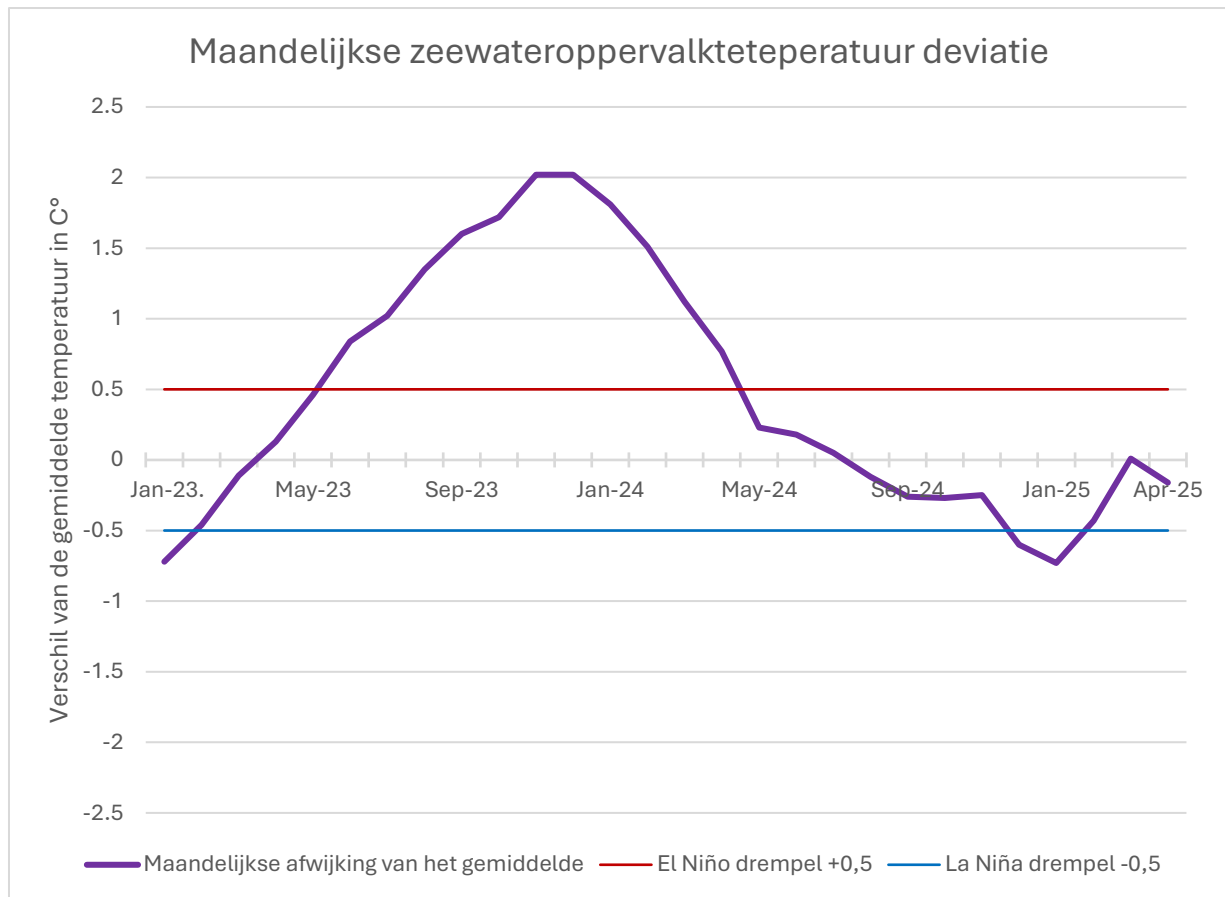


Figuur 12 Jaarlijkse regenval in Panama van 2015 tot 2024 in millimeter

Bron: Panama Canal Authority (2024b)

4.2 El Niño

Het weerfenomeen El Niño is begonnen in mei 2023 door sterke passaatwinden die het warm oppervlaktewater in de Stille Oceaan naar het westen duwen. Voorgaand aan deze El Niño waren er 3 jaren van El Niña. El Niño zorgt voor extreme droogte in centraal Amerika. El Niño kende zijn hoogtepunt in december 2023 en eindigde in mei 2024 (NASA earth observatory, 2024). De zeewateroppervlaktetemperatuur stabiliseerde niet en bleef verder dalen tot we in de La Niña fase kwamen. De La Niña fase was maar van korte duur en heeft slechts twee maanden geduurd. Sinds februari 2025 is de *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) in de neutrale fase (Becker, 2025a, 2025b).

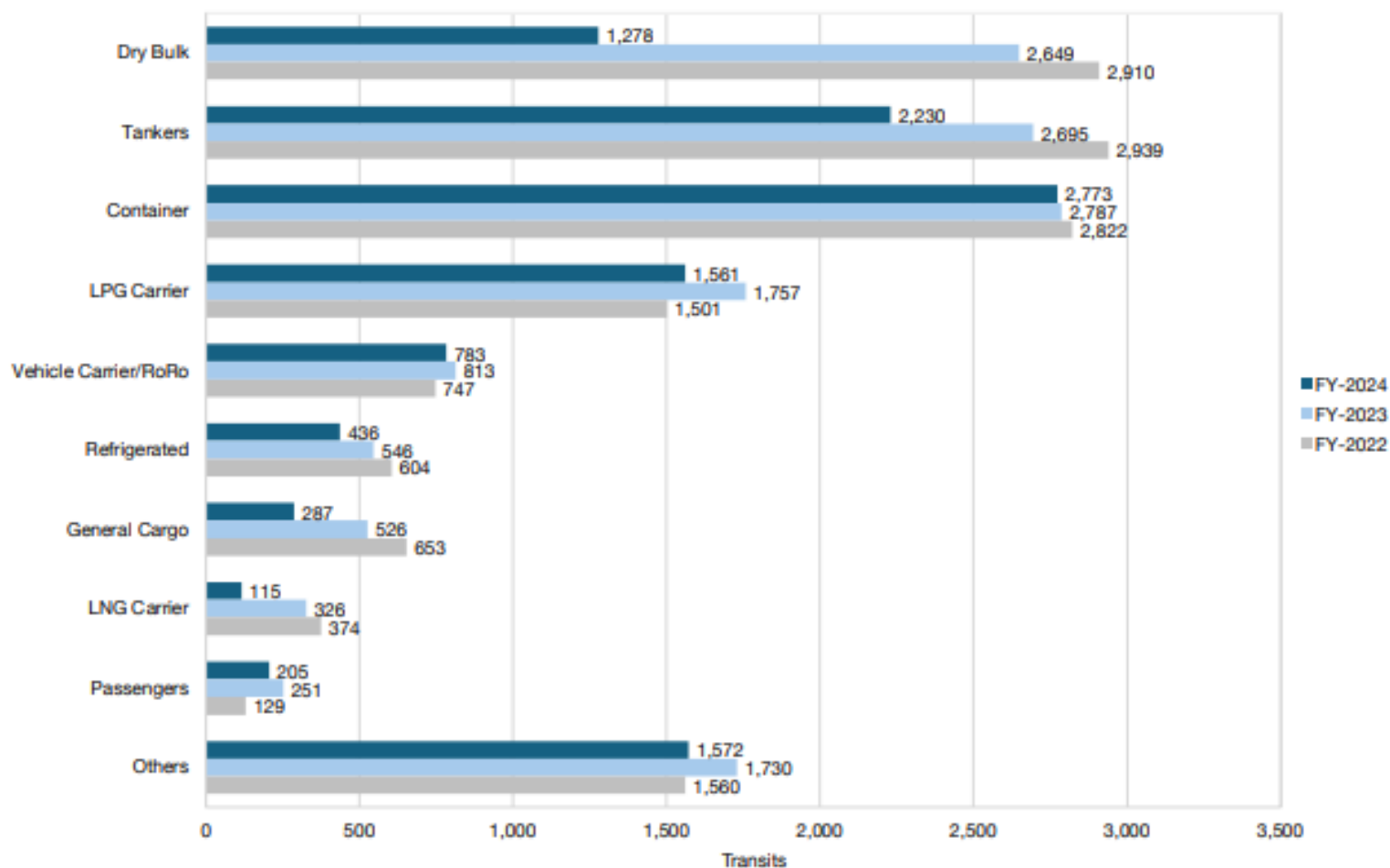


Figuur 13 Grafiek van de maandelijkse afwijking van zeewateroppervlakte temperatuur van de gemiddelde temperatuur in de Niño 3.4 zone in de Stille Oceaan

Bron: Eigen werk aan de hand van Becker (2025b)

4.3 Transitcapaciteit

De gevolgen van de zware droogte in 2023 zijn nog steeds voelbaar in de transitcapaciteit. In **Figuur 14** is duidelijk te zien dat er minder transits zijn uitgevoerd en dat we met een dalende trend zitten. Het totaal aantal transits per jaar bevestigen dit ook. Er zijn 2.840 minder doorvaarten gebeurd in 2024 ten opzichte van 2023. De transitcapaciteit van het kanaal is volgens de meest recente cijfers van de PCA nog steeds niet hersteld. In April 2025 was het dagelijks gemiddelde 34 transits, dat is 2 minder dan normaal (Miguel, 2025).



Figuur 14 Aantal transits per jaar per type schip van 2022 tot 2024

Bron: Panama Canal Authority (2024b)

Zowel de totaal vervoerde tonnage als het totaal aantal transits zijn duidelijk gedaald tussen 2022 en 2024. Over de hele periode 2022 tot 2024 wil dit zeggen dat er jaarlijks een gemiddelde afname is van 9,69% voor de getransporteerde tonnage. Voor de transits is dit jaarlijks gemiddeld 11,15% minder.

Tabel 2 Verschil in transits en verscheepte tonnage tussen 2022 en 2024

Bron: Eigen werk aan de hand van Panama Canal Authority (2022, 2024a, 2024b)

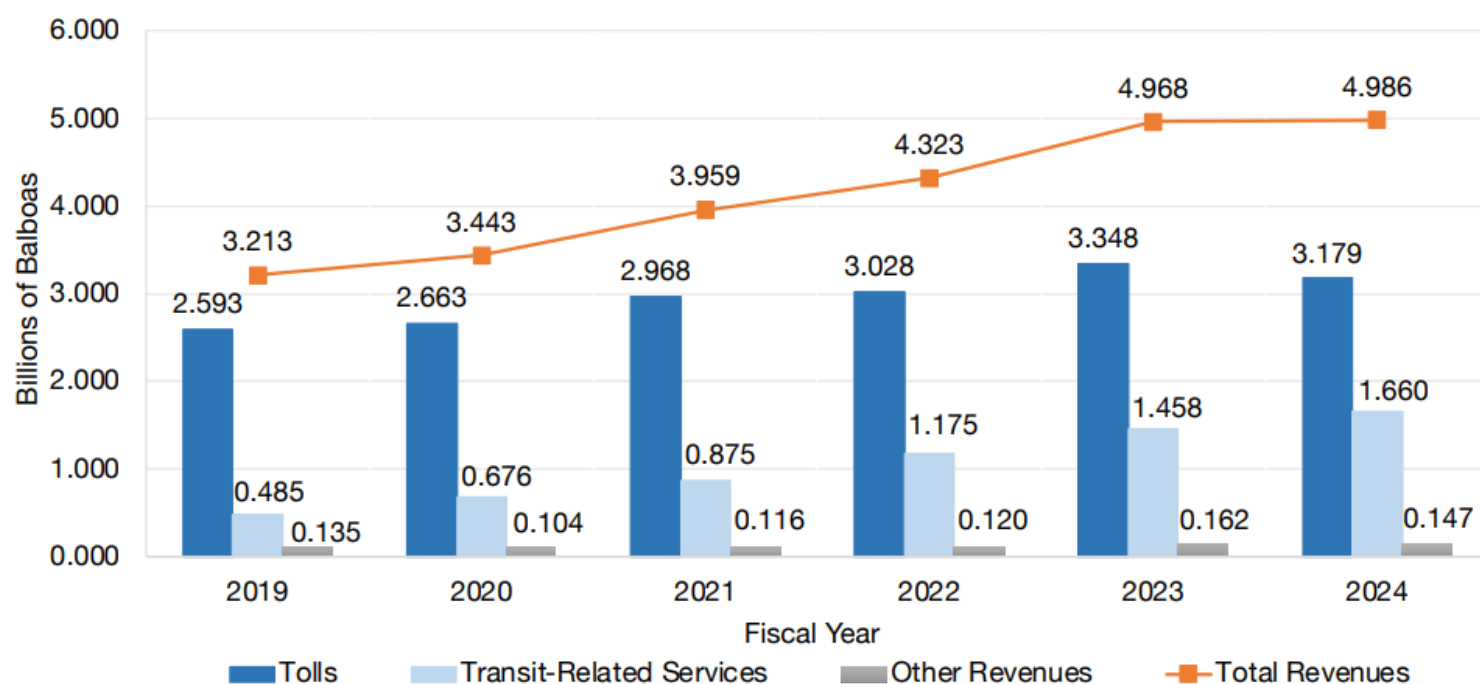
	2022	2023	2024	Verschil 2022-2023	Verschil 2023-2024	CAGR
PC/UMS tonnage in miljoen	518,8	511,1	423,1	-7,7	-88,0	-9,69 %
Transits	14239	14080	11240	-159	-2840	-11,15%

4.4 Financiële inkomsten

Uit het jaarrapport 2024 van de PCA kunnen we afleiden dat de totale inkomsten van de PCA 4,986 miljard dollar¹ zijn, wat een stijging is van 0,9% ten opzichte van 2023. Uit het jaarrapport blijkt dat \$3,598 miljard bijdraagt aan de nationale economie wat goed zou zijn voor 2,9% van bruto binnenlands product (BBP). Het BBP van Panama is \$83,32 miljard, ter referentie dat van België is \$644,78 miljard (The World Bank, 2025). De grootste bron van inkomsten voor de PCA is de tol dat een schip moet betalen bij een doorvaart (Panama Canal Authority, 2024b).

Figuur 15 en Tabel 3 geven aanleiding tot de volgende bevindingen tussen 2023 en 2024. De tolinkomsten zijn met -5,5% gedaald, maar dit heeft weinig invloed op de totale inkomsten, aangezien de transit gerelateerde inkomsten zijn toegenomen. Tussen 2023 en 2024 daalde het vervoerde cargo tonnage met -17,22%. In lijn daarmee nam ook het aantal transits af, met een daling van -20,17%. De afname in transits en vervoerde tonnage is viermaal groter dan die in tolinkomsten. Dit resulteert in een hogere gemiddelde prijs per ton en per transit.

¹ PAB = USD, Panamese Balboa heeft zelfde waarde als US Dollar 27/05/2025 (Oanda, 2025)



Figuur 15 De totale inkomsten van de PCA van 2019 tot 2024 in miljard Panamese Balboa (=US-dollars)

Bron: Panama Canal Authority (2024b)

In 2023 was het effect van de transitrestricties nog niet terug te zien in de tolinkomsten van de PCA. Aangezien de transitcapaciteit nog steeds niet volledig is hersteld, worden de verliezen inmiddels duidelijker zichtbaar. Indien de restricties aanhouden of worden verstrengd, kan de PCA geconfronteerd worden met financiële moeilijkheden. Wanneer deze situatie structureel wordt en ze lagere inkomsten hebben jaar na jaar, kan dit leiden tot een financiële crisis. Als de PCA dan nog wil blijven investeren in lange-termijnoplossingen kan dit voor een probleem zorgen. Het is dan ook essentieel dat de PCA hiermee rekening houdt in haar strategische planning.

Tabel 3 Vergelijkende tabel van de tolgkosten van het Panamakanaal per ton en per transit in de periode 2019–2024.

Bron: Eigen werk aan de hand van Panama Canal Authority (2024b)

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Tol Inkomsten (in miljard \$)	2,593	2,663	2,968	3,028	3,348	3,179
Jaar tot jaar tol inkomsten verschil		2.70%	11.45%	2.02%	10.57%	-5.05%
PC/UMS ton (in miljoen)	469.6	475.2	516.7	518.8	511.1	423.1
Jaar tot jaar PC/UMS ton verschil		1.19%	8.73%	0.41%	-1.48%	-17.22%
Prijs/ton (in \$)	5.52	5.60	5.74	5.84	6.55	7.51
Jaar tot jaar prijs verschil		1.49%	2.50%	1.61%	12.23%	14.70%
Transits	13785	13369	13342	14239	14080	11240
jaar tot jaar transit verschil		-3.02%	-0.20%	6.72%	-1.12%	-20.17%
Price/transit (in duizend \$)	188.10	199.19	222.46	212.66	237.78	282.83
jaar tot jaar prijs /transit verschil		5.90%	11.68%	-4.41%	11.82%	18.94%

De aangehaalde punten in dit hoofdstuk 4, laag waterniveau, minder neerslag, vermindering in transits en lagere tolinkomsten duiden erop dat de droogteproblematiek niet een éénmalig probleem is maar dat dit wel degelijk een structureel en recurrent probleem geworden is.

5 Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk zal de afbakening van de analyse duidelijk worden gemaakt alsook de gehanteerde beoordelingsmethode voor de analyse.

Deze studie en beoordelingen zijn vanuit het gezichtspunt van de Panama Canal Authority (PCA) opgezet. Dit omdat het droogteprobleem grotendeels hun activiteit beïnvloedt en zij hierop de grootste impact kunnen verwezenlijken. Zij zijn verantwoordelijk en staan in voor de controle over het waterbeheer in het stroomgebied van het kanaal. De oplossingen die besproken zullen worden zijn dan ook acties die de PCA zelf kan ondernemen, mits indien van toepassing met overleg met de belanghebbenden, om de waterschaarste aan te pakken. Het leek dus het meest relevant om vanuit hun standpunt de oplossingen te beoordelen.

Om de analyse gestructureerd en overzichtelijk te houden zal er gebruik gemaakt worden van een scoresysteem. Elke oplossing wordt geëvalueerd op basis van vijf criteria: praktische haalbaarheid, financiële impact, ecologische gevolgen, maatschappelijke effecten en waterbeheer.

Er zal gebruik gemaakt worden van Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). Dit is een algemeen kader voor het ondersteunen van een complexe besluitvorming, waar er rekening moet gehouden worden met meerdere criteria of factoren. Dit soort analyses worden veel gebruikt voor waterreguleringsbeleid. Deze methode laat toe meerdere criteria te toetsen en toch een totaalscore te verkrijgen per oplossing. Adequaar dus voor een complex probleem zoals de droogteproblematiek in het Panamakanaal (Saarikoski et al., z.d.).

Om de beoordeling zo relevant mogelijk te kunnen doen zal er aan elk criterium een gewicht toegekend worden. Dit wil zeggen dat bepaalde criteria meer invloed zullen hebben dan andere op de totaalscore van elke oplossing. We berekenen een gewogen gemiddelde. De som van alle gewichten is gelijk aan 100% (Cinelli et al., 2020). Om een robuuste en evenwichtige analyse te garanderen, zal gebruik worden gemaakt van verschillende combinaties van gewichten. Zo kan worden nagegaan hoe gevoelig de totaalscores zijn voor veranderingen in de weging. Op deze manier wordt er een zo objectief mogelijke beoordeling gemaakt. Door verschillende gewicht configuraties toe te passen kan het effect bestudeerd worden als er verschillende invalshoeken worden ingenomen. Door deze methode is het mogelijk om een sensitiviteitsanalyse uit te voeren.

Elke oplossing zal beoordeeld worden op elk criterium. Hiervoor zal er gebruik gemaakt worden van een numerieke scoreschaal. De schaal heeft een radius van 1 tot 5. Met score 1 als laagste, dus slechtste prestatie op dat bepaalde criterium. Score 5 is de hoogste score, dit wil zeggen dat de oplossing heel goed is voor dat bepaald criterium en dat er bijna geen verbetering mogelijk is. Score 3 is het midden en is dus de meest neutrale score. Dit wil zeggen dat de oplossing dus noch goed, noch slecht is voor het beoordeelde criterium.

De score wordt door mijzelf toegekend op basis van de informatie uit beschikbare bronnen en artikels. Het toekennen van een score wordt zo correct en objectief mogelijk gedaan. Toch moet hierbij vermeld worden dat het om een persoonlijke inschatting gaat, en er dus altijd een zekere mate van subjectiviteit in meespeelt.

De totaalscore van elke oplossing zal als volgt berekend worden. Elke oplossing krijgt een score voor elk criterium. Vervolgens wordt elke score van elke criterium vermenigvuldigd met het gewicht van het bijhorende criterium. De totaalscore voor de wateroplossing is dan gelijk aan de som van alle scores inclusief het gewicht per criterium. Dit gebeurt aan de hand van volgende formule.

Berekening gewogen gemiddelde:

$$\text{Oplossing (totaalscore)} = \text{SUM} \left([n1 * w1] [n2 * w2] [n3 * w3] \dots \right)$$

Waarbij:

n = criterium

w = gewicht van beoordelingscriterium

6 Beoordelingscriteria

Elke oplossing om de droogteproblematiek aan te pakken is anders. Het is daarom een uitdaging om deze zo evenwaardig mogelijk te beoordelen. De volgende criteria zijn gekozen vanuit het oogpunt en belang van de PCA. Aan de hand van deze criteria kan er bepaald worden welke oplossing of oplossingen toegepast kunnen worden voor een bepaalde aanpak of situatie, om het watertekort aan te pakken.

6.1 Praktisch

Op papier lijken oplossingen voor het watertekort in het Panamakanaal vaak veelbelovend, maar de echte uitdaging ligt in de praktische implementatie en dagelijkse toepassing. Een effectieve maatregel moet niet alleen technisch haalbaar zijn, maar ook consistent en efficiënt kunnen toegepast worden binnen de operationele werking van het kanaal. Sommige technieken en waterbesparende systemen bestaan al, zoals waterbesparende bassins en hergebruik van sluizenwater, maar de vraag blijft in hoeverre deze daadwerkelijk en structureel worden ingezet. Daarom moet de beoordeling van watermanagement en efficiëntie verder gaan dan enkel het theoretische model van besparingen. Het is essentieel om te meten hoe vaak en hoe effectief de oplossingen in de praktijk kunnen worden toegepast en of ze voldoende zijn om de transitcapaciteit van het kanaal en de drinkwatervoorziening voor de lokale bevolking te garanderen. Innovatieve oplossingen zijn alleen waardevol als ze daadwerkelijk en consistent bijdragen aan een stabiel en duurzaam waterbeheer.

