

Kasteelpark Arenberg 40
3001 Heverlee (Leuven)

tel. 016 32 16 58
fax 016 32 19 89

Patrick.Willems@kuleuven.be

kuleuven.be/hydr

Water- en zoutbalans voor het kanaal Gent – Terneuzen

Opbouw en scenario-analyse

Uitvoerders deelstudie:

ir. Laurens Breugelmans (doctoraatsonderzoeker KU Leuven)

ir. Daan Bertels (doctoraatsonderzoeker KU Leuven)

Prof. dr. ir. Patrick Willems (coördinatie studie)

Contactpersonen opdrachtgevers:

Karen Polfliet (North Sea Port)

Gerjo Bommeljé (North Sea Port)

Eric van Zanten (Rijkswaterstaat)

Laurens Hermans (MOW - Maritieme Toegang)

Inhoud

1	Inleiding	9
1.1	<i>Doelstellingen</i>	9
1.1.1	Opstellen waterbalans	9
1.1.2	Opstellen zoutmodel	9
1.1.3	Scenario – analyse	10
1.2	<i>Opbouw van het rapport</i>	10
2	Waterbalans	11
2.1	<i>Inventarisatie van de waterstromen</i>	11
2.1.1	Instroom	12
2.1.2	Uitstroom	15
2.2	<i>Peilbeheer</i>	19
2.3	<i>Simulatie resultaten</i>	22
3	Zoutmodel	29
3.1	<i>Bestaande modellering</i>	29
3.2	<i>Beschikbare en gebruikte metingen</i>	29
3.3	<i>Methode</i>	30
3.3.1	Zoutverspreidingsmodel	30
3.3.2	Inschatting van de instromende zoutvracht in Terneuzen	32
3.3.3	Moervaart	37
3.4	<i>Resultaten</i>	37
4	Scenario – analyse	45
4.1	<i>Uitwerking scenario's</i>	45
4.1.1	Scenario 0: Basis (huidige toestand)	46
4.1.2	Scenario 2: Nieuwe sluis	51
4.1.3	Scenario 3: Nieuwe sluis + midden 2100	53
4.1.4	Scenario 4: Nieuwe sluis + hoog 2100	54
4.1.5	Scenario 5: Nieuwe sluis + midden 2100 + captatie	54
4.1.6	Scenario 6: Nieuwe sluis + hoog 2100 + captatie	54
4.2	<i>Resultaten</i>	54
4.3	<i>Discussie</i>	66
5	Besluit	67
6	Referenties	68

Lijst van figuren

Figuur 1: Situering van het kanaal Gent – Terneuzen (OpenStreetMaps)	12
Figuur 2: Validatie van het debiet ter hoogte van de stuw van Evergem	13
Figuur 3: Richting van de waterstroom bij de verschillende mogelijke schuttingen. Noord en Zuid slaat op de richting van het geschutte schip.....	16
Figuur 4: Waterpeilen (mTAW) op de Westerschelde en het kanaal Gent – Terneuzen .	17
Figuur 5: Vergelijking maandelijkse schuttingsvolumes (milj m ³)	18
Figuur 6: Te volgen regels bij spuien in mTAW; bx duidt op de beschikbaarheid van de sluizen (0 voor beschikbaar, 1 voor niet beschikbaar). De x in bx slaat op de sluis: w = west, o = oost en m = midden.	20
Figuur 7: Te volgen regels bij spuien in mNAP; bx duidt op de beschikbaarheid van de sluizen (0 voor beschikbaar, 1 voor niet beschikbaar). De x in bx slaat op de sluis: w = west, o = oost en m = midden.	20
Figuur 8: Vergelijking van de cumulatieve spuivolumes (ingeschat door KU Leuven (Model) vs RWS)	21
Figuur 9: Vergelijking van de spuivolumes per dag (ingeschat door KU Leuven (Model) vs RWS).....	22
Figuur 10: Resulterende waterbalans in milj m ³ per term en per jaar	23
Figuur 11: Stroomdiagram KGT in milj m ³ per jaar voor 2020	24
Figuur 12: Overzicht aanvoer en captaties per locatie [milj m ³ /jaar].....	25
Figuur 13: Resulterende waterbalans per halve dag (met en zonder spuien)	25
Figuur 14: Waterpeil van het kanaal Gent – Terneuzen (uitgemiddeld over een week) ..	26
Figuur 15: Validatie van het debiet te Zelzate.....	26
Figuur 16: Vergelijking waterbalans tussen natte en droge maand.....	27
Figuur 17: Stroomdiagram KGT in milj m ³ per maand voor januari 2019	28
Figuur 18: Stroomdiagram KGT in milj m ³ per maand voor september 2019.....	28
Figuur 19: Gemeten saliniteit in het kanaal Gent-Terneuzen door de TSO-meting van 8 juli 2019. De metingen worden als (*) weergegeven, hiertussen werd geïnterpoleerd. De metingen maken duidelijk dat de zoutconcentratie sterk kan variëren tussen wateroppervlak en kanaalbodem, voornamelijk dicht bij het sluisencomplex te Terneuzen.	30
Figuur 20: Gemeten saliniteit in de Moervaart op meetpuntnr. 38020 (VMM). De zwarte punten geven de opgelegde randvoorwaarde weer voor het zoutmodel.....	32
Figuur 21: Schematische voorstelling van de verschillende fases van de schutcyclus, en de verplaatste volumes: 1) het volume voor nivelleren van de kolk, 2) het volume verplaatst door de schepen en 3) de uitwisseling tussen kolk en voorhaven als gevolg van dichtheitsverschillen. Hoe hoger het zoutgehalte van het geschetste watervolume, hoe donkerder de kleur.	33
Figuur 22: Debiet van het kanaal naar de Westerschelde als gevolg van het nivelleren van de schutkolken in Terneuzen, zoals berekend in de zoutvrachtmodule (blauw) en waterbalans van het kanaal (oranje). Rechts worden de totaal verplaatste volumes over de simulatieperiode cumulatief getoond, waaruit blijkt dat de afwijking beperkt is.	35
Figuur 23: Illustratie van de verschillende componenten van het model dat de saliniteit in de Westerschelde berekent met een seizoenale component in functie van het bovendebiet in Schelle, en een getijdencomponent die een afwijking toevoegt op basis van het waterpeil en een vaste tijdsverschuiving.	36

Figuur 24: Vergelijking tussen de voorspelde(blauw) en gemeten (oranje) saliniteit op de Westerschelde in Terneuzen. De gereconstrueerde reeks die als afwaartse randvoorwaarde in het model gebruikt wordt, gebruikt enkel de voorspelde waarden voor de ontbrekende periodes in de meetreeks.....	37
Figuur 25: Locaties van de puntmetingen uit de meetnetten van Rijkswaterstaat (RWS) en de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) zoals gebruikt in de evaluatie van de modellen.	38
Figuur 26: Vergelijking tussen gemodelleerde (blauw) en gemeten (zwart) saliniteit voor de locaties in het RWS-mmeetnet. De RWS-metingen gebeuren op twee dieptes (0,25 mNAP en -4,25 mNAP)	39
Figuur 27: Percentage van de tijd dat een bepaalde saliniteit overschreden wordt volgens de simulatieresultaten (blauw) en de observaties van RWS (zwart). De twee zwarte grafieken stellen een verschillende diepte voor in de beschikbare metingen.....	39
Figuur 28: Vergelijking tussen gemodelleerde (blauw) en gemeten (zwart) saliniteit voor de locaties in het VMM-mmeetnet.	40
Figuur 29: Vergelijking van het gemodelleerde (blauw) en in de TSO-metingen geobserveerde (oranje) profiel van zoutgehalte in het kanaal. De TSO-observaties worden ook uitgemiddeld over de diepte getoond (zwart). Metingen van 2017.	41
Figuur 30: Vergelijking van het gemodelleerde (blauw) en in de TSO-metingen geobserveerde (oranje) profiel van zoutgehalte in het kanaal. De TSO-observaties worden ook uitgemiddeld over de diepte getoond (zwart). Metingen van 2018.	42
Figuur 31: Vergelijking van het gemodelleerde (blauw) en in de TSO-metingen geobserveerde (oranje) profiel van zoutgehalte in het kanaal. De TSO-observaties worden ook uitgemiddeld over de diepte getoond (zwart). Metingen van 2019.	43
Figuur 32: Validatie van de saliniteit op de Moervaart ter hoogte van de versmalling te Mendonk.....	44
Figuur 33: Schema sluisformulering bij scenario-analyse	46
Figuur 34: Vergelijking van het cumulatief schuttingsdebiet van de Middensluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse	47
Figuur 35: Vergelijking van het cumulatief schuttingsdebiet van de Oostsluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse.	48
Figuur 36: Vergelijking van het cumulatief schuttingsdebiet van de Westsluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse.....	48
Figuur 37: Vergelijking van het cumulatief spuidebiet bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse.....	49
Figuur 38: Vergelijking tussen het voorkomen van de peilen bij de schuttingen van de Middensluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse.....	50
Figuur 39: Vergelijking tussen het voorkomen van de peilen bij de schuttingen van de Oostsluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse.....	50
Figuur 40: Vergelijking tussen het voorkomen van de peilen bij de schuttingen van de Westsluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse.....	51
Figuur 41: Te volgen regels bij spuien in mTAW; bx duidt op de beschikbaarheid van de sluisen (0 voor beschikbaar, 1 voor niet beschikbaar). De x in bx slaat op de sluis: w = west, o = oost en n = nieuw.	52

Figuur 42: Te volgen regels bij spuien in mNAP; bx duidt op de beschikbaarheid van de sluizen (0 voor beschikbaar, 1 voor niet beschikbaar). De x in bx slaat op de sluis: w = west, o = oost en n = nieuw.	52
Figuur 43: Scenario resultaten voor de aanvoer naar kanaal Gent-Terneuzen	56
Figuur 44: Aantal dagen dat het aanvoer debiet lager is dan de norm van 13 m ³ /s	56
Figuur 45: Scenario resultaten voor het minimumpeil (mTAW)	57
Figuur 46: Scenario resultaten voor het minimumpeil (mNAP).....	57
Figuur 47: Scenario resultaten voor het voorkomen van lage peilen (lager dan 4,40 mTAW/2,05 mNAP).....	58
Figuur 48: Scenario resultaten voor het voorkomen van lage peilen (lager dan 4,45 mTAW/2,10 mNAP).....	58
Figuur 49: Scenario resultaten voor de gewogen peilonderschrijding	59
Figuur 50: Scenario resultaten voor het aantal dagen met stremmingen	60
Figuur 51: Gemiddelde zoutconcentratie per dag van het jaar	61
Figuur 52: P95 zoutconcentratie per dag van het jaar. P95 duidt op de waarde die slechts in 5% van de tijd wordt overschreden.	62
Figuur 53: Percentielen van de zoutconcentratie voor verschillende locaties en scenario's. Scenario Basis (volle zwarte lijn), scenario Nieuwe sluis (stippellijn) en scenario's Nieuwe sluis - midden 2100 - captatie en Nieuwe sluis - hoog 2100 – captatie (rode band met midden de ondergrens en hoog de bovengrens).....	63
Figuur 54: Verloop van de maximale zoutconcentratie doorheen het kanaal bij een terugkeerperiode van 1 jaar	63
Figuur 55: Verloop van de maximale zoutconcentratie bij een terugkeerperiode van 2 jaar	64
Figuur 56: Verloop van de maximale zoutconcentratie bij een terugkeerperiode van 4,6 jaar	64
Figuur 57: Verloop van de maximale zoutconcentratie bij een terugkeerperiode van 11,5 jaar	65
Figuur 58: Verloop van de maximale zoutconcentratie bij een terugkeerperiode bij een terugkeerperiode van 23 jaar	65

Lijst van tabellen

Tabel 1: Jaarvolumes voor de stuw van Evergem	13
Tabel 2: Jaarvolumes voor de sluizen van Evergem	13
Tabel 3: Jaarvolumes voor de RWZI's (totaal)	14
Tabel 4: Jaarvolumes voor de bedrijfslozingen.....	14
Tabel 5: Jaarvolumes voor de Moervaart	15
Tabel 6: Jaarvolumes voor de neerslagafstroming	15
Tabel 7: Jaarvolumes voor de neerslag	15
Tabel 8: Kolkoppervlakte per sluis	16
Tabel 9: Jaarvolumes voor de sluizen van Terneuzen	17
Tabel 10: Jaarvolumes voor de bedrijfscaptaties	18
Tabel 11: Jaarvolumes voor de (pan)evaporatie	18
Tabel 12: Jaarvolumes voor het spuien in Terneuzen	21
Tabel 13: Opgelegde randvoorwaarden voor het zoutmodel.....	32
Tabel 14: Beschrijving van de randvoorwaarden in de scenarioversie	45
Tabel 15: Gemiddeld aantal schuttingen per dag (Scenario 1)	46
Tabel 16: Variabelen scenario 2	51
Tabel 17: Gemiddeld aantal schuttingen per dag (Scenario 2)	51

Afkortingen

DVW	= De Vlaamse Waterweg
KGT	= Kanaal Gent – Terneuzen
KMI	= Koninklijk Meteorologisch Instituut
KUL	= KU Leuven
MS	= Middensluis
NSE	= Nash Sutcliffe Efficiency
NSP	= North Sea Port
NST	= Nieuwe Sluis Terneuzen
OS	= Oostsluis
RWS	= Rijkswaterstaat
RWZI	= Rioolwaterzuiveringsinstallatie
VMM	= Vlaamse Milieu Maatschappij
VNSC	= Vlaams-Nederlands Scheldec commissie
WS	= Westsluis

1 Inleiding

1.1 Doelstellingen

Het Kanaal Gent – Terneuzen verbindt de stad Gent met de Westerschelde in Terneuzen, dit is vooral erg belangrijk voor de haven van Gent die op deze manier rechtstreeks verbonden is met de zee. De haven van Gent vormt samen met die van Terneuzen en Vlissingen North Sea Port (NSP). In opdracht van NSP i.s.m. de Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie (VNSC) werd aan de afdeling Hydraulica en Geotechniek van de KU Leuven (KUL) gevraagd een waterbalans- en zoutmodel te bouwen van het kanaal Gent – Terneuzen (KGT). Dit model wordt daarna aangewend voor het doorrekenen van verschillende scenario's omtrent de water- en zoutbalans in dit studiegebied. De opdracht bestaat uit drie deeltaken die hieronder verder worden besproken.

1.1.1 Opstellen waterbalans

De opmaak van de waterbalans is gebaseerd op een inventarisatie van alle in- en uitgaande waterstromen vertrekkende vanuit Gent tot aan het sluisencomplex van Terneuzen. Op basis van de waterbalans kan ook het KGT-peil gesimuleerd worden en kan het peilbeheer gemodelleerd worden zodat dit flexibel kan reageren op nieuwe situaties in de verschillende scenario's. De gegevens zijn in hoofdzaak afkomstig van NSP, De Vlaamse Waterweg (DVW), MOW - Maritieme Toegang en Rijkswaterstaat (RWS).

1.1.2 Opstellen zoutmodel

Het zoutmodel beschrijft anderzijds welke zoutvracht het kanaal bereikt vanuit de Westerschelde, en hoe dit zout zich verder opwaarts verplaatst, in functie van de opwaartse debieten en operaties aan de sluisen. Dit model kan dan meer inzicht verschaffen in de huidige toestand en de basis vormen voor latere, meer geavanceerde modelleringen indien vereist. Daarnaast laat het ontwikkelde model toe om een scenarioanalyse uit te voeren van de effecten van veranderende randvoorwaarden, zoals verminderde opwaartse aanvoer, en van aanpassingen en alternatieve bediening van het spui- en sluisencomplex en veranderende scheepvaarttrafiek te Terneuzen.

1.1.3 Scenario – analyse

Het model zal worden aangewend voor de doorrekening van enkele scenario's. In samenspraak met de opdrachtgevers werden onderstaande zes scenario's weerhouden:

- Scenario 1: dit is het basisscenario dat de huidige toestand beschrijft
- Scenario 2: de nieuwe sluis in Terneuzen is in werking
- Scenario 3: de nieuwe sluis in Terneuzen is in werking en voor het klimaat wordt een midden impact 2100 scenario gebruikt
- Scenario 4: de nieuwe sluis in Terneuzen is in werking en voor het klimaat wordt een hoog impact 2100 scenario gebruikt
- Scenario 5: de nieuwe sluis in Terneuzen is in werking, voor het klimaat wordt een midden impact 2100 scenario gebruikt en er wordt een toename van de industriële captaties ingerekend
- Scenario 6: de nieuwe sluis in Terneuzen is in werking, voor het klimaat wordt een hoog impact 2100 scenario gebruikt en er wordt een toename van de industriële captaties ingerekend

1.2 Opbouw van het rapport

Dit rapport focust eerst op de waterbalans, die de basis vormt voor het zoutmodel. In hoofdstuk 2 wordt die waterbalans behandeld waarbij er eerst een uitgebreide inventarisatie volgt van alle aanwezig waterstromen op het KGT in sectie 2.1. Dit wordt dan gevolgd door een gedetailleerde beschrijving van het peilbeheer in sectie 2.2 en de resultaten in sectie 2.3 .

Hoofdstuk 3 bespreekt de bouw van het zoutmodel waarbij wordt gestart met een overzicht van de bestaande modellering in sectie 3.1, waarna ook de beschikbare metingen (sectie 3.2) en de methode (sectie 3.3) aan bod komen. De simulatieresultaten in sectie 3.4 sluiten dit hoofdstuk af.

Hoofdstuk 4 bespreekt de scenario-analyse waarbij er eerst dieper ingegaan zal worden op de uitwerking van de scenario's (sectie 4.1) en vervolgens ook de resultaten worden besproken (sectie 4.2).

Een algemeen besluit kan teruggevonden worden in hoofdstuk 5.

2 Waterbalans

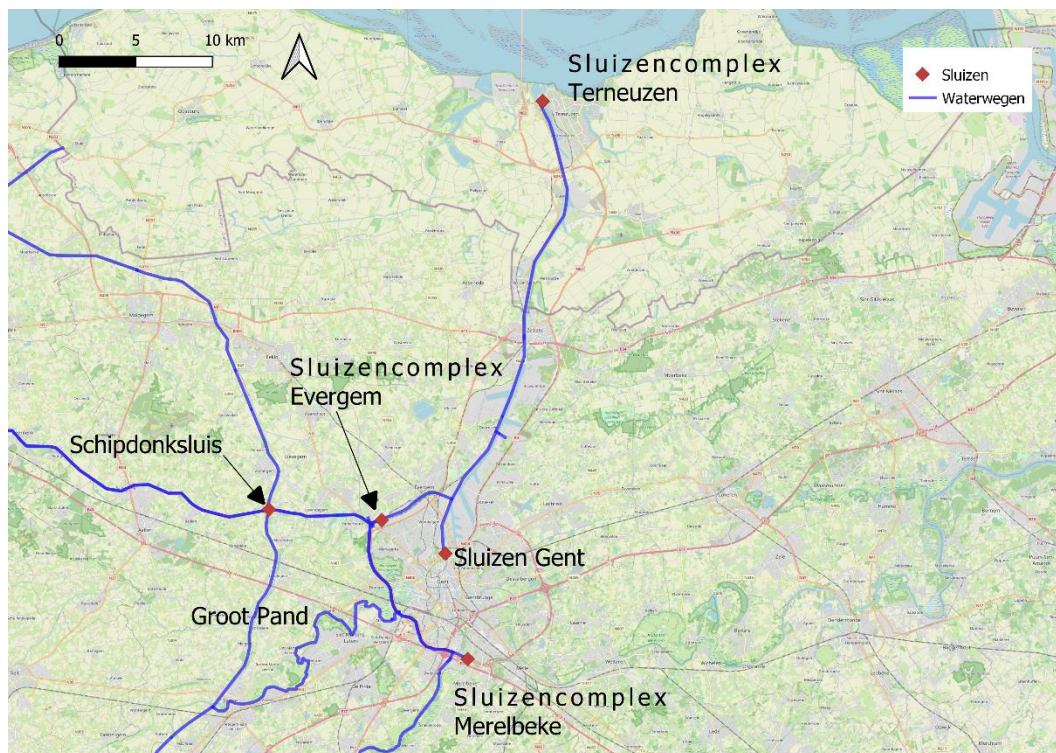
2.1 Inventarisatie van de waterstromen

Het KGT vertrekt vanaf de Ringvaart in Gent en loopt zo verder afwaarts richting de Westerschelde in Terneuzen (zie Figuur 1). Vermits het waterbalansmodel op pandniveau werd ontwikkeld, behoren naast het eigenlijke kanaal ook alle andere waterwegen die ermee in open verbinding staan tot het studiegebied. Dit betekent dat het studiegebied start aan het sluisencomplex van Evergem die het studiegebied verbindt met het Groot Pand. Het sluisencomplex van Evergem bestaat naast twee sluisen ook uit een stuw. Het studiegebied is ook verbonden met de Leie en Bovenschelde in de binnenstad van Gent via onder andere de Tolhuisstuw. Dit complex van sluisen en stuwen zal vanaf hier worden aangeduid met 'sluisen Gent'. Merk op dat het gebied opwaarts van de sluisen te Evergem en de sluisen in de Gent deel uitmaakt van het Groot Pand dat zich uitstrekt tot in Brugge, Machelen en Gavere.

De Leie en Bovenschelde ontspringen beide in Frankrijk en stromen via respectievelijke Menen en Helkijn Vlaanderen binnen. Meer afwaarts zijn beide rivieren met elkaar verbonden via het kanaal Bossuit-Kortrijk waarna afwaarts op de Leie er ook nog een aftakking is naar Roeselare (kanaal Roeslare-Leie). Ten slotte mondt de Leie in Gent (Groot Pand) uit in de Schelde waarna deze laatste verder stroomt richting Antwerpen en de zee.

De afwaartse rand van het studiegebied bevindt zich aan het sluisencomplex in Terneuzen (Westerschelde). De Moervaart staat ook in open verbinding met het kanaal en zal tot Mendonk mee worden gemodelleerd. In totaal bestrijkt het studiegebied een oppervlakte van 10,91 miljoen m² aan open water (bron: NSP). Het streefpeil van het kanaal is gelijk aan 4,45 mTAW of 2,10 mNAP (Rijkswaterstaat, 2017).

Het kanaal wordt verder gekenmerkt door een aantal belangrijke waterstromen aan de opwaartse rand in Gent en eveneens een aantal grote waterstromen aan de afwaartse rand in Terneuzen. Daartussen bevinden zich enkele kleinere waterstromen zoals de instroom vanuit de Moervaart en captaties en lozingen van bedrijven. De waterbalans is opgesteld voor de periode 1/01/2017 – 1/11/2022, merk dus op dat 2022 niet volledig gesimuleerd is wegens het ontbreken van voldoende data op het moment van opmaak.



Figuur 1: Situering van het kanaal Gent – Terneuzen (OpenStreetMaps)

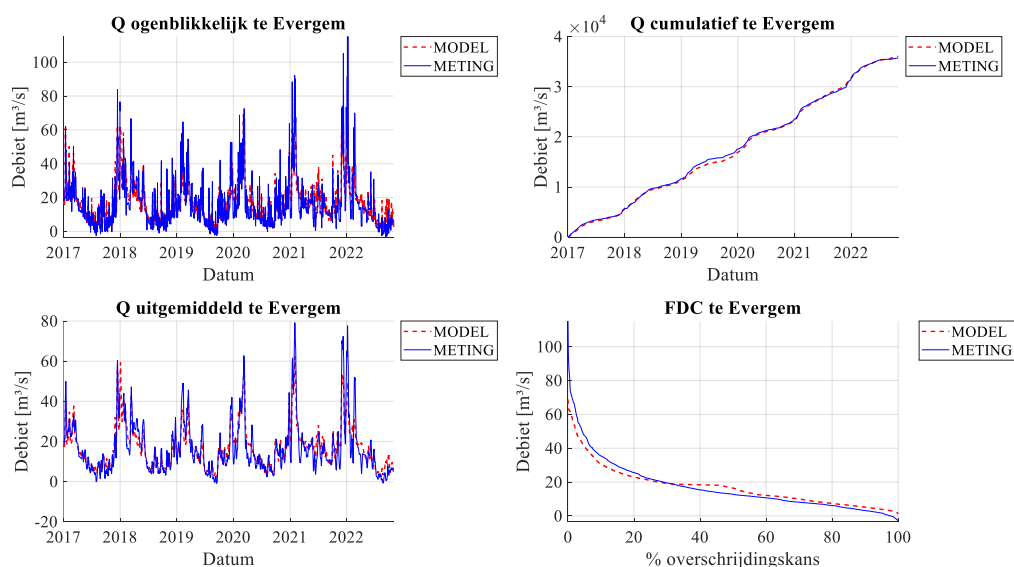
2.1.1 Instroom

De instroom van water in het KGT bestaat uit de volgende termen:

- Stuw van Evergem
- Sluizen van Evergem
- Sluizen Gent
- RWZI lozingen
- Bedrijfslozingen
- Moervaart
- Andere neerslagafstroming (o.a. Avrijevaart)

Stuw van Evergem

Indien het debiet op de Leie en Schelde te groot wordt en er dus een overschot aan water is op het Groot Pand wordt onder andere de stuw in Evergem aangewend om water naar KGT af te voeren (in samenspraak met de operatoren van het sluizencomplex in Terneuzen). Deze waterstroom werd reeds gemodelleerd en gevalideerd in opdracht van DVW. In Figuur 2 is de validatie terug te vinden waaruit blijkt dat er een zeer goede simulatie van deze waterstroom volgt uit het model. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de volumes per jaar die via de stuw het kanaal binnenstromen.



Figuur 2: Validatie van het debiet ter hoogte van de stuw van Evergem

Tabel 1: Jaarvolumes voor de stuw van Evergem

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	493,19
2018	541,35
2019	479,79
2020	559,89
2021	720,10
2022 ¹	375,16

Sluizen van Evergem

Op basis van de aangeleverde schuttingsregistraties door DVW zijn de schuttingsdebieten berekend per dag. Gemiddeld genomen is er een dagelijks debiet van 1,67 m³/s dat op deze manier naar het kanaal stroomt. Dit debiet kan echter ook oplopen tot 3,55 m³/s. Tabel 2 geeft een overzicht van de jaarvolumes die langs deze weg het kanaal binnenstromen.

Tabel 2: Jaarvolumes voor de sluizen van Evergem

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	52,80
2018	43,66
2019	47,77
2020	58,19
2021	59,49
2022	44,87

¹ 2022 werd niet volledig gesimuleerd daarenboven was er een beperkte spuicapaciteit door de werken aan het sluizencomplex in Terneuzen

Sluizen Gent

Daar er geen metingen beschikbaar zijn van het debiet doorheen het sluizen- en stuwencomplex in de Gent is er op basis van overleg met DVW een constant debiet van 2 m³/s aangenomen dat vanuit het Groot Pand via de sluizen en stuwen naar het kanaal stroomt. Op jaarbasis geeft dit een volume van 63,07 miljoen m³.

RWZI lozingen

Er zijn twee rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) gelokaliseerd aan de rand van het kanaal; één in Evergem en ook één in Zelzate. Aquafin registreert de dagelijkse volumes die deze RWZI's in het kanaal lozen en stelde deze informatie ter beschikking. Het gemiddelde jaarvolume bedraagt in totaal 4,59 miljoen m³, al is er natuurlijk wel wat fluctuatie over de jaren heen zoals in Tabel 3 getoond.

Tabel 3: Jaarvolumes voor de RWZI's (totaal)

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	5,12
2018	4,79
2019	3,87
2020	4,21
2021	4,97
2022	3,17

Bedrijfslozingen

De ingerekende bedrijfslozingen bevinden zich allemaal op het Vlaamse gedeelte van het kanaal; RWS gaf namelijk aan dat het niet toegelaten is netto water te capteren op het Nederlandse gedeelte waardoor eventuele lozingen steeds gecompenseerd worden door een even grote captatie. Er zijn bij vier instanties gegevens opgevraagd over de bedrijfslozingen: DVW, NSP, VMM en Maritieme Toegang.

Dit leidt uiteindelijk tot een totale bedrijfslozing van gemiddeld 87,3 miljoen m³ per jaar. Dit blijft ook vrij constant doorheen de jaren zoals getoond in Tabel 4.

Tabel 4: Jaarvolumes voor de bedrijfslozingen

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	92,67
2018	91,62
2019	90,33
2020	82,36
2021	79,52
2022	68,59

Moervaart

De Moervaart stroomt ter hoogte van het Rodenhuizedok in het kanaal; het verbindt het kanaal met de rivier de Durme en wordt enkel voor pleziervaart gebruikt (Moervaart en Durme, 2022). De instroom vanuit de Moervaart wordt gesimuleerd aan de hand van herschaalde debietsmetingen (WATERINFO.be). Het jaarvolume vertoont soms een sterke fluctuatie. Vooral 2019 valt hierbij op als een jaar met een lage instroom vanuit de Moervaart (zie Tabel 5).

Tabel 5: Jaarvolumes voor de Moervaart

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	57,63
2018	53,29
2019	40,09
2020	51,65
2021	82,11
2022	26,35

Neerslagafstroming

Net zoals de Moervaart zijn er nog andere gebieden die naar KGT afvoeren, onder meer de Avrijevaart is zo'n afstroomgebied. De afvoer ervan naar het kanaal is gegroepeerd in één term wat resulteert in de jaarvolumes zoals getoond in Tabel 6.

Tabel 6: Jaarvolumes voor de neerslagafstroming

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	47,71
2018	43,63
2019	32,83
2020	39,05
2021	61,76
2022	18,35

Neerslag

De neerslag die rechtstreeks in het kanaal valt wordt ook ingerekend, hiervoor wordt het meetpunt te Ertvelde gebruikt. De jaarvolumes zijn getoond in Tabel 7.

Tabel 7: Jaarvolumes voor de neerslag

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	8,70
2018	7,22
2019	8,26
2020	8,34
2021	9,84
2022	5,62

2.1.2 Uitstroom

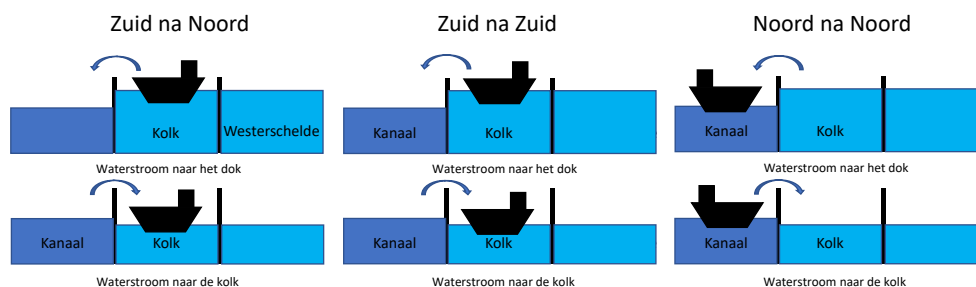
De uitstroom wordt gedomineerd door het sluiscomplex van Terneuzen waar er zowel via schutten als via spuien water het studiegebied verlaat. Het spuien valt onder het peilbeheer en zal in sectie 2.2 verder worden toegelicht. De andere uitstromen zijn:

- Sluizen van Terneuzen
- Bedrijfsceptaties
- Evaporatie

Een eventuele interactie met grondwater is bestudeerd, maar uit de beschikbare gegevens kon geen éénduidige conclusie getrokken worden. Daarom is besloten om de interactie met het grondwater in deze studie niet in te rekenen.

Sluizen van Terneuzen

Door RWS zijn de schuttingsregistraties aangeleverd voor de periode 2017-2022 voor zowel de Middensluis (MS), Westsluis (WS) en Oostsluis (OS). Op basis van deze schuttingsregistraties is het mogelijk een uitgewisseld volume tussen kanaal en Westerschelde te bepalen per schutting. Afhankelijk van het waterpeil van de Westerschelde (hoger of lager dan het kanaalpeil) zal dit een volume zijn dat naar het kanaal stroomt of een volume dat naar de Westerschelde stroomt. De verschillende mogelijkheden afhankelijk van de richting van de huidige schutting en de vorige schutting zijn gegeven in Figuur 3. De mogelijkheid Noord (richting Westerschelde) na Zuid (richting kanaal) is hierbij niet gegeven omdat het kanaalpeil op korte termijn meestal vrij constant blijft en er dus amper een waterstroom aanwezig is, maar in de berekeningen wordt hiermee wel degelijk rekening gehouden. De scheepsvolumes zijn onbekend en dus wordt deze term verwaarloosd.



Figuur 3: Richting van de waterstroom bij de verschillende mogelijke schuttingen. Noord en Zuid slaat op de richting van het geschutte schip.

De geschutte volumes worden bepaald door het te nivelleren peilverschil tussen kanaal en Westerschelde te vermenigvuldigen met de kolkoppervlakte. De gebruikte kolkoppervlaktes kunnen in Tabel 8 worden teruggevonden.

Tabel 8: Kolkoppervlakte per sluis

Westsluis	Middensluis	Oostsluis
11600 m ²	3360 m ²	6720 m ²

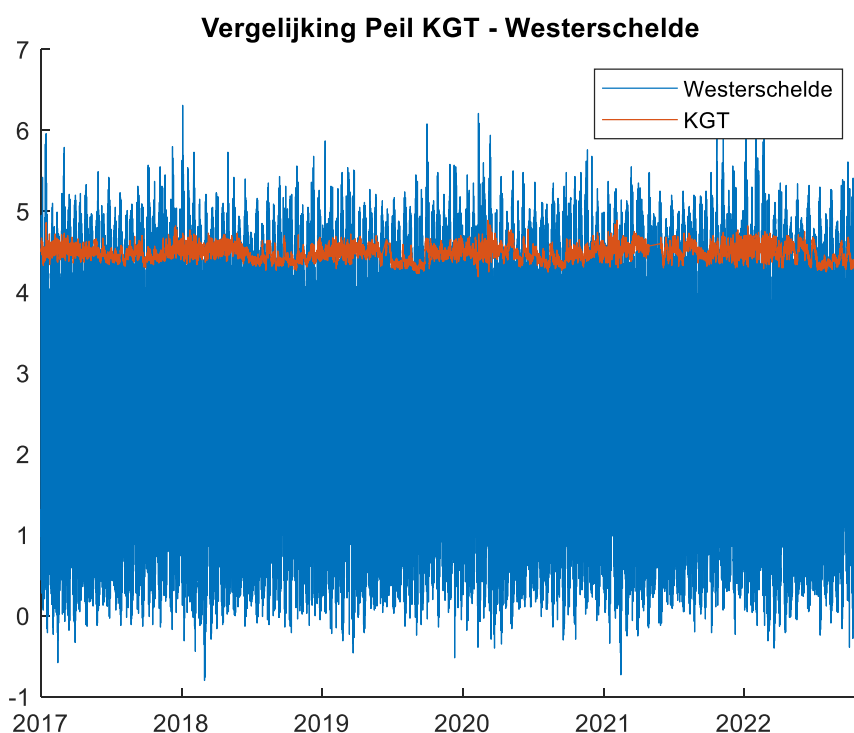
In de periode maart – juni 2019 werden de schuttingen fout geregistreerd; de meeste schuttingen werden namelijk toegewezen aan de Oostsluis terwijl dit niet het geval was. Dit kwam naar voren uit overleg met studiebureau HKV dat reeds een onderzoek had uitgevoerd op de schuttingsregistraties. Er kan aangenomen worden dat de geregistreerde schuttingen wel degelijk plaatsvonden. Dit is als volgt gecorrigeerd:

- Schuttingen met zeeschepen worden toegewezen aan de Westsluis
- De overige schuttingen met schepen worden op basis van een algemene factor willekeurig toegewezen aan de Oost- of Middensluis
- De lege schuttingen worden op basis van een algemene factor willekeurig toegewezen aan de West-, Oost- of Middensluis

Zoals te zien in Figuur 5 geeft dit vergelijkbare resultaten als voor dezelfde periode in 2017 en 2018. Derhalve wordt deze correctie als vrij betrouwbaar ingeschat al dient deze periode steeds extra kritische bekeken te worden.

Op jaarbasis zorgen de schuttingen voor een verlies van ongeveer 190 miljoen m³ aan water voor het kanaal. Dit is een logisch gevolg van het feit dat het waterpeil van de Westerschelde ongeveer 90% van de tijd lager staat dan het kanaalpeil zoals getoond in Figuur 4. De jaarvolumes kunnen teruggevonden worden in Tabel 9.

Belangrijk om te vermelden is dat de Middensluis sinds 1/10/2021 niet langer gebruikt wordt voor schuttingen in het kader van de bouw van de Nieuwe sluis en dat vanaf 26/09/2022 de mogelijkheid om te spuien via deze sluis niet langer mogelijk was.

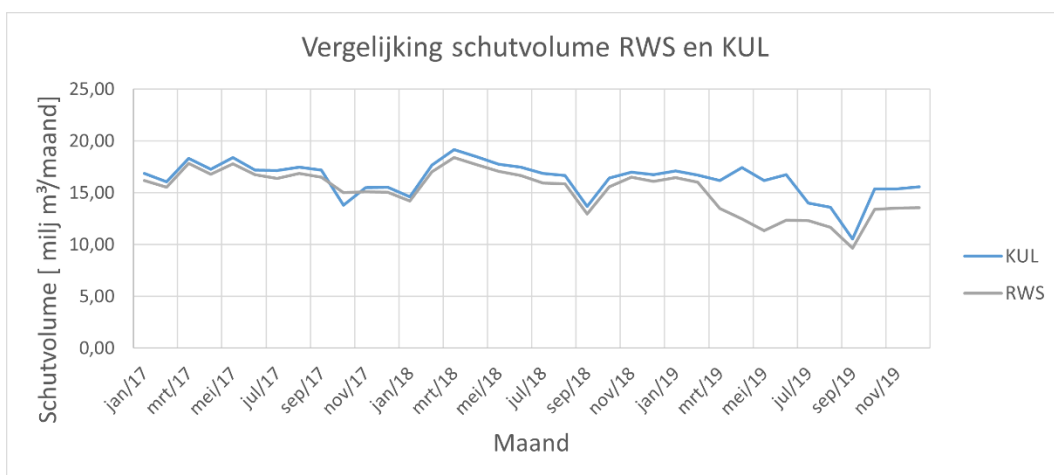


Figuur 4: Waterpeilen (mTAW) op de Westerschelde en het kanaal Gent – Terneuzen
Tabel 9: Jaarvolumes voor de sluisen van Terneuzen

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	200,70
2018	202,48
2019	184,81
2020	182,72
2021	182,63
2022	133,23

Naast de schuttingsregistraties leverde RWS ook berekende schuttingsvolumes per dag aan. De berekening en aannames achter deze waarden zijn echter niet meer te reconstrueren. Figuur 5 toont een vergelijking tussen de berekende maandelijkse schuttingsvolumes van RWS en KUL. Hieruit blijkt dat er een vrij goede overeenstemming is in 2017 en 2018. In 2019 is de overeenstemming duidelijk minder, maar dit valt te verklaren door het verkeerd registreren van de schuttingen.

Merk op dat er in september 2019 een significante daling optreedt van het schuttingsverlies, dit komt door het nemen van maatregelen (zoals gegroepeerd schutten) om het watertekort op het kanaal te compenseren. De waterbesparing die hiermee gepaard gaat bedraagt enkele miljoenen m³ water wanneer vergeleken wordt met bijvoorbeeld september 2017.



Figuur 5: Vergelijking maandelijkse schuttingsvolumes (milj m³)

BedrijfsCaptaties

Net zoals bij de bedrijfslozingen zijn er gegevens aangeleverd door DVW, NSP en Maritieme Toegang; dit resulteert in de jaarvolumes in Tabel 10. De netto captatie per jaar, captatie min lozing, bedraagt dus ongeveer 1 miljoen m³ al zit hier wel wat fluctuatie op.

Tabel 10: Jaarvolumes voor de bedrijfsCaptaties

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	93,94
2018	93,44
2019	90,91
2020	85,36
2021	78,50
2022	71,10

Evaporatie

Op basis van gegevens van het KMI is de (pan)evaporatie uit het kanaal ingerekend. Dit is een kleinere term in vergelijking met de overige termen zoals te zien in Tabel 11.

Tabel 11: Jaarvolumes voor de (pan)evaporatie

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	10,80
2018	13,30
2019	12,80
2020	11,52
2021	10,22
2022	13,44

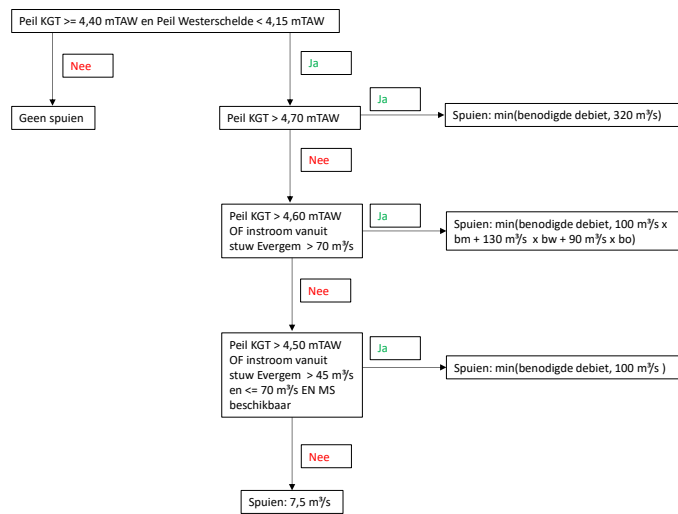
2.2 Peilbeheer

Naast de basis aanvoer die nodig is voor het terugdringen van de zoutlast en ter compensatie van het schutverlies in Terneuzen, gebeurt het vaak dat door de grote aanvoer van water vanuit Gent er een overschot aan water op het KGT is. Dit dient afgevoerd te worden via de sluizen van Terneuzen door middel van spuien. Er zijn echter verschillende soorten spuien te onderscheiden (Rijkswaterstaat, 2017):

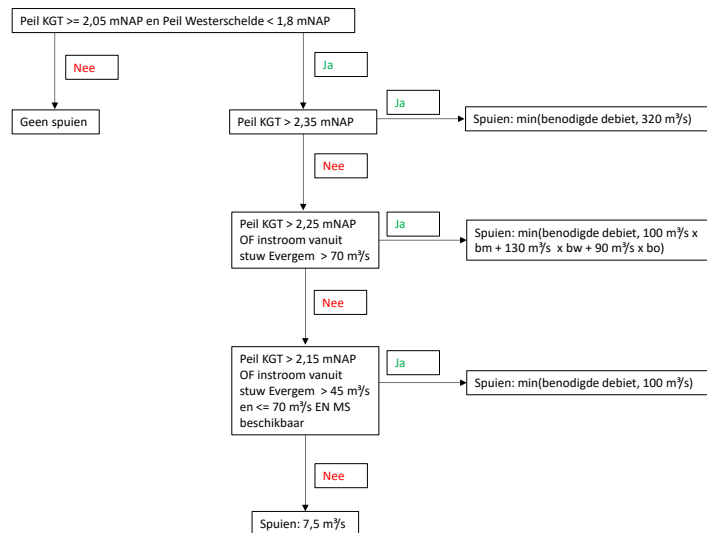
- Uitwisselingsspuien: spuien ter hoogte van de Westsluis tijdens het openstaan van de binnendeuren.
- Continu spuien: dit is het spuien ter hoogte van de Westsluis dat noodzakelijk is om het zoutwater terug te dringen dat niet door het uitwisselingsspuien werd weggespoeld.
- Overtollig water spuien: dit is spuien om het kanaalpeil te verlagen en kan gebeuren aan alle drie de sluizen:
 - o Eerst via de middensluis met een debiet van ongeveer 100 m³/s;
 - o Indien noodzakelijk kan ook de Westsluis worden ingeschakeld met een debiet van 130 m³/s;
 - o Als laatste kan ook de Oostsluis worden ingeschakeld met nog eens een extra debiet van 90 m³/s.

Er kan enkel gespuid worden als het peil op de Westerschelde lager is dan 4,15 mTAW (1,80 mNAP) en het kanaalpeil hoger is dan 4,40 mTAW (2,05 mNAP) (Luijsterburg & Schiepers, 2020). Continu- en uitwisselingsspuien wordt geregeld door de spuicomputer. Dit is een programma dat automatisch de opgebouwde zoutschuld berekent en dit vertaalt naar een hoeveelheid terug te spuien water en dit dan ook uitvoert. Het spuien van overtollig water daarentegen wordt manueel geregeld door de operatoren. Dit maakt een modellering van het spuien zeer moeilijk, daarom is er geopteerd om een set van regels te ontwerpen die zo dicht mogelijk de gemeten waterpeilen benaderd. Voor het gemeten kanaalpeil is de meting te Sluiskil gebruikt. De correlatie en Nash-Sutcliffe efficiëntie (NSE) zijn gebruikt als indicator voor de accuraatheid van het model. Voor de kalibratieperiode 2017-2020 kwam de set van regels in Figuur 6 en Figuur 7 als beste naar voren uit 81 mogelijke combinaties met een correlatie van 0.72 en een NSE van 0.49. Gezien de vrij complexe sturing van het spuien door zowel de spuicomputer als de operatoren en de werkelijke sturing dus niet gekend is, is dit een goede benadering.

Er zijn twee punten die belangrijk zijn om te vermelden. Allereerst wordt er bij sommige stappen rekening gehouden met de beschikbaarheid van de sluizen. Dit houdt in dat een sluis enkel beschikbaar is als er geen schutting plaatsvindt op dat moment. In dat geval worden voor de validatie van het model de historische schuttingsregistraties gebruikt. Ten tweede wordt er in het geval het waterpeil hoog genoeg is er steeds een basisdebiet van 7,5 m³/s wordt gespuid, dit is om rekening te houden met het frequent spuien dat door de spuicomputer wordt bepaald.



Figuur 6: Te volgen regels bij spuien in mTAW; bx duidt op de beschikbaarheid van de sluisen (0 voor beschikbaar, 1 voor niet beschikbaar). De x in bx slaat op de sluis: w = west, o = oost en m = midden.



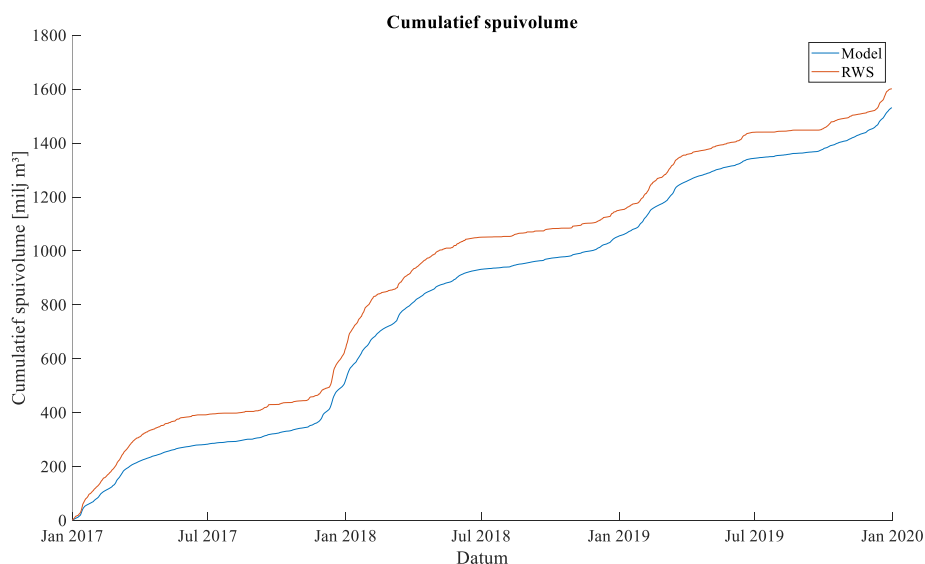
Figuur 7: Te volgen regels bij spuien in mNAP; bx duidt op de beschikbaarheid van de sluisen (0 voor beschikbaar, 1 voor niet beschikbaar). De x in bx slaat op de sluis: w = west, o = oost en m = midden.

In Tabel 12 zijn de jaarvolumes voor het spuien samengevat. Qua grootteorde is dit vergelijkbaar met de instroom via de stuw van Evergem. Enkel voor 2021 is er een zeer opvallend stijging, maar dit lijkt toegewezen te kunnen worden aan de overvloedige neerslag van dat jaar.

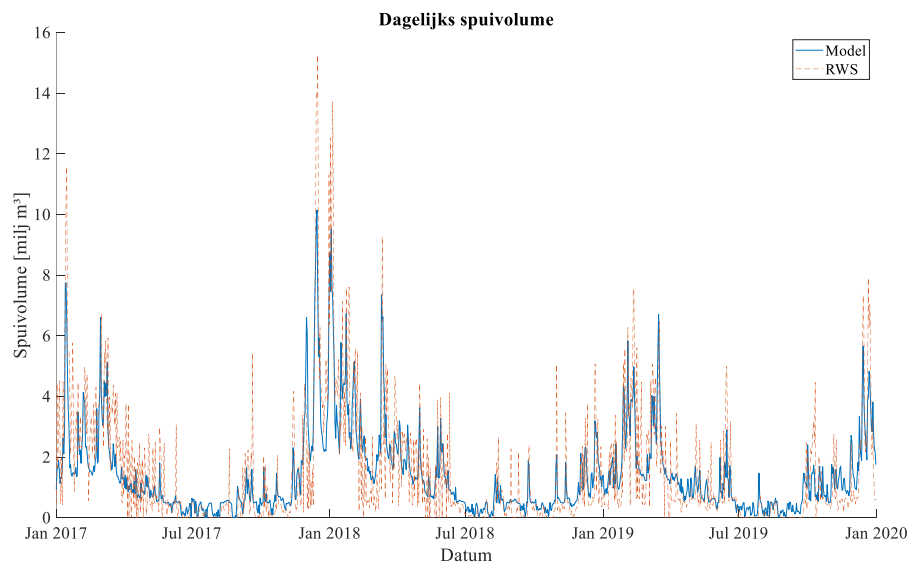
Tabel 12: Jaarvolumes voor het spuien in Terneuzen

Jaar	Volume [milj m ³]
2017	514,01
2018	540,30
2019	477,52
2020	587,31
2021	809,45
2022	377,99

Ook van het spuien zijn door RWS berekende volumes per dag beschikbaar gesteld. Ook hiervan zijn de berekening en aannames niet meer te achterhalen. In Figuur 8 en Figuur 9 is een vergelijking gemaakt tussen de berekende waarden van RWS en de berekening door KU Leuven i.k.v. deze studie. Het valt op dat er bij momenten grotere verschillen zijn, maar over het algemeen zijn ze gelijkend. De grootste verschillen komen voor bij de piekdebieten die bij de berekening van RWS duidelijk hoger zijn. Daarentegen is het verloop in Figuur 9 van beide berekeningen erg gelijkend met significant meer spuien in de winter dan in de zomer.