In deze beoordeling ligt de nadruk op de toepasbaarheid van de voorgestelde oplossing voor het watertekort in het Panamakanaal. Daarbij wordt gekeken of de maatregel direct uitvoerbaar is, of dat er eerst voorbereidende stappen of investeringen nodig zijn voordat deze in werking kan treden, rekening houdend met de betrokken partijen. Binnen dit beoordelingscriterium kunnen onder meer de volgende vragen worden gesteld:

- Hoe gemakkelijk is de oplossing toe te passen?
- Kan de oplossing instant en direct toegepast worden?
- Zijn er infrastructurele aanpassingen nodig?

Uiteindelijk zal de totale efficiëntie van de oplossing beoordeeld worden.

Tabel 4 Beoordelingsschaal voor het praktische criterium

Bron: Eigen werk

Score	Beoordeling
1	Niet uitvoerbaar/ Zeer complex
2	Vergt aanpassingen/ Beperkt toepasbaar
3	Neutraal
4	Goed toepasbaar/ Efficiënt
5	Zeer efficiënt/ Direct inzetbaar

6.2 Financiële haalbaarheid

Bij de financiële beoordeling van een oplossing voor het watertekort in het Panamakanaal staat de volgende vraag centraal: “Wat zijn de kosten en hoe groot is de financiële impact?” Dit omvat zowel de initiële investeringskosten als de jaarlijkse operationele en onderhoudskosten. De omvang van de kosten en de geschatte jaarkosten worden geanalyseerd om de haalbaarheid en rentabiliteit van de oplossing te bepalen. We gaan ervan uit dat de inkomsten per transit gelijk blijven, dus dat de extra kosten niet zullen doorgerekend worden in de tolheffingen. We bekijken dus enkel de kostenzijde van de oplossingen.

Aangezien de Panama Canal Authority (PCA) een winstgedreven organisatie is, moet een oplossing niet alleen financieel haalbaar zijn, maar bij voorkeur ook economisch rendabel op lange termijn (Panama Canal Authority, 2011).

Tabel 5 Beoordelingsschaal voor het financiële criterium

Bron: Eigen werk

Score	Beoordeling
1	Zwaar verlieslatend
2	Nauwelijks rendabel
3	Neutraal
4	Winstgevend
5	Maximaal rendabel

6.3 Ecologische impact

Het Panamakanaal is niet alleen een cruciale handelsroute, maar ook een ecologisch rijke en kwetsbare regio. De biodiversiteit in het kanaal, de meren en zijn omliggende ecosystemen spelen een essentiële rol in het behoud van de waterkwaliteit en de stabiliteit van het ecosysteem. Bossen rondom het kanaal beschermen het stroomgebied en reguleren de watervoorziening die van vitaal belang zijn voor de werking van het kanaal (Brooks, 2004). Daarnaast brengt de economische groei die het kanaal stimuleert ecologische uitdagingen met zich mee. De kanaaluitbreiding gebouwd in 2016 verhoogt het totale waterverbruik, dat de druk op lokale waterbronnen verhoogt en mogelijk leidt tot ontbossing en verlies van habitats. Het Gatúnmeer is een zoetwatermeer, het wordt voornamelijk gevoed door regenwater en aanvoer vanuit de rivieren. Een bijkomend probleem van het gebruik van Neo-Panamaxsluizen is de verzilting van het meer. Vermenging met zoutwater kan het ecosysteem verstoren en de waterkwaliteit aantasten, wat gevolgen heeft voor de biodiversiteit. Daarom worden strikte maatregelen genomen om de instroom van zoutwater te beperken en het water van het meer zoet te houden. Het vinden van een balans tussen economische ontwikkeling en ecologisch

behoud blijft een uitdaging, maar is essentieel om de biodiversiteit en ecosysteem van het Panamakanaal te beschermen voor toekomstige generaties (Castellanos-Galindo et al., 2004; Condit et al., 2001). Het is voor de PCA constant wikken en wegen om een evenwicht te vinden. Zij hebben er dus ook groot belang bij dat het ecosysteem niet te veel wordt belast door de oplossingen. Daarom is dit dus een belangrijk aspect.

Op ecologisch vlak moet de PCA met verschillende belanghebbenden rekening houden. De nationale milieuautoriteit van Panama speelt hier de centrale rol, zij zullen toezien en “Environmental Impact Assessment” (EIA) beoordelen en goedkeuren. Zelf heeft de PCA ook een milieubeheer afdeling die hun focussen en specialiseren op het ecologische domein. De lokale bevolking mag zeker niet vergeten worden. Als de PCA internationale technische of financiële steun krijgt, zal ze aan extra milieunormen en richtlijnen moeten voldoen (cdp_admin, 2003, 2007; Rojas, 2022).

Tabel 6 Beoordelingsschaal voor het ecologische criterium

Bron: Eigen werk

Score	Beoordeling
1	Ernstige schade en achteruitgang
2	Negatieve impact
3	Neutraal/ Geen merkbare verandering
4	Positieve bijdrage en verbetering
5	Volledig hertstel/ Geen verstoring

6.4 Maatschappelijke impact

Het zoetwater uit het Gatúnmeer en de omliggende reservoirs wordt niet alleen gebruikt voor de werking van het Panamakanaal, maar speelt ook een cruciale rol in de drinkwatervoorziening

van de Panamese bevolking en de industriële sector. Het stroomgebied voorziet 95% van het drinkwater voor de inwoners van Panama City, San Miguelito en Colon. Dit komt overeen met de helft van de Panamese bevolking. Een watertekort heeft dus niet alleen impact op de scheepvaart, maar ook de volksgezondheid, welvaart en economische stabiliteit lijdt hieronder (Larsen, 2019; Netherlands Water Partnership, 2022). Om de maatschappelijke en industriële impact van een oplossing voor het watertekort te beoordelen, moet gekeken worden naar de mate waarin de maatregel bijdraagt aan een stabiele en eerlijke verdeling van het zoetwater. Dit houdt in dat zowel het Panamakanaal als de lokale gemeenschappen en industrieën voldoende toegang moeten behouden tot schoon water. De PCA moet rekening houden met anderen die het water ook nodig hebben. Naast verzilting kan een oplossing ook op verschillende andere manieren een impact hebben op de bevolking of maatschappij.

De PCA is een belangrijke werkgever in Panama, met zowel rechtstreekse tewerkstelling binnen de organisatie als onrechtstreekse werkgelegenheid via toeleveranciers en ondersteunende diensten. In 2024 stelde zij 8.560 werknemers tewerk. Daarnaast waren 4.981 geregistreerde vrijwilligers betrokken, wiens inzet een positieve impact had op circa 22.000 mensen. Bij de besluitvorming moet dan ook rekening worden gehouden met deze bredere maatschappelijke impact (Panama Canal Authority, 2024b).

Daarom is dit een beoordelingsonderdeel zelfs van uit het standpunt van de PCA.

Tabel 7 Beoordelingsschaal voor het maatschappelijk criterium

Bron: Eigen werk

Score	Beoordeling
1	Ernstige negatieve impact/ Grote verstoring
2	Negatieve impact
3	Neutraal/ Geen merkbare verandering
4	Positieve impact/ Verbetering
5	Sterk positieve impact/ Duidelijke verbetering

6.5 Waterbeheer

Het kernprobleem van het watertekort in het Panamakanaal ligt bij de beperkte beschikbaarheid van water door de klimaatsveranderingen. Daarom is dit één van de belangrijkste beoordelingscriteria van het watermanagement van de Panama Canal Authority (PCA) en de effectiviteit van de voorgestelde oplossing. Een duurzame aanpak moet zorgen voor nieuwe waterbronnen of efficiënter gebruik van het bestaande water. Bij de beoordeling van waterbeheersmaatregelen zal gekeken worden naar de besparing of toename van beschikbaar water. Dit omvat zowel directe besparingen door efficiëntere technologieën als de lange-termijnvoordelen door verbeterd landgebruik en wateropslag. Er zal bij dit criterium bekeken worden hoeveel water met de maatregel wordt bespaard of behouden (Anderson, 2007; Hatvani et al., 2025; Rodríguez, 2023a).

Tabel 8 Beoordelingsschaal voor het waterbeheer criterium

Bron: Eigen werk

Score	Beoordeling
1	Geen of verwaarloosbaar extra water
2	Beperkte hoeveelheid extra water
3	Gematigde hoeveelheid extra water
4	Grote hoeveelheid extra water
5	Zeer grote hoeveelheid extra water

6.6 Impact op transitcapaciteit

De droogte in de regio van het Panamakanaal heeft een aanzienlijke impact op de dagelijkse transitcapaciteit. Door de lage waterstanden in het Gatúnmeer en andere reservoirs wordt het

aantal doorgangen per dag beperkt, dat leidt tot vertragingen en verstoringen voor de scheepvaart en rederijen die gebruik maken van het kanaal. De implementatie van oplossingen moet ervoor zorgen dat er voldoende waterbuffer is, zodat het aantal transits stabiel blijft, zelfs in periodes van grote droogte. Om de impact op de transitcapaciteit te beoordelen, moet een oplossing niet alleen zorgen voor voldoende wateropslag, maar ook rekening houden met de flexibiliteit van de scheepvaartstromen (Chico et al., 2024; Notteboom et al., 2023).

Initieel werd dit criterium opgenomen in de studie. Echter tijdens het onderzoek werd duidelijk dat er te weinig informatie beschikbaar is om dit criterium volwaardig te kunnen beoordelen. Hierdoor werden we genoodzaakt om dit criterium niet verder op te nemen in de scoretoetsing. De impact op de transitcapaciteit zal wel besproken worden waar mogelijk. Voor de beoordeling zijn er dus maar vijf criteria in plaats van zes.

6.7 Gradaties van oplossingen

Er worden drie gradaties van oplossingen onderscheiden.

De eerste gradatie omvat de oplossingen die volledig in deze analyse worden besproken. Over deze maatregelen is voldoende data beschikbaar om elk criterium degelijk te kunnen beoordelen. Ze vormen de kern van de analyse en zullen uitgebreid worden toegelicht.

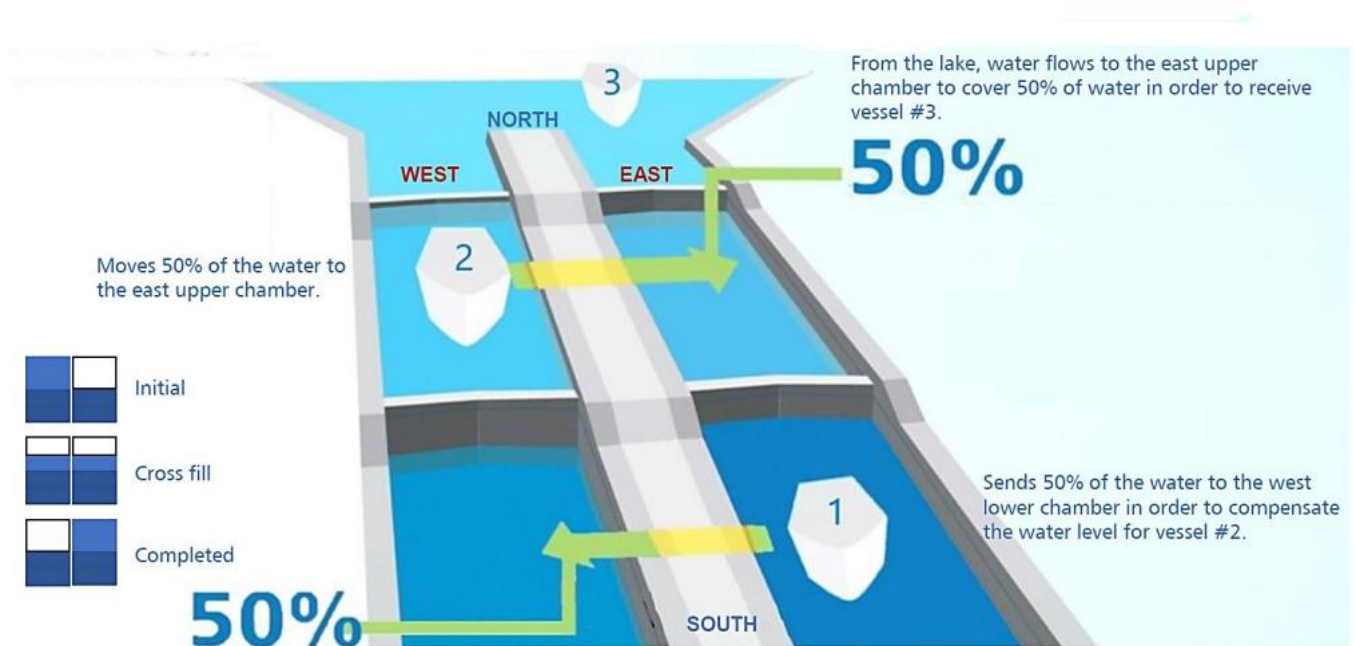
De tweede gradatie bestaat uit oplossingen waarvoor wel enige informatie beschikbaar is, maar onvoldoende om tot een volledige en betrouwbare evaluatie te komen. Door het gebrek aan gegevens kunnen deze niet worden opgenomen in de vergelijkende analyse.

De derde gradatie betreft ideeën waarvoor nog geen concreet onderzoek is gedaan. Het gaat om concepten of suggesties die mogelijk interessant kunnen zijn, maar waarover nog te weinig bekend is.

Van hoofdstuk 7 tot 14 worden er zeven oplossingen besproken van de eerste gradatie.

7 Oplossing 1: Cross-filling

Cross-filling is een methode die sinds de droogte van 2019 gebruikt wordt voor de Panamaxsluizen. Water wordt gerecycleerd door het lateraal van de ene sluiskamer naar de andere sluiskamer over te brengen. Dit is dus enkel mogelijk bij de “oude” Panamaxsluizen waar er twee sluiskamers naast elkaar liggen. Hier wordt gebruik gemaakt van het principe van communicerende vaten.



Figuur 16 *Cross-filling* principe

Bron: US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority (2023)

7.1 Praktisch

Cross-filling is organisatorisch niet zo eenvoudig toe te passen. Het wordt namelijk beïnvloed door verschillende aspecten. Als er voldoende water beschikbaar is in het Gatúnmeer, wordt dit niet toegepast. Deze techniek wordt enkel ingezet bij een schaarste. Doorvaartcapaciteit, wachtrijen en scheepscombinatie zijn de grootste limiterende factor. Alle schepen moeten

perfect gesynchroniseerd in de juiste volgorde in de juiste sluiskamer liggen anders is *cross-filling* niet mogelijk. Een goede planning is dus cruciaal. Afgezien van een goede planning is *cross-filling* een praktische oplossing. De techniek is snel te implementeren en vereist weinig extra middelen. Het water wordt aangevoerd uit twee reservoirs in plaats van één. (US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority, 2023).

Met de bovenstaande redenering krijgt *cross-filling* een score vier voor het praktisch criterium.

7.2 Financieel

Het is onduidelijk of er structurele aanpassingen zijn moeten gebeuren om de sluiskamers met elkaar te verbinden. *Cross-filling* vergt geen extra energiekost want de waterverplaatsing gebeurt door de wet van communicerende vaten, er is dus geen pomp nodig. Er wordt enkel een klep opgezet die beide sluiskamers verbindt. Over de onderhoudskosten is er geen informatie te vinden. We veronderstellen dat de onderhoudskosten minimaal of verwaarloosbaar zijn, aangezien er sowieso onderhoud moet gedaan worden aan de sluizen en dat deze omleidingspijp maar een klein onderdeel is. Omdat er geen grote investering of operationele kost nodig zijn voor deze oplossing krijgt deze een score vijf op het financieel criterium.

7.3 Ecologisch

Tot nu toe is er geen specifiek onderzoek gedaan naar zoutintrusie door *cross-filling*. Daardoor is het moeilijk om dit aspect nauwkeurig te beoordelen. Het risico lijkt echter beperkt, omdat het hergebruikte water afkomstig is uit het zoetwater van het Gatúnmeer. Het water wordt meerdere keren hergebruikt en stroomt stapsgewijs naar beneden, waardoor er telkens nieuw water wordt gebruikt en niet steeds hetzelfde water wordt gerecycleerd. Ook de ecologische impact zal eerder klein zijn. De maatregel verandert de werking van de sluizen niet ingrijpend, maar maakt wel een duurzamer gebruik van het beschikbare water mogelijk. Omdat de ecologische impact niet slecht of goed is krijgt deze een neutrale score.

7.4 Maatschappelijk

Naast de mogelijke zoutintrusie die het drinkwater in gevaar zou kunnen brengen heeft deze oplossing geen rechtstreekse impact op de maatschappij. Er is nog geen onderzoek gedaan naar zoutintrusie, maar zoals uitgelegd in hoofdstuk 7.3 zou de impact hiervan beperkt zijn. Daarom krijgt *cross-filling* een neutrale score voor het maatschappelijk criterium.

7.5 Waterbeheer

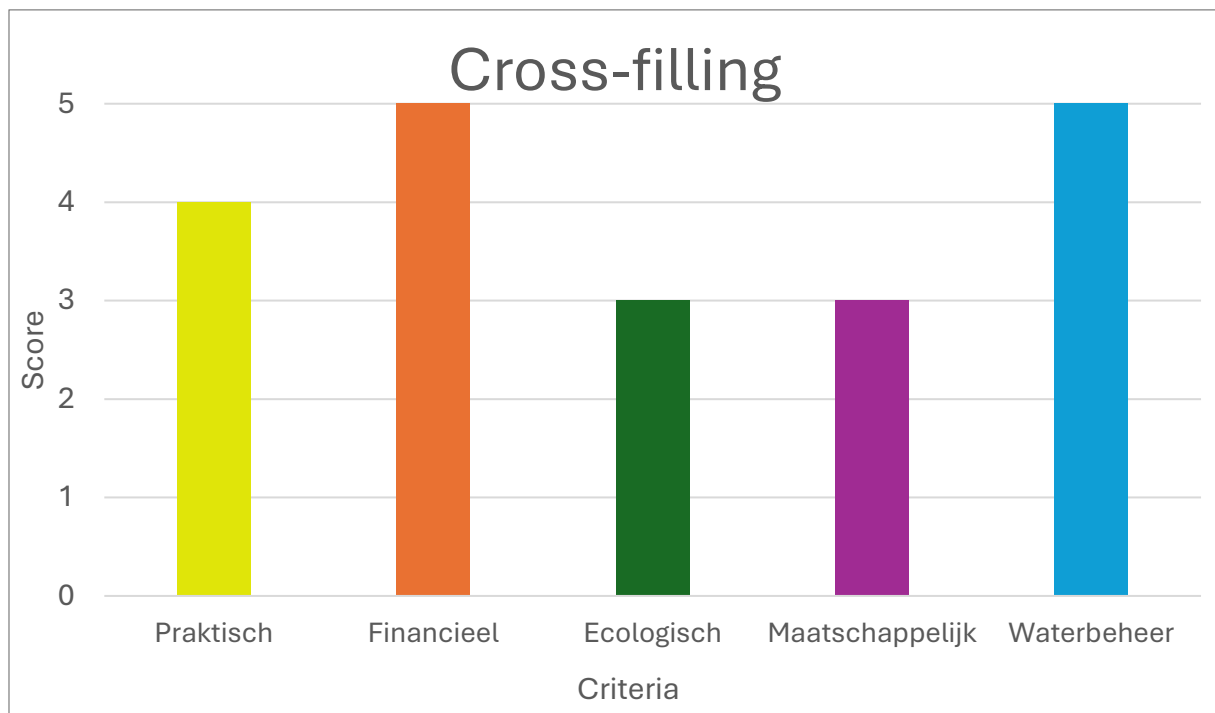
Door deze methode wordt er telkens 50% van het actief gedeelte water hergebruikt. Dit wil zeggen dat er slechts de helft van het water nodig is. Er kunnen dus twee schepen doorvaren met het volume water dat normaal voor één schip nodig is. Per dag bespaart dit een equivalent aan waterverbruik van ongeveer zes transits (Panama Canal Authority, 2020; Rodríguez, 2023d). In 2024 bespaarde de PCA door deze oplossing toe te passen het volume water gelijkwaardig aan 1.454,8 versluizingen dit is 12,9% van de jaarlijkse transits (Panama Canal Authority, 2024b).

Deze oplossing bespaart veel water en krijgt daarom de maximale score voor waterbeheer.

7.6 Impact op de transitcapaciteit

Deze methode vraagt meer tijd voor het vullen en ledigen van de sluiskamer. Het water komt namelijk niet van één locatie maar twee, namelijk 50% uit een naast liggende sluiskamer, de overige 50% komt uit het Gatúnmeer of een hoger liggende sluiskamer. Normaal gezien komt alles van een hoger liggend reservoir dus is er een groter hoogteverschil waardoor de hydrostatische druk hoger is en het dus sneller stroomt. Nu komt maar de helft van een hoger reservoir de andere helft komt van dezelfde hoogte waar de hydrostatische druk minder is. Deze overschakeling van aanvoer reservoirs en het wisselen van connectiepijpen zal meer tijd in beslag nemen. Bij een normale operatie duurt het 15 min om een sluiskamer te vullen, met *cross-filling* zal dit meer zijn aangezien dat dit niet tegelijkertijd kan gebeuren, want dan geldt de wet van communicerende vaten niet meer (Hodges, 1909; Rodríguez, 2023b).