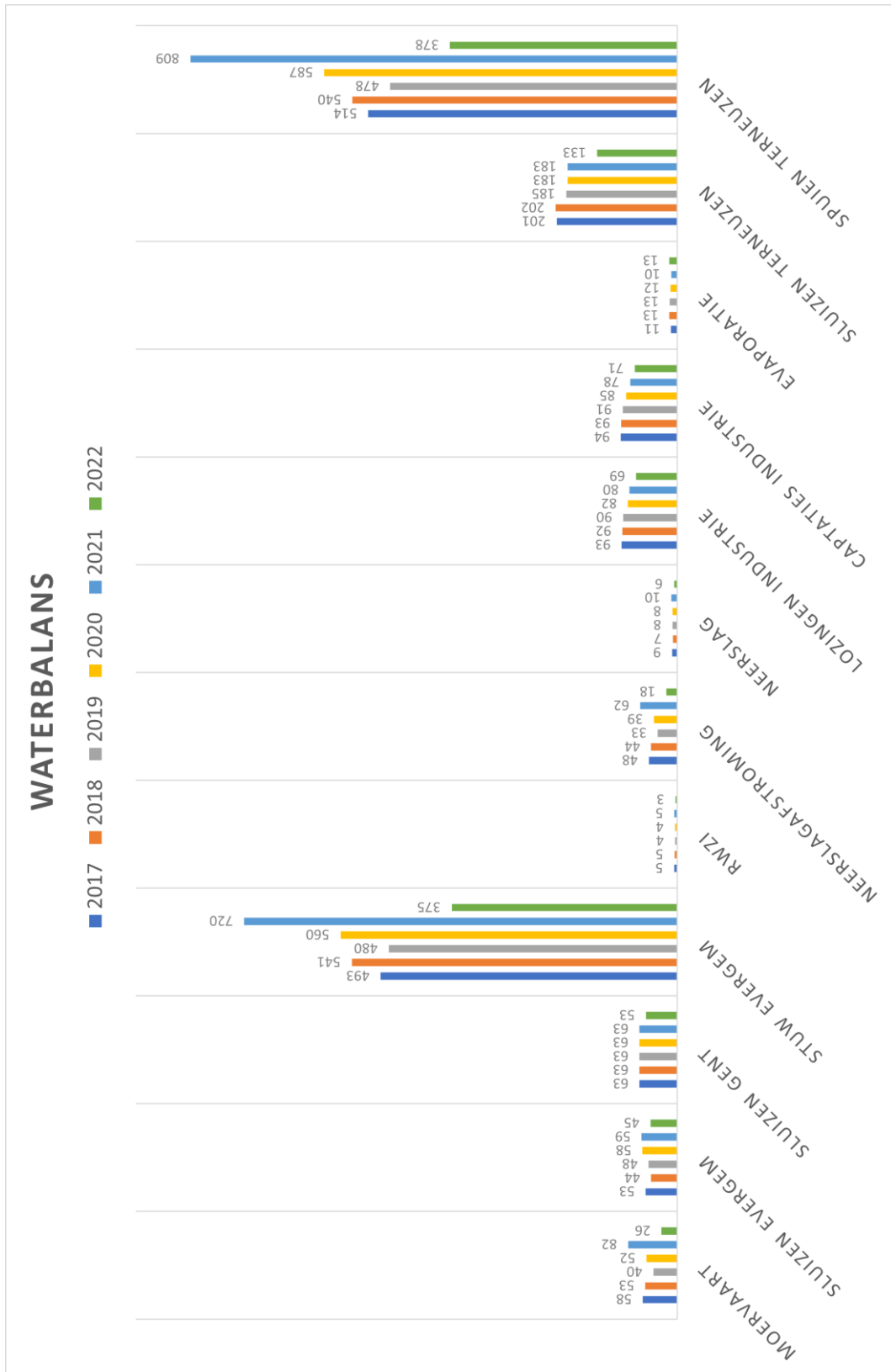
Figuur 8: Vergelijking van de cumulatieve spui volumes (ingeschat door KU Leuven (Model) vs RWS)



Figuur 9: Vergelijking van de spuibolumes per dag (ingeschat door KU Leuven (Model) vs RWS)

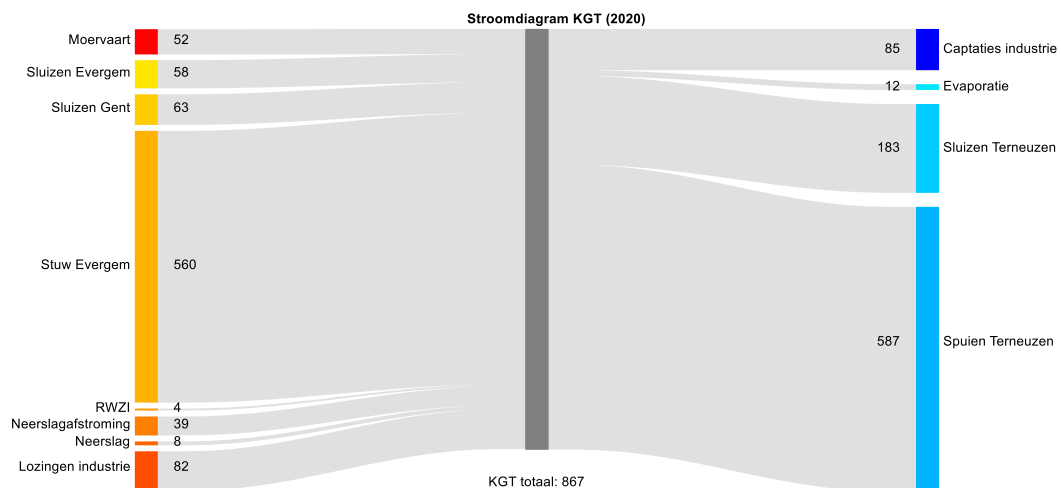
2.3 Simulatieresultaten

Wanneer de balanstermen zoals beschreven in de vorige secties met elkaar worden vergeleken, valt onmiddellijk op dat de belangrijkste waterstromen het spuien en de aanvoer via de stuw van Evergem zijn (zie Figuur 10). Ook de sluisen van Terneuzen en de bedrijfslozingen en -captaties zijn relatief grote waterstromen, al dient bij die laatste twee wel de nuance gemaakt te worden dat deze van elkaar afgetrokken dienen te worden om de netto captatie te bekomen.



Figuur 10: Resulterende waterbalans in milj m³ per term en per jaar

Figuur 11 geeft voor het jaar 2020 het stroomdiagram van de waterbalans van KGT. Hierin is duidelijk te zien hoe dat de belangrijkste instroom de stuw van Evergem is, daarnaast valt op dat de instroom vrij divers is in tegenstelling tot de uitstroom die gedomineerd wordt door het sluisencomplex van Terneuzen (zowel schutten als spuien).



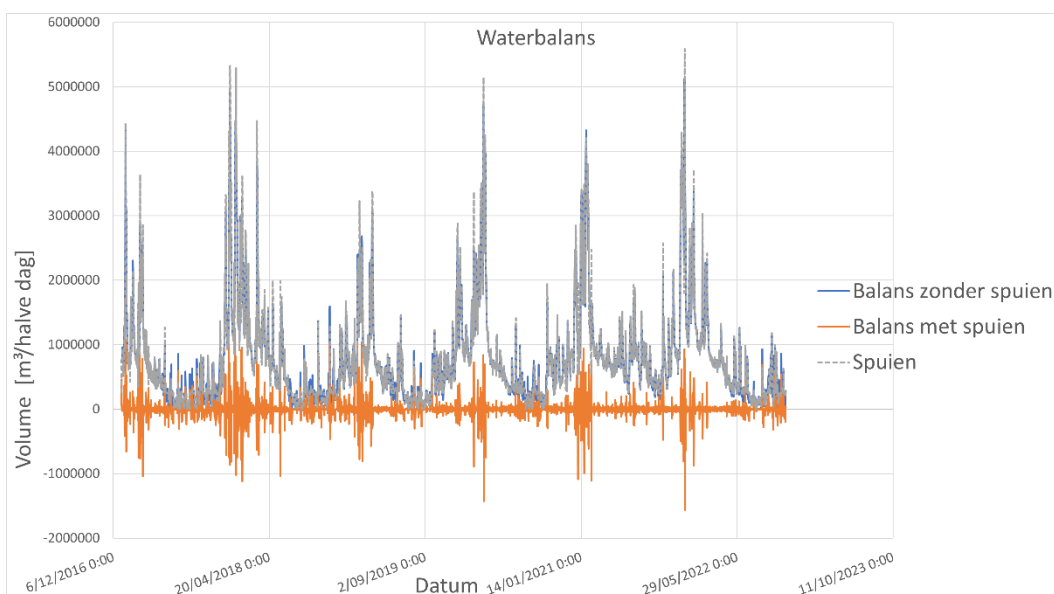
Figuur 11: Stroomdiagram KGT in milj m³ per jaar voor 2020

Figuur 12 geeft een ruimtelijk overzicht van de waterbalans van KGT. De volumes zijn een gemiddelde op basis van de jaren 2017-2021. Bedrijfslozingen en -captaties zijn hierbij samengeteld tot een netto captatie/lozing. Het valt onmiddellijk op dat de aanvoer van water naar het kanaal verspreid zit over het gehele Vlaamse gedeelte van het kanaal, maar dat de afvoer/captatie voornamelijk geconcentreerd is aan het sluisencomplex van Terneuzen.

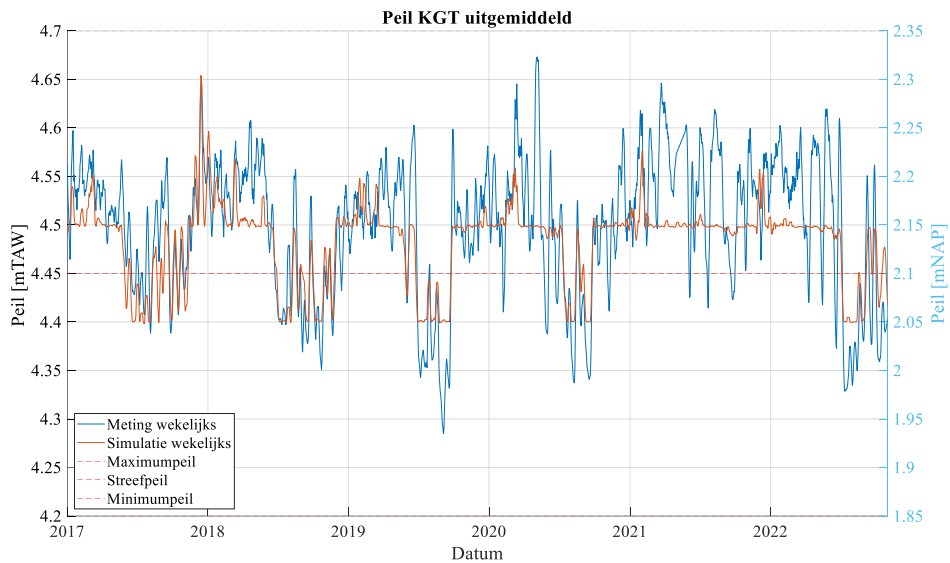


Figuur 12: Overzicht aanvoer en captaties per locatie [milj m³/jaar]

Daar het spuien zo'n grote waterstroom is impliceert dit dat er zonder het spuien een groot overschot aan water aanwezig is op het kanaal Gent – Terneuzen. Dit komt ook duidelijk naar voren in Figuur 13. In de winter zijn er grote overschotten aan water die gecompenseerd dienen te worden door grote spuivolumes. Uitschieters tot enkele miljoenen m³ per dag zijn hierbij niet uitzonderlijk. In de zomer daarentegen is er veel minder water op overschot en wordt er dus ook minder gespuid (deze conclusie kwam reeds naar voren in Figuur 9).



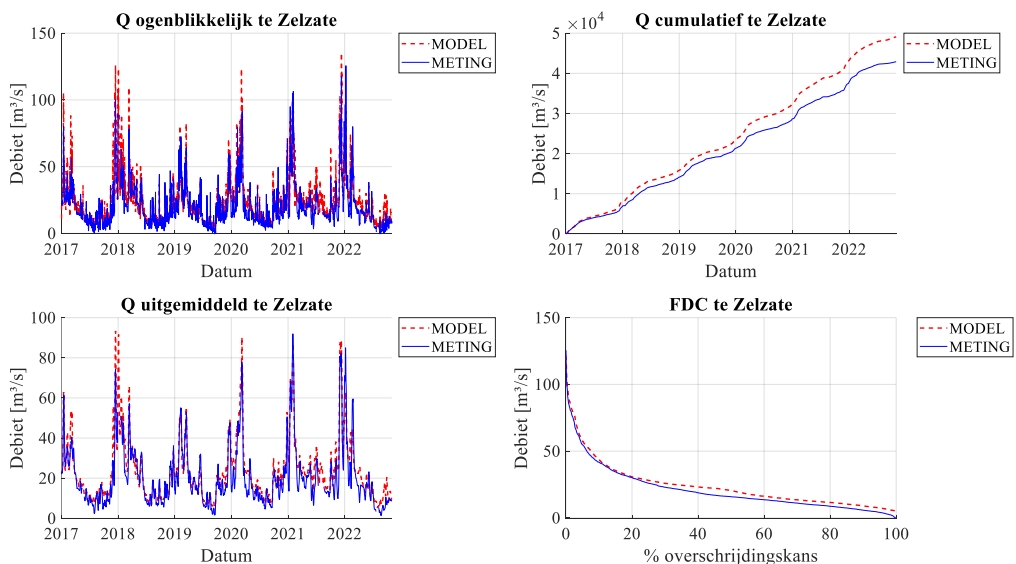
Figuur 13: Resulterende waterbalans per halve dag (met en zonder spuien)



Figuur 14: Waterpeil van het kanaal Gent – Terneuzen (uitgemiddeld over een week)

Een gelijkaardige conclusie kan getrokken worden uit de simulatie van de waterpeilen. Uit Figuur 14 blijkt opnieuw dat er in de winter een overschot aan water aanwezig is wat leidt tot een vrij hoog waterpeil. In de zomer daarentegen daalt het waterpeil significant doordat er minder water beschikbaar is. De zomer van 2021 is hierop de uitzondering door de grote hoeveelheden neerslag die toen gevallen zijn. Over de gehele simulatieperiode bedraagt de correlatie tussen model en meting 0,68 en de NSE 0,41.

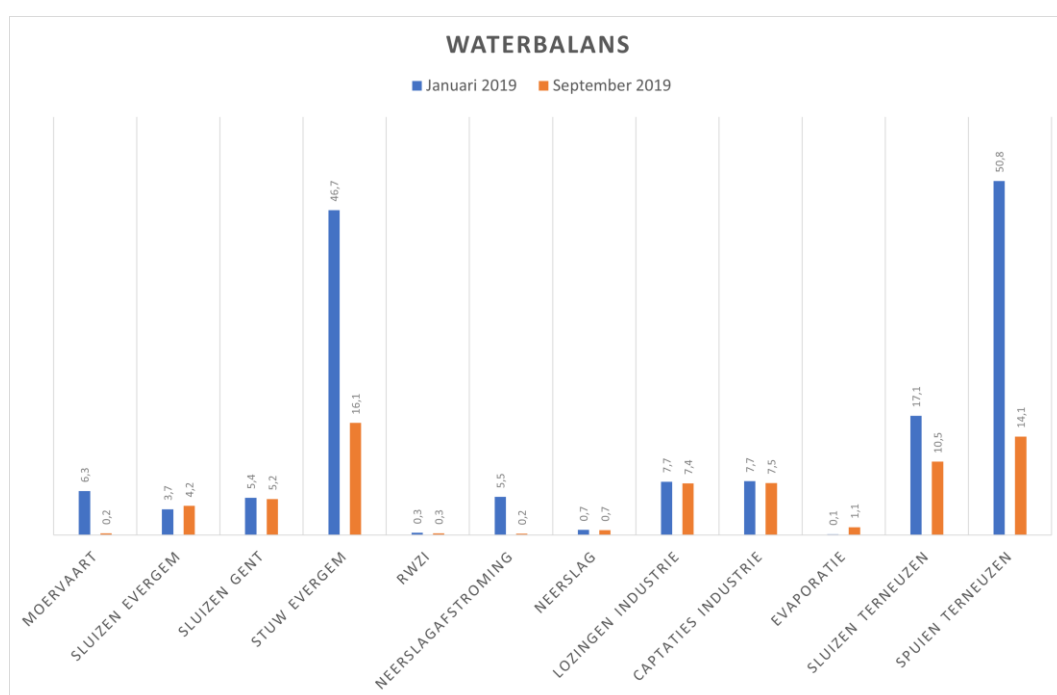
Verder is er op WATERINFO.be (WATERINFO.be) ook nog een berekende meting van het debiet te Zelzate beschikbaar die ook als validatie kan dienen. Figuur 15 geeft de vergelijking tussen de modelresultaten en deze meting weer.



Figuur 15: Validatie van het debiet te Zelzate

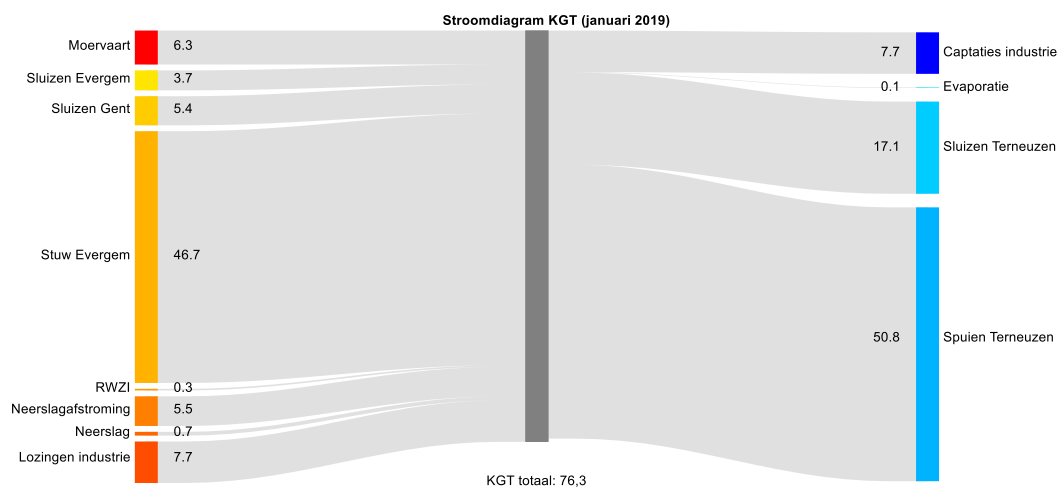
Uit de figuren hierboven blijkt dat het model er goed in slaagt om het waterpeil, het debiet en de historische tendensen te simuleren. Het model beschrijft de waterbalans dus vrij correct al blijven er enkele onbekenden zoals bijvoorbeeld de interactie met het grondwater. Die interactie kan, mogelijks, vooral in het Nederlandse gedeelte aanzienlijk zijn daar men er incidenteel verzilting opmerkt en er ook vermoedens rond verziltingsproblemen bestaan bij de naburige landbouwers (bron: NSP).

Daar de focus van deze studie voornamelijk op de droge periodes ligt is in Figuur 16 een vergelijking gemaakt tussen een redelijk natte maand zoals januari 2019 en een drogere maand zoals september 2019. Hierbij valt onmiddellijk het verschil op in aanvoer vanuit de stuw van Evergem wat natuurlijk ook leidt tot een reductie in het volume aan de sluisen in Terneuzen en het spuien door de lagere waterbeschikbaarheid.

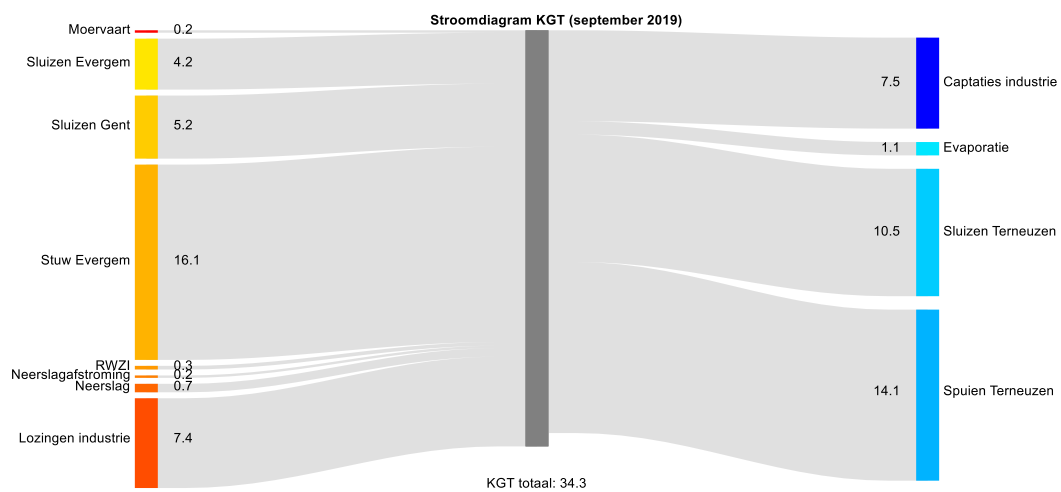


Figuur 16: Vergelijking waterbalans tussen natte en droge maand

Figuren Figuur 17 en Figuur 18 tonen het stroomdiagram van KGT voor januari 2019 en september 2019.



Figuur 17: Stroomdiagram KGT in milj m³ per maand voor januari 2019



Figuur 18: Stroomdiagram KGT in milj m³ per maand voor september 2019

3 Zoutmodel

3.1 Bestaande modellering

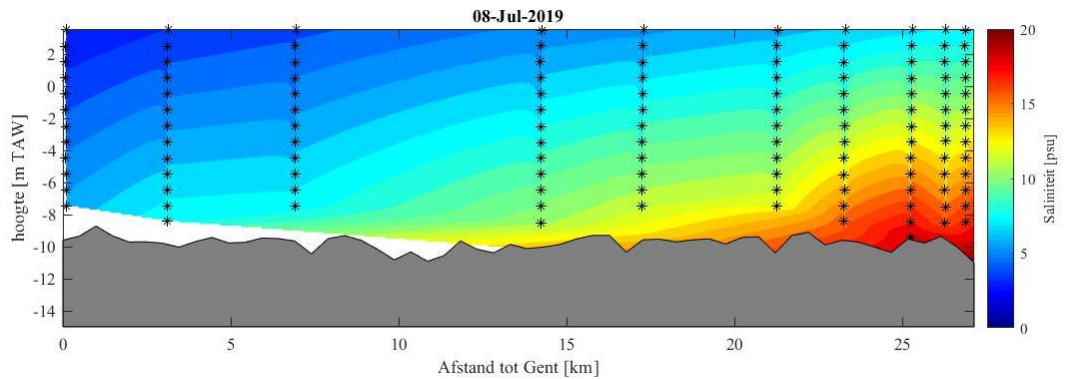
De zoutintrusie op het KGT werd in het verleden reeds eerder bestudeerd. In het rapport 'Verkenning maritieme toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen: Aanvullend oppervlaktewateronderzoek' werd een operationele tool ontwikkeld in Excel om de impact van bepaalde variabelen op de zoutconcentraties in het kanaal te begroten. Vijverberg et al. maakten hiervoor gebruik van het FINEL3D-pakket om de zoutvrachten van het sluiscomplex te begroten in functie van de saliniteitsverschillen tussen het kanaal en de Schelde (Vijverberg, Folmer, Carron, Talstra, & Blik, 2010). De berekeningen werden uitgevoerd voor een beperkt aantal waterstanden, voor het openen van de kolkdeuren aan de kanaal-zijde en onder de veronderstelling dat de schutkolken na het eerdere openen aan de Schelde-zijde volledig gemengd zijn. Deze zoutvrachten worden vervolgens gebruikt als randvoorwaarde in een SOBEK-model om de verspreiding van zout verder opwaarts te modelleren. De resultaten van deze gedetailleerde, fysisch gebaseerde modellen werden vervolgens vereenvoudigd tot rekenregels in de Excel-module door het aannemen van een exponentieel verloop van de concentratie in het kanaal in functie van de afstand tot Evergem.

In het kader van de studie 'Opmaak van modellen voor onderzoek naar waterbeschikbaarheid en allocatiestrategieën in het Scheldestroomgebied' werd de zoutintrusie gemodelleerd door Vanderkimpfen et al. (2012). De zoutvrachten berekend door Vijverberg (2010) werden hier als afwaartse randvoorwaarde gebruikt voor een ééndimensionaal MIKE11-model van het kanaal. De bestaande toestand van het kanaal werd aan de hand van een 40-jarige simulatie geanalyseerd. Daarnaast werden ook de impact van een halvering van het bovendebiet en een constante minimaanvoer naar het kanaal onderzocht. De studie besluit dat het mogelijk is om de variatie van de dieptegemiddelde zoutconcentratie in het kanaal met een ééndimensionaal model te analyseren. De maximale concentraties in het kanaal zijn volgens de studie afhankelijk van de aanvoer uit Gent en dus de opwaartse hydrologische condities. Een vermindering van het aanvoerdobiet, bijvoorbeeld als gevolg van klimaatverandering of een ander verdelingsbeleid van de knoop in Gent, leidt zeer snel tot een nieuwe evenwichtssituatie van de zoutconcentratie in het kanaal, er werd geen geleidelijke verandering van de saliniteit gevonden (Vanderkimpfen, Pereira, & Mostaert, 2012).