7.7 Beoordeling

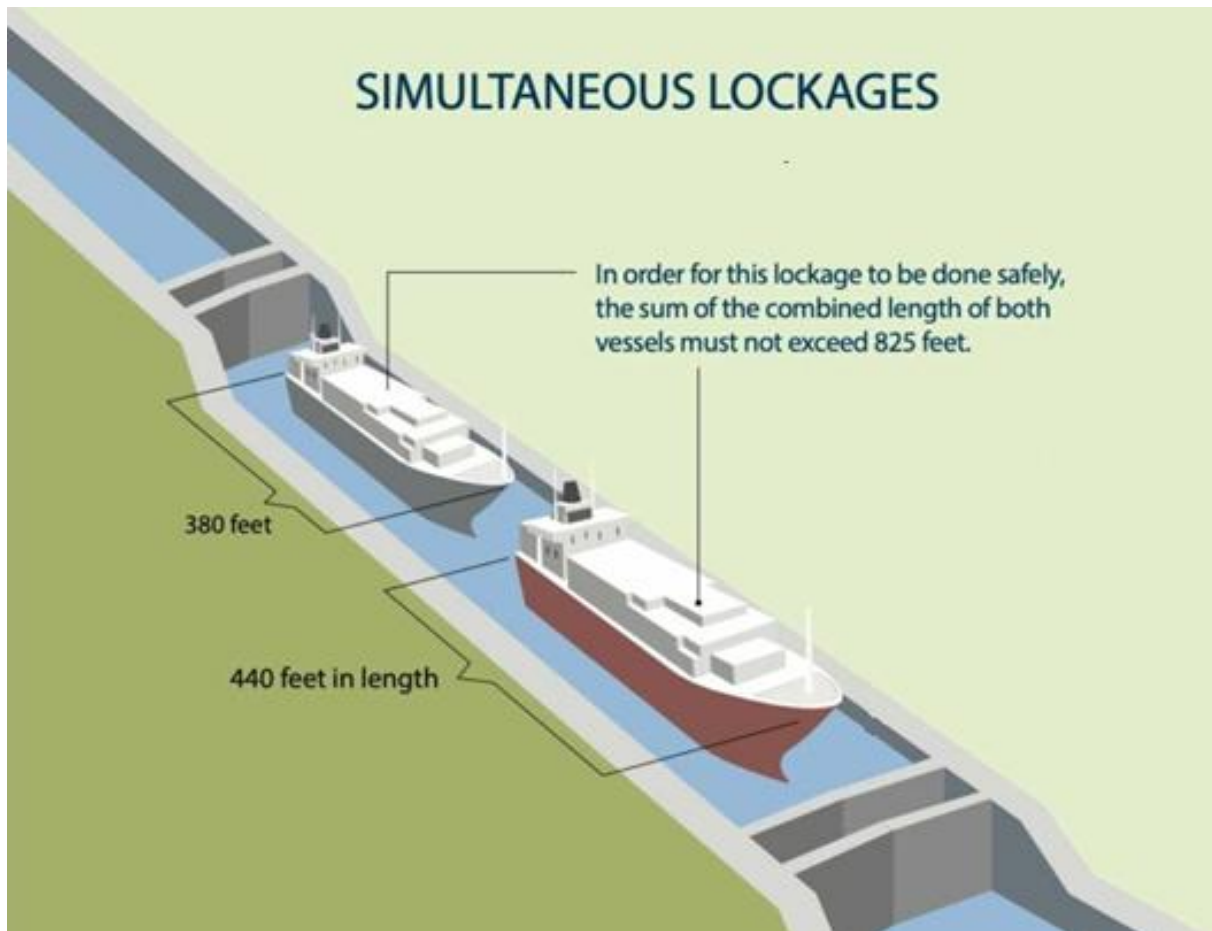


Figuur 17 Beoordeling *cross-filling* op een schaal van 1 tot 5

Bron: Eigen werk

8 Oplossing 2: Tandempassage

Een tandempassage is als twee of meer schepen in één sluiskamer de doorgang maken. Dit is enkel mogelijk als de dimensies van de schepen het toelaten (Rodríguez, 2023b).



Figuur 18 Tandempassage en maximale lengte voor Panamaxsluizen

Bron: Rodríguez (2023d)

8.1 Praktisch

De enige restrictie voor deze methode is de totale lengte van de sluiskamer. De totale opgetelde lengte van de schepen plus een veiligheidsmarge, die niet langer mag zijn dan 366 meter (1.201 feet) voor de Neo-Panamaxsluizen (Sabonge, 2014). Voor de “oude” Panamaxsluizen mag de opgetelde lengte van de schepen niet meer zijn dan 251,5 meter (825 feet) exclusief

veiligheidsmarge. Naast de lengte is een geoptimaliseerde transitplanning nodig zodat schepen, met de juiste afmetingen, op hetzelfde moment de sluiskamer kunnen binnenvaren (Rodríguez, 2023b, 2023d).

Realistisch gezien zal deze oplossing niet vaak kunnen worden toegepast. De koopvaardischepen zijn namelijk zo gebouwd tot op de limieten van de sluisen om zoveel mogelijk cargo mee te kunnen nemen. Het Panamakanaal is de enige *bottleneck* op een vaarroute dat een beperking heeft op dimensies van het schip. Schepen zijn eigenlijk op maat gemaakt voor de sluiskamers. Daarom noemen de schepen ook Panamax en Neo-Panamax.

De PCA kan zelf niet controleren hoeveel, hoe frequent en op welk tijdstip geschikte tandems schepen toekomen. Daarom krijgt tandempassage een score twee voor toepasbaarheid.

8.2 Financieel

De toelinkomsten voor de PCA zijn afhankelijk van verschillende factoren en variëren per schip. Het uiteindelijke bedrag hangt dus af van de samenstelling van de schepen die samen in tandem passeren. Afhankelijk van die combinatie kunnen de inkomsten hoger of lager uitvallen. Er is dus geen expliciet financieel voordeel of nadeel voor de PCA. De operationele kost is wel lager maar deze is niet opgenomen in de beoordeling. Aan de hand van deze redenering heeft tandempassage een neutrale score op financieel vlak.

8.3 Ecologisch

In plaats dat er één schip door het kanaal vaart, varen er nu twee schepen door. Dus er zou kunnen gesteld worden dat dit dubbele verstoring is van het ecosysteem. Al is deze verstoring onvermijdelijk dus is deze opmerking te verwaarlozen.

Er is wel al onderzoek gedaan naar de luchtvervuiling van schepen. Volgens het artikel “Size Matters” leidt het inzetten van twee kleinere schepen, in plaats van één groot schip met hetzelfde laadvermogen, tot een aanzienlijk hogere totale uitstoot. Twee kleinere schepen verbruiken samen tot 60% meer brandstof dan één groot schip voor dezelfde reis. Doordat elk afzonderlijk schip zijn eigen voortstuwing en hulpsystemen nodig heeft. Dit resulteert in een totale CO₂-uitstoot die bijna twee keer zo hoog kan zijn als bij één groot schip. Het gebruik van één groot schip is dus niet alleen efficiënter, maar ook aantoonbaar milieuvriendelijker op

totaalniveau (Walsh & Bows, 2012). Daarom heeft tandempassage een score twee voor het ecologisch criterium.

8.4 Maatschappelijk

Deze oplossing heeft geen rechtstreekse maatschappelijke impact. Daarom krijgt deze een neutrale score.

8.5 Waterbeheer

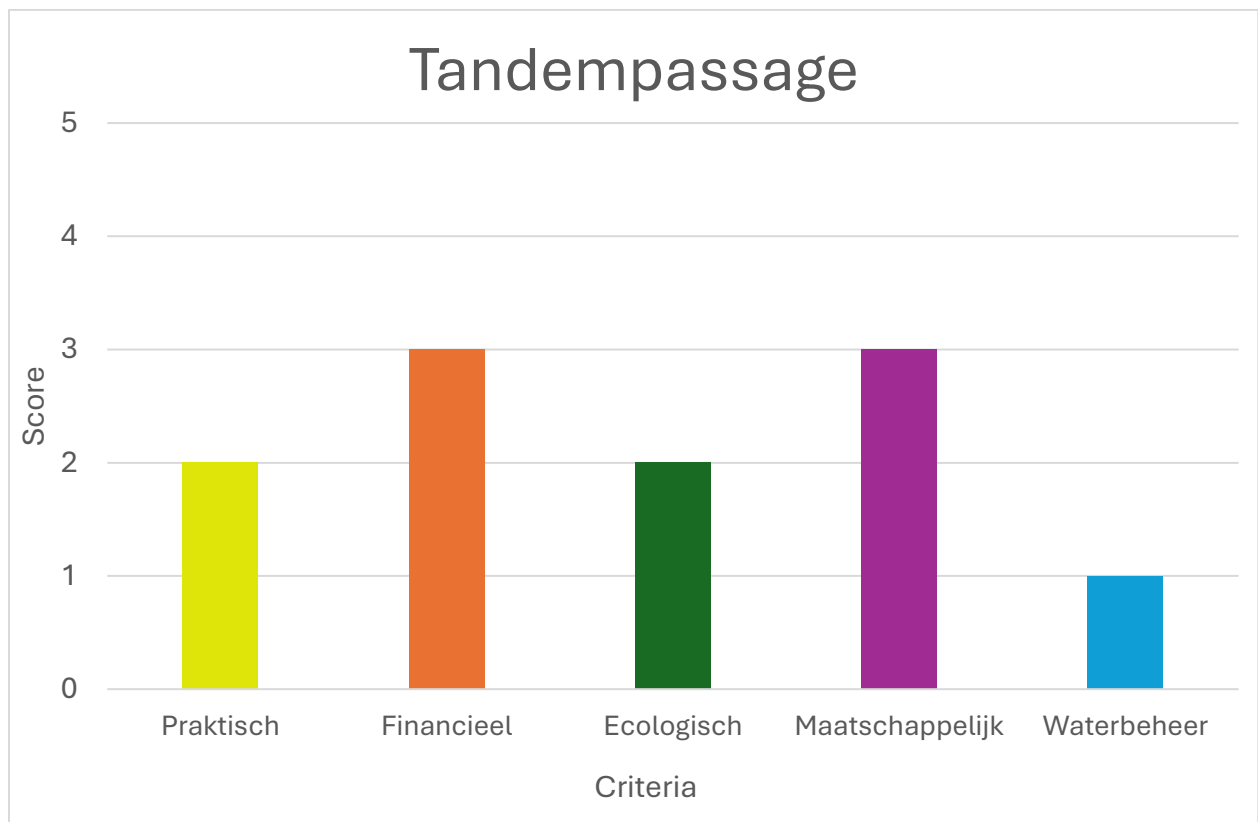
Door een goede transitplanning en zoveel mogelijk tandempassages te realiseren wordt er water bespaard. Het moeilijke hiervan is dat de PCA niet in de hand heeft wanneer deze verschillende kleinere schepen aankomen of op welk moment deze willen doorvaren. Bij een tandempassage wordt de hoeveelheid water van één "normale" transit gebruikt om twee schepen over te brengen. Er wordt ongeveer 100 miljoen liter per passage verbruikt. Als ze elk individueel zouden doorvaren zou er minstens 200 miljoen liter verbruikt worden.

Omwille van te weinig data en praktisch erg moeilijk in te plannen wordt de waterbesparing minimaal ingeschat. Daarom heeft tandempassage maar een score één op waterbeheer.

8.6 Impact op transitcapaciteit

Deze oplossing heeft automatisch een positieve invloed op het aantal transits. Twee schepen passeren in plaats van één, waardoor er meer schepen doorvaren. Dit betekent echter niet dat er meer vracht wordt vervoerd. Vaak gaat het om pleziervaartuigen die de doorvaart maken en zo het totale aantal jaarlijkse transits verhogen.

8.7 Beoordeling



Figuur 19 Beoordeling tandempassage op een schaal van 1 tot 5

Bron: Eigen werk

9 Oplossing 3: Recuperatie bassins, Neo-Panamaxsluizen

De waterbesparing door de recuperatiebassins zijn een toevoeging aan het Panamakanaal door de expansiewerken die in 2016 voltooid werden. Het zijn 3 reservoirs die naast de Neo-Panamax sluiskamers liggen. Ze worden gebruikt om het water dat tijdens de versluizing van een schip normaal wegstroomt, op te vangen. Zo kan het hergebruikt worden voor het volgende schip. Door deze methode van vullen en ledigen van sluizen wordt er maar liefst 60% van het water bespaard. Deze door zwaartekracht gedreven bassins zijn 40m breed, 430m lang en 5,5m diep (Fattor et al., 2020). De impact is soms moeilijk in te schatten omdat dit onderdeel was van een groter project. Het is daardoor niet altijd even gemakkelijk om deze oplossing afzonderlijk te beoordelen.



Figuur 20 Neo-Panamaxsluizen aan de Stille Oceaan met aan de rechterkant de recuperatie bassins

Bron: Rodríguez (2023e)

9.1 Praktisch

Het gebruik van de recuperatiereservoirs is eenvoudig en makkelijk in gebruik. Eénmaal aangelegd is er een minimum aan onderhoud vereist. De kanaalexpansie is zo ontworpen om 99,6% van de tijd beschikbaar te zijn, voor de komende 100 jaar. Het nadeel aan de waterbesparende bassins is dat deze bijna dubbel zo veel tijd vereisen om de sluiskamers te vullen. Zonder waterbesparende bassins duurt het 10 minuten, met is het 17 minuten wat een aanzienlijk verschil is (Newbery, 2017; Sabonge, 2014). De bassins zijn makkelijk in gebruik en scoren een vier voor praktische toepasbaarheid.

9.2 Financieel

De totale kostprijs van de expansie van het Panamakanaal bedroeg \$5,25 miljard. De hoofdaannemer Grupo Unidos por el Canal (GUPC) werd \$3,47 miljard betaald voor de bouw van de 6 sluiskamers en de 18 recuperatiebassins. De geschatte prijs voor de bouw van de waterrecuperatie bassins is 620 miljoen dollar. Dit betreft enkel de kosten voor de bouw. De jaarlijkse onderhoudskosten en operationele kosten zouden hier ook in rekening moeten gebracht worden. Deze kosten zijn echter niet publiekelijk beschikbaar (Autoridad del Canal de Panama, 2015; Carroll, 2009; Llamas et al., 2017). Deze oplossing was een grote investering hierdoor krijgen de bassins een score twee op financieel vlak.

9.3 Ecologisch

Na de bouw van de nieuwe sluizen en de waterbesparende bassins is er een duidelijke stijging van het zoutgehalte van het water in het Gatúnmeer. Dit komt door de recuperatiebassins omdat deze het water recupereren, waardoor er zoutwaterintrusie is en hierdoor het zoutgehalte in het zoetwatermeer stijgt. Dit gebeurt echter vooral in de buurt van de sluizen. Het Gatúnmeer is nog steeds een zoetwatermeer met een zoutgehalte lager dan 0,5 ppt. Door het mengen kan deze grens van 0,5 ppt tussen brak en zoetwater bereikt worden in de buurt van de sluizen. Dit zal de lokale biodiversiteit verstoren. Deze zoutconcentratie is echter te laag voor marine organismes om in te overleven, het is dus onmogelijk dat er exotische soorten zullen migreren tussen de Stille en de Atlantische oceaan (Wijsman, 2013). Deze manier van waterrecuperatie

heeft een negatieve impact op de ecosystemen, daarom krijgt deze oplossing een score twee voor dit criterium.

9.4 Maatschappelijk

Bij het maatschappelijke criterium is de zoutconcentratie het grootste aandachtspunt. Zoals eerder al vermeld, wordt het water uit het Gatúnmeer gebruikt als drinkwater voor ongeveer de helft van de Panamese bevolking. Deze waterbesparingsmethode is niet de gunstigste voor mens en maatschappij. (Wijsman, 2013)

Door de extreme droogte heeft de PCA al 2 keer de beslissing moeten nemen om de waterrecuperatie via de bassins stil te leggen en het drinkwater prioritair te stellen zoals gedefinieerd in de PCA-waarden. Dit was reeds in 2019 en 2023 het geval, in deze 2 jaren vond het weerfenomeen El Nino plaats (Calvo Gobbetti & Ríos Córdoba, 2024).

Door het risico dat de drinkwatervoorziening in gevaar komt, krijgen de recuperatiebassins een score van twee op maatschappelijke impact.

9.5 Waterbeheer

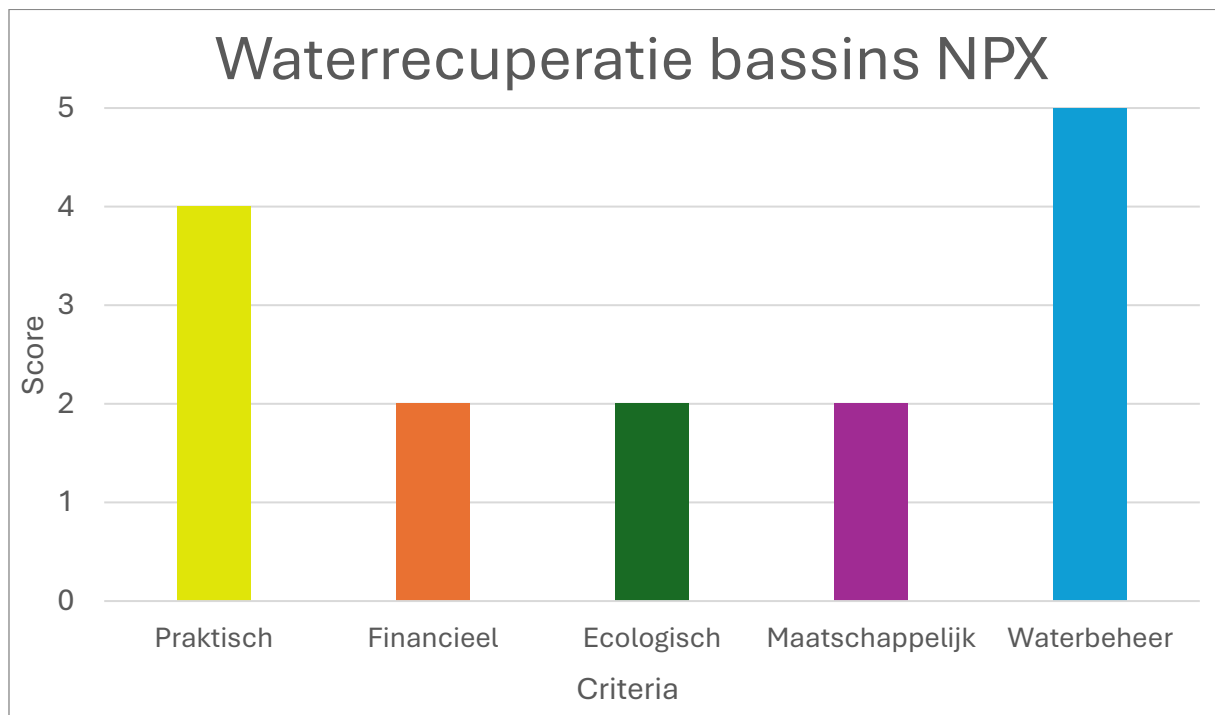
Op het vlak van waterbesparing is dit een zeer goede oplossing. De recuperatiebassins besparen maar liefst 60% van het water dat normaal zou wegstromen. Van 480 miljoen liter waterverbruik zonder recuperatie naar 192 miljoen liter water met de waterbesparing bassins per transit. Dit is zelfs 7% minder dan het waterverbruik bij de kleinere Panamaxsluizen (Newbery, 2017). In 2024 heeft de PCA met deze oplossing een watervolume bespaard gelijk aan 1.597,6 versluizingen dit is 14,2% van de jaarlijkse transits (Panama Canal Authority, 2024b).

Deze oplossing bespaart veel water daarom krijgt deze een maximale score voor waterbeheer.

9.6 Impact op transitcapaciteit

De impact op de transitcapaciteit is moeilijk te bepalen want de reservoirs zijn samen met nieuwe Neo-Panamaxsluizen geïntroduceerd, dus de dagelijkse transitcapaciteit ligt hoger door de nieuw sluizen.

9.7 Beoordeling

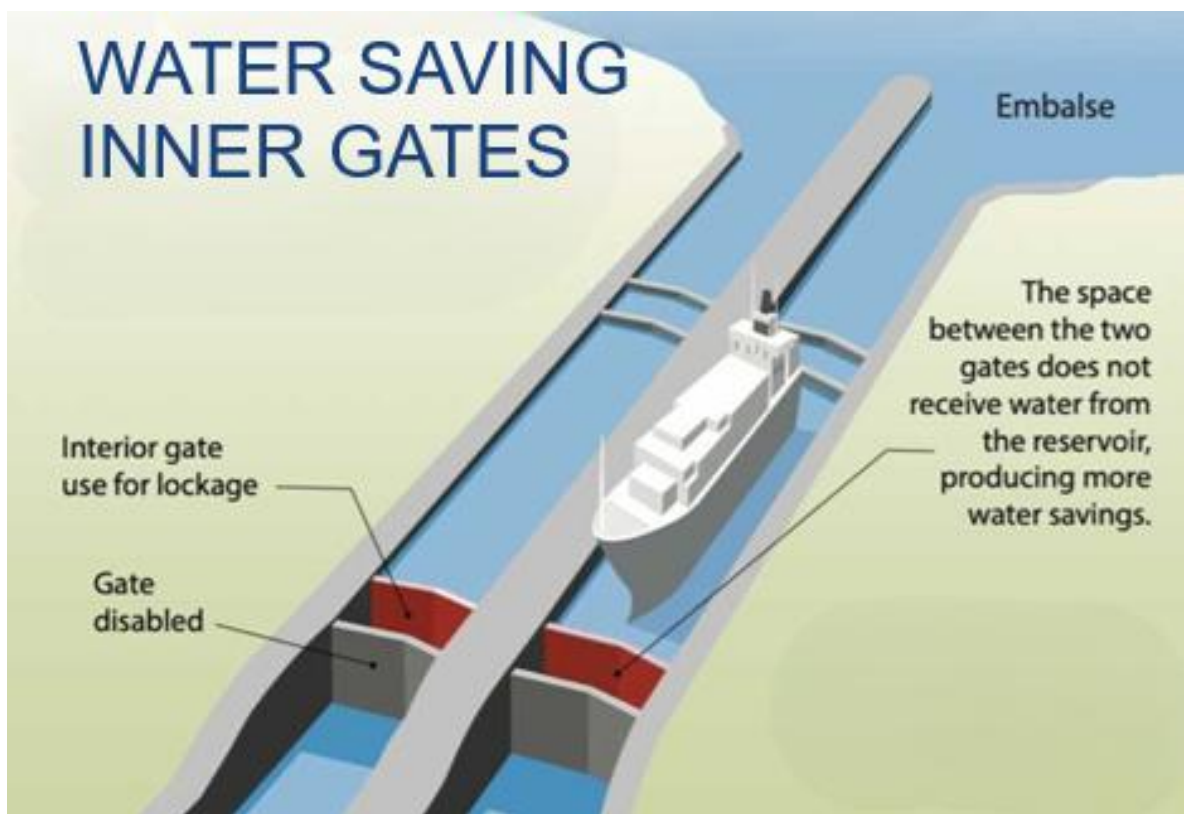


Figuur 21 Beoordeling water recuperatie bassins van de Neo-Panamaxsluizen op een schaal van 1 tot 5

Bron: Eigen werk

10 Oplossing 4: Waterrecuperatie tussen de dubbele sluisdeuren

Elke sluiskamer is uitgerust met dubbele sluisdeuren om redundantie te garanderen. Mocht één van de deuren falen, dan voorkomt de tweede dat het water plotseling wegstroomt, met alle bijhorende gevolgen. Tussen de twee deuren bevindt zich een tussenruimte die eveneens met water wordt gevuld. Dit water wordt hergebruikt en draagt zo bij aan extra waterbesparing. Zowel in de Panamax- als in de Neo-Panamaxsluizen wordt dit principe toegepast.