3.2 Beschikbare en gebruikte metingen

Het opstellen en evalueren van de modellen vereist betrouwbare metingen van het zoutgehalte langsheen de loop van het kanaal. In het Vlaamse gedeelte van het kanaal zal gebruik gemaakt worden van het meetnet van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). Dit zijn metingen van het chloridegehalte met een resolutie van ongeveer één maand. Het is niet duidelijk op welke diepte deze metingen werden uitgevoerd. In het Nederlandse gedeelte van het kanaal wordt het meetnet van Rijkswaterstaat gebruikt. Dit zijn continue metingen (resolutie 10 minuten) van de geleidbaarheid en temperatuur, op verschillende waterdieptes, waaruit het zoutgehalte kan berekend worden. Ten slotte worden de

metingen van de 8-wekelijkse rondvaarten, de zogenaamde TSO-metingen gebruikt. Dit gaat om observaties voor een bepaalde datum langsheen de loop van het kanaal, wat nuttig is in het evalueren van de gesimuleerde profielen van zoutconcentraties in het kanaal. Bovendien zijn deze metingen steeds uitgevoerd voor verschillende dieptes, wat toelaat de concentratiegradiënt voor een dwarssectie van het kanaal te bestuderen. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 19. Het is duidelijk dat het zoet en zout water niet goed gemengd zijn, en dat een zwaardere zouttong over de bodem van het kanaal verder opwaarts beweegt. Hiermee moet rekening gehouden worden bij het opstellen van een zoutverspreidingsmodel.



Figuur 19: Gemeten saliniteit in het kanaal Gent-Terneuzen door de TSO-meting van 8 juli 2019. De metingen worden als () weergegeven, hiertussen werd geïnterpoleerd. De metingen maken duidelijk dat de zoutconcentratie sterk kan variëren tussen wateroppervlak en kanaalbodem, voornamelijk dicht bij het sluisencomplex te Terneuzen.*

3.3 Methode

3.3.1 Zoutverspreidingsmodel

De verspreiding van zout in het kanaal wordt in deze aanpak beschreven met de ééndimensionale stromingsvergelijkingen, bestaande uit de continuïteitsvergelijking, momentumvergelijking en advection-dispersievergelijking. Ze kunnen worden geformuleerd als volgt voor een willekeurige kanaalsectie tussen longitudinale coördinaten x_1 en x_2 :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} \mathbf{U} dx + \int_{x_1}^{x_2} \mathbf{F} dx = \int_{x_1}^{x_2} \mathbf{S} dx$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} A \\ AV \\ AC \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} AV \\ V^2 A + gA\bar{y} \\ AVC - AD \frac{\partial C}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sum_i Q_i \delta(x - x_i) \\ F_e + gA(S_0 - S_f) \\ \sum_i C_i Q_i \delta(x - x_i) \end{bmatrix}$$

Met A de dwarssectie van het kanaal [m^2], V de stroomsnelheid uitgemiddeld over A [m/s], C de concentratie opgeloste stof (zout) [kg/m^3], g de valversnelling, \bar{y} de diepte van het zwaartepunt van de dwarssectie onder het vrije wateroppervlak [m], D de longitudinale dispersiecoëfficiënt [m^2/s], Q_i de debieten van puntbron i langsheen de loop van het kanaal [m^3/s], C_i de concentratie opgeloste stof in de lozing van puntbron i [kg/m^3], F_c de longitudinale component van de hydrostatische kracht die door de kanaalwanden in een niet prismatisch kanaal wordt uitgeoefend [m^4/s^2], S_0 de bodemhelling [m/m] en S_f de wrijvingshelling [-].

De vergelijkingen worden opgelost met de eindige volumemethode (eng: Finite Volume Method of FVM). De toegepaste methode wordt beschreven in Sanders et al. (2001). Hierin wordt het kanaal verdeeld in een aantal cellen of deelvolumes met lengte Δx_i , waarbij de variabelen A, V en C als uitgemiddeld per cel worden bijgehouden. Het model wordt geprogrammeerd in MATLAB met als doel een maximale flexibiliteit in modelopbouw en gekozen randvoorwaarden te garanderen (Sanders, Green, Chu, & Grant, 2021).

Het model heeft als primair doel om de opwaartse verspreiding van zout in het kanaal te beschrijven, onder huidige en aangepaste randvoorwaarden zoals verder beschreven in de scenarioanalyse. Het strekt zich uit van de dokken te Gent tot net **opwaarts** van het complex te Terneuzen. Om toe te laten lange termijnsimulaties uit te voeren, is de modelstructuur zo efficiënt mogelijk gehouden. Dit betekent dat de modellen optimaal geschikt zijn om het globale gedrag van de zouttong te beschrijven, maar dat een analyse voor een zeer specifieke locatie, zoals bijvoorbeeld een vergelijking op het niveau van de individuele dokken in Gent vraagt om meer complexe 2D of 3D analyses. Hetzelfde geldt voor de sluizencomplex te Terneuzen, het zoutverspreidingsmodel laat toe om de zoutgradiënt langsheen de loop van het kanaal te bepalen, maar de precieze concentraties net ter hoogte van het verschillende sluizen, en op verschillende waterdieptes vragen om een meer gedetailleerde studie die voorbijgaat aan de doelstellingen van dit rapport.

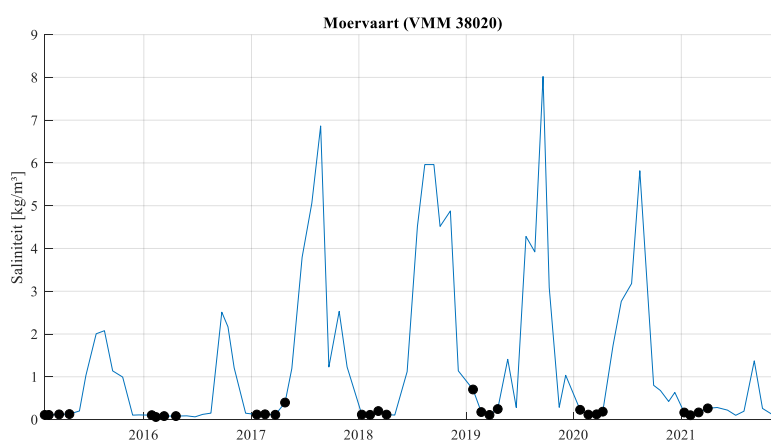
Het voornaamste nadeel van de aanname dat het zouttransport door ééndimensionale stromingsvergelijkingen kan beschreven worden, is dat de vorming en beweging van een zouttong als gevolg van dichtheitsverschillen tussen meer en minder zout water niet expliciet wordt beschouwd, aangezien er geen verticale variatie van de concentratie in rekening wordt gebracht. Dit proces kan echter mogelijk een belangrijk aandeel hebben in het transport van zout water in het kanaal, aangezien uit de TSO metingen ook blijkt dat de verticale zoutgradiënt significant kan zijn. Dit wordt omzeild door het kalibreren van de dispersiecoëfficiënt D tot artificieel verhoogde waarden.

Aan de op- (Gent) en afwaartse (Terneuzen) randen van het model worden de in- en uitstromende debieten opgelegd, berekend met het massabalansmodel van het kanalenstelsel. Daarnaast worden ook een beperkt aantal zijdelingse captaties en lozingen opgelegd, afkomstig van Industrie, RWZI's en de Moervaart en Avrijevaart. De modellen hebben als doel de instromende vracht en verdere opwaartse verspreiding van zout vanuit Terneuzen in het kanaal te simuleren. Het is vanzelfsprekend dat deze afwaartse concentratierandvoorwaarde dus zo accuraat mogelijk is. De gekozen methode wordt verder besproken in de volgende sectie. Ook de op- en zijdelingse randvoorwaarden kennen een (beperkte) zoutvracht. Deze worden als constant aangenomen, en zijn gebaseerd op metingen van de VMM. Hier werden enkel de metingen in het voorjaar (januari t.e.m. april) weerhouden, om de invloed van zoutintrusie te elimineren, zie ook bijvoorbeeld Figuur 20 **ter illustratie** voor de weerhouden metingen van de Moervaart.

De figuur beschrijft dus enkel de weerhouden metingen voor het bepalen van de zoutvracht die aan de opwaartse rand wordt toegeschreven. De intrusie van zout in de Moervaart vanuit het kanaal staat verder in de tekst beschreven. Tabel 13 vat samen welke constante zoutvracht aan elk van de opwaartse randen wordt toegekend.

Tabel 13: Opgelegde randvoorwaarden voor het zoutmodel

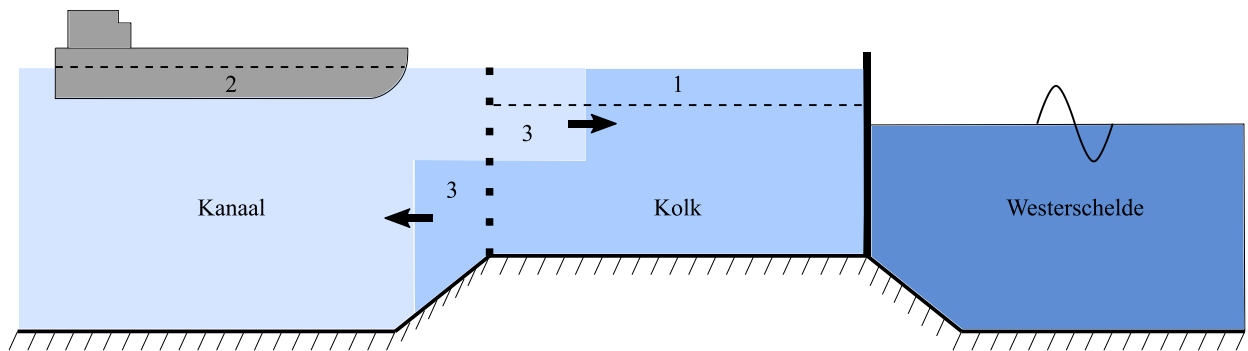
Randvoorwaarde	VMM meetpuntnummer	Opgelegd zoutgehalte
Gent	787000	0.137 [kg/m ³]
Ringvaart	347000	0.138 [kg/m ³]
Moervaart	38020	0.166 [kg/m ³]
Avrijevaart	35100	0.123 [kg/m ³]



Figuur 20: Gemeten saliniteit in de Moervaart op meetpuntnr. 38020 (VMM). De zwarte punten geven de opgelegde randvoorwaarde weer voor het zoutmodel.

3.3.2 Inschatting van de instromende zoutvracht in Terneuzen

Als gevolg van het schutten van schepen tussen de Westerschelde en het kanaal zal een bepaalde zoutvracht het kanaal bereiken. Het is de doelstelling van deze studie om de zoutvracht in de huidige toestand en voor verschillende alternatieve scenario's nauwkeurig in te kunnen schatten. De voornaamste mechanismen waarmee zout tussen zee, kolk en kanaal wordt verplaatst in een schutcyclus zijn geschetst in Figuur 21.



Figuur 21: Schematische voorstelling van de verschillende fases van de schutcyclus, en de verplaatste volumes: 1) het volume voor nivelleren van de kolk, 2) het volume verplaatst door de schepen en 3) de uitwisseling tussen kolk en voorhaven als gevolg van dichtheitsverschillen. Hoe hoger het zoutgehalte van het geschetste watervolume, hoe donkerder de kleur.

De verschillende fasen van een schutcyclus en het bijhorende transport van water en zout zijn de volgende:

- Wanneer een schip van de zee naar het kanaal wordt geschut dient de kolk **genivelleerd** te worden. Bij een lager peil op zee dan in het kanaal (hier 'laagwater' genoemd) wordt kanaalwater met een bepaalde zoutvracht in de kolk toegelaten, waar volledige menging kan verondersteld worden (nummer 1 op de figuur). Bij Scheldepeil hoger dan het kanaalpeil (hoogwater) wordt zout water uit de kolk in het kanaal geloosd.
- Het volume ingenomen door **schepen** die de kolk uitvaren zal vervangen worden door een gelijk volume 'zoet' water uit het kanaal.
- Wanneer de kolkdeur aan de kanaalzijde wordt geopend, zal de kolk een andere (typisch hogere) zoutconcentratie kennen en ontstaan er omwille van drukverschillen aan de scheiding tussen kolk en kanaal **densiteitsstromen** waarbij een zouttong het kanaal binnendringt, en een gelijk volume zoet water de kolk binnen stroomt (nummer 3 op de figuur). De fractie van het totale kolkvolume dat wordt uitgewisseld is in belangrijke mate afhankelijk van de tijd gedurende welke de kolkdeur open blijft staan, en de verschillen in zoutgehalte die de snelheid van de zouttong bepalen.
- **Schepen** uit het kanaal varen de kolk binnen en verplaatsen zo een volume water van de kolk naar het kanaal (nummer 2).
- Het tweede deel van de schutcyclus verloop volledig analoog, maar verplaatst nu schepen van het kanaal naar de zee. De kolk wordt dus weer genivelleerd van het kanaal- naar het zeepeil. Bij laagwater wordt er uit de kolk richting zee geloosd en verandert de concentratie niet, in geval van hoogwater zal er zout zeewater in de kolk stromen. De deur wordt aan de zeezijde geopend en densiteitsstromen veroorzaken een uitwisseling tussen kolk en zee. De uitvarende schepen veroorzaken nu een transport van de zee naar de kolk en binnenvarende schepen veroorzaken een water- en zoutverplaatsing van de zee naar de kolk. De schutcyclus kan zich herhalen.

Wanneer de verplaatste volumes en hun zoutgehaltes voor elke fase van de schutcyclus gekend zijn, en we na elke fase een volledige menging in de kolk veronderstellen, kan een eenvoudige 'boekhouding' gebruikt worden om op elk moment het zoutgehalte in de kolk te evalueren.

Voor het nivelleren zijn hiervoor de waterpeilen in de kolk en het kanaal of de Schelde en de geometrie van de kolk vereist. Voor de volumes verplaatst door de schepen is de geometrie van elk versast schip vereist. Aangezien deze laatste niet gekend zijn, worden deze volumes en zoutvrachten verder niet beschouwd. De uitwisseling als gevolg van dichtheidsverschillen is in dit model gebaseerd op de formulering door Vrijburgt et al. (2000). Hierin wordt de 'relatieve uitwisseling van de kolk' U uitgedrukt als een functie van de duurtijd van het open staan van de kolkdeur T_{open} : hoe langer de deur open staat, hoe groter de fractie van uitwisselen. De functie zal uiteindelijk convergeren naar 1 (volledige uitwisseling) (Vrijburgt & Glerum, 2000). De snelheid van deze convergentie hangt af van de theoretische tijd voor volledige uitwisseling op basis van de initiële snelheid van de zouttong T_{LE} : De zouttong heeft dan tweemaal de lengte van de kolk afgelegd aan snelheid c . De snelheid c wordt berekend met een empirische formule, gebaseerd op metingen. Wanneer er maatregelen worden genomen om de uitwisseling te reduceren, zoals het gebruik van bellenschermen bij het openen van de deur, kan een doorlaatfractie η kleiner dan 1 gekozen worden. De gebruikte formules worden hieronder weergegeven:

$$U = \tanh\left(\eta \frac{T_{open}}{T_{LE}}\right)$$

$$T_{LE} = \frac{2L}{c}$$

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} H}$$

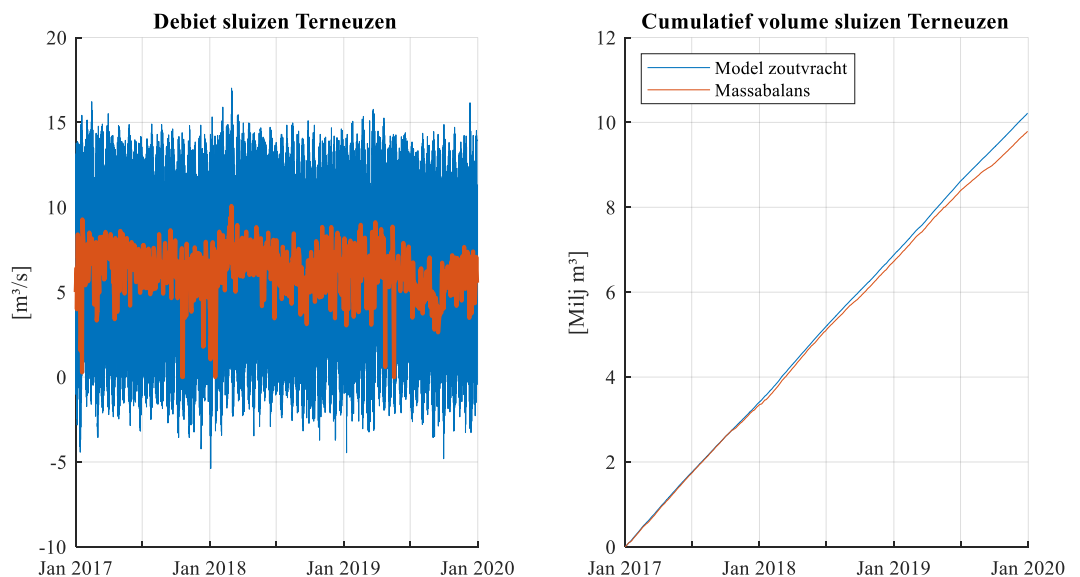
Met de hierboven beschreven aannames en formules kan in principe voor elke kolk in Terneuzen de zoutbalans worden gemaakt door per kolk fase per fase van de schuttingscyclus te doorlopen: geometrie van kolken, waterpeilen en het zoutgehalte van de Westerschelde zijn op elk tijdstip gekend. Het opwaartse zoutgehalte wordt echter berekend in het 1D zoutverspreidingsmodel dat aan een eigen, onafhankelijke, rekenstap werkt. Om de moeilijke koppeling tussen verschillende rekenstappen te omzeilen, wordt een module opgesteld waarin de berekende zoutvracht van de afzonderlijke fasen van de schuttcyclus wordt berekend en opgeteld, welke vervolgens gedeeld wordt door de totale duur van de schuttcyclus. Deze werkwijze is gebaseerd op de 'Zeesluisformulering' zoals voorgesteld door Weiler en Burgers (2017). Zo wordt dus een massaflux zout [kg/s] bekomen die als afwaartse rand van het zoutverspreidingsmodel dient, en wordt doorgerekend aan dezelfde tijdstap als deze laatste. De invoer van deze module bestaat uit de waterpeilen, en -temperaturen (voor de berekening van de dichtheid) en zoutgehalten aan weerszijden van de kolk. Daarnaast zijn enkele, hieronder opgesomde parameters vereist die enkele eigenschappen van de kolk en kenmerkende duurtijden van de schuttcyclus samenvatten:

- N_{cycli} : het aantal schuttcycli van een kolk op één dag. Deze zullen in de realiteit variëren maar worden hier constant verondersteld, berekend als de mediaan van het aantal dagelijkse schuttcycli per kolk voor de periode 2017-2019:
 - Westsluis: 12 schuttcycli per dag
 - Middensluis: 9 à 10 schuttcycli per dag
 - Oostsluis: 16 à 17 schuttcycli per dag
- T_{niv} : tijd nodig om de kolk te nivelleren. Deze hangt af van de peilverschillen tussen zee en kanaal, maar wordt in de modellen constant verondersteld. Op basis van overleg met de beheerders van de kolk wordt een gemiddelde duurtijd van 15 minuten vastgelegd.

- T_{deur} : de tijd nodig voor het openen of sluiten van de kolkdeuren. Vastgelegd op 4 minuten op basis van overleg met de beheerders.
- T_{open} : de tijd dat een kolkdeur open staat om schepen uit en in te laten varen. In een eerste stap wordt deze ingeschat door van de totale tijd van één schuttingscyclus (op basis van het aantal cycli per dag) de tijden voor verschillende nivelleringen en deuroperties af te trekken. Uit overleg met de beheerder blijkt echter dat de sluiswachters wordt gevraagd om de deuren zo veel mogelijk gesloten te houden bij het wachten op de volgende schepen. Daarom wordt een te kalibreren reductiefactor voorzien voor T_{open} .

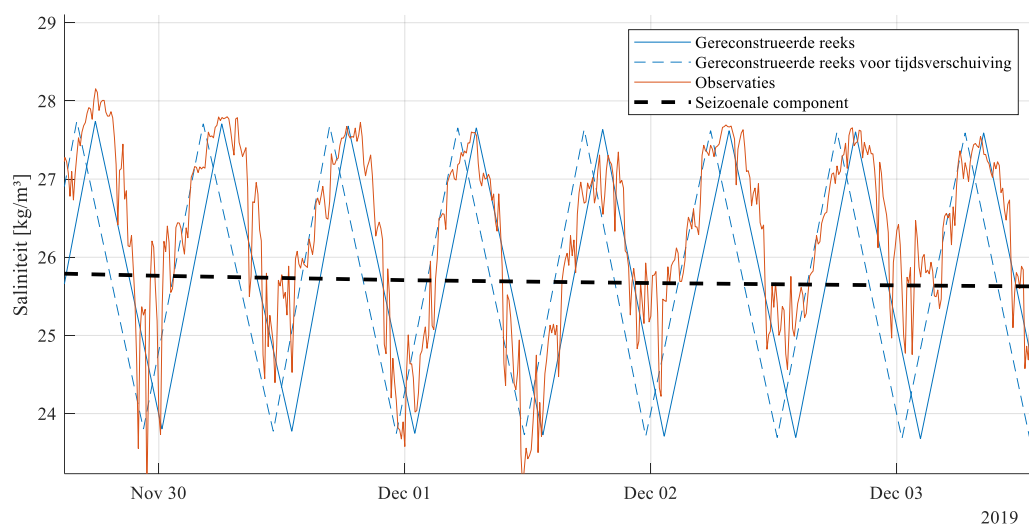
Naast de in- en uitstroom van zout bij nivelleren voor schutten en de instroom door densiteitsstromen, zal zout ook uit het kanaal worden afgevoerd door spuien. Dit wordt in het zoutverspreidingsmodel toegevoegd op basis van gekende debieten en berekende zoutgehaltenes.

De uit- en instroom van zout als gevolg van nivelleren wordt wél in de zoutvrachtmodule berekend, dus op basis van waterpeilen volgens de rekenstap van het zoutverspreidingsmodel en de gemiddelde aantallen schuttingen per dag. De berekende volumes kunnen dus afwijken van de volumes volgens de massabalans van het kanaal. Een grote afwijking zou aangeven dat de zoutvrachtmodule geen realistische inschatting van de zoutvracht maakt. Bij controle blijkt echter dat de afwijking minimaal is en gemiddeld $-0.272\text{m}^3/\text{s}$ bedraagt (het in de waterbalans gebruikte debiet is dus wat hoger). Dit is ook duidelijk in Figuur 22 waar de twee debieten en cumulatieve volumes met elkaar vergeleken worden. De afwijking wordt gecompenseerd door de spuidebieten in de berekening van de uitstromende zoutvracht met $0.272\text{ m}^3/\text{s}$ te verlagen.

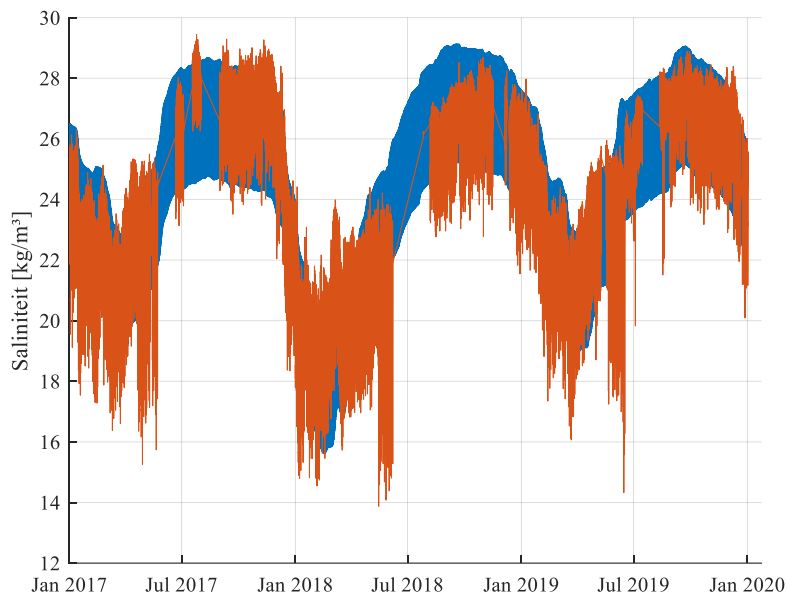


Figuur 22: Debiet van het kanaal naar de Westerschelde als gevolg van het nivelleren van de schutkolken in Terneuzen, zoals berekend in de zoutvrachtmodule (blauw) en waterbalans van het kanaal (oranje). Rechts worden de totaal verplaatste volumes over de simulatieperiode cumulatief getoond, waaruit blijkt dat de afwijking beperkt is.

De zoutvrucht zal deels afhankelijk zijn van het zoutgehalte van de Westerschelde, en dus moeten betrouwbare metingen gebruikt worden voor deze randvoorwaarde. De meting ter hoogte van het sluiscomplex Terneuzen omvat de volledige simulatieperiode en kan dus gebruikt worden, maar enkele perioden in de meetreeks ontbreken. Hier wordt een eenvoudig model voor aangenomen dat het zoutgehalte te Terneuzen berekend in twee stappen: een 'seizoenale' component houdt rekening met de verdunning door het bovendebiet en berekent de zoutgehalten in functie van het uitgemiddelde bovendebiet (zoals berekend voor Schelle) voor de voorbije 80 dagen. De waarde van 80 dagen werd bepaald aan de hand van een empirische analyse waarbij de modelaccuraatheid voor verschillende uitmiddelingvensters werd vergeleken. Vervolgens wordt de 'getijdecomponent' toegevoegd als een gemiddelde afwijking boven (bij hoogwater) of onder (bij laagwater) deze seizoenale waarde. Deze getijdenafwijking valt bovendien niet exact samen met het ogenblik van hoog- of laagwater, maar wordt verschoven volgens een gekalibreerde tijdstap. Dit eenvoudige model laat toe om de meetreeks aan te vullen, en is bovendien in staat om eventuele scenario's die een impact op het bovendebiet hebben in te rekenen. Het is mogelijk een meer gedetailleerder model te bouwen dat nauwkeurigere inschattingen kan maken, maar in het kader van deze studie bleek dit niet opportuun gezien de hoge werklast van zo'n gedetailleerder model en de goede resultaten van het eenvoudige model. Een voorbeeld van de verschillende stappen bij het reconstrueren, wordt gegeven in Figuur 23. De validatie van de reconstructie voor de periode 2017-2019 is getoond in Figuur 24. Het model haalt een NSE van 0.79 voor het voorspellen van de observaties die wel beschikbaar zijn in de vermelde periode.