Figuur 22 Waterrecuperatie van tussen de dubbele sluisdeuren

Bron: Rodríguez (2023d)

10.1 Praktisch

Dit is een zeer makkelijk toepasbare oplossing en vergt geen tot weinig monitoring. Het is de recuperatie van een kleine hoeveelheid water. Deze oplossing verandert weinig aan de standaard werking van de sluizen. Daarom heeft deze oplossing een maximale score voor toepasbaarheid.

10.2 Financieel

Het is onduidelijk of kosten zijn gemaakt om deze oplossing infrastructureel operationeel te krijgen. Ook is het niet duidelijk of er gebruik wordt gemaakt van pompen om het water te hergebruiken. De kostprijs van het onderhoud zal eerder minimaal zijn aangezien deze ruimte tussen de sluisdeuren niet groot is ten opzichte van de andere compartimenten van de sluis. Het is dus niet mogelijk om een inschatting van de kostprijs te maken. Deze oplossing wordt financieel als positief ingeschat en krijgt daarom een score van vier.

10.3 Ecologisch

Deze oplossing heeft geen rechtstreekse ecologische impact. Daarom krijgt deze een neutrale score voor ecologisch criterium.

10.4 Maatschappelijk

Deze oplossing heeft geen rechtstreekse invloed op de maatschappij. Daarom krijgt deze een neutrale score voor het maatschappelijk criterium.

10.5 Waterbeheer

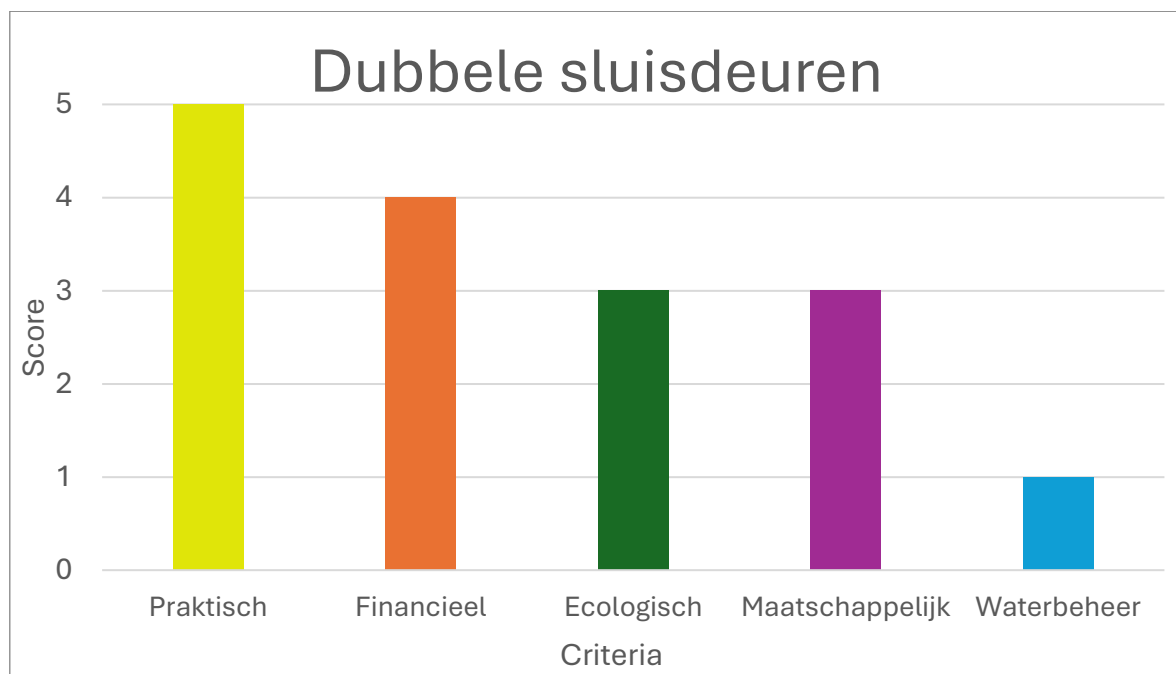
De ruimte tussen de sluisdeuren is niet enorm maar alle beetjes helpen. Door dit water te hergebruiken wordt er dagelijks 7,6 miljoen liter water bespaard per sluiskamer bij de Panamaxsluizen en 24,6 miljoen liter per sluiskamer bij de Neo-Panamaxsluizen. Dit komt op een dagelijks besparing van 238,8 miljoen liter water per dag. Per schip wordt er gemiddeld 6,6 miljoen liter water bespaard als er 36 transits per dag zijn (Rodríguez, 2023b).

De waterbesparing aan de hand van deze oplossing is beperkt daarom heeft de waterrecuperatie tussen de dubbele sluisen een score één op waterbeheer.

10.6 Impact op transitcapaciteit

Deze oplossing heeft geen rechtstreekse impact op de transitcapaciteit.

10.7 Beoordeling



Figuur 23 Beoordeling waterrecuperatie tussen dubbele sluisdeuren op een schaal van 1 tot 5.

Bron: Eigen werk

11 Oplossing 5: Transitrestricties

Transitrestricties wil zeggen dat het totaal aantal doorvaarten per dag verminderd wordt. Dit om het waterverbruik naar beneden te krijgen. Het beperken van de doorvaart aanschouwen we hier als een oplossing maar eigenlijk is het maar een tijdelijke oplossing. Het is het onderbreken of verminderen van de activiteiten van de Panama Canal Authority (PCA).

11.1 Praktisch

Hoewel deze maatregelen op korte termijn noodzakelijk lijken, vormen ze geen structurele oplossing. Transitrestricties leiden tot aanzienlijke economische verliezen en vertragingen, wachttijden en omleidingen van scheepvaartverkeer, zoals blijkt uit het toenemende aantal schepen dat uitwijkt naar alternatieve routes (Chico et al., 2024). Bovendien tonen recente data aan dat de afhankelijkheid van restricties de betrouwbaarheid van de PCA ondermijnt. Door het gebrek aan voorspelbare capaciteit zijn rederijen gedwongen om risicovollere en duurdere alternatieven te zoeken. Het vertrouwen in het Panamakanaal als strategische transportroute wordt aangetast (Chico et al., 2024; Velić et al., 2025). De transitrestricties zijn relatief eenvoudig toe te passen en hoeven slechts enkele maanden vooraf aangekondigd te worden. Aan de hand van bovenstaande redenering hebben transitrestricties een score van twee op toepasbaarheid.

11.2 Financieel

Door de verminderde activiteit en de beperkte transits zou dit logischerwijs tot een verlies aan toelinkomsten moeten leiden, aangezien minder schepen het kanaal passeren.

Toch blijken de financiële gevolgen voor de PCA voorlopig beperkt. Volgens het onderzoek van Chico (2024) heeft de organisatie dit verlies grotendeels gecompenseerd door een herziening van haar tolsysteem. Er werden hogere tarieven ingevoerd voor gegarandeerde boekingen en grotere schepen, zoals Neo-Panamax, die door hun afmetingen meer waterverbruiken en dus hogere lasten rechtvaardigen. Er worden tevens dynamische

prijsstrategieën toegepast die inspelen op de beperkte beschikbaarheid van transittijd, waardoor het beperkte aantal doorgangen financieel optimaal benut kan worden (Chico et al., 2024).

De aangepaste toltarieven zorgen dat de PCA per schip meer verdient, waardoor de daling in transits niet automatisch leidt tot een evenredige daling van inkomsten. In de praktijk blijven de kasstromen tot nu toe relatief stabiel. Toch waarschuwen experts dat deze strategie op lange termijn risicovol is. Als het vertrouwen in de operationele betrouwbaarheid van het kanaal verder afneemt, bijvoorbeeld door aanhoudende capaciteitsbeperkingen of onvoorspelbare wachttijden, zouden reders hun toevlucht kunnen nemen tot alternatieve routes zoals het Suezkanaal of Kaap Hoorn. In dat geval komt de structurele inkomstenstroom van de PCA wél ernstig onder druk te staan (Velić et al., 2025).

De opportunistische aanpak waarbij er weinig tijdsvensters beschikbaar zijn om door te varen zijn deze heel gegeerd. Wanneer er dan een tijdsvenster vrij komt dan wordt deze geveild en verkocht aan de hoogste bieder. Zo kunnen schepen de wachtrij proberen te vermijden. Dit zijn zeer lucratieve inkomsten voor de PCA maar het is onzeker dat dit op lange termijn goed stand zal houden.

Omdat er geen eenduidige financieel impact op de PCA was heeft transitrestricties een score drie voor het financieel criterium.

11.3 Ecologisch

De afgenomen doorvaartcapaciteit in het Panamakanaal leidt tot een afname van belasting op het Gatúnmeer en het omliggende ecosysteem. Tegelijkertijd heeft deze maatregel een belangrijk neveneffect. Schepen die niet tijdig door het kanaal kunnen, blijven voor anker liggen nabij de toegangszones aan de Atlantische en Pacifische kusten. Als de transitrestricties strenger worden of langer aanhouden, zullen de wachttijden en het aantal wachtende schepen toenemen. Deze geankerde schepen houden doorgaans hun hulpsystemen draaiende, zoals motoren en generatoren, dat leidt tot verhoogde uitstoot van stikstofoxiden (NO_x), zwaveldioxide (SO_2), fijnstof (PM) en CO_2 in kustgebieden. Dit zorgt daar dus voor meer luchtvervuiling dan tijdens normale werking. Door de negatieve impact op ecologisch vlak krijgt transitrestricties een score twee.

11.4 Maatschappelijk

Door het verminderde aantal transits lopen veel schepen aanzienlijke vertraging op, dit resulteert in latere aankomsten op hun eindbestemming. Dit heeft gevolgen voor de leveringszekerheid van goederen waardoor zowel logistieke ketens als bedrijven onder druk komen te staan. Voor consumenten betekent dit een beperktere beschikbaarheid van producten en een verhoogd risico op prijsstijgingen, vooral bij tijdsgevoelige of geïmporteerde goederen (Dierker et al., 2024).

Dit was duidelijk het geval tijdens de restricties in 2023. Volgens de “U.S. Energy Information Administration” bereikten de tarieven voor *Very Large Gas Carriers* (VLGC's) op de route van Houston naar Chiba (Japan) in september 2023 een recordhoogte van \$250 per ton, het hoogste sinds de tarieven in 2016 werden geregistreerd. Deze kostenstijgingen worden vaak doorgerekend aan de consumenten, dit kan leiden tot hogere prijzen voor goederen zoals voedsel, brandstof en andere geïmporteerde producten (Eiermann, 2023; Raimkulov, 2025).

Door de verreikende negatieve impact op de economie krijgen transitrestricties een score één op maatschappelijk vlak.

11.5 Waterbeheer

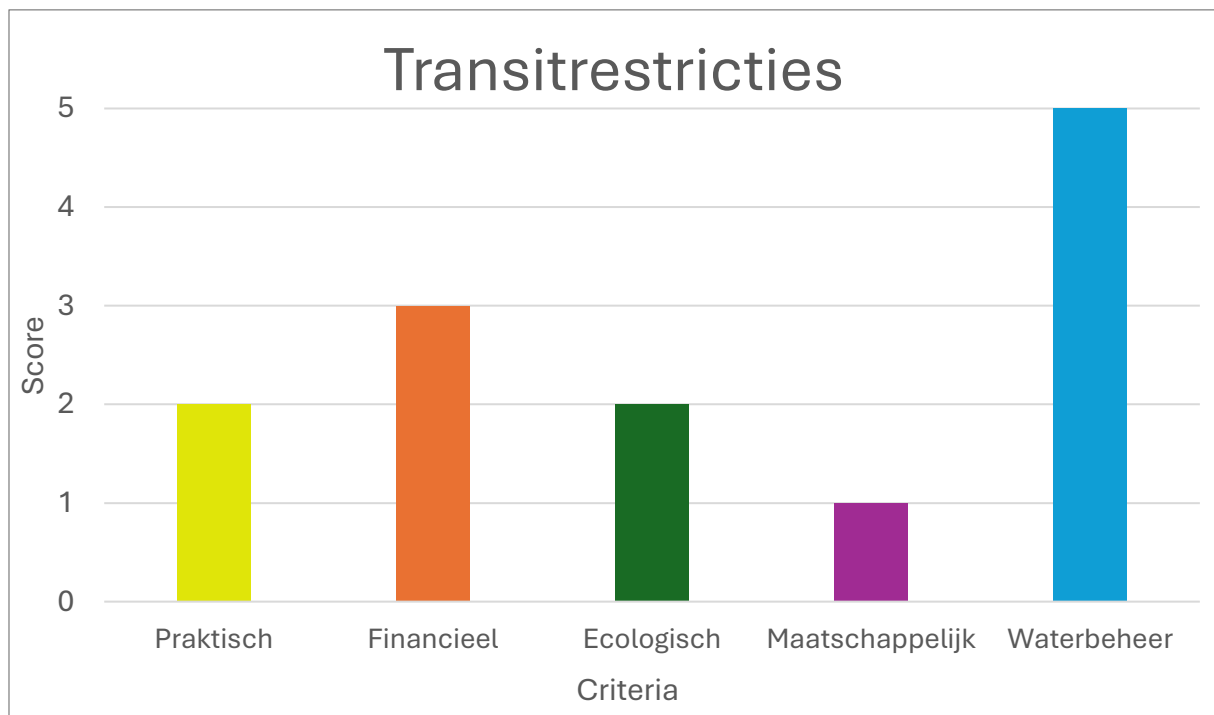
Hoe minder schepen gebruik maken van de sluizen hoe minder water er kan wegstromen. Elk schip dat niet doorvaart bespaart de PCA ongeveer 200 miljoen liter water (Carse, 2012, 2014). In januari 2024 zijn de maximale transitrestricties bereikt met 22 schepen per dag. Dit zijn er 14 minder dan normaal. Er werd dus op dat moment 2800 miljoen liter water bespaard per dag (Miguel, 2024). Deze grote waterbesparing zorgt voor de maximale score op het criterium waterbeheer.

11.6 Impact op transitcapaciteit

Het is duidelijk dat deze oplossing een grote en negatieve impact zal hebben op de transitcapaciteit. Daarom dat deze oplossing enkel wordt ingezet als noodoplossing als er niets anders meer kan helpen. Het zal op korte termijn een negatieve impact hebben op de transitcapaciteit maar als de PCA deze restricties niet oplegt en gewoon verder zou doen zonder beperkingen kan het water in het Gatúnmeer zo laag komen te staan dat er geen doorvaart meer

mogelijk is. Wat voor veel grotere problemen zorgt op lange termijn. Het is preventief de transits verminderen om erger in de toekomst te voorkomen.

11.7 Beoordeling



Figuur 24 Beoordeling transitrestricties op een schaal van 1 tot 5

Bron: Eigen werk

12 Oplossing 6: Baggeren

Er zijn twee verschillende doeleinden voor het uitvoeren van baggerwerken voor de Panama Canal Authority.

De eerste is het constante baggeren als onderhoud. Dit om de diepte van het vaarwater voor de schepen groot genoeg te houden. Dit wordt dagelijks gedaan omdat er veel sediment in het Gatúnmeer is. Door voorbijvarende schepen wordt er elke keer zand los gemaakt door de schroef, dat later dan weer samen hoopt en dus moet worden weggehaald om de doorgang bevaarbaar te houden. Deze operatie heeft niets met de waterschaarste te maken. Dit is onafhankelijk van de beschikbare hoeveelheid water, dit moet het jaar rond gedaan worden. Daarom bespreken we in dit hoofdstuk niet deze methode van baggeren.

De tweede is de oplossing of het doel dat wordt besproken in dit hoofdstuk. Dat is namelijk de gemiddelde diepte van het volledige meer te vergroten. Dit door te baggeren waar het mogelijk is en zo het waterreservoir te vergroten waardoor er meer water kan worden opgeslagen, zodat er meer water beschikbaar is. Het Gatúnmeer heeft een relatief grote oppervlakte van 431 km². De gemiddelde diepgang is eerder beperkt, namelijk 12,7 meter (World Lake Database, 2025). Dus de oppervlakte zou efficiënter kunnen gebruikt worden als waterreservoir door het dieper te maken.

12.1 Praktisch

Baggeren is geen kleine operatie voor dit soort oppervlaktes. Er is veel man- en machinekracht nodig om deze operatie uit te voeren. Het Panamakanaal heeft haar eigen baggervloot, met zeven vaartuigen voor het standaard onderhoud van het Panamakanaal. Deze zijn constant bezig om het kanaal bevaarbaar te houden (Norén, 2025). Om het Gatúnmeer uit te baggeren en dieper te maken zijn er dus extra schepen nodig. Een bijkomende moeilijkheid voor het baggeren in het Gatúnmeer is de harde ondergrond. De bodem van het meer bestaat uit een zeer sterk gesteente en moet dus los geboord worden of met explosieven losgemaakt worden vooraleer deze kan weggehaald worden. Het Belgische bedrijf DEMA heeft in het verleden al baggerwerken gedaan voor de PCA, als onderdeel van de Panamakanaal expansie. Bij deze baggerwerken hebben ze het kanaal breder en dieper gemaakt, hierbij hebben ze 0,01 km³ grond

weggehaald. Deze werkzaamheden hebben vijf jaren geduurd (DEME Group, 2025). Ter referentie het volume van het meer is 5.48 km³ (World Lake Database, 2025). Het volume dat weggegraven werd heeft dus plaats gemaakt voor extra wateropslag. Dit volume komt overeen met het volume aan water nodig voor vijf transits. Deze werken hebben laten zien dat het heel veel tijd vergt om het reservoir te vergroten voor extra wateropslag.

Het Panamakanaal heeft in 2013 zelf al onderzoek gedaan om de haalbaarheid te bepalen om hun 2de reservoir, Alajuelameer uit te baggeren. Dit project zou ervoor zorgen dat er dagelijks 0,07 tot 0,11 extra doorvaartvolume aan water beschikbaar is. Er zou ongeveer 15,7 miljoen kubieke meter grond verwijderd moeten worden. Vier *cutter-head suction* baggerschepen zouden constant voor meer dan 9 jaar operationeel moeten zijn. Voor het onderhoud achteraf zouden er permanent 3 baggerschepen moeten zijn om het sediment weg te krijgen en het geleverde werk te behouden. Het meer ligt tevens in een nationaal park. Door de impact en gevolgen voor inheemse bevolking en de lage opbrengsten, langdurige uitvoeringstijd, milieu- en sociale bezwaren, werd er beslist dat dit onhaalbaar is en niet verder te onderzoeken (US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority, 2023).

Door de lage haalbaarheid van baggeren krijgt deze maatregel een score van één voor het praktisch criterium.

12.2 Financieel

Het is algemeen geweten dat baggerwerken een kostelijke en tijd consumerende operatie zijn. DEME heeft tussen 2008 en 2013 baggerwerken uitgevoerd voor het kanaal. Ze hebben een verbreding en verdieping van het kanaal gedaan en zo 10 miljoen kubieke meter grond verwijderd. Ze hebben voor deze werkzaamheden om en bij 177,5 miljoen dollar gekregen van de PCA (Barrios, 2010; cdp_admin, 2008; DEME Group, 2025; Luis & K., 2014; Schexnayder, z.d.). Volgens de studie uit 2013 van de PCA moet er dus 142,73 miljoen kubieke meter grond verwijderd worden om 1 transit extra te creëren per dag. Als we de theoretische kostprijs hiervan willen bereken, komt dit neer op 2,53 miljard dollar exclusief inflatie (US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority, 2023). Deze investeringskost is extreem hoog waardoor deze oplossing een score één krijgt op financieel vlak.

12.3 Ecologisch

Door deze baggerwerken wordt het bodemlandschap van het meer onomkeerbaar veranderd. Wat een grote impact zal hebben op het ecosysteem. Om te baggeren wordt er gebruik gemaakt van zware boren en/of explosieven om de harde bodem los te krijgen. Dit verstoort het lokale ecosysteem. Er kan gesteld worden dat baggeren een negatieve ecologische impact heeft. Door sediment zal het water niet alleen troebeler zijn en dus minder zonlicht doorlaten, maar er is ook een risico op een verminderde waterkwaliteit (Contreras et al., 2024). We kunnen stellen dat baggeren een negatieve ecologische impact heeft en dus een score één krijgt.

12.4 Maatschappelijk

Als er een grootschalige baggeroperatie wordt gehouden met een enorme vloot aan baggerschepen die tegelijkertijd werken, dan moet er rekening gehouden worden dat er niet te veel sediment in het water terecht komt. Dit heeft een negatief effect op de waterkwaliteit en kan het drinkwater in gevaar brengen. Deze oplossing heeft een score twee voor het maatschappelijk criterium.