Figuur 23: Illustratie van de verschillende componenten van het model dat de saliniteit in de Westerschelde berekent met een seizoenale component in functie van het bovendebiet in Schelle, en een getijdencomponent die een afwijking toevoegt op basis van het waterpeil en een vaste tijdsverschuiving.



Figuur 24: Vergelijking tussen de voorspelde (blauw) en gemeten (oranje) saliniteit op de Westerschelde in Terneuzen. De gereconstrueerde reeks die als afwaartse randvoorwaarde in het model gebruikt wordt, gebruikt enkel de voorspelde waarden voor de ontbrekende periodes in de meetreeks.

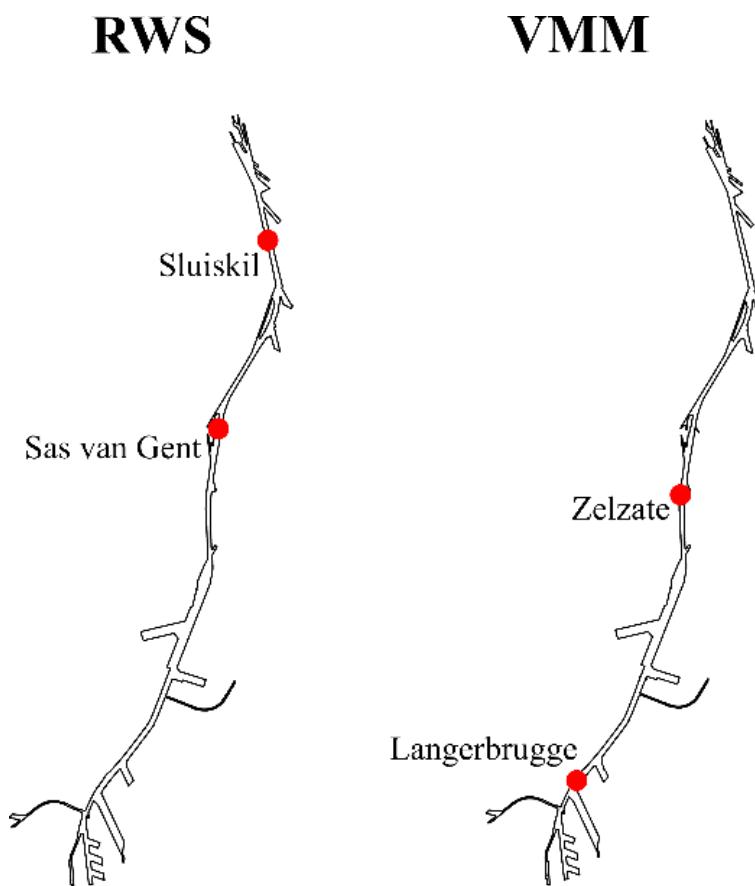
3.3.3 Moervaart

De saliniteit van het afwaartse gedeelte van de Moervaart wordt gemodelleerd met een analog 1D-eindig volumeschema als voor het kanaal zelf. De opwaartse randvoorwaarde is afstroomdebiet van de Moervaart. Afwaarts worden de met het 'hoofdmodel' gesimuleerde waterpeilen en concentraties opgelegd. De zeer beperkte meetgegevens laten geen gedetailleerde kalibratie toe, en er wordt daarom gekozen om de dispersiecoëfficiënt niet te laten variëren langsheen loop van de waterloop.

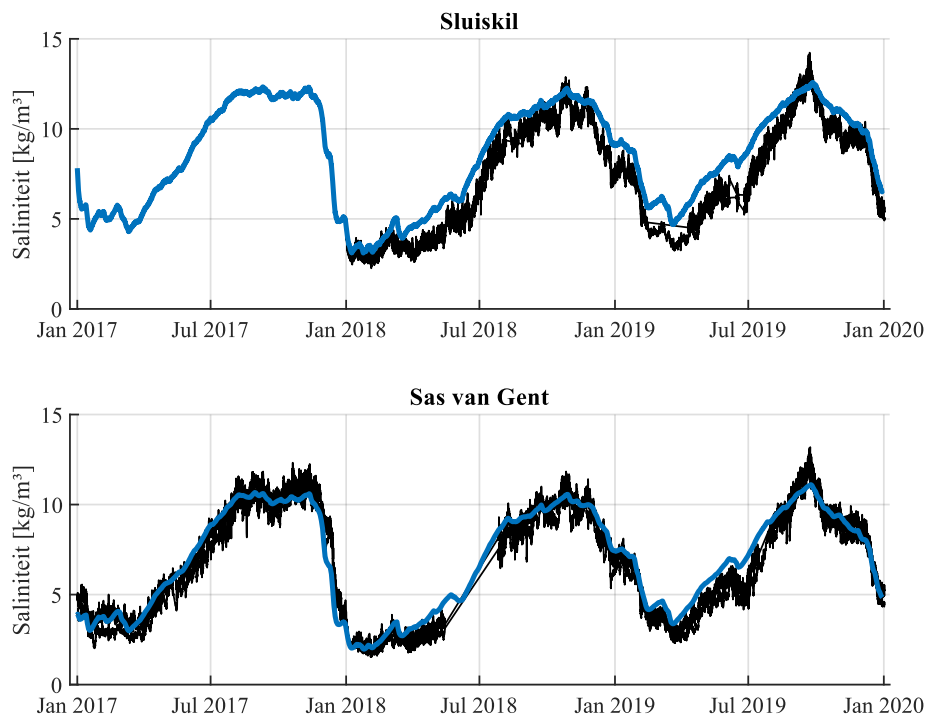
3.4 Resultaten

Het model wordt gekalibreerd en geëvalueerd door geselecteerde puntmetingen met simulatieresultaten te vergelijken. In het meetnet van Rijkswaterstaat worden de observaties te Sluiskil en Sas Van Gent gekozen, zie ook Figuur 25. De modelresultaten vertonen de beste overeenkomst met de observaties voor een dispersiecoëfficiënt van 300 [m²/s]. Hoewel deze waarde erg hoog is, is hierboven al aangegeven dat dit wellicht nodig is om in een ééndimensionaal stromingsmodel de effecten van verticale dichtheitsverschillen impliciet in te rekenen. Bovendien ligt ze in lijn met de waarden die werden gevonden door Vanderkimpfen et al. (2012), waar een dispersiecoëfficiënt van 200 [m²/s] werd gevonden, en Vijverberg et al. (2010), waar de dispersiecoëfficiënt 55 [m²/s] bedraagt voor een deel voor de op- en afwaartse delen van het kanaal, en 550 [m²/s] voor het kanaaldeel ruwweg tussen Zelzate en Desteldonk.

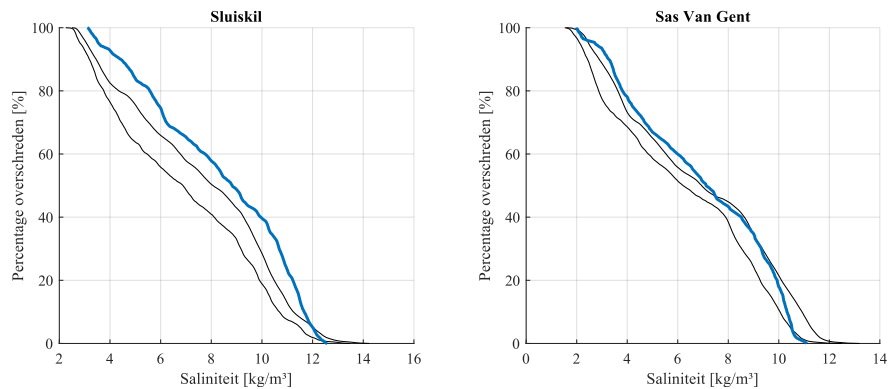
Uit de vergelijking blijkt dat het zoutmodel goed in staat is om het verloop van de zoutconcentraties te voorspellen: de stijging van de concentraties, als gevolg van een verminderde aanvoer in het kanaal, en de daling wanneer de afvoer weer stijgt, vallen goed samen met de observaties. Ook de grootte van de zoutconcentraties zelf worden goed benaderd. Ter hoogte van de meting van Sluiskil lijkt het model systematisch een kleine overschatting te maken van de werkelijke saliniteit. De metingen ter hoogte van Sas Van Gent worden echter zeer goed benaderd. De opgestelde zoutvrachtmodule lijkt dus goed de instromende zoutvracht te voorspellen (zie Figuur 26). Deze conclusies kunnen ook worden afgeleid uit de curves in Figuur 27 welke de overschrijdingsduur weergeven voor een bepaald zoutgehalte, volgens de metingen en het model: voornamelijk de lagere zoutgehaltenes lijken te worden overschat in het model voor Sluiskil, terwijl de metingen over het volledige bereik goed benaderd worden te Sas Van Gent.



Figuur 25: Locaties van de puntmetingen uit de meetnetten van Rijkswaterstaat (RWS) en de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) zoals gebruikt in de evaluatie van de modellen.

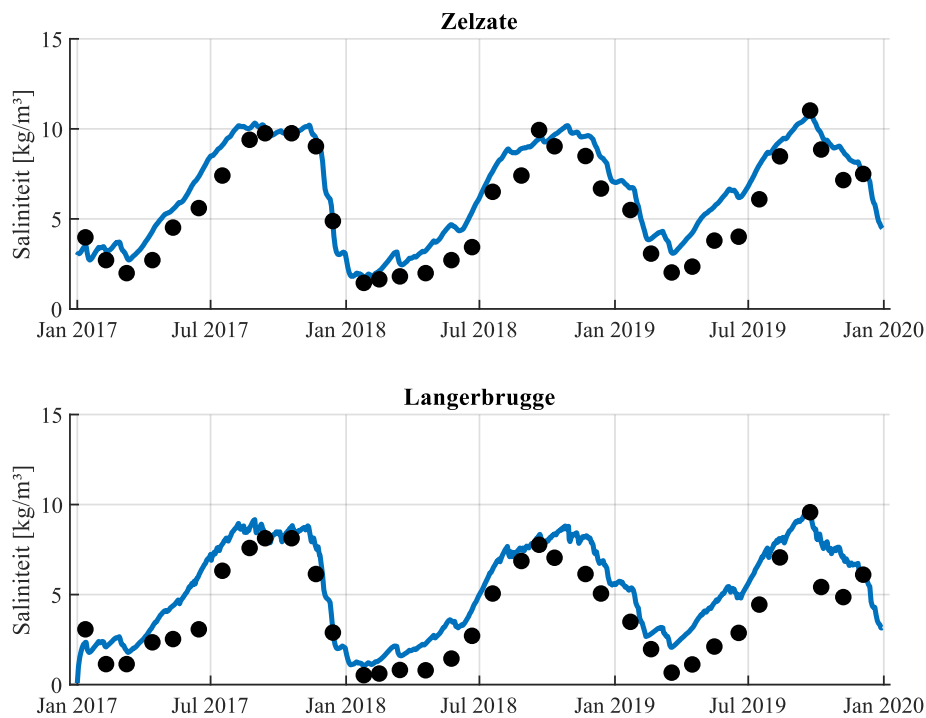


Figuur 26: Vergelijking tussen gemodelleerde (blauw) en gemeten (zwart) saliniteit voor de locaties in het RWS-meetnet. De RWS-metingen gebeuren op twee dieptes (0,25 mNAP en -4,25 mNAP)



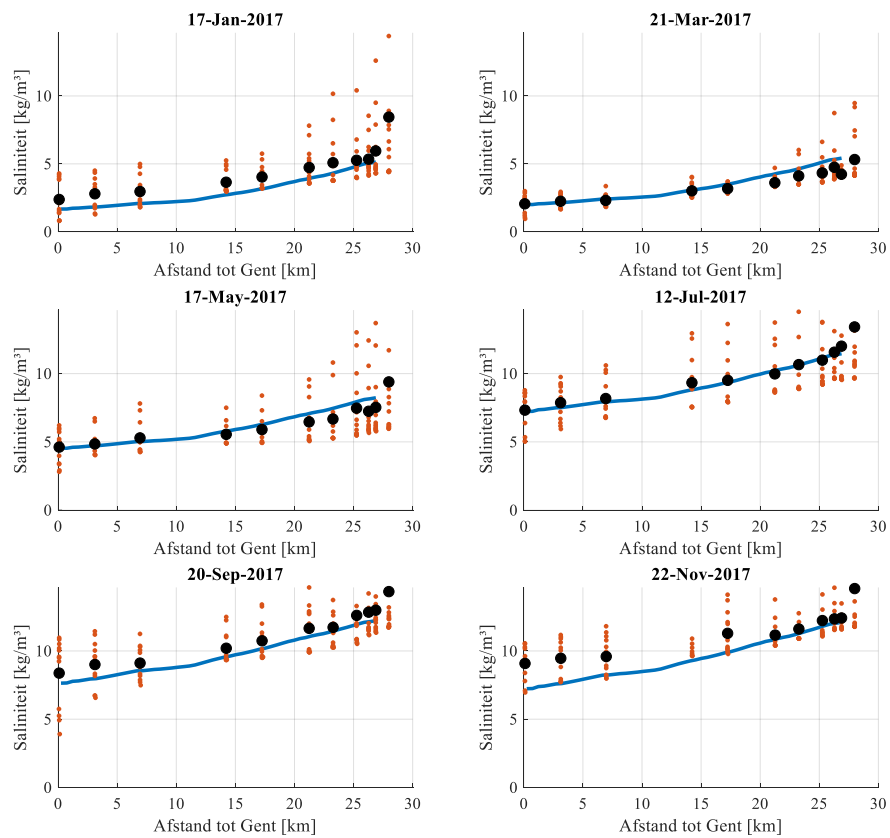
Figuur 27: Percentage van de tijd dat een bepaalde saliniteit overschreden wordt volgens de simulatieresultaten (blauw) en de observaties van RWS (zwart). De twee zwarte grafieken stellen een verschillende diepte voor in de beschikbare metingen.

Voor het Belgische kanaaldeel worden twee meetlocaties uit het VMM-meetnet gebruikt: Zelzate ter hoogte van de landsgrenzen en Langerbrugge (zie Figuur 28). Ook voor deze meting lijkt het model goed in staat het verloop en de waarde van de zoutconcentraties te benaderen. Voor deze metingen dient eveneens opgemerkt te worden dat het niet duidelijk is op welke diepte de stalen werden genomen.

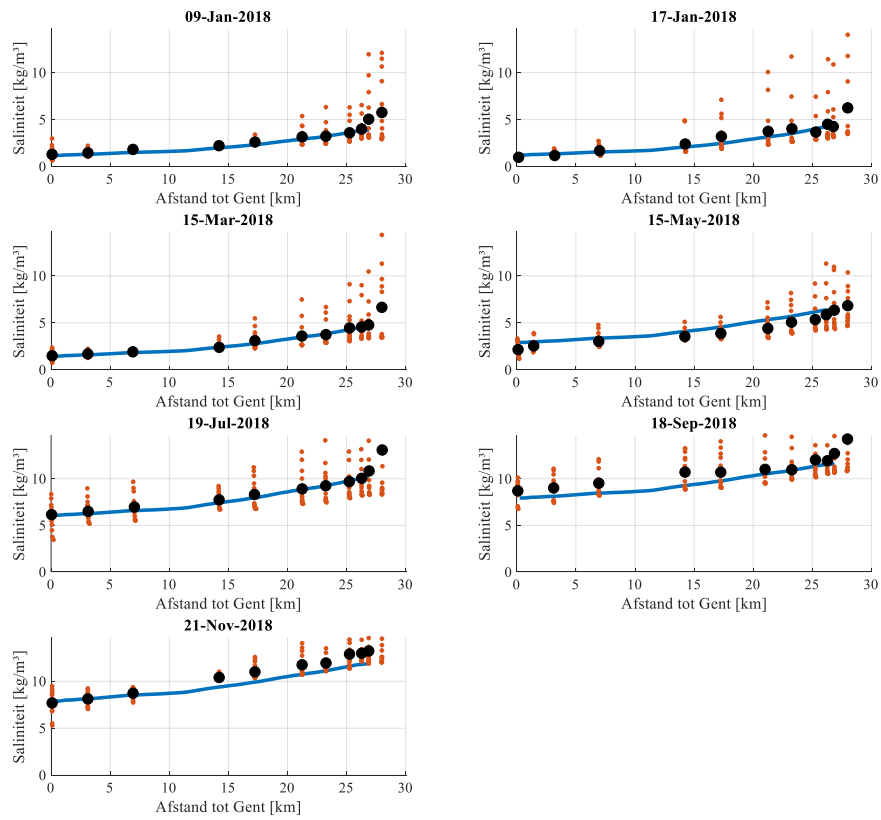


Figuur 28: Vergelijking tussen gemodelleerde (blauw) en gemeten (zwart) saliniteit voor de locaties in het VMM-meetnet.

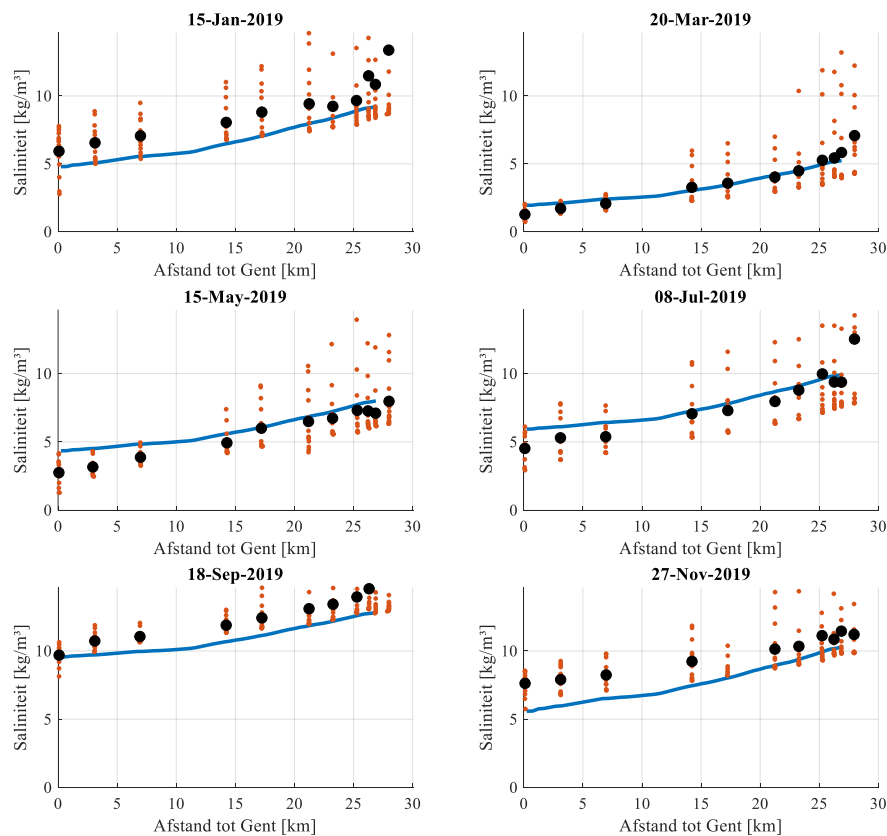
Ten slotte worden ook de TSO metingen met de simulatieresultaten vergeleken. Deze zijn zeer nuttig om de gesimuleerde vorm van de zouttong die vanuit Terneuzen binnendringt te evalueren. In Figuur 29 tot Figuur 31 worden steeds alle metingen voor een bepaalde datum in de simulatieperiode getoond, samen met de uitgemiddelde saliniteit over de diepte voor een bepaalde locatie. De zoutgradiënt in de lengterichting van het kanaal lijkt goed gesimuleerd te worden door het zoutverspreidingsmodel: de verschillen in concentratie tussen Gent en Terneuzen komen goed overeen met de (gemiddelde) metingen. Ook de absolute waarde van de zoutgehalten worden voor de meeste meetdata goed benaderd, er zijn slechts enkele data waarop het gemeten en gesimuleerde profiel sterker afwijken. Dit kan vermoedelijk verklaard worden door een verschil in timing tussen een grote in- of uitstroom van zout door de gemaakte aannames van het zoutvrachtmodel of de onzekerheid op de aanvoer uit Gent en de spuidebieten in Terneuzen. Na een afwijking lijkt het model echter steeds snel terug te keren naar de hoogte van de gemeten saliniteit.



Figuur 29: Vergelijking van het gemodelleerde (blauw) en in de TSO-metingen geobserveerde (oranje) profiel van zoutgehalte in het kanaal. De TSO-observaties worden ook uitgemiddeld over de diepte getoond (zwart). Metingen van 2017.

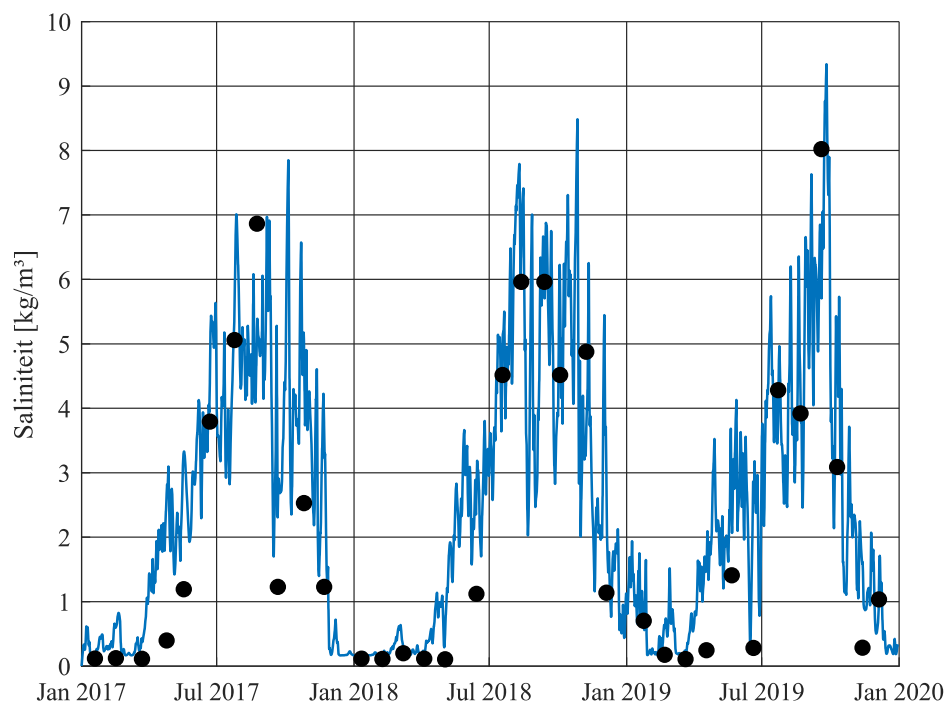


Figuur 30: Vergelijking van het gemodelleerde (blauw) en in de TSO-metingen geobserveerde (oranje) profiel van zoutgehalte in het kanaal. De TSO-observaties worden ook uitgemiddeld over de diepte getoond (zwart). Metingen van 2018.



Figuur 31: Vergelijking van het gemodelleerde (blauw) en in de TSO-metingen geobserveerde (oranje) profiel van zoutgehalte in het kanaal. De TSO-observaties worden ook uitgemiddeld over de diepte getoond (zwart). Metingen van 2019.

Figuur 32 toont de validatie van de saliniteit op de Moervaart ter hoogte van de versmalling te Mendonk door vergelijking met VMM-meting 38020. De gekalibreerde dispersiecoëfficiënt bedraagt $15\text{m}^2/\text{s}$. Uit de figuur blijkt dat de algemene tendensen behoorlijk goed worden gesimuleerd, maar de beperkte meetresolutie maakt een conclusie moeilijk. De waarden vertonen een lage 'achtergrondconcentratie' gedurende de nattere perioden, en zullen sterk stijgen wanneer de opwaartse aanvoer stil valt. De concentratie is dus niet enkel bepaald door de zoutconcentraties op het kanaal, maar wordt zeer sterk gestuurd door het aanvoerdebiet. Dit blijkt ook uit de sterke schommelingen van zowel de gemeten als de gesimuleerde saliniteiten. De meting zal door zijn beperkte temporele resolutie natuurlijk zeer afhankelijk zijn van specifieke omstandigheden op het moment van staalname. Het opwaartse debiet kent ook grote onzekerheden die een meer gedetailleerde simulatie verhinderen. Omwille van deze redenen zal er in de scenario-analyse gefocust worden op de saliniteit op het kanaal zelf daar die correcter en relevanter is voor dit onderzoek.