12.5 Waterbeheer

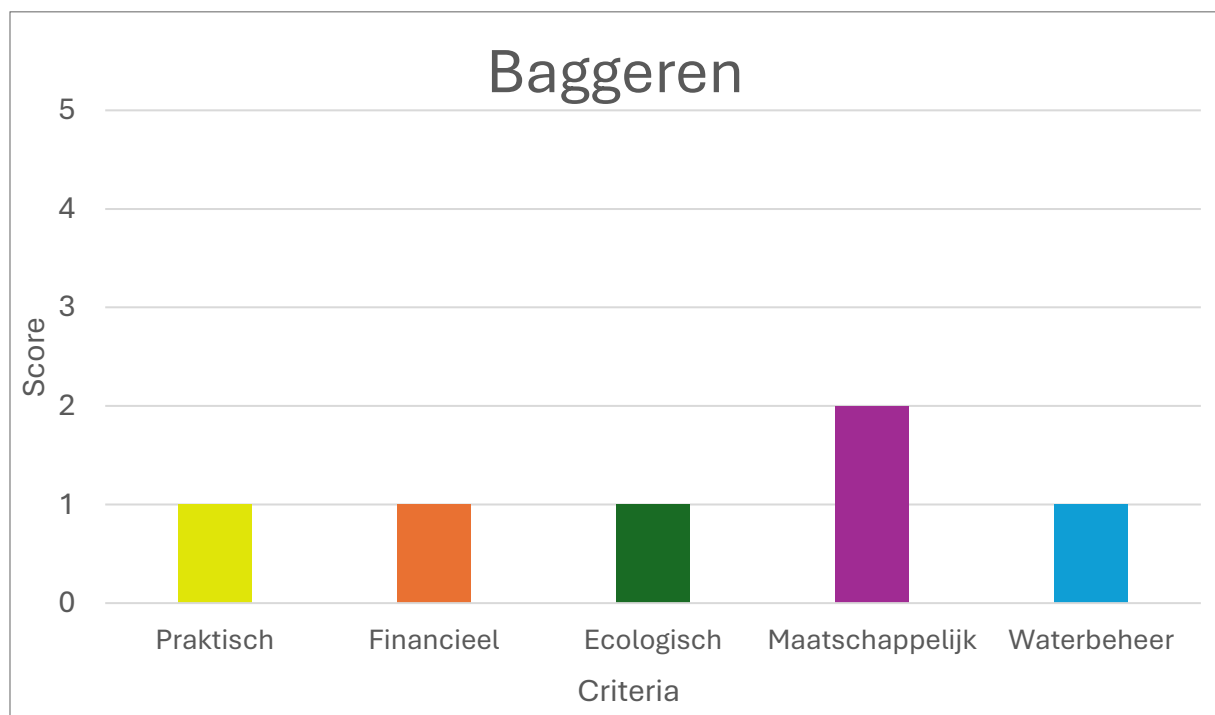
Per kubieke meter grond die verwijderd wordt, komt dit volume vrij om meer water in op te slaan. Dit water kan dan voor andere doeleinden gebruikt worden. Er is dan ook meer opgeslagen water in het reservoir om drogere periodes te overbruggen. Als de 142,73 miljoen kubieke meter uit de studie van 2013 van de PCA wordt uitgebaggerd dan is er één transit per dag extra. Dit komt dus neer op 200 miljoen liter water per dag extra voor de werking van het kanaal. Door het volume van het reservoir te vergroten, ontstaat er meer opslagcapaciteit voor water. Dit betekent echter niet dat er automatisch meer watertoevoer is. De extra opslag heeft enkel nut wanneer het waterpeil boven het maximum zou stijgen en het overtollige water zou geloosd moeten worden. In de praktijk komt dit zelden voor. Het aandeel water dat op die manier verloren is gegaan in 2024 bedraagt momenteel nagenoeg 0% van het totale waterverbruik. Omdat deze oplossing vrijwel geen extra water oplevert, wordt een score van één toegekend voor waterbeheer.

12.6 Impact op transitcapaciteit

De impact op de transitcapaciteit tijdens de werken is miniem. Doorvarende schepen zullen misschien kleine vertragingen oplopen door de in de weg liggende baggerschepen die aan het werk zijn. De impact als de baggerwerken beëindigd zijn hangt af van hoeveel meer volume water er beschikbaar is voor de werking van de sluizen.

Uit de studie van 2013 van de PCA voor baggerwerken in het Alajuelameer kunnen we afleiden dat het water, nodig voor 1 extra transit per dag er maar liefst 142,73 miljoen kubieke meter grond moet worden verwijderd (US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority, 2023).

12.7 Beoordeling



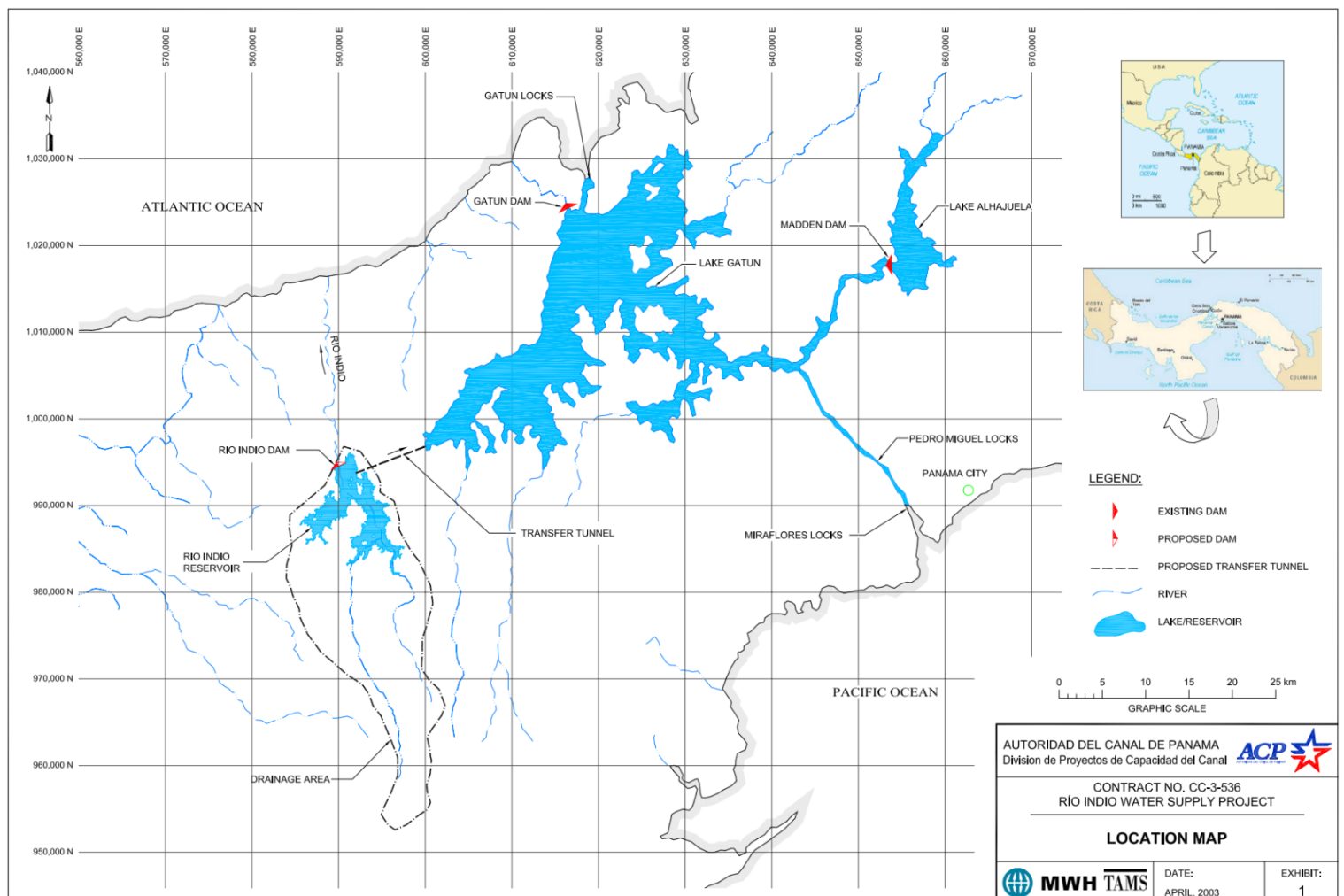
Figuur 25 Beoordeling baggeren op een schaal van 1 tot 5

Bron: Eigen werk

13 Oplossing 7: Extra reservoir

Door een dam te plaatsen in een rivier is het mogelijk om een waterreservoir te maken. Het water van het reservoir kan dan naar het Gatúnmeer geleid worden en gebruikt worden voor verschillende doeleinden.

De Panama Canal Authority heeft aangekondigd dat ze komende jaren een extra reservoir zullen bouwen. Daarom zullen we in dit hoofdstuk het Rio Indio project bespreken. De PCA zal een dam bouwen op de Indio rivier en hiermee een derde waterreservoir creëren. Het reservoir en de Indio rivier liggen ten westen van het Panamakanaal. De dam zal ongeveer 75 kilometer ten noordwesten van Panama-City liggen en 25 kilometer boven de monding in de Caraïbische zee. Het extra water zal met een tunnel omgeleid worden naar het Gatúnmeer waar het beschikbaar zal zijn voor verschillende toepassingen (US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority, 2023).



Bron: US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority (2023)

13.1 Praktisch

Een project zoals dit vergt veel tijd en levert niet direct resultaat op. Momenteel bevinden we ons ongeveer halverwege het traject. De eerste onderzoeksfase begon in 2017 en liep tot 2020. Daarna volgde de tweede onderzoeksfase, die duurde tot 2024. In 2025 is gestart met het verplaatsen van inwoners en dorpen die binnen het projectgebied liggen. De daadwerkelijke bouw staat gepland voor 2027 en zou ongeveer vier jaar in beslag nemen. In die periode moeten het reservoir en de tunnel voltooid worden. De bouwwerkzaamheden zelf nemen relatief weinig tijd in beslag. Het is vooral het vullen van het reservoir dat de meeste tijd vergt. Dit proces hangt sterk af van de hoeveelheid neerslag. In totaal zal het project ongeveer 14 jaar duren en af zijn in 2031 (Labrut, 2024; Rodríguez, 2025).

Door een wet uit 2006 heeft de PCA het recht niet om een extra reservoir te bouwen buiten hun stroomgebied. De Indio rivier ligt buiten het stroomgebied van het kanaal. Hierdoor werd het project ook een politiek onderwerp. Uiteindelijk is er toch groen licht gegeven na een beslissing van het gerechtelijk hof (Labrut, 2024).

Naast de lange looptijd en de politieke inmenging vergde het project ook uitgebreid onderzoek. Er zijn diverse ecologische en sociale studies uitgevoerd voordat met de uitvoering kon worden gestart.

Een project zoals dit is complex en krijgt daarom een score van één voor uitvoerbaarheid.

13.2 Financieel

De PCA heeft ongeveer 1,6 miljard dollar gereserveerd voor de aanleg van dit derde reservoir. Daarvan is 1,2 miljard bestemd voor de daadwerkelijke bouw. Dit omvat: de bouw van de hoofddam die 94 meter hoog zal zijn, de verbindingstunnel tussen het nieuwe reservoir en het Gatúnmeer, met een totale lengte van 8,7 km, alsook de toegangswegen en de hulpdammen voor extra afsluiting. De overige 400 miljoen dollar is voorzien voor de herhuisvesting en het ondersteunen van de gemeentes en gemeenschappen die door het project worden getroffen. De oplossing is duur maar zorgt wel voor zekerheid (Labrut, 2024; Pérez & Marulanda, 2019). In de haalbaarheidsstudie van Harza (2003) is er een jaarlijkse exploitatie en onderhoudskost geschat, die neerkwam op 1,94 miljoen dollar per jaar in 2001. Vandaag is dit gelijk aan 3,2 miljoen dollar als de inflatie in rekening is gebracht (WorldData, 2025). De hoge investeringskost leidt tot een score van één op het financiële criterium.

13.3 Ecologisch

De ecologische impact is tamelijk groot bij dit soort projecten. Dit reservoir zal het landschap compleet doen veranderen. De bossen zullen plaats moeten maken voor het water. Hierdoor zal de PCA 20 hectare aan bomen planten om zo de bosgebieden te behouden of te herstellen. Er zullen 8430 bomen geplant worden van 12 verschillende soorten (Martinez, 2017). Volgens een studie van de PCA kan de aanleg van een reservoir een slechte impact hebben op de biodiversiteit en het ecosysteem. Het ecosysteem van de Indio rivier is beschreven als zeer kwetsbaar. Daarom heeft de PCA een actief monitoring en mitigatie plan opgesteld. Samen met de lokale bevolking zullen ze een geïntegreerd conservatieprogramma uitvoeren om de ecologische rijkdom te beschermen. Zo proberen ze de 757 soorten flora en 300 soorten fauna te behouden in het stroomgebied. Een verstoring van het ecosysteem is onvermijdelijk, het is de PCA die zo goed mogelijk moet zorgen dat de impact niet te groot wordt (Canal de Panamá, 2018).

De hulpdammen zullen gebouwd worden met uitgegraafde klei van op de site zelf. De klei is hiervoor geschikt en zo wordt er duurzaam te werk gegaan (Pérez & Marulanda, 2019).

De grote Ecologische impact resulteert in een score één voor het Rio Indio project.

13.4 Maatschappelijk

De Indio rivier is 98 kilometer lang, van de bron tot aan de monding. In het stroomgebied wonen ongeveer 12.435 mensen. Voor de aanleg van het nieuwe reservoir moeten 538 huishoudens worden verplaatst. Dit komt neer op 1.714 personen die herhuisvesting nodig hebben. Voor hen moeten dus nieuwe woningen worden gezocht of gebouwd. De PCA heeft meerdere voorlichtingssessies georganiseerd om ervoor te zorgen dat deze overgang zo soepel en menswaardig mogelijk verloopt. Het doel is om de betrokken bewoners zoveel mogelijk comfort en duidelijkheid te bieden tijdens het verhuisproces. Hoewel de herhuisvesting een ingrijpende maatregel is, levert het project op maatschappelijk vlak ook grote voordelen op. Het extra waterbassin zal de beschikbaarheid van water voor zowel de industrie als de samenleving vergroten, en zo bijdragen aan de nationale waterzekerheid (Labrut, 2025; Panama Canal Authority, 2017). Ondanks het extra beschikbare water heeft deze oplossing een aanzienlijke impact op een specifieke bevolkingsgroep. Daarom krijgt ze een score van één op het maatschappelijke criterium.

13.5 Waterbeheer

Het stroomgebied van de Indio rivier strekt zich uit over zo een 580 vierkante kilometer. Het nieuwe reservoir zal 1,5 kubieke kilometer aan water bevatten en een oppervlakte hebben van 46 vierkante kilometer. Het operationele peil van het meer is minimaal 40 m en maximaal 80 m boven zee niveau (Panama Canal Authority, z.d.; Pérez & Marulanda, 2019; US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority, 2023). Volgens de toepasbaarheidsstudie van MWH Constructors² uitgevoerd voor de PCA zorgt het reservoir voor een effectieve 1.200 miljoen kubieke meter water extra per jaar. Dit extra water zou een 99,6% betrouwbaarheidsgraad hebben. Met 15, 8 transits extra per dag zorgt dit voor een 3.160 miljoen liter water per dag extra voor het kanaal (Harza, 2003).

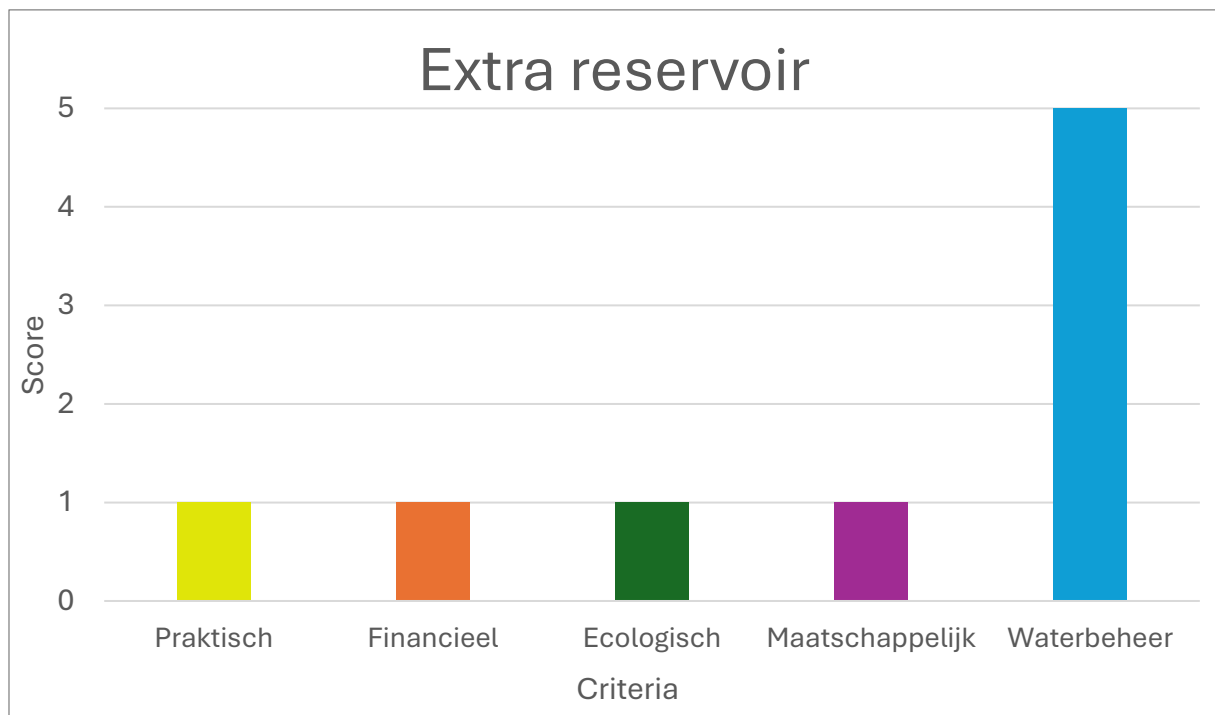
Vanwege de aanzienlijke toename in beschikbaar water wordt een maximale score van vijf toegekend op het criterium waterbeheer.

13.6 Impact op transitcapaciteit

Het extra reservoir zou voor meer garantie moeten zorgen wat betreft de betrouwbaarheid van de transitcapaciteit van het kanaal. Door dit extra water zouden ze vlot een droog seizoen moeten kunnen overbruggen. De capaciteit zou op een standaard van 36 per dag moeten blijven en met een maximale capaciteit van 40 transit per dag (Labrut, 2024). Volgens de toepasbaarheidsstudie van MWH Constructors uitgevoerd voor de PCA zou het extra reservoir voor 15,8 extra transit zorgen per dag (Harza, 2003).

² MWH Constructors = Een gespecialiseerde Amerikaanse aannemer actief in de bouw van installaties voor waterbehandeling, afvalwaterverwerking en industrieel waterbeheer (MWH Constructors, 2025).

13.7 Beoordeling



Figuur 27 Beoordeling extra reservoir op een schaal van 1 tot 5

Bron: Eigen werk

14 Analyse

In de zeven voorgaande hoofdstukken hebben we de oplossingen besproken en een score toegekend. In dit hoofdstuk zal de sensitiviteitsanalyse uitgevoerd worden, er zullen verschillende combinaties van gewichten aan de beoordelingscriteria gegeven worden. Zo zal er nagegaan worden welke oplossingen het gevoeligst zijn voor bepaalde criteria.

14.1 Neutraal gewicht

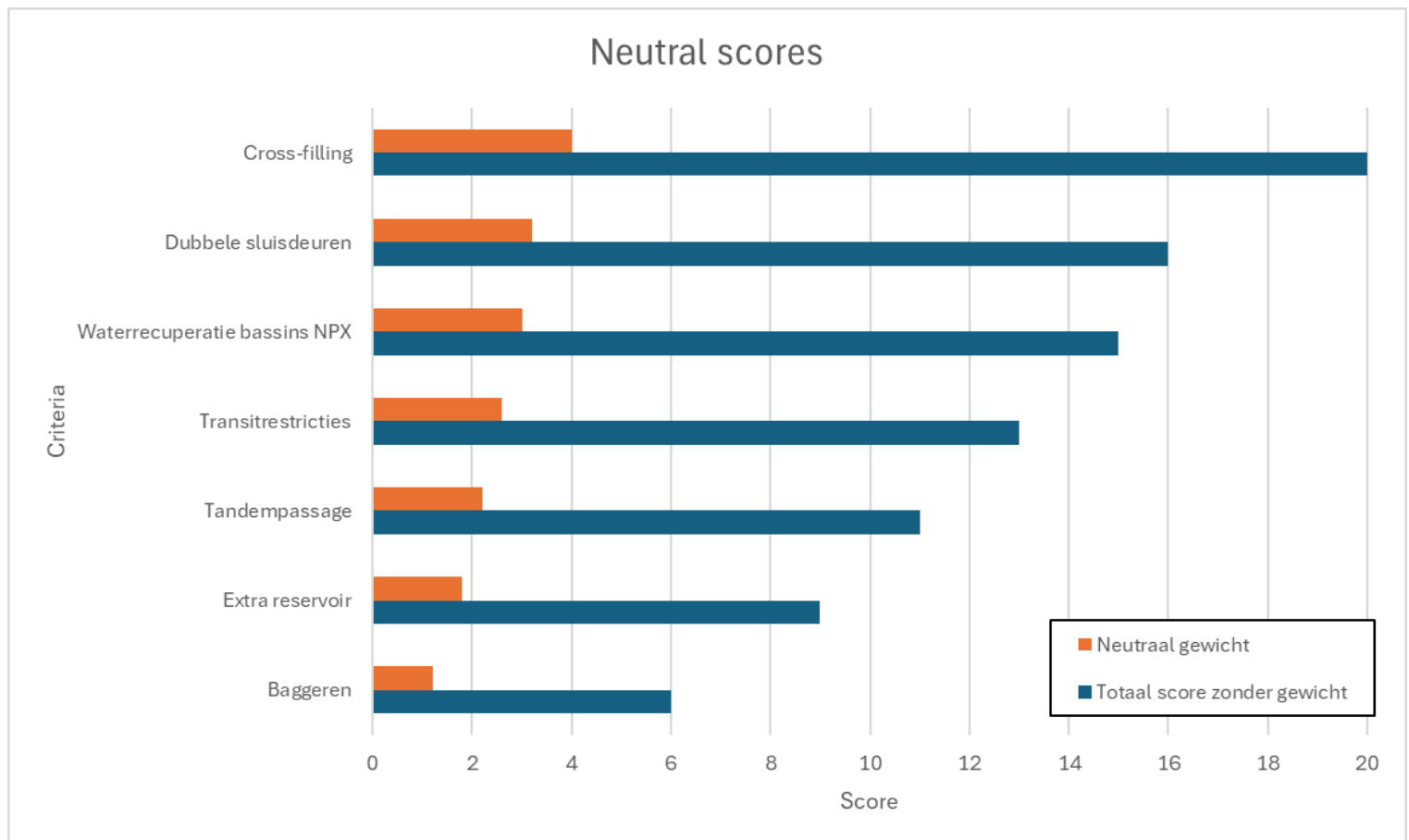
Eerst hebben we een grafiek die de score weergeeft zonder gewicht. Zo kunnen we de oplossingen kort vergelijken en zien we snel welke oplossing het beste scoort en hoe de score verdeeld is. Om een neutraal zicht te krijgen, een referentie te hebben zullen we nu de scores berekenen met een neutraal gewicht. Alle criteria zullen dus evenveel doorwegen. Het gewicht is 0.2 of 20%.