Figuur 32: Validatie van de saliniteit op de Moervaart ter hoogte van de versmalling te Mendonk

4 Scenario – analyse

4.1 Uitwerking scenario's

Zoals in sectie 1.1.3 reeds aangehaald worden er zes scenario's opgesteld en doorgerekend waarbij zowel de waterbeschikbaarheid als de zoutbalans geëvalueerd wordt. De scenario's worden doorgerekend voor de periode 1/01/2000 – 1/11/2022 waardoor het mogelijk is een statistische analyse uit te voeren over een langere periode.

Om scenario's te kunnen doorrekenen dient de waterbalans zoals die werd opgesteld aangepast te worden. Daarom wordt naar de waterbalans van hoofdstuk 2 verwezen als de validatieversie en naar de aangepaste waterbalans voor scenario-analyse als de scenarioversie. Deze aangepaste scenarioversie bevat dezelfde randvoorwaarden, maar met aanpassingen zoals in Tabel 14 beschreven.

Tabel 14: Beschrijving van de randvoorwaarden in de scenarioversie

Term	Methode voor aanpassing
Moervaart	Historische waarde ² (eventueel aangevuld met NAM-model)
Sluizen Evergem	Gemiddelde per weekdag en per maand
Sluizen Gent	Constante waarde
Stuw Evergem	Berekening door model
RWZI	Gemiddelde per dag van het jaar
Neerslagafstroming	Historische waarde (eventueel aangevuld met NAM-model)
Neerslag	Historische waarde
Lozingen industrie	Constante waarde (gemiddelde op basis van historische gegevens)
Captaties industrie	Constante waarde (gemiddelde op basis van historische gegevens)
Evaporatie	Historische waarde
Sluizen Terneuzen	Sluisformulering
Spuien Terneuzen	Berekening door model
Peil Westerschelde	Historische waarde

Hieronder volgt per scenario een korte beschrijving van de uitwerking en implementatie van dit scenario.

² Bron: WATERINFO.be

4.1.1 Scenario 0: Basis (huidige toestand)

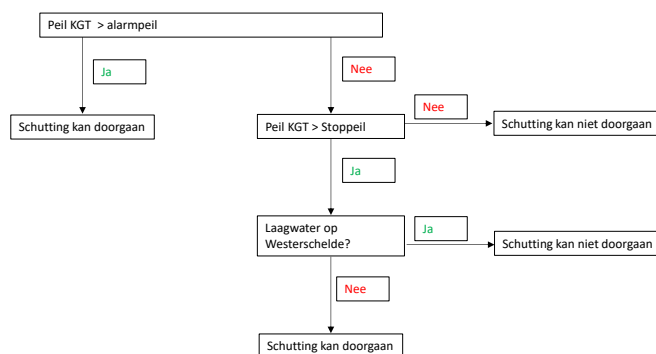
Sluizen

De bestaande sluizen worden behouden, maar worden anders gemodelleerd om het model toe te laten een langere periode te simuleren alsook stremmingen op te leggen indien nodig. Op basis van de huidige schuttingsregistraties wordt een gemiddeld aantal schuttingen per dag bepaald (zie Tabel 15), dit omdat er geen historische gegevens zijn voor de gehele simulatieperiode. Het gemiddeld aantal schuttingen wordt zo evenredig mogelijk verspreid over een dag waarbij er wordt aangenomen dat het nivellieren van de kolk steeds 30 minuten duurt ongeacht de schutting of sluis. De richtingen van de schuttingen zijn afwisselend Noord en Zuid waarbij de eerste schutting van een dag steeds richting Zuid heeft. Op deze manier is het mogelijk een tijdreeks van schuttingen te maken voor de volledige simulatieperiode van bijna 23 jaar waarbij alle dagen hetzelfde zijn.

Tabel 15: Gemiddeld aantal schuttingen per dag (Scenario 1)

Westsluis	Middensluis	Oostsluis
24	34	21

Per gesimuleerde tijdstap en per sluis zal het model nagaan of er een schutting dient plaats te vinden. Indien er een schutting moet plaatsvinden zal er gecontroleerd worden of het peil van het kanaal hoog genoeg is om dit toe te laten. Indien het kanaalpeil lager is dan het alarmpeil van 4,40 mTAW (2,05mTAW) zal er enkel geschut mogen worden als het geen laagwater is op de Schelde. De periode van laagwater beslaat de ganse periode van 2u voor tot 2u na laagwater. Indien het kanaalpeil lager is dan het stoppeil (4,20 mTAW of 1,85 mTAW) zal er nooit geschut mogen worden. Figuur 33 geeft een schematisch overzicht van de sluisformulering in de scenario-analyse.



Figuur 33: Schema sluisformulering bij scenario-analyse

Spuien – Peilbeheer

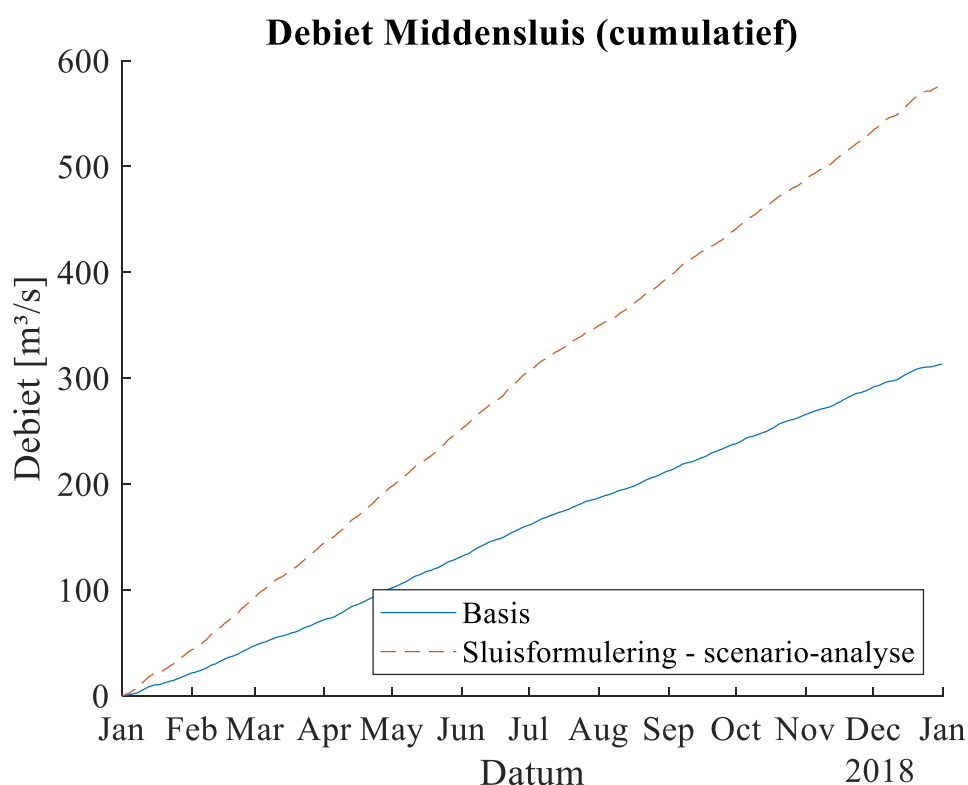
Het spuien wordt in dit scenario behouden zoals dat in de validatieversie werd opgesteld (zie sectie 2.2).

Validatie methode

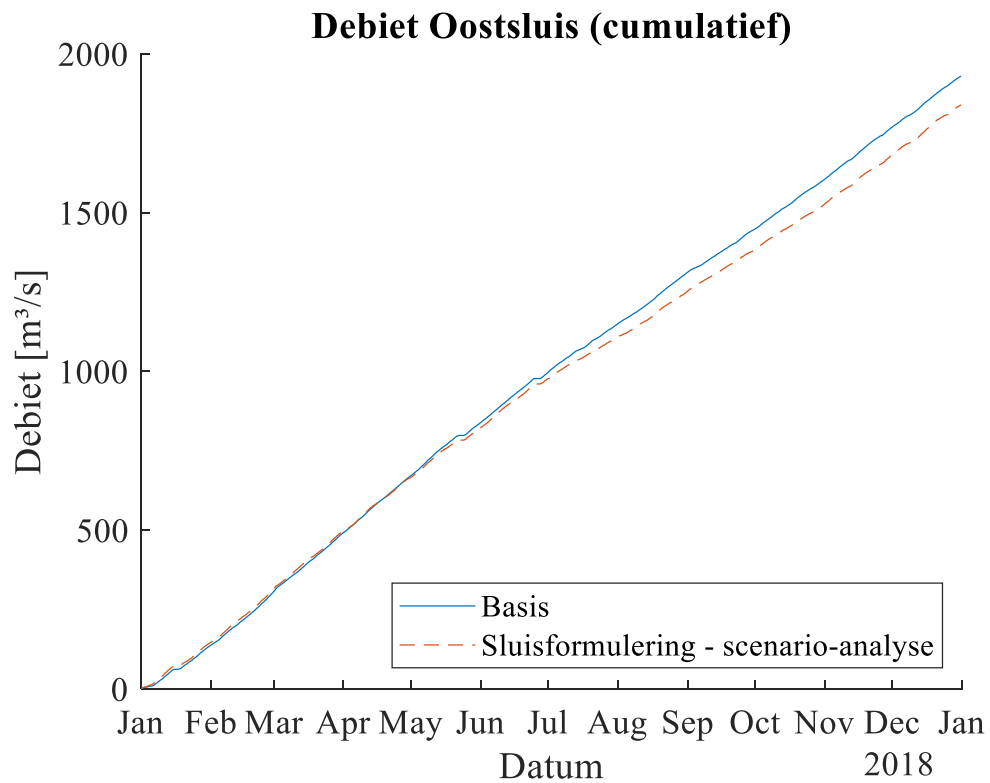
De correctheid van de hierboven beschreven wijzigingen voor de sluisen werd gecontroleerd door deze toe te passen voor het jaar 2018. Daar er echter maar één jaar wordt gecontroleerd waarvoor er historische gegevens zijn is het aantal schuttingen per dag steeds gelijk gesteld aan het historische aantal schuttingen per dag. Merk dus op dat hierdoor de tijdreeks van schuttingen per dag anders is, wat in de eigenlijke doorrekening van het scenario niet het geval zal zijn wegens het ontbreken van genoeg gegevens om dit voor de gehele simulatieperiode te kunnen doen.

Figuren Figuur 34 tot Figuur 37 geven een vergelijking tussen de basisversie (=validatieversie) op basis van de historische schutgegevens zoals die in hoofdstuk 2 werd toegelicht en de scenarioversie met de aangepast sluisformulering.

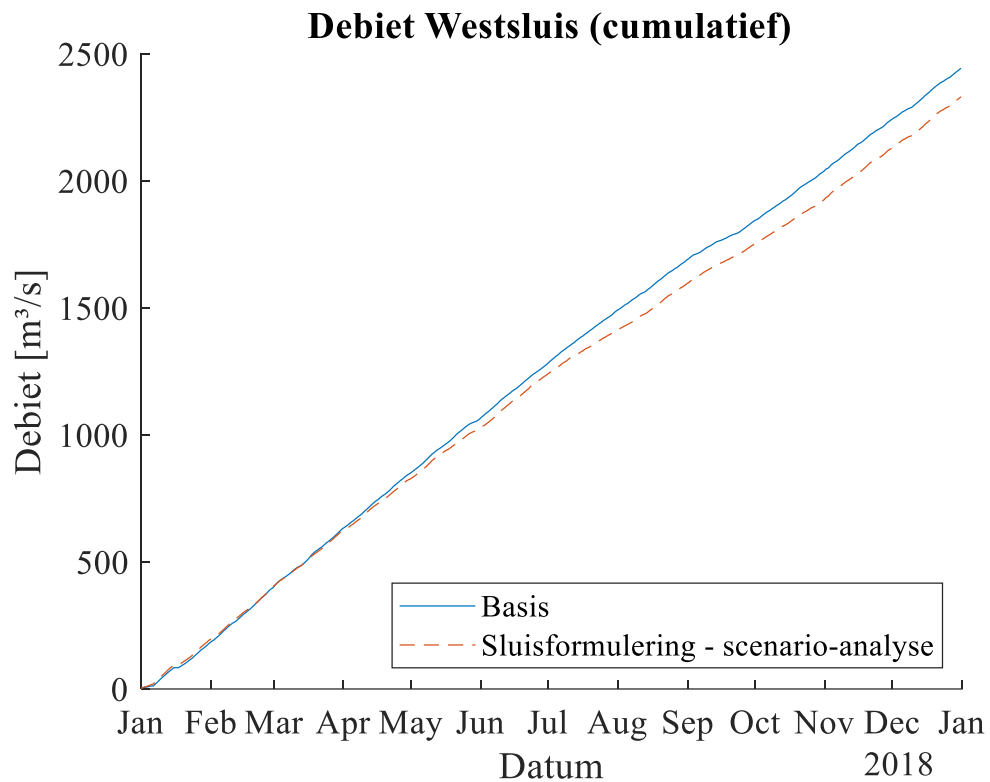
Uit de vergelijking blijkt dat er in de meeste gevallen een sterke overeenkomst is wat betreft de sluis- en spuidebieten wat aantoont dat de sluisformulering correct werkt. Bij de Middensluis is er een opvallend verschil te bemerken, maar dit lijkt verklaard te worden door een duidelijke verschuiving in de Scheldepeilen op het moment van een schutting (zie Figuur 38). In de realiteit blijkt namelijk dat de Middensluis voornamelijk gebruikt wordt bij een hoger waterpeil op de Westerschelde, maar de nieuwe sluisformulering verdeelt de schuttingen gelijk over een dag waardoor de Scheldepeilen meer gespreid zijn en wat dus resulteert in een groter sluisdebiet bij de nieuwe sluisformulering. Figuren Figuur 39 en Figuur 40 tonen dat deze verschuiving zich niet voordoet bij de andere sluisen.



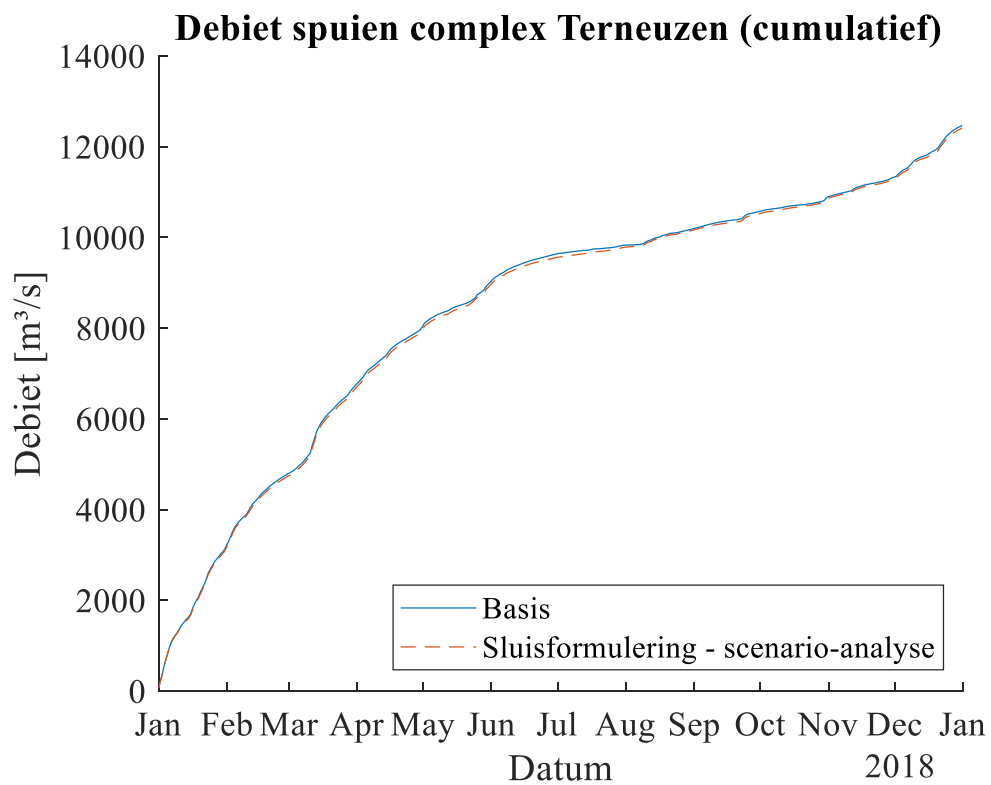
Figuur 34: Vergelijking van het cumulatief schuttingsdebiet van de Middensluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse



Figuur 35: Vergelijking van het cumulatief schuttingsdebiet van de Oostsluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse.

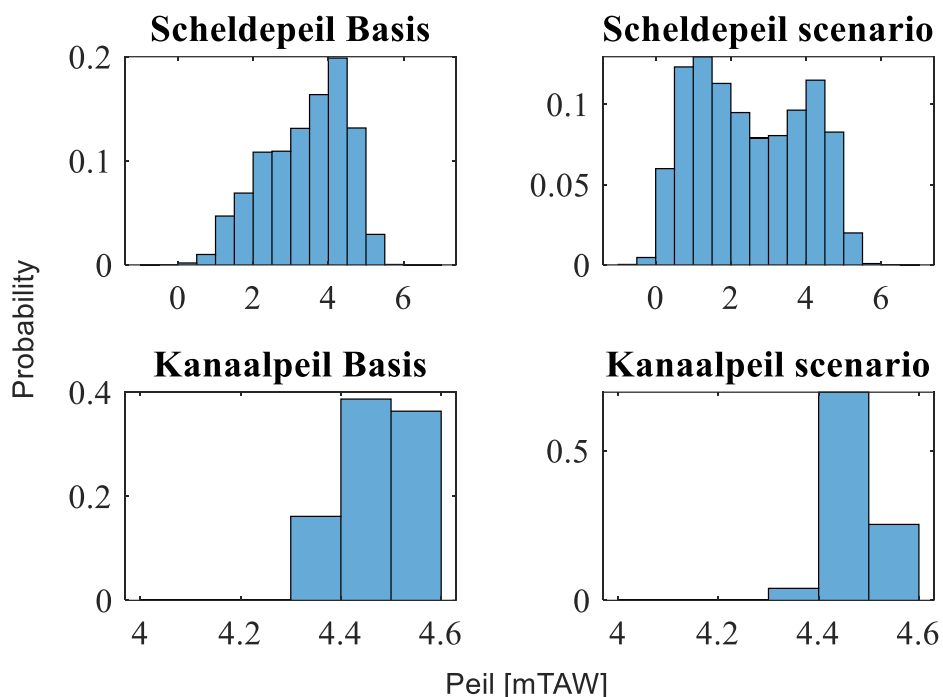


Figuur 36: Vergelijking van het cumulatief schuttingsdebiet van de Westsluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse.



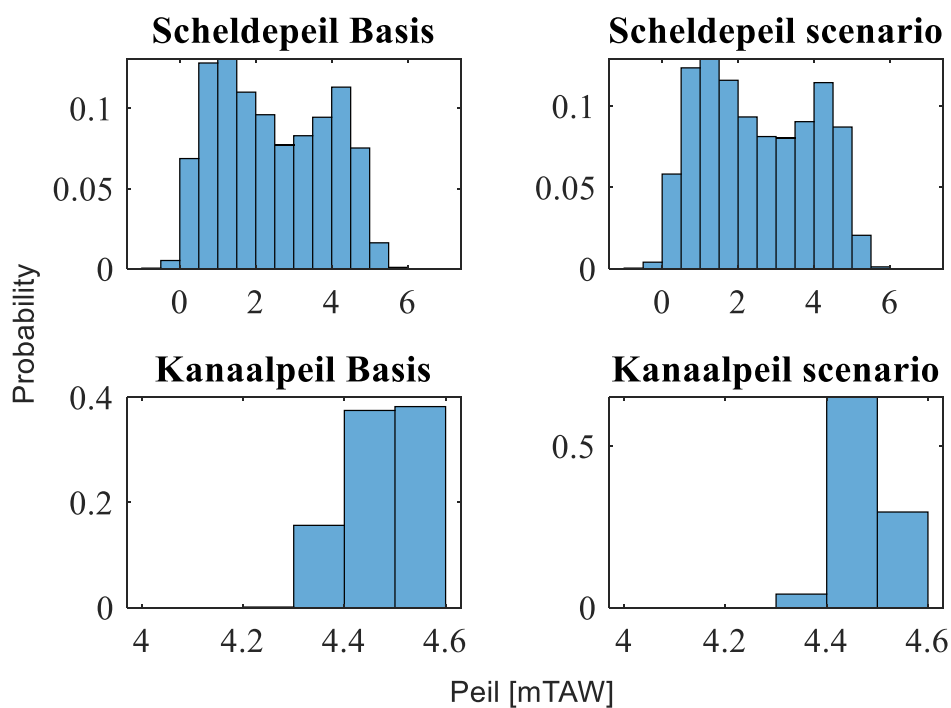
Figuur 37: Vergelijking van het cumulatief spuidebiet bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse

Peilen Middensluis

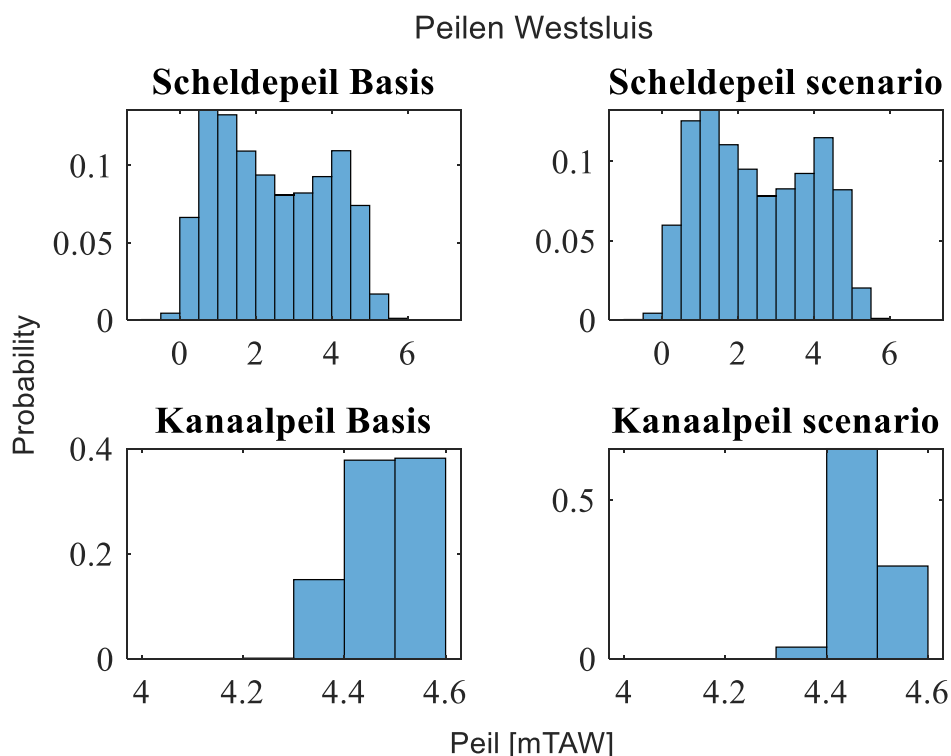


Figuur 38: Vergelijking tussen het voorkomen van de peilen bij de schuttingen van de Middensluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse

Peilen Oostsluis



Figuur 39: Vergelijking tussen het voorkomen van de peilen bij de schuttingen van de Oostsluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse



Figuur 40: Vergelijking tussen het voorkomen van de peilen bij de schuttingen van de Westsluis bij gebruik van de historische schutgegevens (Basis) en de nieuwe sluisformulering voor de scenario analyse

4.1.2 Scenario 2: Nieuwe sluis

Sluizen

Dit scenario houdt in dat in de plaats van de Middensluis de Nieuwe sluis te Terneuzen in werking is. De sluisformulering blijft hetzelfde zoals in Figuur 33 getoond, maar per sluis zal er nu een apart stoppeil worden gedefinieerd. Daarnaast zal ook het gemiddeld aantal schuttingen per dag aangepast worden per sluis. Hiervoor is het GE2030-scenario uit de MER van de Nieuwe sluis overgenomen (SIVAK-simulatie 17) (Marin, 2015). Alle nieuwe gegevens voor dit scenario zijn samengevat in Tabel 16 en Tabel 17.

Tabel 16: Variabelen scenario 2

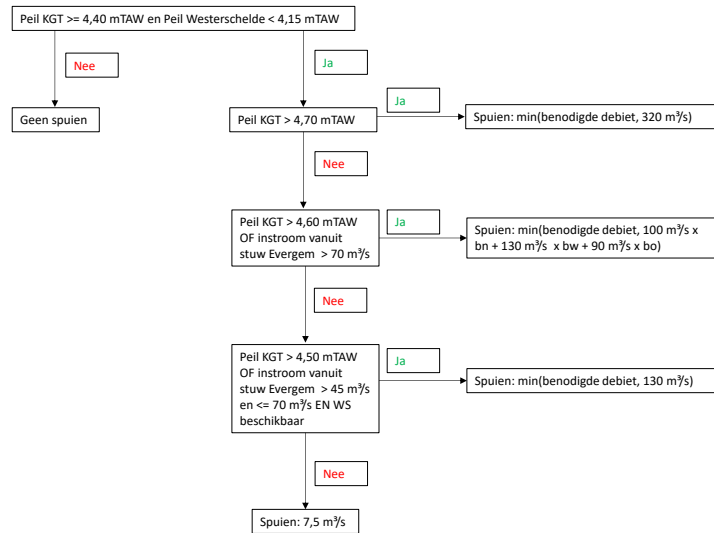
Term	Waarde
Kolkoppervlakte Nieuwe sluis	23485
Stoppeil Westsluis	4,20 MTAW (1,85 mNAP)
Stoppeil Oostsluis	4,25 mTAW (1,90 mNAP)
Stoppeil Nieuwe sluis	4,30 mTAW (1,95 mNAP)
Alarmpeil	4,40 mTAW (2,05 mNAP)

Tabel 17: Gemiddeld aantal schuttingen per dag (Scenario 2)

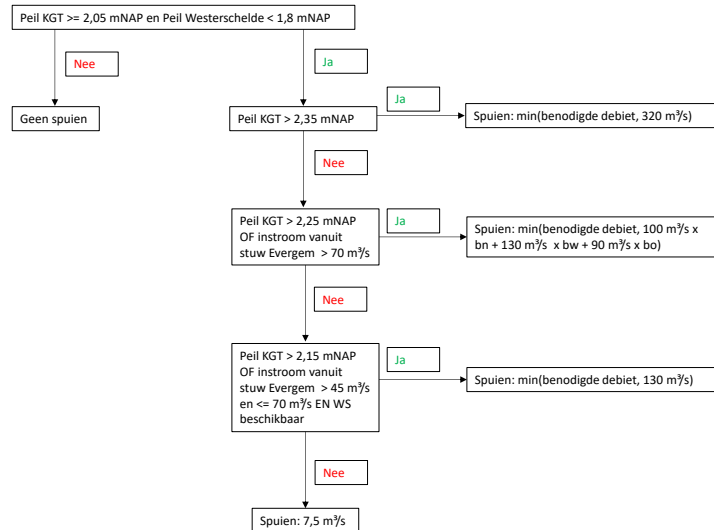
Westsluis	Nieuwe sluis	Oostsluis
29	21	41

Spuien

Het spuien wordt lichtjes aangepast ten opzichte van scenario 1, de Middensluis wordt vervangen door de Nieuwe sluis (met dezelfde spuicapaciteit) en er wordt nu preferentieel via de Westsluis gespuid. Het schema in Figuur 6 en Figuur 7 wordt aangepast naar het schema van Figuur 41 en Figuur 42.



Figuur 41: Te volgen regels bij spuien in mTAW; bx duidt op de beschikbaarheid van de sluisen (0 voor beschikbaar, 1 voor niet beschikbaar). De x in bx slaat op de sluis: w = west, o = oost en n = nieuw.



Figuur 42: Te volgen regels bij spuien in mNAP; bx duidt op de beschikbaarheid van de sluisen (0 voor beschikbaar, 1 voor niet beschikbaar). De x in bx slaat op de sluis: w = west, o = oost en n = nieuw.

4.1.3 Scenario 3: Nieuwe sluis + midden 2100

Om de impact van klimaatverandering op het laagwaterregime in het kanaal te bestuderen, worden lange-termijnsimulaties uitgevoerd met geperturbeerde tijdreeksen van het debiet op Leie en Bovenschelde aan de opwaartse randen van het studiegebied. De relevante impact van klimaatverandering voor deze studie zal dus inhouden dat de typische aangevoerde volumes in de zomermaanden vermoedelijk zullen dalen ten opzichte van de huidige toestand, waardoor er minder water beschikbaar is voor de verschillende gebruikers (scheepvaart, industrie,...) en bovendien een lagere doorstroom een groot gevolg kan hebben voor de risico's op zoutindringing.

Deze perturbatie vertrekt van de klimaatsignalen van 30 EURO-CORDEX regionale klimaatmodellen (Jacob, et al., 2014), voor tijdshorizon 2100, volgens de RCP2.6, 4.5, 6.0 en 8.5 uitstootscenario's van het 'Coupled Model Intercomparison Project' fase 5 (CMIP5) (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012). Deze 30 klimaatmodel-runs zijn geselecteerd op hun representativiteit van de spreiding van de mogelijke klimaatsignalen en laten toe de grote onzekerheid op toekomstige klimaatverandering in te rekenen. Om deze 30 geselecteerde reeksen te vertalen naar veranderingen in de laagwaterdebieten worden ze eerst met de kwantielperturbatiemethode (Willems & Vrac, 2011) statistisch neergehaald tot geperturbeerde neerslag en potentiële evapotranspiratie (pET) tijdreeksen, elk met een lengte van 100 jaar, die representatief zijn voor het lokale studiegebied. Deze vormen de meteorologische input voor hydrologische (NAM) modellen van Leie (Menen) en Schelde (Doornik). De gesimuleerde debieten voor elk van deze 30 reeksen wordt vergeleken met de gesimuleerde debieten voor de ongeperturbeerde input als de verhouding tussen het jaarlijkse minimumdebiet voor een bepaalde empirische terugkeerperiode tussen de geperturbeerde en de niet geperturbeerde reeks. Door dit te herhalen voor verschillende groottes van bewegende vensters voor het uitmiddelen van het debiet, worden zogenaamde 'impactfactoren' bekomen voor het laagwaterdebiet die horen bij een bepaalde terugkeerperiode en uitmiddelvingsvenster, en dat voor elk van de 30 reeksen. Voor elk jaar van de gemeten debieten op de Leie en Schelde worden nu deze impactfactoren toegepast op basis van de empirische terugkeerperiode van dat jaar. Om de hoeveelheid te simuleren scenario's te beperken, worden uit deze factoren een 'midden' en een 'hoog'-impactscenario geselecteerd, gedefinieerd als de mediaan en het 95% - percentiel van de berekende factor per terugkeerperiode en per venster. Dit laat toe om een goed beeld te krijgen van de onzekerheid van de verschillende klimaatmodel en uitstootscenario's.

Samengevat worden de opwaartse debieten van het massabalansmodel per jaar gereduceerd volgens twee 'impactfactoren': midden en hoog. De resultaten voor deze twee analyses laten toe een beeld te krijgen van de onzekerheid die er nog heerst op de impact van klimaatverandering, afkomstig van onder andere de toekomstige uitstoot van broeikasgassen en klimaatmodellen. De impactfactoren worden dan dus toegepast op de afstroming van Leie en Bovenschelde, alsook de neerslagafstroming. Daarnaast wordt er analoog ook een impactfactor toegepast op de evaporatie. Tot slot heeft deze reductie van de aangevoerde debieten in de Schelde ook effect op de zoutconcentratie van de Westerschelde, zoals berekend met het empirische zoutmodel voor de concentratie te Terneuzen beschreven in sectie 3.3.2. De impact van deze klimaatanalyse op de aanvoer naar het kanaal Gent-Terneuzen wordt geïllustreerd in Figuur 43.

Aan de sluis- en spuiformulering wordt niets gewijzigd ten opzichte van Scenario 2.

4.1.4 Scenario 4: Nieuwe sluis + hoog 2100

Dit scenario is analoog aan scenario 3, maar nu met de impactfactoren voor het 'hoog'-impactscenario.

4.1.5 Scenario 5: Nieuwe sluis + midden 2100 + captatie

Dit scenario vertrekt van Scenario 3 waarbij er in totaal voor 1870 m³/h (0,52 m³/s) extra wordt gecapteerd. Merk op dit een erg grote toename is in vergelijking met de huidige netto captatie van ongeveer 1 miljoen m³ per jaar. Dit scenario dient daarom als een worst case behandeld te worden.

4.1.6 Scenario 6: Nieuwe sluis + hoog 2100 + captatie

Dit scenario vertrekt van scenario 4 waarbij opnieuw 1870 m³/h bijkomende captatie wordt ingerekend.

4.2 Resultaten

De resultaten worden aan de hand van een statistische analyse voor alle scenario's vergeleken. Er wordt hierbij gefocust op de boven aanvoer naar het kanaal Gent-Terneuzen, het peil, het aantal dagen met stremmingen aan de sluisen van Terneuzen en de zoutconcentratie doorheen het kanaal. Het is belangrijk een lange termijnsimulatie uit te voeren voor de verschillende scenario's. Dit laat namelijk toe om de antecedente condities, dus voorafgaand aan een droge periode, op correcte wijze in rekening te brengen. Daarenboven laat dit toe om de resultaten statistisch te analyseren en op die manier dus uitspraken te doen over de kansen waarmee bepaalde gebeurtenissen voorkomen (zoals het onderschrijden van drempelpeilen of minimale debieten, of het overschrijden van bepaalde zoutconcentraties gedurende een bepaalde periode).

Merk op dat het model gebruik maakt van een aantal strenge drempelwaarden waar niet van afgeweken kan worden, iets wat in de realiteit natuurlijk wel kan omdat operatoren op de hoogte zijn van weersvoorspellingen, scheepvaarttrafiek, etc.

Voor de analyse van de scenario's wordt gebruik verwezen naar de empirische terugkeerperiodes. Deze terugkeerperiode T wordt als volgt gedefinieerd (Willems P. , 2013):

“De terugkeerperiode T van een extreme gebeurtenis wordt gedefinieerd als de gemiddelde tijd die verloopt tussen twee zulke extreme gebeurtenissen”

Een terugkeerperiode van 1 jaar betekent dat die gebeurtenis (of 'erger') gemiddeld eens per jaar voorkomt, een terugkeerperiode van 10 jaar daarentegen betekent dat het extremum gemiddeld slechts om de 10 jaar voorkomt. Een belangrijke nuance is dat deze

terugkeerperiode **niet** gebruikt kan worden om te berekenen hoe lang het nog duurt tot de volgende extreme gebeurtenis wanneer de vorige een aantal jaren geleden gebeurde. Ze dient slechts om uitspraken te maken over de gemiddelde duurtijd tussen twee gebeurtenissen.

Om de empirische terugkeerperiode te berekenen wordt per simulatiejaar (in dit geval dus 23 jaren) een variabele bepaald zoals bijvoorbeeld het laagste peil. Dit levert dan 23 waarden op voor deze variabele, deze waarden worden vervolgens gerangschikt op basis van hun grootte en de empirische terugkeerperiode wordt als volgt bepaald (Willems P. , 2013):

$$T(r) = \frac{n}{r}$$

met $T(r)$ de terugkeerperiode bij een bepaalde rang r en n het aantal gesimuleerde jaren. De laagste (of hoogste waarde afhankelijk van de variabele die wordt onderzocht) heeft dus een terugkeerperiode van 23 jaar.

Aanvoer naar het kanaal Gent-Terneuzen

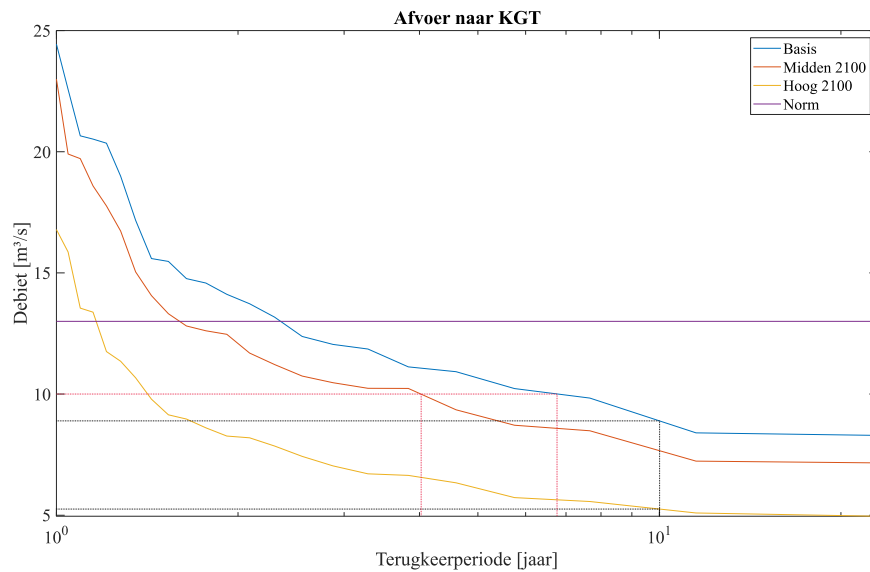
De aanvoer naar het kanaal Gent-Terneuzen wordt gedefinieerd als de som van onderstaande waterstromen:

- Sluizen Gent
- Sluizen Evergem
- Stuw Evergem
- Moervaart
- Overige neerslagafstroming

Figuur 43 toont voor elk klimaatscenario het aangevoerde debiet (2-maandelijks uitgemiddeld) in functie van de empirische terugkeerperiode. Voor een terugkeerperiode op de x-as van bijvoorbeeld 10 jaar kan men dus afleiden dat in het 'hoog 2100' scenario het debiet slechts ongeveer 5 m³/s bedraagt waar dit in het basis scenario nog rond de 9 m³/s is (zie zwarte stippellijn). Anderzijds kan ook gesteld worden dat een debiet van minder dan 10 m³/s zich in het basis scenario gemiddeld slechts om de ongeveer 7 jaar voordoet waar dit in het 'midden 2100' scenario al elke 4 jaar is (zie rode stippellijn).

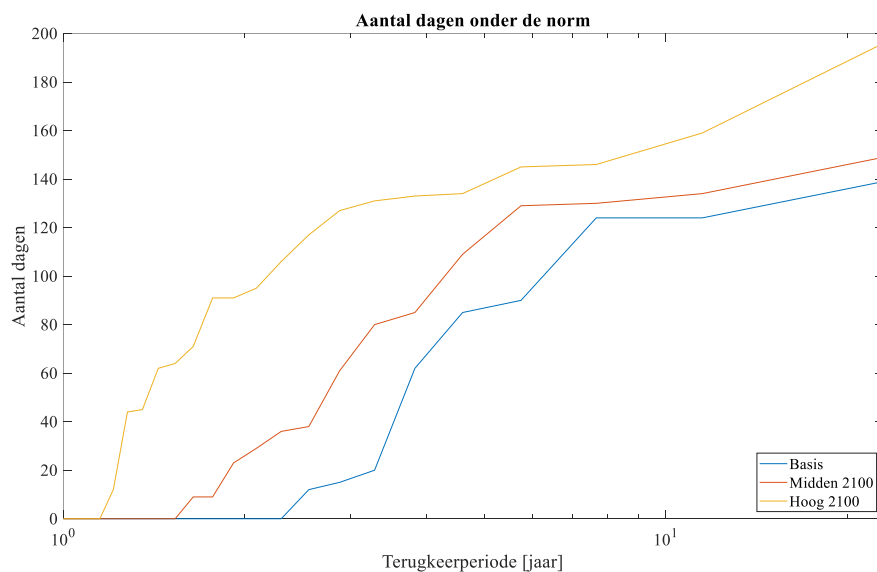
De boven aanvoer wordt niet beïnvloed door de bouw van de nieuwe sluis, maar wel door het veranderende klimaat. De verdeling van het water op het Groot Pand is in alle scenario's gelijk en heeft dus geen invloed op deze resultaten. Reeds in het huidige klimaat komen er bij hogere terugkeerperiodes zeer lage debieten voor, maar onder invloed van klimaatverandering dalen deze debieten sterk met voor de hoogste terugkeerperiode een daling van 40% voor het hoog impact scenario t.o.v. het basis scenario.

De norm in Figuur 43 is gelijk aan 13 m³/s overeenkomstig het verdrag tussen Vlaanderen en Nederland. Echter zijn ook de schutverliezen in Terneuzen (met Nieuwe sluis en scheepvaartgroei) ongeveer gelijk aan 13 m³/s. Deze waarde voor de toekomstige schutverliezen komt overeen met de gelijklopende studie door HKV. Uit de vergelijking van deze norm valt onmiddellijk op dat het jaarlijkse minimale 2-maandelijkse debiet zeer frequent onder deze norm daalt en er zich dus een watertekort voordoet op het kanaal Gent-Terneuzen.



Figuur 43: Scenario resultaten voor de aanvoer naar kanaal Gent-Terneuzen

Figuur 44 geeft voor elk klimaatscenario het aantal dagen dat het aanvoerdebiet lager is dan de norm van 13 m³/s in functie van de terugkeerperiode. Hieruit blijkt duidelijk dat er in het basis scenario reeds frequent overschrijdingen van de norm plaatsvinden, maar dat dit in het midden en vooral hoog klimaatscenario nog sterk zal toenemen.

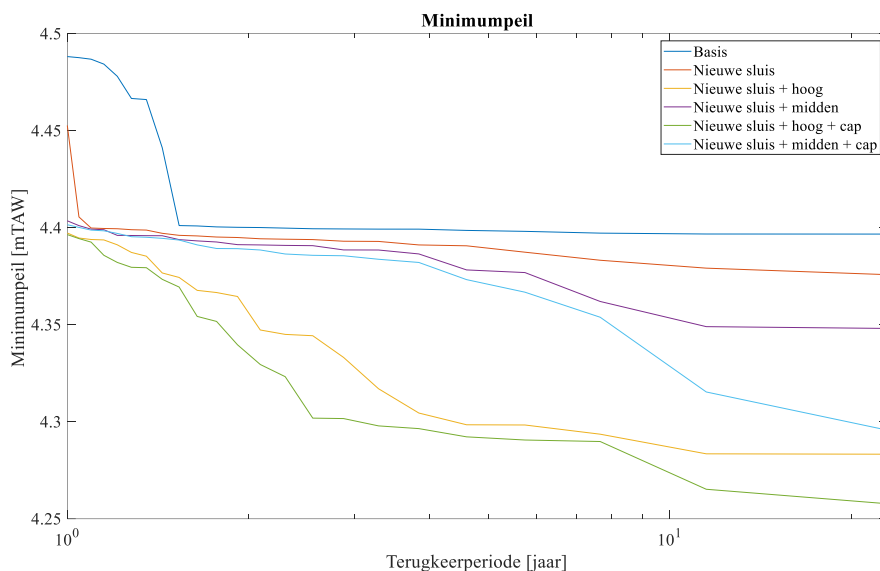


Figuur 44: Aantal dagen dat het aanvoer debiet lager is dan de norm van 13 m³/s

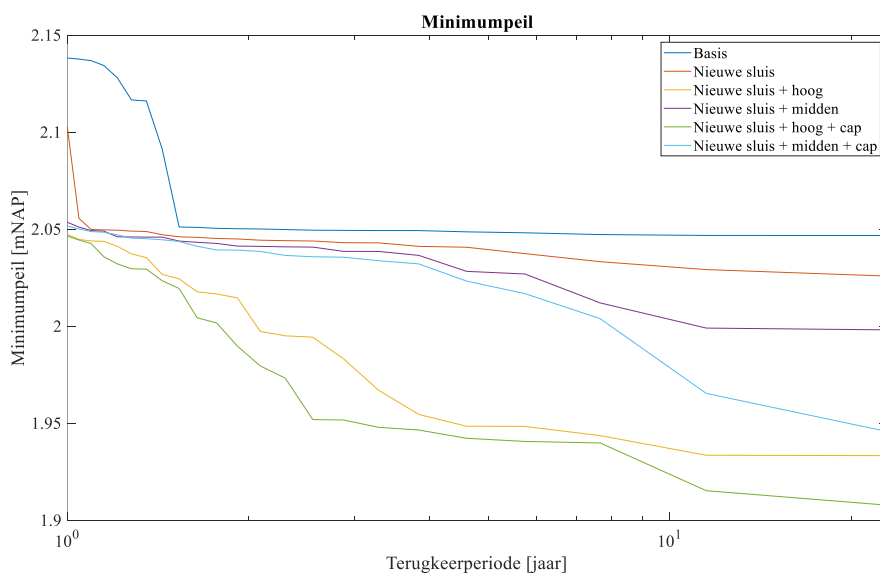
Peil

In Figuren Figuur 45 en Figuur 46 wordt dieper ingegaan op het laagste peil dat per jaar voorkomt. Hierbij is er zowel een invloed merkbaar van het klimaat als van de bouw van de Nieuwe sluis alsook van de bijkomende captaties. Allen hebben als gevolg dat er een daling optreedt van het peil, maar de duidelijkste daling lijkt zich voor te doen ten gevolge van het veranderende klimaat. Het scenario Nieuwe sluis + hoog 2100 heeft bij de hoogste terugkeerperiode een laagste peil dat 10 cm lager ligt dan bij het scenario Nieuwe sluis.

Een verhoging van de captaties leidt bijkomend nog eens tot een daling van bijna 3 cm bij de hoogste terugkeerperiode. Een belangrijke nuancering hierbij is dat het model werkt met zeer strikte drempels en dat deze zeker een invloed kunnen hebben op het minimumpeil (bemerkt dit bijvoorbeeld bij het scenario Basis).



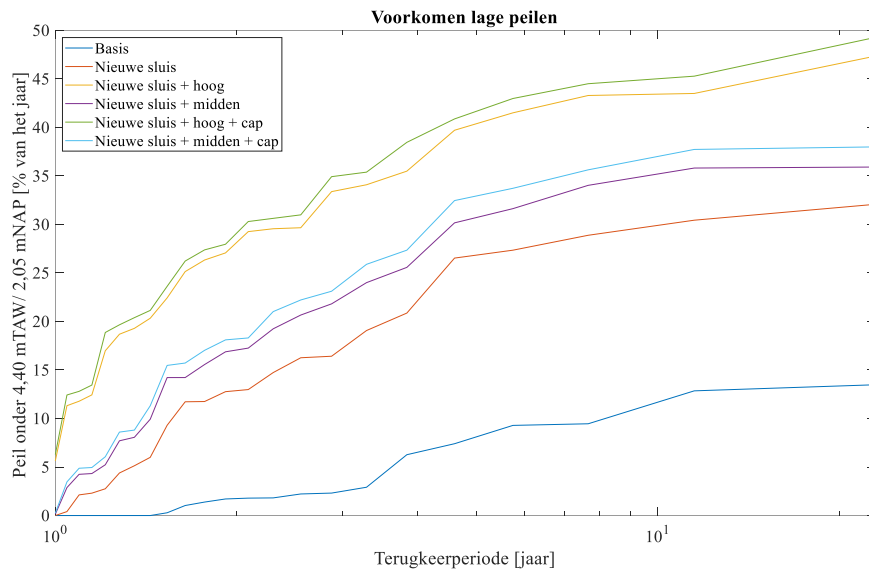
Figuur 45: Scenario resultaten voor het minimumpeil (mTAW)



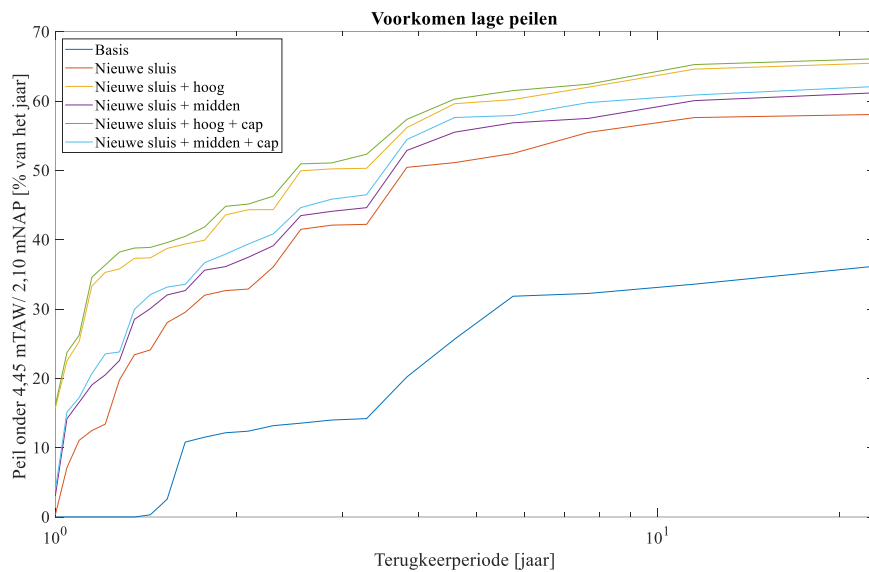
Figuur 46: Scenario resultaten voor het minimumpeil (mNAP)

De figuren hierboven vertellen enkel iets over het minimumpeil, maar niets over de duur of het voorkomen van lage peilen. Figuren Figuur 47, Figuur 48 en Figuur 49 gaan hier wel dieper op in. Figuur 47 toont hoeveel procent van het simulatiejaar het peil onder het alarmpeil van 4,40mTAW (2,05 mNAP) gaat. Merk op dat het jaar 2022 niet volledig gesimuleerd werd en dat dit dus een kleine vertekening kan geven van de resultaten. Het valt onmiddellijk op dat de bouw van de Nieuwe sluis een groot effect heeft op het voorkomen van lage peilen, t.o.v. het scenario Basis is er een stijging merkbaar met meer dan factor 2 bij het scenario Nieuwe sluis.

Het verder inrekenen van klimaatverandering en de bijkomende captaties leidt eveneens tot een stijging, zij het wel kleiner. Figuur 48 toont hetzelfde maar dan voor de peilen lager dan het streefpeil van 4,5 mTAW (2,10 mNAP).