Tabel 9 Gewogen gemiddelde met neutraal gewicht

Bron: Eigen werk

	Neutraal					
	Praktisch	Financieel	Ecologisch	Maatschappelijk	Waterbeheer	Gewogen gemiddelde
Gewicht	20%	20%	20%	20%	20%	100%
Cross-filling	4.0	5.0	3.0	3.0	5.0	4.0
Tandempassage	2.0	3.0	2.0	3.0	1.0	2.2
Waterrecuperatie bassins (NPX)	4.0	2.0	2.0	2.0	5.0	3.0
Dubbele sluisdeuren	5.0	4.0	3.0	3.0	1.0	3.2
Transitrestricties	2.0	3.0	2.0	1.0	5.0	2.6
Baggeren	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.2
Extra reservoir	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0	1.8

Het neutraal gewicht is eigenlijk het gemiddelde van elke oplossing. Het is duidelijk dat *cross-filling* de beste score heeft kort gevolgd door de waterrecuperatie tussen de dubbele deuren. Naast deze twee is er nog waterrecuperatie bassins NPX die een gemiddelde score van drie heeft. Er zijn dus 3 oplossingen van de 7 die hoger of gelijk zijn aan de neutrale score drie.



Figuur 28 Totale score van elke oplossing zonder en met gewicht, schaal zonder 5-25, schaal met 1-5.

Bron: Eigen werk

Aan de hand van deze grafiek kunnen we duidelijk een rangschikking maken van beste naar slechtste oplossing. *Cross-filling* komt er als beste uit en baggeren als slechtste. Met een maximale score van 20 en een minimale score van 6 zonder gewicht. Rekeninghoudend met neutraal gewicht is dit respectievelijk 4 en 1,2.

14.2 Economisch gewicht

De nadruk ligt op het economisch voordeligste perspectief. Er wordt geen rekening gehouden met ecologische en maatschappelijke impact. Waterbeheer en de toepasbaarheid zijn ook in mindere mate belangrijk. We willen een oplossing die de laagste kosten heeft en dus financieel het gunstigst is.

Tabel 10 Gewogen gemiddelde met economisch gewicht

Bron: Eigen werk

	Economisch					
	Praktisch	Financieel	Ecologisch	Maatschappelijk	Waterbeheer	Gewogen gemiddelde
Gewicht	10%	80%	0%	0%	10%	100%
Cross-filling	4.0	5.0	3.0	3.0	5.0	4.9
Tandempassage	2.0	3.0	2.0	3.0	1.0	2.7
Waterrecuperatie bassins (NPX)	4.0	2.0	2.0	2.0	5.0	2.5
Dubbele sluisdeuren	5.0	4.0	3.0	3.0	1.0	3.8
Transitrestricties	2.0	3.0	2.0	1.0	5.0	3.1
Baggeren	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0
Extra reservoir	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0	1.4

Cross-filling haalt met economisch gewicht een maximale score wat toch opmerkelijk is. Alle oplossingen hebben een hogere score dan het neutraal gewicht behalve waterrecuperatie bassins, baggeren en extra reservoir. Deze drie maatregelen zijn de enige die een score lager dan drie behalen op het financiële criterium. Hierdoor heeft tandempassage een hogere score dan de waterrecuperatie bassins NPX.

14.3 Ecologisch en sociaal gewicht

We richten ons hier op het ecologisch en sociaal meest gunstige standpunt. Er wordt geen rekening gehouden met financieel en praktische aspect. Het belangrijkste is dat de sociaal en ecologische impact zo klein mogelijk blijft. Het waterbeheer van de oplossing is in mindere mate van belang.

Tabel 11 Gewogen gemiddelde ecologisch en sociaal gewicht

Bron: Eigen werk

	Ecologisch & sociaal					
	Praktisch	Financieel	Ecologisch	Maatschappelijk	Waterbeheer	Gewogen gemiddelde
Gewicht	0%	0%	40%	50%	10%	100%
Cross-filling	4.0	5.0	3.0	3.0	5.0	3.2
Tandempassage	2.0	3.0	2.0	3.0	1.0	2.4
Waterrecuperatie bassins (NPX)	4.0	2.0	2.0	2.0	5.0	2.3
Dubbele sluisdeuren	5.0	4.0	3.0	3.0	1.0	2.8
Transitrestricties	2.0	3.0	2.0	1.0	5.0	1.8
Baggeren	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.5
Extra reservoir	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0	1.4

De eerste plaats bij ecologisch en sociaal gewicht is cross-filling. De slechte is een extra reservoir aanleggen. Bij neutraal gewicht staat tandempassage maar op plaats vijf maar nu stijgt zijn score en heeft hij plaats drie. *Cross-filling* en transitrestricties wijken het sterkst af van de neutrale score, met een negatieve scoreverschuiving van 0,8.

14.4 Onmisbare factor

Water is de cruciale factor, alles hangt hiervan af. Zonder water is er geen doorvaart van schepen en is er geen werking van het kanaal. Dit is noodzakelijke om operationeel te blijven. Als het water op is, dan is het niet alleen de PCA die hier last van zal hebben. De ecologische en maatschappelijke impact zal dan ook groot zijn, bijvoorbeeld het drinkwater zal een probleem vormen. Iedereen heeft dus baat bij deze factor. Water is de oorzaak van het probleem en het knelpunt. Hier wordt bekeken welke oplossing het meeste water bezorgt.

Tabel 12 Gewogen gemiddelde onmisbare factor gewicht

Bron: Eigen werk

	Onmisbare factor					
	Praktisch	Financieel	Ecologisch	Maatschappelijk	Waterbeheer	Gewogen gemiddelde
Gewicht	10%	10%	0%	0%	80%	100%
Cross-filling	4.0	5.0	3.0	3.0	5.0	4.9
Tandempassage	2.0	3.0	2.0	3.0	1.0	1.3
Waterrecuperatie bassins (NPX)	4.0	2.0	2.0	2.0	5.0	4.6
Dubbele sluisdeuren	5.0	4.0	3.0	3.0	1.0	1.7
Transitrestricties	2.0	3.0	2.0	1.0	5.0	4.5
Baggeren	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0
Extra reservoir	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0	4.2

Cross-filling heeft net geen maximale score van vijf. Van de gewicht configuraties die zijn toegepast is het grootste verschil met de neutrale score bij extra reservoir. Voor de onmisbare factor gewicht heeft het een scorestijging van 2,4. Waterrecuperatie tussen de dubbele sluisdeuren heeft de sterkste daling in score met 2 ten opzichte van het neutraal gewicht. Waterrecuperatie bassins NPX stijgt met 1,6 ten opzichte van neutraal gewicht. Baggeren,

tandempassage en waterrecuperatie tussen de dubbele sluisdeuren scoren alle drie onder een twee. De andere oplossingen scoren allemaal boven een vier. De oplossingen brengen of veel of weinig water, er is geen oplossing tussenin.

14.5 Algemene analyse

We hebben de verschillende standpunten ingenomen en berekend. In dit deel zullen de uitkomsten worden vergeleken en geanalyseerd.

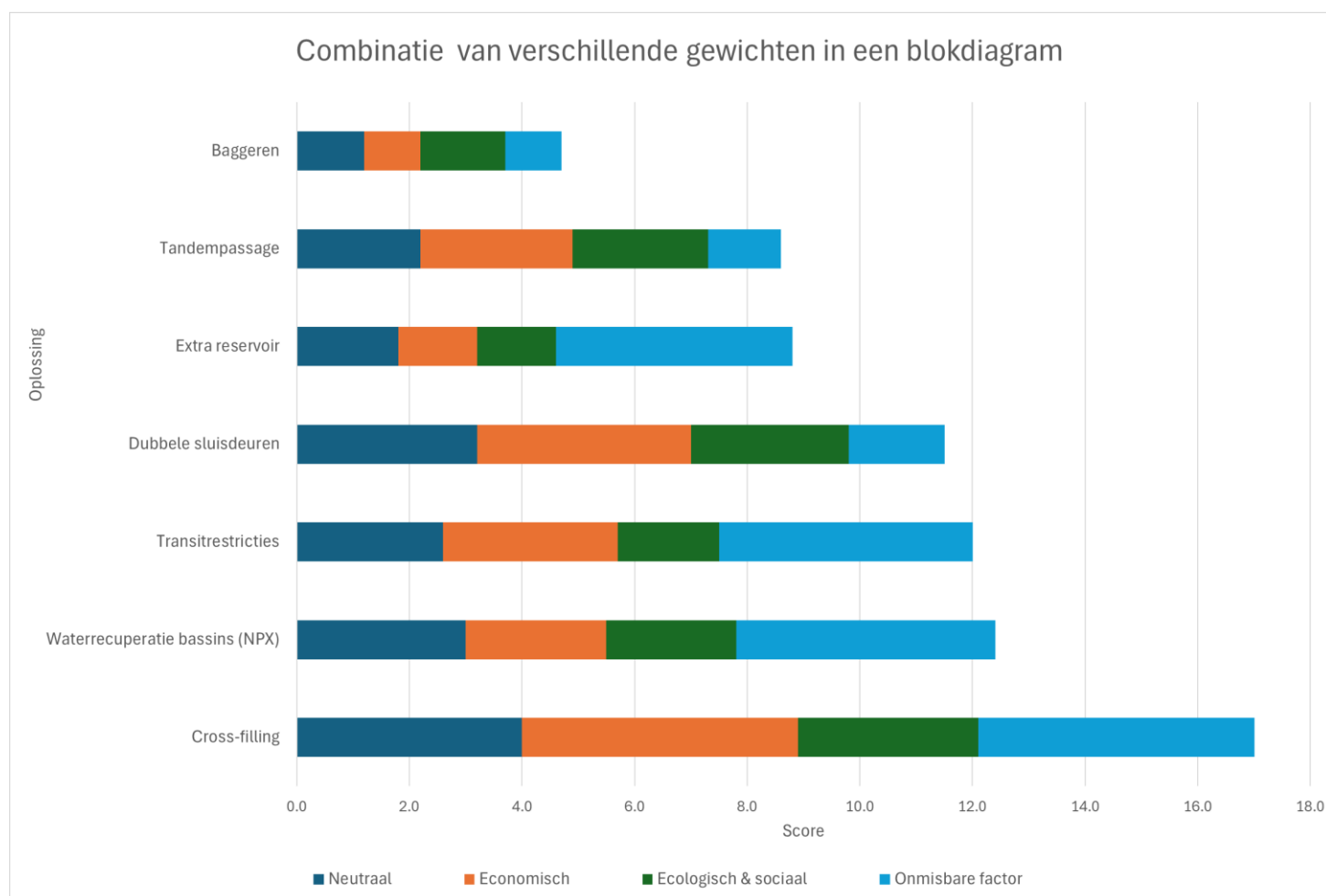
14.5.1 Sensitiviteitsanalyse

In Tabel 13 staan de gewogen gemiddeldes van elk standpunt naast elkaar. De oplossingen worden per standpunt met elkaar vergeleken. Om het visueler te maken is de volgende kleurcode toegepast. Hoe hoger de score hoe groener het vakje, hoe slechter de score hoe roder het vakje. De oplossingen zijn van beste totaalscore naar slechtste totaalscore geplaatst.

Tabel 13 Sensitiviteitsvergelijking, verschillende standpunten

Bron: Eigen werk

	Totale berekening				Totaal
	Neutraal	Economisch	Ecologisch & sociaal	Onmisbare factor	
Cross-filling	4.0	4.9	3.2	4.9	17.0
Waterrecuperatie bassins (NPX)	3.0	2.5	2.3	4.6	12.4
Transitrestricties	2.6	3.1	1.8	4.5	12.0
Dubbele sluisdeuren	3.2	3.8	2.8	1.7	11.5
Extra reservoir	1.8	1.4	1.4	4.2	8.8
Tandempassage	2.2	2.7	2.4	1.3	8.6
Baggeren	1.2	1.0	1.5	1.0	4.7
GROEN = goed WIT = gemiddeld ROOD = slecht					



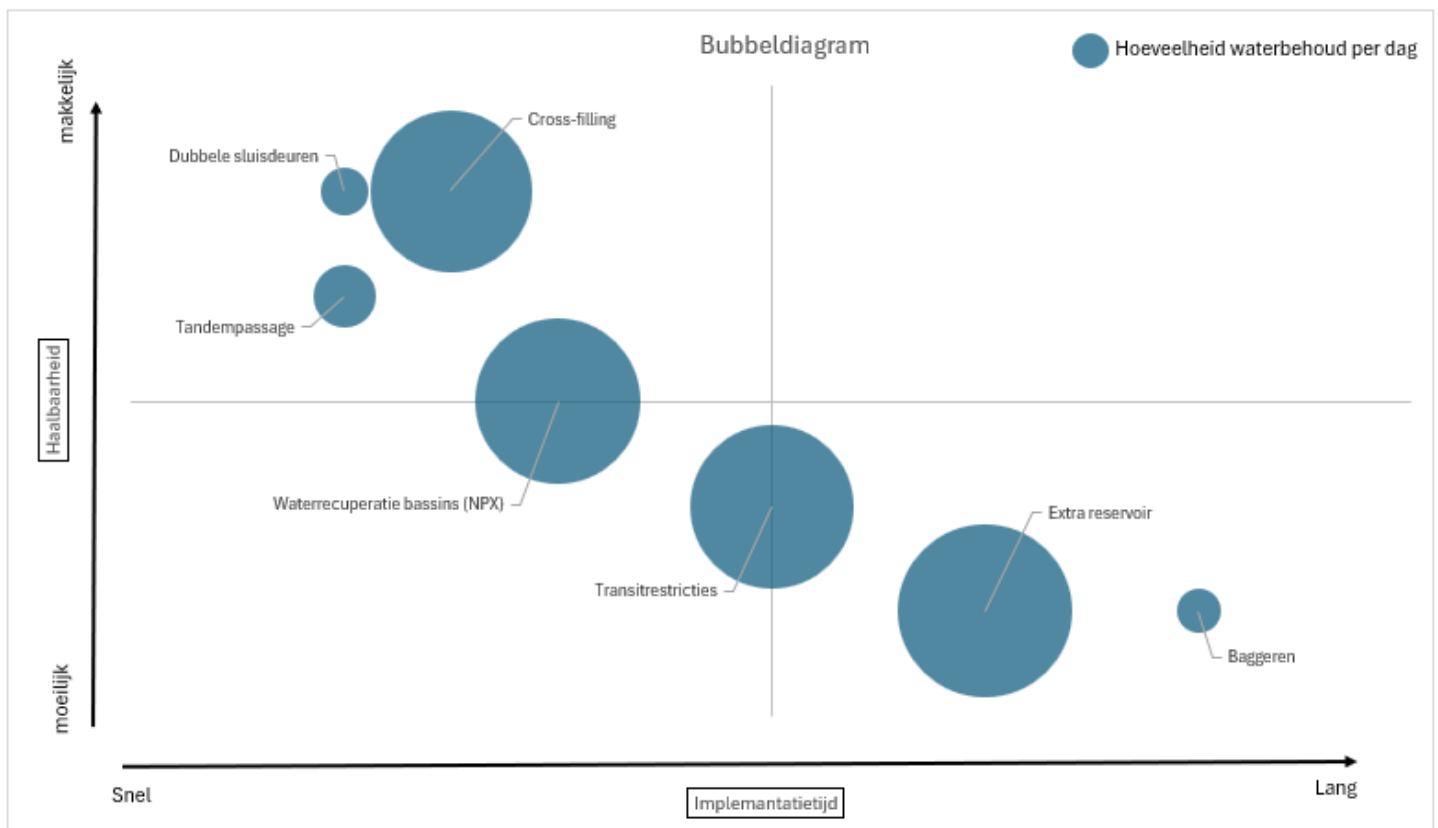
Figuur 29 Vergelijkende blokdiagram van verschillende gewichten met een schaal van 4 tot 20

Bron: Eigen werk

Uit Tabel 13 en Figuur 29 kunnen we afleiden dat *Cross-filling* op alle criteria het beste scoort voor elk gewichtsconfiguratie die is toegepast. Baggeren scoort op alles het slechtste op ecologisch en sociaal vlak na. Een extra reservoir scoort ecologisch en sociaal het slechtste. Wat opvalt is dat er eigenlijk geen groot verschil is. Voor elk standpunt dat is ingenomen en het bijhorend gewicht is er geen significant verschil. De scores veranderen niet veel, het zijn altijd dezelfde oplossingen die het beste of het slechtste scoren. De oplossingen zijn onafhankelijk van het standpunt dat wordt ingenomen.

14.5.2 Bubbeldiagram

In Figuur 30 is een bubbeldiagram gemaakt beter bekend als een “Boston Consulting Group chart” (BCG). De x-as toont de implementatietijd, de y-as de haalbaarheid, en de bubbelgrootte vertegenwoordigt de hoeveelheid water die per dag kan worden bespaard.



Figuur 30 Bubbeldiagram, x-as implementatietijd, y-as haalbaarheid beide op een schaal van 1 tot 5, bubbelgrootte is hoeveelheid water bespaard per dag in miljoen liter

Bron: Eigen werk

Aan de hand van dit soort bubbeldiagrammen kan er een strategische beslissing genomen worden. Nu is het duidelijk welke oplossingen voor veel water zorgen en welke kunnen ingezet worden op korte termijn. De kleine cirkels hebben een kleine impact op de waterbesparing dus deze kunnen eigenlijk al geëlimineerd worden als degelijke oplossing op lange termijn.

Ook is er duidelijk een diagonaal van linksboven naar recht onder. Dit wil dus zeggen dat er geen oplossingen in kwadrant één en drie liggen. Er zijn dus geen moeilijke en snelle of makkelijke en trage oplossingen. De zeven besproken oplossingen zijn dus snel en makkelijk of lang en moeilijk.

In Tabel 14 staat de hoeveelheid waterbesparing per oplossing in verschillende eenheden en tijdsspanne. Dit zijn de gegevens die doorheen het onderzoek gevonden zijn in verband met waterbesparing en dus de grootte van de bubbels bepalen. Verdere toelichting is vereist over de wijze waarop deze cijfers zijn berekend. De oplossingen worden theoretisch zo optimaal mogelijk gebruikt voor de berekening van de waterbesparing. *Cross-filling* wordt enkel toegepast in de Panamaxsluizen. In het verleden bedroeg het maximale aantal passages 27 schepen per dag. Vanwege de beperkte toepasbaarheid van tandepassages schatten we het maximum hiervan op twee tandepassages per dag, dus vier schepen. De waterrecuperatiebassins kunnen uitsluitend bij de Neo-Panamaxsluizen gebruikt worden, waar maximaal tien schepen per dag kunnen passeren. De strengste transitrestrictie vond plaats in februari 2024, toen het dagelijks aantal doorgangen beperkt werd tot 22 in plaats van 36 schepen. Dit verschil van 14 schepen resulteerde eveneens in een dagelijkse besparing van het transitvolumewater voor 14 schepen. Alle overige gegevens zijn afkomstig uit eerder genoemde bronnen in de hoofdstukken over waterbeheer (Miguel, 2022, 2024).

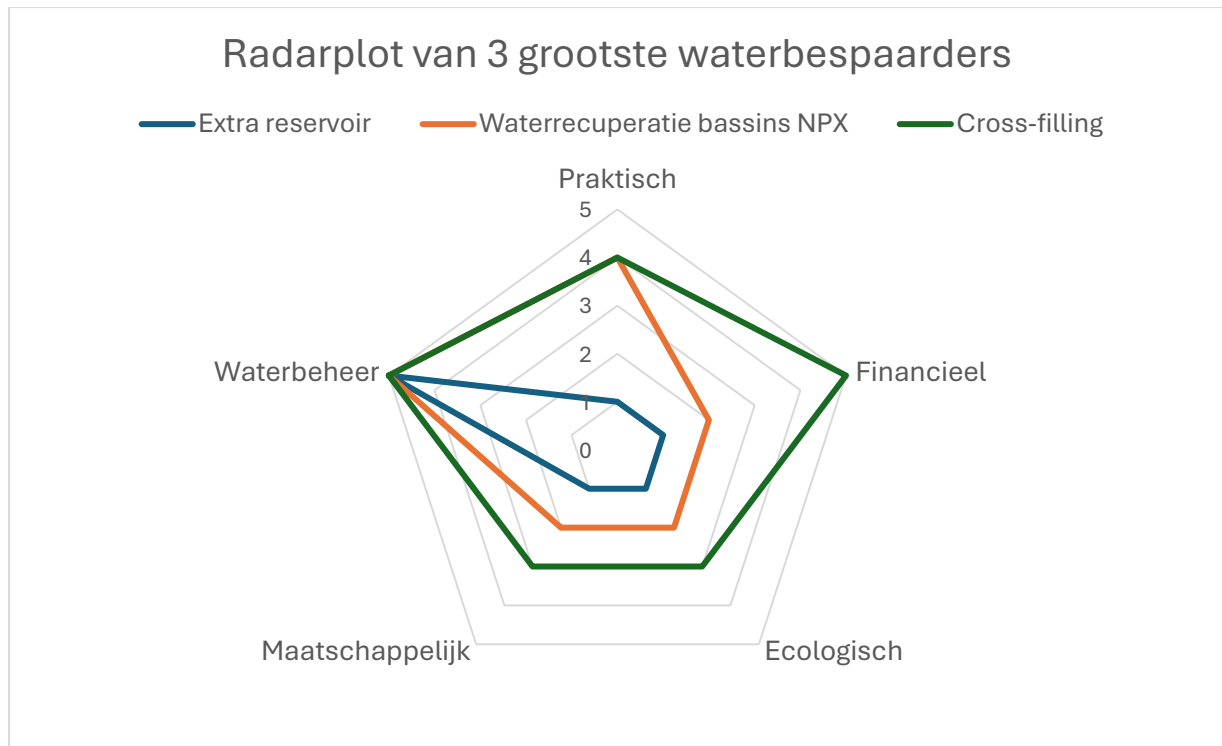
Tabel 14 Waterbesparing per oplossing op basis van beschikbare gegevens

Bron: Eigen werk

	Waterbehoud per dag in miljoen liter	Waterbehoud per schip in miljoen liter	Versluizingen bespraad op jaar basis
Cross-filling	2700	100	1454,8
Tandempassage	400	100	NB
Waterrecuperatie bassins (NPX)	2880	288	1597,6
Dubbele sluisdeuren	238,8	6,6	NB
Transitrestricties	2800	200	NB
Baggeren	200	NB	NB
Extra reservoir	3160	NB	NB
NB= Niet beaald			

14.5.3 Radardiagrammen

Het volgende deelhoofdstuk presenteert diverse radardiagrammen ter ondersteuning van relevante bevindingen.

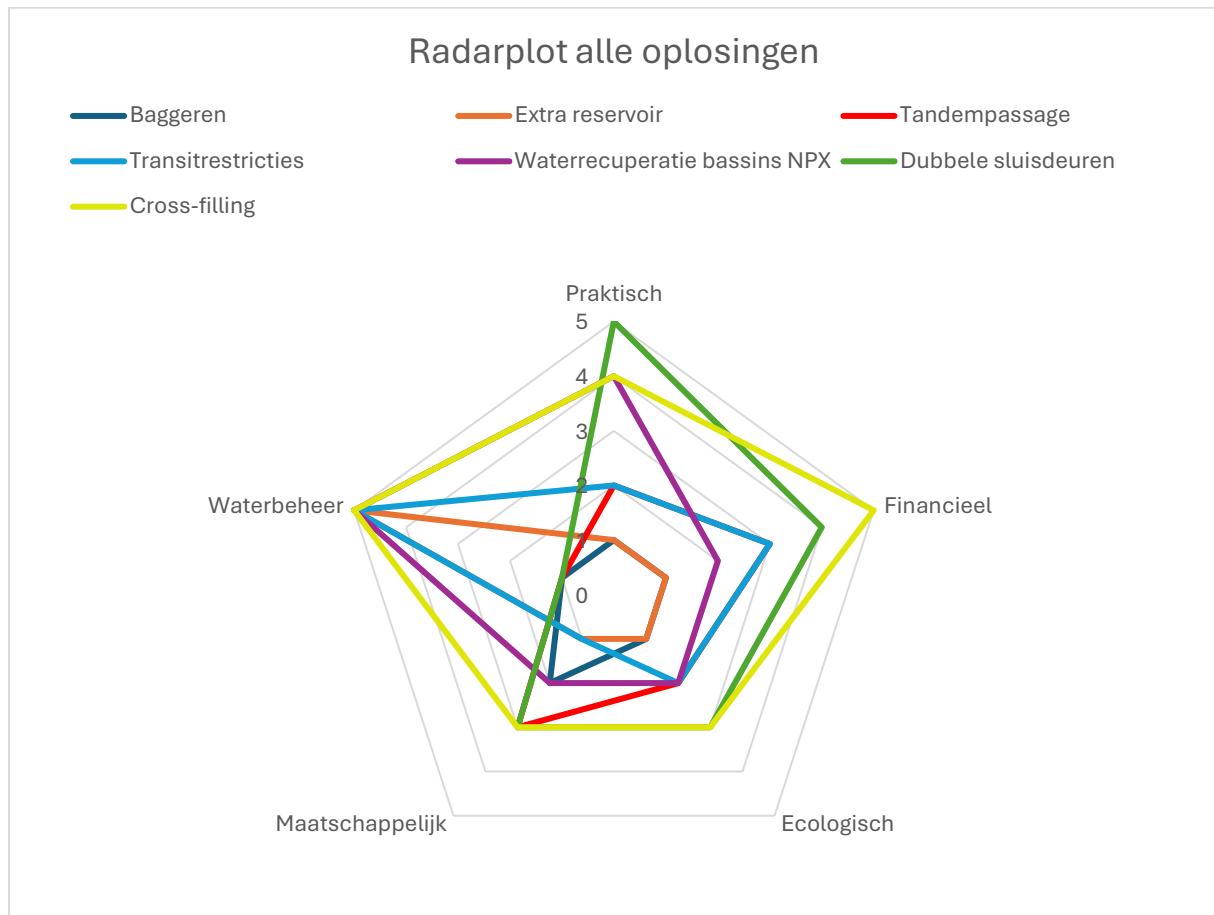


Figuur 31 Radarplot van drie zuinigste wateroplossingen, score zonder gewicht

Bron: Eigen werk

Figuur 31 is een radarplotcombinatie van de 3 oplossingen die het meeste water besparen zonder beperkingen te hebben op de werking van het kanaal. Transitrestricties besparen namelijk veel water maar beperken de kernactiviteiten van het kanaal. Deze radarplot laat dus zien welke drie oplossingen het meeste water besparen en waar hun focus ligt. Deze oplossingen zijn ook deze waar de Panama Canal Authority het meeste water van haalt of zal halen in de toekomst. Er is duidelijk te zien dat er geen hoge score is voor ecologisch en maatschappelijk. Dit wil zeggen dat deze oplossing dus geen rekening houden met deze domeinen. De PCA is zich hiervan bewust. Ze zetten de drinkwatervoorziening altijd zonder discussie op de eerste plaats. Als er

watertekort is zal de doorvaart van schepen moeten wijken voor het drinkwater van de Panamese bevolking (Panama Canal Authority, 2024b; Rodríguez, 2024).



Figuur 32 Radarplot van alle besproken oplossingen zonder gewicht

Bron: Eigen werk

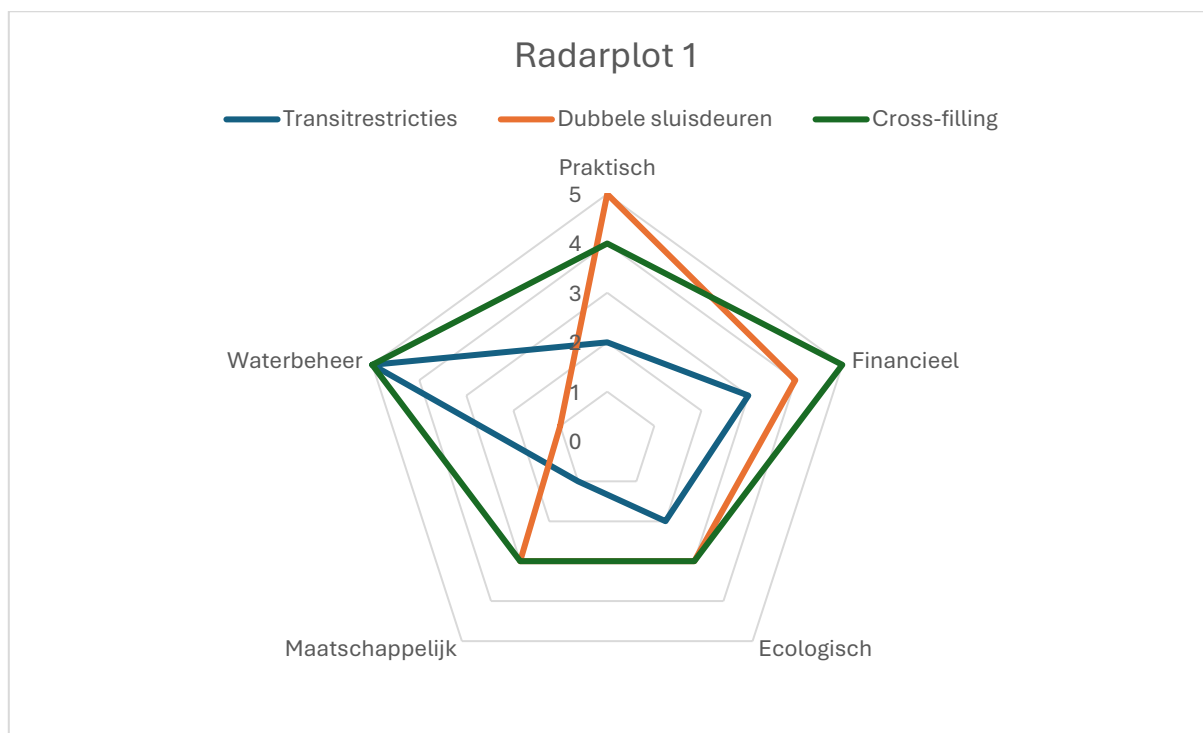
Uit Figuur 32 waar alle oplossing op één radarplot staan wordt het duidelijk dat er amper oplossingen ecologisch en maatschappelijk gericht zijn. De PCA is zich hiervan bewust en doet hiervoor dan ook het nodige. Ze weten dat dit hun zwakke punten zijn waar ze weinig aan kunnen doen, dus zetten ze hier extra op in om dit te compenseren. Zoals eerder al vermeld is het drinkwater van de bevolking topprioriteit. Voor de bouw van het Rio Indio reservoir neemt de PCA deze twee criteria ter harte. Ze hebben heel veel lezingen gedaan om de lokale bevolking te informeren die hiervan hinder ondervinden of getroffen zijn door dit project. Er zijn zes vaste assistentie kantoren in het gebied geplaatst om de bevolking zo soepel mogelijk

door dit project te helpen. Ze ondersteunen lokale projecten en scholen om ervoor te zorgen dat deze er beter uit komen. De hervestiging gebeurt in samenspraak met de getroffen gemeenschappen (Rodríguez, 2025).

Naast de maatschappelijke inspanningen van de PCA zijn er ook inspanningen voor de ecologische kant van dit project. Ze hebben namelijk alle fauna en flora soorten uit het stroomgebied van de Indio rivier gedocumenteerd. Zodat ze deze kunnen monitoren tijdens de loop van dit proces en zo de biodiversiteit te kunnen vrijwaren en indien nodig tijdig te kunnen ingrijpen mocht er iets misgaan. Ze zorgen ook voor meer bebossing door het planten van bomen (Canal de Panamá, 2018).

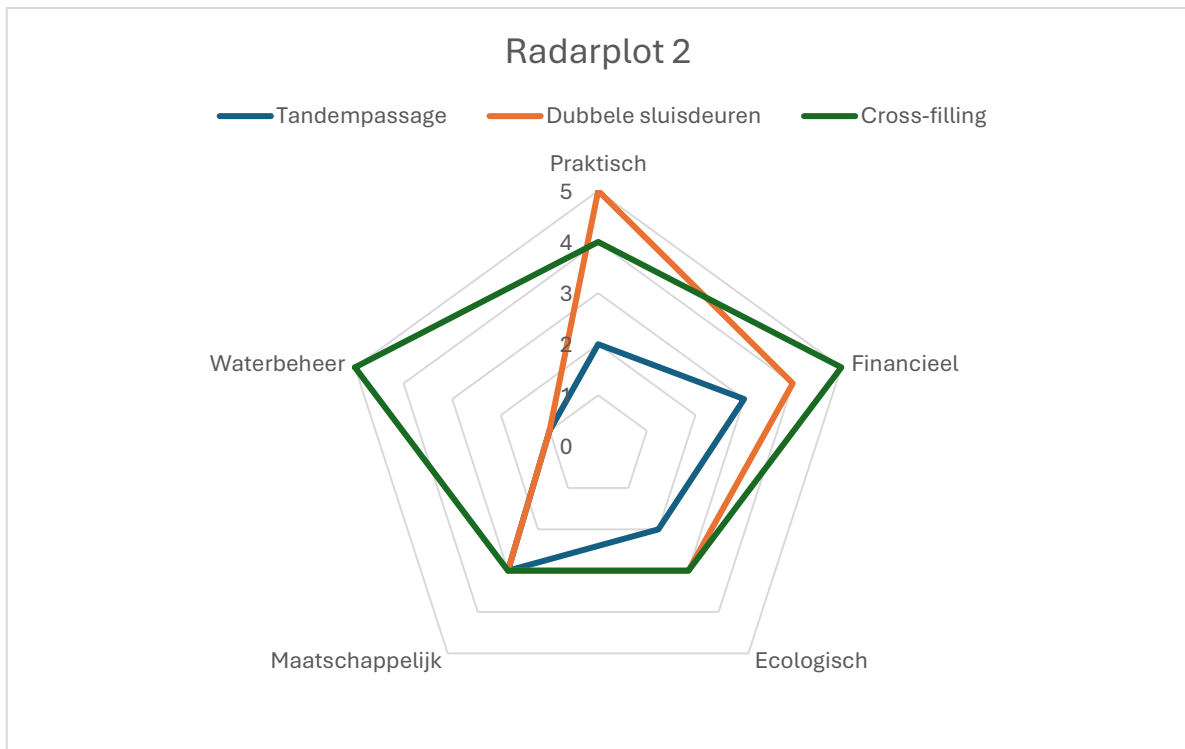
De PCA kijkt dus zeker niet weg maar durft haar zwaktes te herkennen en deze ook aan te pakken. Ze leveren duidelijk wel een inspanning om deze impact te compenseren.

Uit Figuur 32 is er niet meteen een éénzijdig antwoord uit te halen. De radarplot leunt niet extreem hard naar één kant. We kunnen afleiden dat er geen ideale oplossing is en dat het een complex probleem is. De PCA is goed bezig om de droogteproblematiek te beperken.



Figuur 33 Radarplot 1, combinatie van drie oplossingen zonder gewicht

Bron: Eigen werk



Figuur 34 Radarplot 2, combinatie van drie oplossingen zonder gewicht

Bron: Eigenwerk

Figuur 33 en Figuur 34 zijn 2 radarplots die de meest ideale configuratie trachten te bekomen. Aan de hand van 3 oplossingen proberen ze gezamenlijk een zo hoog mogelijke score te behalen op alle vijf criteria. Dit lukt maar matig, de tandempassage en transitrestricties maken geen verschil. Op ecologische en maatschappelijk vlak komt de score niet boven een drie. De meeste oplossingen sluiten elkaar niet uit en kunnen dus parallel gebruikt worden. Daarom bespreken we hier welke de beste combinaties zijn en welke oplossingen er eigenlijk altijd zouden moeten worden gebruikt. Het is duidelijk dat *Cross-filling* zeer goed scoort op alle vlakken en daarom dus ook best altijd ingezet wordt. Daarnaast kan het hergebruiken van het water tussen de dubbele deuren toegepast worden voor Panamax- en Neo-Panamaxsluizen. De waterrecuperatiebassins van de Neo-Panamaxsluizen kunnen onafhankelijk ingezet worden want dit is op een ander type sluis. De eerdergenoemde maatregelen sluiten het toepassen van tandempassages niet uit. Waar de eerste oplossingen de sluiswerking optimaliseren, richt tandempassage zich op de scheepstransit. Momenteel kunnen alle korte termijnoplossingen in combinatie gebruikt worden. Als er dan naar een oplossing op lange termijn gekeken wordt moet

er wel een keuze gemaakt worden. Het gaat dan om grote projecten die veel tijd en geld kosten. Daarom kiest men ervoor om te investeren in één lange-termijnoplossing, met een gerichte focus om de kans op succes te vergroten. De PCA verkiest de aanleg van een extra reservoir boven het uitbaggeren van een meer, aangezien dit gunstiger is met het oog op de waterzekerheid. Als noodoplossing zijn de transitrestricties die in combinatie gaan met alle andere oplossingen. Dit heeft echter een aanzienlijke impact op de werking van het kanaal, zijn klanten en zelfs ver daarbuiten. Het is duidelijk geworden dat er geen eenzijdige oplossing is voor de droogteproblematiek in het Panamakanaal. Er kunnen meerdere oplossingen tegelijkertijd ingezet worden. Uit het verleden is af te leiden dat dit ook meer dan nodig is om het waterpeil in het Gatúnmeer op peil te houden.

15 Conclusie

De droogte waarmee het Panamakanaal sinds 2023 te kampen heeft, heeft grote gevolgen gehad op de werking van het kanaal en zijn maatschappelijke en ecologische context. Deze masterproef bracht in kaart hoe de Panama Canal Authority (PCA) reageerde met een reeks maatregelen, gaande van beperkingen op het aantal transits en aangepaste tolheffingen tot grootschalige infrastructurele plannen zoals het Rio Indio reservoir. Die acties tonen aan dat de PCA snel moet schakelen tussen operationele noodmaatregelen en langetermijnstrategieën om de beschikbaarheid van zoetwater veilig te stellen.

Het beperken van het aantal dagelijkse transits en het invoeren van diepgangsrestricties zijn kortetermijnmaatregelen die in hoofdzaak gericht zijn op het behoud van operationele continuïteit. Hoewel deze effectief zijn in het temporiseren van de waterconsumptie per dag, leiden ze onmiskenbaar tot economische en logistieke vertragingen, met mogelijke mondiale impact op de toeleveringsketens. Het Panamakanaal zal hierdoor minder als een betrouwbare route aanschouwd worden. Dankzij aangepaste tolstructuren en nieuwe prijsstrategieën kon de PCA haar financiële balans toch grotendeels handhaven. Dat roept vragen op over de maatschappelijke rechtvaardigheid van dergelijke maatregelen, zeker wanneer de ecologische impact zoals zoutintrusie of verhoogde uitstoot door wachttijden moeilijk te kwantificeren is.

Lange-termijnoplossingen, zoals het Rio Indio-project, lijken noodzakelijk om een robuust en veerkrachtig watersysteem te garanderen. Deze projecten brengen echter aanzienlijke ecologische en sociale kosten met zich mee. Zo zullen meer dan 1.700 mensen moeten worden geëvacueerd, en is er onvermijdelijk sprake van ontbossing en verlies van biodiversiteit. De PCA stelt wel compenserende maatregelen voor, zoals herbebossing en gemeenschapsbetrokkenheid, maar het blijft onzeker in welke mate deze de impact daadwerkelijk zullen beperken.

Al met al toont dit onderzoek aan dat de droogte van 2023 het Panamakanaal fundamenteel heeft uitgedaagd en een kantelpunt markeert in het waterbeheer van de regio. De maatregelen van de PCA getuigen van flexibiliteit en technisch inzicht, maar leggen tegelijk bloot dat de huidige infrastructuur kwetsbaar is voor klimaatveranderingen. Structurele oplossingen vragen niet alleen bouwkundige investeringen, maar ook een heroverweging van hoe natuurlijke hulpbronnen worden verdeeld tussen economische exploitatie en publieke belangen.

Toekomstig beleid zal dus moeten streven naar meer dan technische efficiëntie alleen. Het succes van het Panamakanaal zal in de komende decennia net zo sterk afhangen van ecologisch evenwicht en sociaal draagvlak als van de capaciteit om schepen te versluizen. Deze masterproef benadrukt het belang van een geïntegreerde benadering, waarin waterbeheer, duurzaamheid en rechtvaardigheid hand in hand gaan.

16 Bibliografie

Er is gebruik gemaakt van Generatieve Artificiële Intelligentie als zoekrobot en taalassistent voor het maken van deze Master thesis.

Abdulhafedh, A. (2017). The Panama Canal: A Man-Made Engineering Marvel. *ResearchGate*, 5, 318-342.

Anderson, K. (2007). Existing Supply of Watershed Services in the Panama Canal Watershed. *Journal of Sustainable Forestry*, 25(1-2), 121-145.
https://doi.org/10.1300/J091v25n01_06

Autoridad del Canal de Panama. (2015). *Statement of costs of the investment in progress and statement of operating Expenses of the Panama Canal Expansion program*. 21.

Avery, R. E. (2001, mei 29). *The French Failure—Panama Canal*.
<https://www.czbrats.com/Builders/FRCanal/failure.htm>

Barrios, J. (2010, april). *The Panama Canal Expansion Program*. <https://capac.org/wp-content/uploads/2022/12/Disen%CC%83o-especificaciones-te%CC%81cnicas.pdf>

Becker, E. (2025a, april 10). *April 2025 ENSO update: La Niña has ended* | NOAA Climate.gov.
<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/april-2025-enso-update-la-nina-has-ended>

Becker, E. (2025b, mei 8). *May 2025 ENSO update: Eye of neutral* | NOAA Climate.gov.
<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/may-2025-enso-update-eye-neutral>

- Brooks, M. (2004). *Economic growth, ecological limits, and the expansion of the Panama Canal* [Thesis, McGill University].
<https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/fx719m91w>
- Calvo Gobbetti, L., & Ríos Córdoba, K. (2024). Impacto de la ampliación del Canal de Panamá en las confiabilidades hídrica y de calado. *I+D Tecnológico*, 20(1), 49-60.
<https://doi.org/10.33412/idt.v20.1.3880>
- Canal de Panamá. (2018). *Evaluación de la biodiversidad* (p. 198). <https://pancanal.com/wp-content/uploads/2022/03/Evaluacion-biodiversidad.pdf>
- Canal de Panamá. (2025, april 29). *Data—AQUARIUS Web Portal* [Data].
<https://panama.aquaticinformatics.net/Data/Chart/ChartId/1145/Interval/Custom/2021/09/01/2025/04/30>
- Carroll, R. (2009, juli 10). Unblocking Panama canal's bottleneck. *The Guardian*.
<https://www.theguardian.com/business/2009/jul/11/panama-canal-shipping-expansion>
- Carse, A. (2012). *Nature as infrastructure: Making and managing the Panama Canal watershed*. 25. [https://doi.org/DOI: 10.1177/0306312712440166](https://doi.org/DOI:10.1177/0306312712440166)
- Carse, A. (2014). *Beyond the Big Ditch: Politics, Ecology, and Infrastructure at the Panama Canal*. MIT Press. <https://books.google.be/books?id=oHWwEAAQBAJ>
- Carse, A. (2017). *An Infrastructural Event: Making Sense of Panama's Drought*. 10(3).
- Castellanos-Galindo, G. A., Sharpe, D. M. T., Robertson, D. R., Bravo, V., Jeschke, J. M., & Torchin, M. E. (2004). New fish migrations into the Panama Canal increase likelihood of interoceanic invasions in the Americas. *Current Biology*, 0(0).
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2025.01.049>

- Castrellón, M. G., Wang, Z. B., Solomatine, D., & Popescu, I. (2024). *Hybrid approaches to model salinity in Gatun Lake* (Nos. EGU24-1743; p. 1). EGU24. Copernicus Meetings.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-1743>
- cdp_admin. (2003, juni 3). Panama Canal Environmental Management Division Receives ISO 14001 Certification. *Autoridad Del Canal de Panamá*.
<https://pancanal.com/en/panama-canal-environmental-management-division-receives-iso-14001-certification/>
- cdp_admin. (2007, november 13). EIA for Third Set of Locks Project Approved by National Environmental Authority of Panama. *Autoridad Del Canal de Panamá*.
<https://pancanal.com/en/eia-for-third-set-of-locks-project-approved-by-national-environmental-authority-of-panama/>
- cdp_admin. (2008, april 7). Paving the Way for Construction Panama Canal Awards the Largest Expansion Contract Thus Far. *Autoridad Del Canal de Panamá*.
<https://pancanal.com/en/paving-the-way-for-construction-panama-canal-awards-the-largest-expansion-contract-thus-far/>
- Chico, C., Wang, Z., Reyes, E. K. C., & Mariasingham, M. J. (2024). *Navigating Drought: Analyzing Panama Canal Transit Disruptions Using AIS Big Data*. In Review.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4193827/v1>
- Cinelli, M., Kadziński, M., Gonzalez, M., & Słowiński, R. (2020). How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega*, 96, 10.1016/j.omega.2020.102261.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261>
- Condit, R., Robinson, W. D., Ibáñez, R., Aguilar, S., Sanjur, A., Martínez, R., Stallard, R. F., García, T., Angehr, G. R., Petit, L., Wright, S. J., Robinson, T. R., & Heckadon, S.

- (2001). The Status of the Panama Canal Watershed and Its Biodiversity at the Beginning of the 21st Century: Long-term ecological studies reveal a diverse flora and fauna near the Panama Canal, harbored within a corridor of forest stretching from the Caribbean to the Pacific, but deforestation, land degradation, erosion, and overhunting remain threats. *BioScience*, 51(5), 389-398. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0389:TSOTPC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0389:TSOTPC]2.0.CO;2)
- Contreras, A., Henderson, H., Herrera, P., & Mack, Y. (2024). *Alternativa para el uso de sedimentos acumulados producto del funcionamiento del Canal de Panamá*. 5. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v10.1.4002>
- DEME Group. (2025). *Capital dredging, rock dredging, drilling & blasting for the Panama Canal*. What We Do. <https://www.deme-group.com/projects/panama-canal>
- Dierker, D., Lopez, N., Murnane, J., Saxon, S., Szigethi, J., & Zampelas, A. (2024, januari 19). *Panama Canal restrictions' impact on supply chains | McKinsey*. McKinsey&Company. https://www.mckinsey.com/industries/logistics/our-insights/how-could-panama-canal-restrictions-affect-supply-chains?utm_source=chatgpt.com
- Eiermann, J. (2023, oktober 31). *Drought at the Panama Canal delays energy shipments, increasing shipping costs—U.S. Energy Information Administration (EIA)*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=60842>
- Europese Commissie. (z.d.). *Gevolgen van de klimaatverandering—Europese Commissie*. Geraadpleegd 25 mei 2024, van https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_nl
- Evers, J., & Editing, E. (2023, oktober 19). *El Niño*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/el-nino>

- Famine Early Warning Systems Network. (2023, 2024). *El Niño 2023-2024 | FEWS NET*. FEWS NET. <https://fews.net/topics/special-topics/el-nino-2023-2024>
- Fattor, C. A., Bacchiega, J. D., & Arrigoni, S. A. (2020). *HYDRODYNAMIC FORCES ON THE VALVES OF THE TRANSFER SYSTEM OF THE THIRD SET OF LOCKS OF THE PANAMA CANAL*. 10. <https://doi.org/DOI: 10.14264/uql.2020.596>
- Fleury, M. (2024, maart 6). *Can the Panama Canal save itself?* <https://www.bbc.com/news/business-68467529>
- Giraldo, M. (2024, april 3). Panama Canal drought could threaten supply chain, S&P says. *Reuters*. <https://www.reuters.com/business/environment/panama-canal-drought-could-threaten-supply-chain-sp-says-2024-04-03/>
- Harza, M. W. (2003). *Feasibility design for the Rio Indio Water Supply Project*. 21.
- Hatvani, I. G., Souza, N. A. D. C., Harmon, R. S., Espinosa, J. A., & Kern, Z. (2025). Assessment of multidecadal precipitation seasonality in the panama canal watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102213. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102213>
- Hodges, H. F. (1909). The Panama Canal. *Professional Memoirs, Corps of Engineers, United States Army, and Engineer Department at Large*, 1(4), 355-388.
- Inbound Logistics. (2023, september). | *Panamax Ship: History, Advantages, and Capacity*. <https://www.inboundlogistics.com/articles/panamax-ships/>
- Jankowicz, M. (2023, november 9). *The Panama Canal is so clogged up that a shipping company paid \$4 million to jump the line: Report* [Nieuws]. Business Insider. <https://www.businessinsider.com/panama-canal-shipping-company-paid-record-4-million-skip-line-2023-11>

- Knack. (2021, juli 6). *Zijn er echt zeven 'olympische zwembaden' aan Belgisch kernaafval?*
Knack. <https://www.knack.be/nieuws/zijn-er-echt-zeven-olympische-zwembaden-aan-belgisch-kernaafval/>
- Labrut, M. (2024, juli 10). *Panama Canal plans new \$1.6bn reservoir to address water shortages.* <https://www.seatrade-maritime.com/ship-operations/panama-canal-plans-new-1-6bn-reservoir-to-address-water-shortages>
- Labrut, M. (2025, februari 25). *Panama Canal approves funding for new lake to increase water supply.* <https://www.seatrade-maritime.com/maritime-transportation/panama-canal-approves-funding-for-new-lake-to-increase-water-supply>
- Larsen, M. C. (2019). Water Supply and Water Quality Challenges in Panama. In *Advances in Water Purification Techniques* (pp. 41-66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814790-0.00003-X>
- Larson, C. L., & Albertin, W. (1984). Controlling Erosion and Sedimentation in the Panama Canal Watershed. *Water International*, 9(4), 161-164. <https://doi.org/10.1080/02508068408686529>
- LetsBuild. (2015, oktober 22). *How they built the Panama canal.* Letsbuild. <https://www.letsbuild.com/blog/how-they-built-the-panama-canal>
- LI, A., & FORD, J. (2019). *Understanding Socio-Ecological Vulnerability to Climatic Change through a Trajectories of Change Approach: A Case Study from an Indigenous Community in Panama.* 17. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-18-0093.1>
- Llamas, B., Mazadiego, F. L., & Gracia, M. D. S. D. (2017). *Case Study of Innovative Projects: Successful Real Cases.* BoD – Books on Demand. <https://books.google.be/books?id=ghCQDwAAQBAJ>

- Luis, Engr., & K., F. (2014, april 8). *Panama Canal Expansion Program Update*.
https://www.iaphworldports.org/n-iaph/wp-content/uploads/2020/12/IAPH_2014_Luis_Ferreira.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Martinez, Y. (2017). *REFORESTACIÓN Y RESTAURACIÓN EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DE RÍO INDIO*. 26.
- Met Office. (z.d.). *What are El Niño and La Niña?* Met Office. Geraadpleegd 26 mei 2024, van
<https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/oceans/el-nino>
- Miguel, P. (2022). *SCHEDULE OF PANAMAX LOCKS MAINTENANCE OUTAGES*. No. A-14-2022, 3.
- Miguel, P. (2024). *OP, February 9, 2024 Subject: Monthly Canal Operations Summary – January 2024*. 29(No. A-04-2024), 6.
- Miguel, P. (2025). *OP, May 08, 2025 Subject: Monthly Canal Operations Summary – April 2025*. 29(No. A-11-2025), 3.
- Montemurno, M. (2022, juni 30). *What are Brackish Water Environments?* Ocean Conservancy. <https://oceanconservancy.org/blog/2022/06/30/brackish-water-environments/>
- MWH Constructors. (2025). *MWH Constructors*. <https://www.mwhconstructors.com/>
- NASA earth observatory. (2009, oktober 23). *World of Change: El Niño, La Niña, and Rainfall* [Text.Article]. NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/ENSO>
- NASA earth observatory. (2024, juli 15). *El Niño Exits* [Text.Article]. NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/images/153058/el-nino-exits?utm_source=chatgpt.com

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (z.d.). *What is El Niño? | El Niño Theme Page—A comprehensive Resource*. Geraadpleegd 25 mei 2024, van <https://www.pmel.noaa.gov/elnino/what-is-el-nino>
- Netherlands Water Partnership. (2022). *Water Sector Study—Panama* (p. 31) [Onderzoek]. Netherlands Water Partnership (NWP). https://www.netherlandswaterpartnership.com/sites/nwp_corp/files/2022-03/Panama%20Water%20Sector%20Study.pdf
- Newbery, M. (2017). The Critical Role of Water Management and Reliability in the Panama Canal Expansion. *World Environmental and Water Resources Congress 2017*, 11.
- NOAA. (2024, mei 9). *El Niño & La Niña (El Niño-Southern Oscillation) | NOAA Climate.gov*. <http://www.climate.gov/enso>
- Norén, A. (2025). *ACP Ships and Boats – Panama Canal Transits and Beyond*. <https://madaboutpanama.com/panama-canal-cruise/what-you-will-see/acp-ships-and-boats/>
- NOS. (2023, april 15). *El Niño is terug en de hele wereld zal het weten*. <https://nos.nl/op3/collectie/13871/video/2471475-el-nino-is-terug-en-de-hele-wereld-zal-het-weten>
- Notteboom, T., Pallis, A., & Rodrigue, J.-P. (2019, december 30). *Comparative Characteristics of the Panama Canal Expansion | Port Economics, Management and Policy*. <https://porteconomicsmanagement.org/pemp/contents/part1/interoceanic-passages/characteristics-panama-canal-expansion/>
- Notteboom, T., Pallis, A., & Rodrigue, J.-P. (2023, juni 8). *Effect of the Panama Canal Draft Limitation on Containership Capacity | Port Economics, Management and Policy*.

- <https://porteconomicsmanagement.org/pemp/contents/part1/interoceanic-passages/panama-canal-draft-limitation-containership-capacity/>
- Oanda. (2025, mei 27). *Currency Converter | Foreign Exchange Rates | OANDA*.
<https://www.oanda.com/currency-converter/en/>
- Olujinmi, O. (2023, december 27). The 6 countries with most rainy days worldwide. *World Excellence International*. <https://www.worldexcellence.com/rainfall-the-countries-with-most-rainy-days/>
- Panama Canal Authority. (z.d.). Inicia proceso para la elaboración de Estudio de Impacto Ambiental en río Indio (Periodo 2017-2020). *Autoridad Del Canal de Panamá*.
Geraadpleegd 11 mei 2025, van <https://pancanal.com/estudios-de-rio-indio/inicia-proceso-para-la-elaboracion-de-estudio-de-impacto-ambiental-en-rio-indio/>
- Panama Canal Authority. (2011). Statement of Costs of Investments in Progress and Statement of Operating Expenses of the Panama Canal Expansion Program. *Ernst &young*, 17.
- Panama Canal Authority. (2017, 2020). Estudios en río Indio. *Autoridad Del Canal de Panamá*.
<https://pancanal.com/estudios-de-rio-indio/>
- Panama Canal Authority (Regisseur). (2020, februari 5). *Water-saving Measures: Cross Filling in the Panamax Locks* [Video recording].
<https://www.youtube.com/watch?v=aarjrOeD6Aw>
- Panama Canal Authority. (2022). *Annual Report 2022* (p. 118) [Jaarverslag].
<https://pancanal.com/wp-content/uploads/2023/02/Informe-2022-Eng.pdf>
- Panama Canal Authority. (2024a). *Annual Report 2023* (p. 123) [Jaarverslag]. Panama Canal Authority.
<https://pancanal.com/wp-content/uploads/2021/08/Informe-2023EngFINAL.pdf>

- Panama Canal Authority. (2024b). *Annual Report 2024* (p. 121) [Jaarverslag]. Panama Canal Authority. <https://pancanal.com/wp-content/uploads/2021/08/Informe-2024Eng79.pdf>
- Panama Canal Authority. (2025a). *American canal construction*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/american-canal-construction/>
- Panama Canal Authority. (2025b). *Canal Watershed* [Officiële overheidswebsite]. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/canalwatershed/>
- Panama Canal Authority. (2025c). *Early Plans*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/early-plans/>
- Panama Canal Authority. (2025d). *End Of The Construction*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/end-of-the-construction/>
- Panama Canal Authority. (2025e). *Learn about the history of the Panama Canal*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/history-of-the-panama-canal/>
- Panama Canal Authority. (2025f). *THE FRENCH CANAL CONSTRUCTION*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/the-french-canal-construction/>
- Panama Water Sector Study.pdf*. (z.d.). Geraadpleegd 26 mei 2024, van https://www.netherlandswaterpartnership.com/sites/nwp_corp/files/2022-03/Panama%20Water%20Sector%20Study.pdf
- Paris, C. (2023, augustus 18). *The Panama Canal Has Become a Traffic Jam of the Seas* [Nieuws]. WSJ. <https://www.wsj.com/business/logistics/panama-canal-drought-causes-traffic-problems-eed9d335>
- Paton, S. (2024). *Lake Gatun salinity monitoring* [Dataset]. Smithsonian Tropical Research Institute. <https://doi.org/10.25573/data.25412134.v3>
- Pérez, M., & Marulanda, A. (2019). *REVISIÓN Y APROBACIÓN*. 16.

- Raimkulov, A. (2025, april 7). *Panama Canal Drought: Global Trade & Supply Chain Disruptions*. <https://www.allthingsupplychain.com/panama-canal-drought-global-trade-and-supply-chain-disruptions/>
- Rodríguez, R. (2023a, oktober 4). *Beyond Scarcity: How the Canal Manages the Fresh Water Challenge* [Officiële overheidswebsite]. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/how-the-canal-manages-the-fresh-water-challenge/>
- Rodríguez, R. (2023b, oktober 11). *The Panama Canal Adapts: Strategic Measures for Water Savings*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/the-panama-canal-adapts-strategic-measures-for-water-savings/>
- Rodríguez, R. (2023c, oktober 31). *The driest month of October since 1950*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/the-driest-month-of-october-since-1950/>
- Rodríguez, R. (2023d, november 25). *From Cross-fillings to Long-Term Solutions: How the Panama Canal is addressing the issue of water head on*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/how-the-panama-canal-is-addressing-the-issue-of-water-head-on/>
- Rodríguez, R. (2024, april 9). *Clearing the Waters: Dispelling Myths About Panama Canal Operations*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/clearing-the-waters-dispelling-myths-about-panama-canal-operations/>
- Rodríguez, R. (2025, februari 21). *Rio Indio Lake Project Established as a Top Priority for National Water Security*. Autoridad Del Canal de Panamá. <https://pancanal.com/en/rio-indio-lake-project-established-as-a-top-priority-for-national-water-security/>
- Rojas, M. (2022, mei 24). *ABC of the Environmental Impact Study (EIS) in Panama*. Focus. <https://focusalcogal.com/en/what-you-should-know-about-the-environmental-impact-study-eis-in-panama/>

- Römer, T. (2023, december 13). *Panama Canal Map*.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/68/Panama_Canal_Map_EN.svg
- Saarikoski, H., Barton, D. N., Mustajoki, J., Keune, H., Gomez-Baggethun, E., & Langemeyer, J. (z.d.). Multi-criteria decision analysis (MCDA) in ecosystem service valuation. *Openness*, 6.
- Sabonge, R. (2014). The Panama Canal expansion. *Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)*, 24.
- Scaife, A., Guilyardi, E., Cain, M., & Gilbert, A. (2019). What is the El Niño–Southern Oscillation? *Weather* (00431656), 74(7), 250-251. <https://doi.org/10.1002/wea.3404>
- Schexnayder, C. J. (z.d.). *Belgian Firms Snags \$177M Panama Canal Dredge Contract | 2008-04-04 | ENR | Engineering News-Record*. Geraadpleegd 9 mei 2025, van <https://www.enr.com/articles/32569-belgian-firms-snags-177m-panama-canal-dredge-contract>
- Scott, W. R. (1913). *The Americans in Panama*. <https://www.czbrats.com/AmPan/index.htm>
- Soto, E. R. (2010). *Integrated water resources management: The case of the Panama Canal Basin*. *Publ.* 338, 4.
- The Maritime Executive. (2023, november 9). *Panama Canal Auction Sets Record \$4M for Slot as Congestion Grows*. The Maritime Executive. <https://maritime-executive.com/article/panama-canal-auction-sets-record-4m-for-slot-as-congestion-grows>
- The World Bank. (2024, mei 25). *World Development Indicators | DataBank [Data]*. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators/Series/AG.LND.PRCP.MM#>

- The World Bank. (2025, mei 27). *World Bank Open Data*. World Bank Open Data.
<https://data.worldbank.org>
- TravelArk. (2017). *The Story of the Panama Canal*. TravelArk 2.0.
<http://v2.travelark.org/travel-blog-entry/raroboy/10/1517456026>
- US Army Corps of Engineers & Panama Canal Authority. (2023). *Integrated Water Resource Management Feasibility Study* (Final Report No. USACE-478303-AMM; p. 233).
https://pancanal.com/wp-content/uploads/2024/04/2023-May_Water-Project-AMM-Study-A-Final-Report-USACE.pdf
- Vega, C. R. C. (2020, april 27). *The marvel that is Panama Canal, how it works and why it is important to global trade..* Shipping and Freight Resource.
<https://www.shippingandfreightresource.com/panama-canal-how-it-works-and-why-it-is-important/>
- Vehaeghe, O., Roulens, T., & Cockx, R. (2023, augustus 10). *De Kleine Jongen die straks de wereldwijde inflatie oppookt* [Nieuws]. De Tijd. <https://multimedia.tijd.be/el-nino>
- Velić, S., Barić, M., Toman, I., & Leonardo Šango. (2025). *Impact of Gatun Lake Water Level on Safety of Navigation in the Panama Canal*. 12.
- Verheggen, B. (2020). *Wat iedereen zou moeten weten over klimaatverandering* (Tweede druk). Prometheus. <https://uitgeverijprometheus.nl/boeken/wat-iedereen-zou-moeten-weten-over-klimaatverandering-paperback/>
- Walsh, C., & Bows, A. (2012). Size matters: Exploring the importance of vessel characteristics to inform estimates of shipping emissions. *Applied Energy*, 98, 128-137.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.015>

- Wijsman, J. (2013). *Panama Canal Extension: A review on salt intrusion into Gatun Lake* (Onderzoek No. C215/13; p. 27). IMARES - Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies. <https://edepot.wur.nl/288785>
- Wikipedia. (2022). Zwembad met olympische afmetingen. In *Wikipedia*. https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Zwembad_met_olympische_afmetingen&oldid=62355040
- Wikipedia. (2025). Provincies van België. In *Wikipedia*. https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Provincies_van_Belgi%C3%AB&oldid=69142891
- World Health Organization. (2018). Health, environment and climate change. *SEVENTY-FIRST WORLD HEALTH ASSEMBLY, Provisional agenda item 11.4(A71/10)*, 7.
- World Health Organization. (2023). *Climate change and health. Provisional agenda item 22(154th session)*, 4.
- World Lake Database. (2025). *Gatun Lake SAM-203* [Data]. <https://wldb.ilec.or.jp/Lake/SAM-203>
- World Meteorological Organization (WMO). (2024a). *State of the Global Climate 2023*. <https://library.wmo.int/records/item/68835-state-of-the-global-climate-2023>
- World Meteorological Organization (WMO). (2024b, maart 4). *El Niño weakens but impacts continue*. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/news/media-centre/el-nino-weakens-impacts-continue>
- World Population Review. (2024). *Population of Cities in Panama 2024* [Data]. <https://worldpopulationreview.com/countries/cities/panama>

- WorldData. (2025). *Inflation rates in Panama*. Worlddata.Info.
<https://www.worlddata.info/america/panama/inflation-rates.php>
- Worldometer. (2024). *Panama Population (2024)—Worldometer* [Data].
<https://www.worldometers.info/world-population/panama-population/>
- Zielinski, K. (2018). The Panama Canal Expansion Project: A Historical Review and Lessons Learned. *Journal of IT and Economic Development*, 9(2), 11.