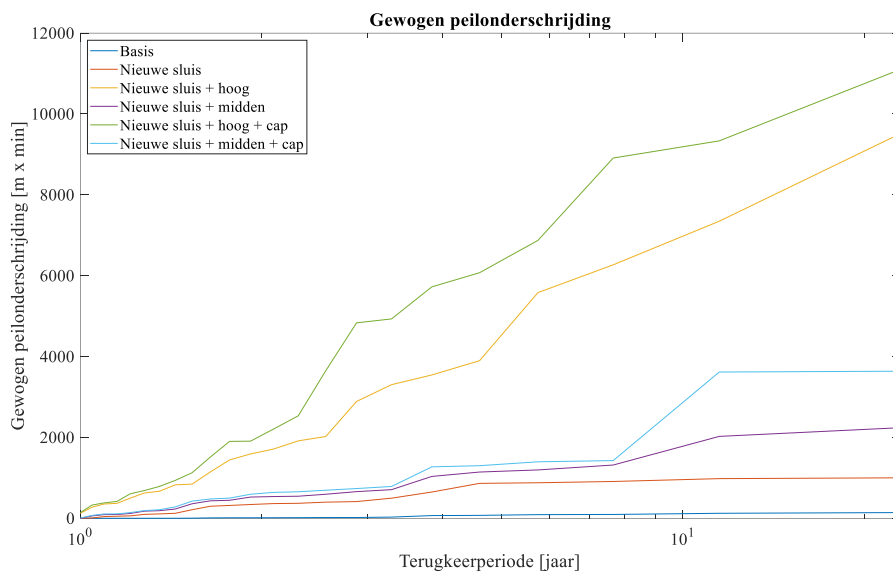
Figuur 47: Scenario resultaten voor het voorkomen van lage peilen (lager dan 4,40 mTAW/2,05 mNAP)



Figuur 48: Scenario resultaten voor het voorkomen van lage peilen (lager dan 4,45 mTAW/2,10 mNAP)

Figuur 49 toont de gewogen peilonderschrijding, dit is de duur dat het peil lager is dan 4,40 mTAW (2,05 mNAP) vermenigvuldigd met de grootte van deze onderschrijding. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het scenario Nieuwe sluis weliswaar leidt tot een zeer sterke stijging van het voorkomen van peilen onder 4,40 mTAW, maar dat het meestal gaat om kleine peilonderschrijdingen. De inrekening van klimaatverandering daarentegen leidt tot een zeer sterke stijging van de gewogen peilonderschrijding en dus tot significant lagere peilen doorheen voornamelijk de droge periodes.

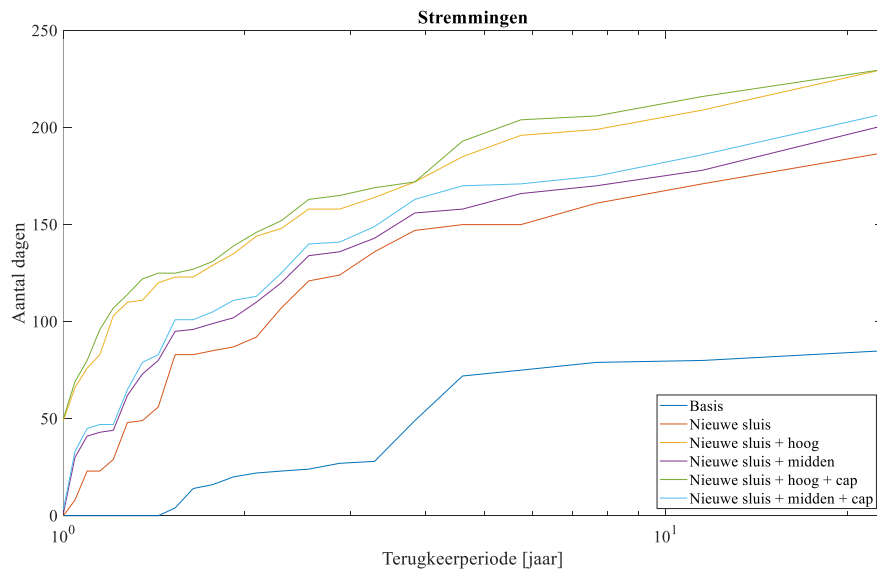
De bijkomende captaties leiden eveneens tot een stijging van de gewogen onderschrijdingsduur, maar duidelijk minder sterk dan het veranderende klimaat.



Figuur 49: Scenario resultaten voor de gewogen peilonderschrijding

Aantal dagen met stremmingen

Figuur 50 geeft voor elk scenario het aantal dagen met stremmingen per jaar weer in functie van de terugkeerperiode. Merk op dat vanaf er één stremming is op een dag deze wordt opgenomen in de statistieken. Deze figuur lijkt sterk op Figuur 47 wat zeer logisch is daar 4,40 mTAW ook de drempel is vanaf wanneer er gestremd wordt rond laagwater. Het bouwen van de Nieuwe sluis leidt inderdaad tot het voorkomen van meer peilen onder de 4,40 mTAW wat automatisch zal leiden tot een sterke stijging van het aantal dagen met minstens één gestremde schutting. Al dient hierbij wel vermeld te worden dat er reeds in het scenario Basis heel wat stremmingen voorkomen bij de hogere terugkeerperiodes.

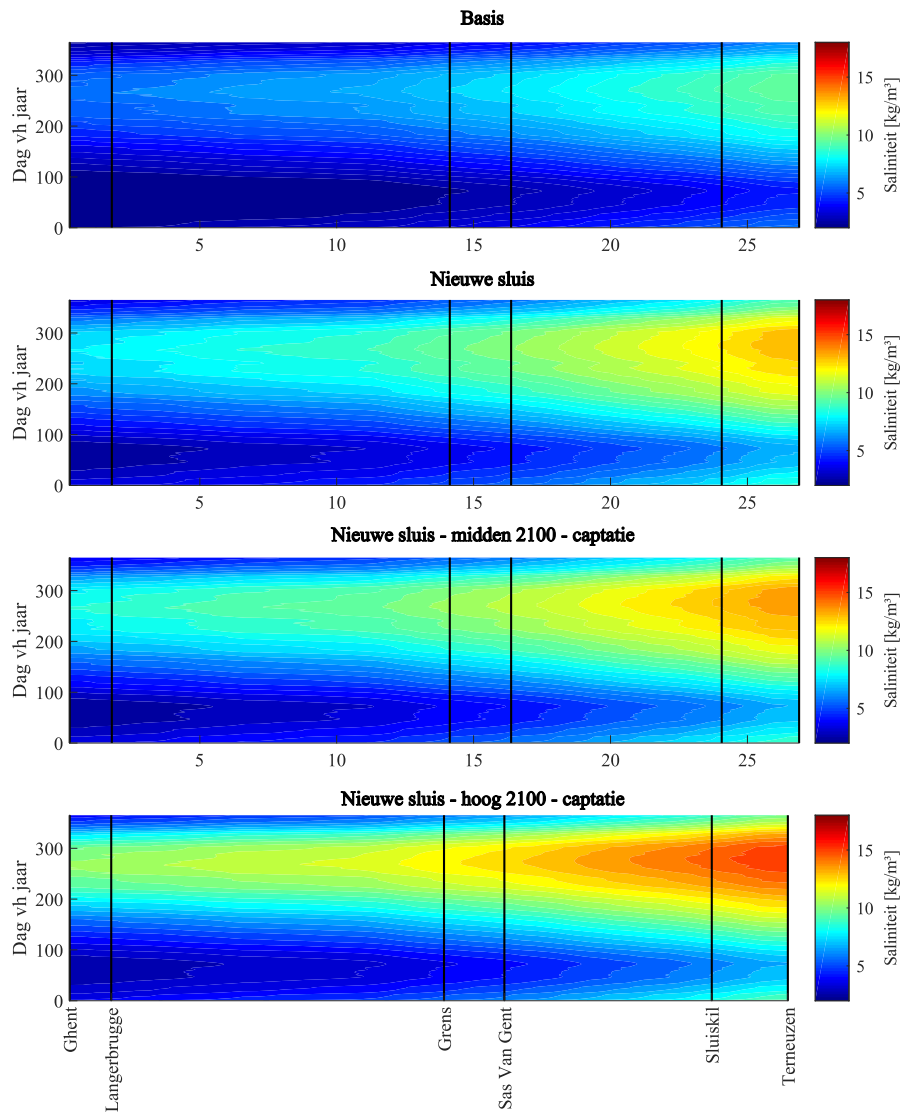


Figuur 50: Scenario resultaten voor het aantal dagen met stremmingen

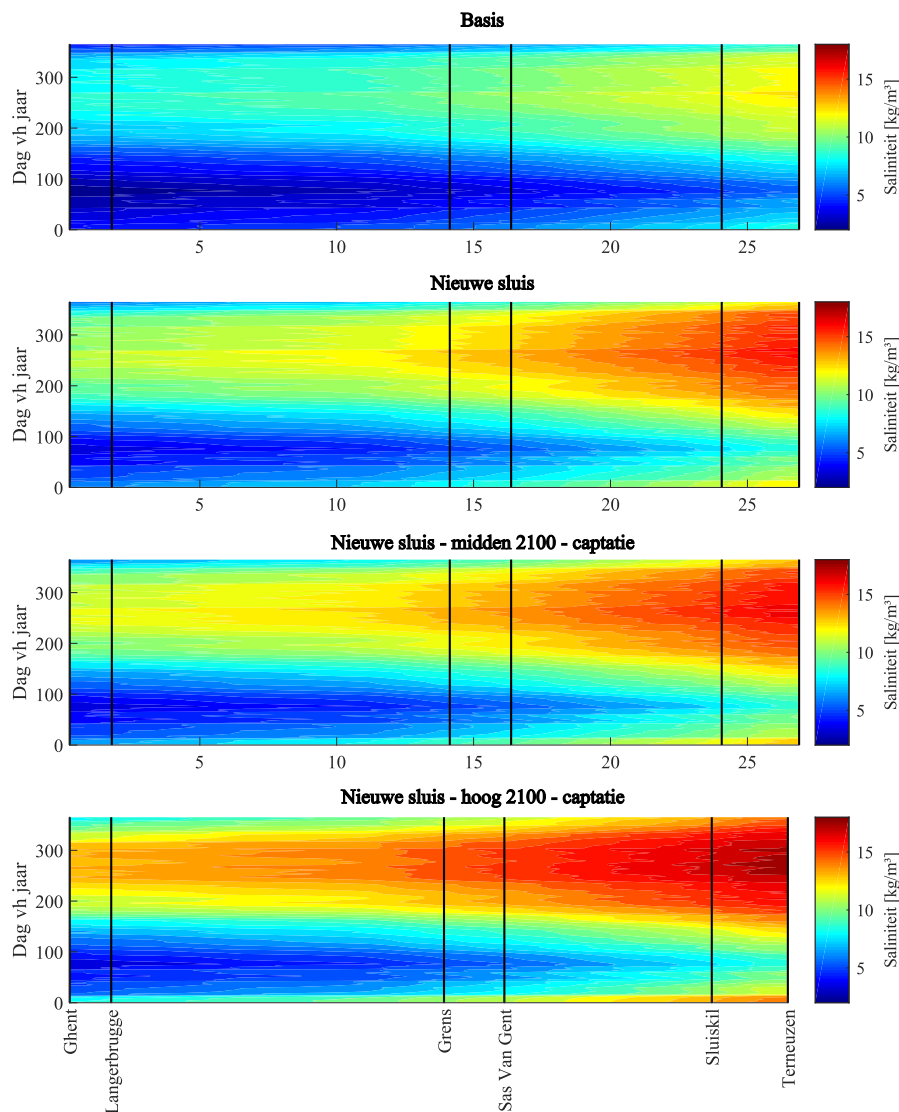
Zoutconcentratie

Als laatste variabele wordt ook de zoutinrusie op het kanaal bestudeerd voor de verschillende scenario's. Hierbij valt op dat er geen significant verschil was tussen de scenario's met bijkomende captatie (Nieuwe sluis – midden 2100 – captatie en Nieuwe sluis – hoog 2100 – captatie) en degene zonder bijkomende captatie (Nieuwe sluis – midden 2100 en Nieuwe sluis – hoog 2100) daarom zijn enkel de scenario's met bijkomende captatie getoond om de figuren overzichtelijk te houden.

Figuren Figuur 51 en Figuur 52 tonen voor elk scenario respectievelijk de gemiddelde en P95 zoutconcentratie voor elke dag van het jaar doorheen het kanaal. Voor elke dag van het jaar is er op basis van de 23 gesimuleerde jaren een gemiddelde concentratie en een P95 concentratie bepaald. De P95 concentratie is de concentratie die slechts gedurende 5% van de gesimuleerde/beschouwde periode wordt overschreden. Deze figuren demonstreren dat het bouwen van de nieuwe sluis en het veranderende klimaat leiden tot een sterke stijging van zowel de gemiddelde als de P95 concentratie met de sterkste effecten in de zomer periodes (droge periodes). Tegelijkertijd valt ook op dat de zoutinrusie zich sterker zal verspreiden over het kanaal met ook hoge concentraties die voorkomen in Gent.

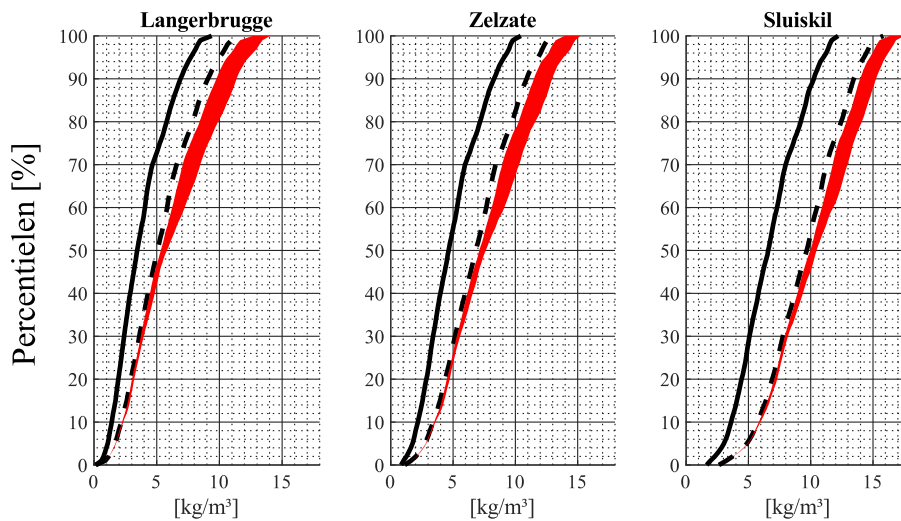


Figuur 51: Gemiddelde zoutconcentratie per dag van het jaar



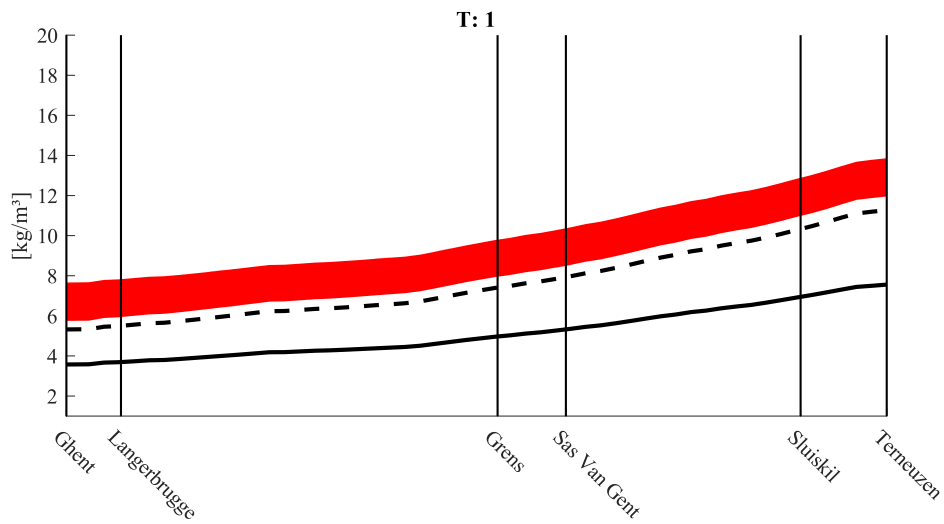
Figuur 52: P95 zoutconcentratie per dag van het jaar. P95 duidt op de waarde die slechts in 5% van de tijd wordt overschreden.

Figuur 53 toont voor de verschillende scenario's en drie locaties de percentielen van de zoutconcentratie op basis van de 23 gesimuleerde jaren. Hierbij valt op dat de percentielwaarden voor elke locatie hoger liggen bij de scenario's met de Nieuwe sluis en klimaatverandering t.o.v. het scenario Basis. De sterkste stijging lijkt toegeschreven te kunnen worden aan het bouwen van de Nieuwe sluis, dit is logisch te verklaren door enerzijds een toename in het aantal schuttingsen en het grotere kolkvolume van de Nieuwe sluis. De stijging van de percentielwaarden is ook sterker voor de locaties dicht bij het sluisencomplex van Terneuzen (Zelzate en Sluiskil).

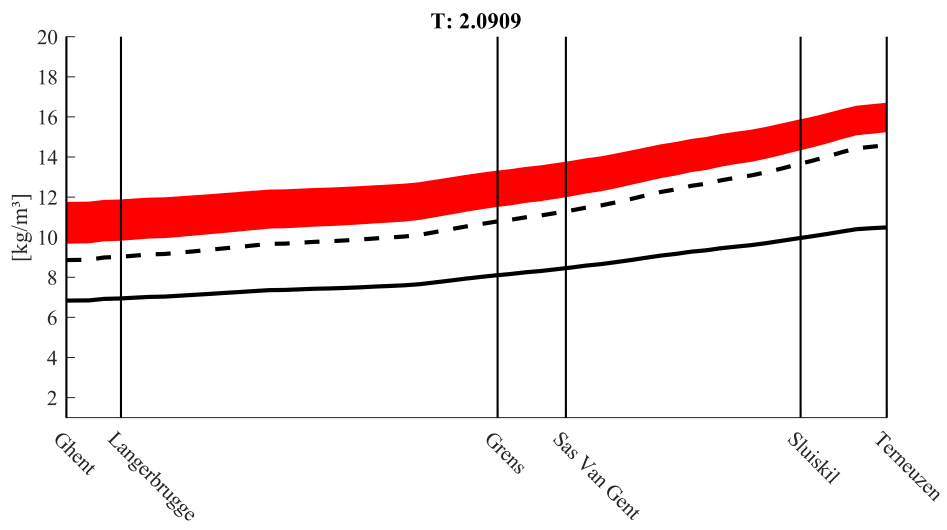


Figuur 53: Percentielen van de zoutconcentratie voor verschillende locaties en scenario's. Scenario Basis (volle zwarte lijn), scenario Nieuwe sluis (stippellijn) en scenario's Nieuwe sluis - midden 2100 - captatie en Nieuwe sluis - hoog 2100 – captatie (rode band met midden de ondergrens en hoog de bovengrens)

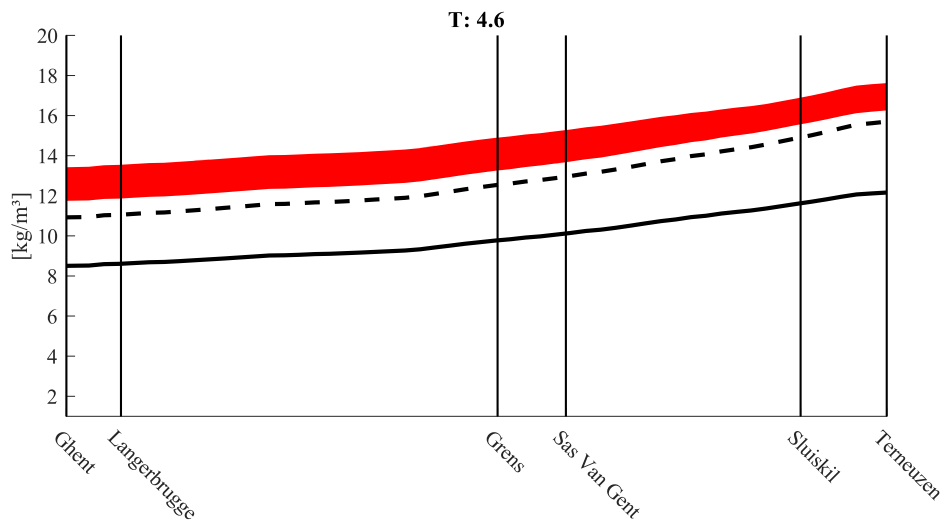
Figuren Figuur 54 tot Figuur 58 geven voor verschillende terugkeerperiodes het verloop van de maximale zoutconcentratie doorheen het kanaal voor de verschillende scenario's. Ook hier valt op dat de grootste stijging zich voordoet ten gevolge van de bouw van de Nieuwe sluis. Het inrekenen van het veranderende klimaat leidt tot een bijkomende stijging, maar deze is duidelijk kleiner. Bemerkt dat ook in deze figuren duidelijk wordt dat de stijging sterker is dicht bij het sluisencomplex van Terneuzen.



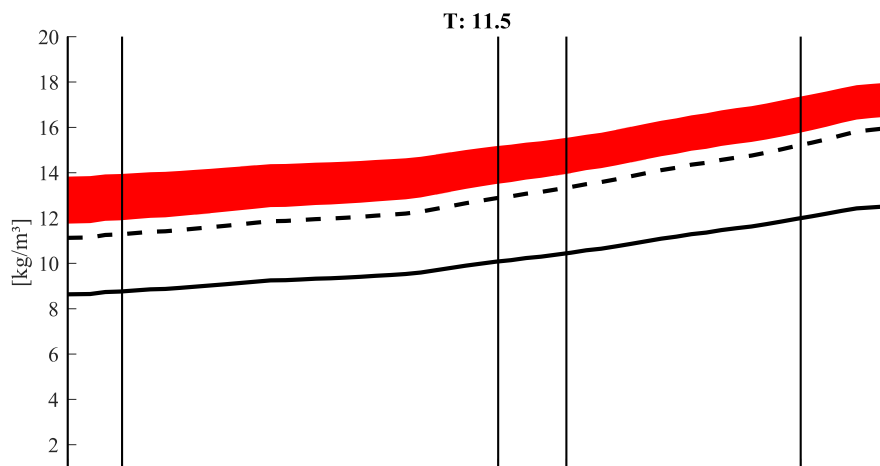
Figuur 54: Verloop van de maximale zoutconcentratie doorheen het kanaal bij een terugkeerperiode van 1 jaar



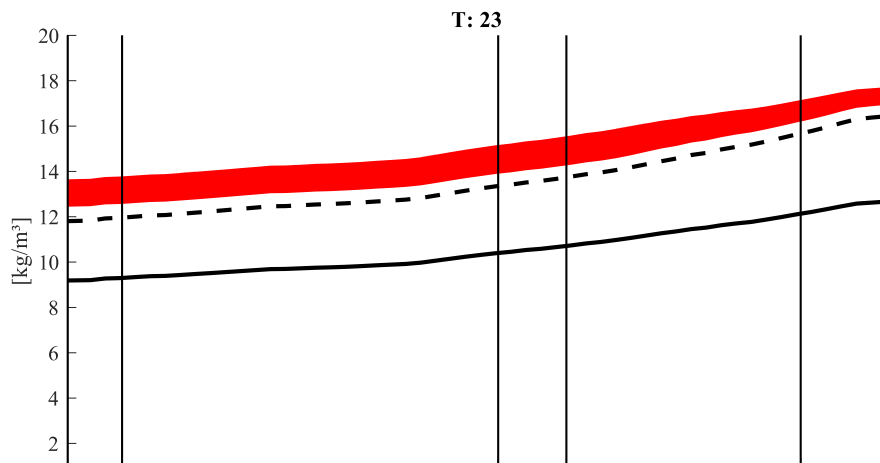
Figuur 55: Verloop van de maximale zoutconcentratie bij een terugkeerperiode van 2 jaar



Figuur 56: Verloop van de maximale zoutconcentratie bij een terugkeerperiode van 4,6 jaar



Figuur 57: Verloop van de maximale zoutconcentratie bij een terugkeerperiode van 11,5 jaar



Figuur 58: Verloop van de maximale zoutconcentratie bij een terugkeerperiode bij een terugkeerperiode van 23 jaar

4.3 Discussie

Uit de resultaten kan geconcludeerd worden dat zowel klimaatverandering, de Nieuwe sluis en de bijkomende captaties een grote impact hebben op de waterhuishouding van het kanaal Gent-Terneuzen.

Scenario 2 schat het effect van de Nieuwe sluis in waarbij er een opvallende stijging zichtbaar is van het voorkomen van lage peilen en het aantal dagen met stremmingen ten opzichte van de huidige situatie. Echter bleek uit scenario's 3 en 4 dat klimaatverandering een sterker effect heeft op het peil daar de gewogen peilonderschrijding sterk steeg te opzichte van scenario 2. Dit betekent dat de Nieuwe sluis er voor zal zorgen dat het peil veel meer onder de 4,40 mTAW (2,05 mNAP) zal zakken, maar dat deze peildalingen opgevangen worden door het soms veelvuldig stremmen van de sluizen.

Klimaatverandering daarentegen zal leiden tot een sterkere daling van de peilen die gecompenseerd dienen te worden door bijkomende dagen met stremmingen. Uit de analyse van de aanvoerdebieten naar het kanaal Gent-Terneuzen bleek dat een onderschrijding van de norm van 13 m³/s in de toekomst scenario's veelvuldig voorkomt voor een periode langer dan de typische zomermaanden.

Het bijkomend capteren versterkt de eerder beschreven effecten daar in deze scenario's er een bijkomende constante watervraag aanwezig is. De effecten zijn daarentegen wel minder groot dan die ten gevolge van klimaatverandering en de Nieuwe sluis.

Om het peil op het kanaal te handhaven zal het model de sluizen in Terneuzen stremmen om op die manier de watervraag te verlagen, waarbij het scheepvaartverkeer wel sterk gehinderd zal worden. Echter zal er in de realiteit ook overgegaan kunnen worden op diepgangbeperkingen en gegroepeerd schutten. Beide maatregelen kunnen de watervraag van de sluizen verminderen zonder daarvoor een goede werking van de sluizen te verhinderen (Koevoets, 2023).

Wat betreft de waterkwaliteit is voornamelijk de Nieuwe sluis van groot belang daar deze de uitwisseling van zout met de Westerschelde sterk zal laten toenemen. Dit leidt tot een significante verhoging van de zoutconcentratie overal op het kanaal, maar de stijging is het sterkste in de omgeving van het sluizencomplex in Terneuzen. Het veranderende klimaat heeft ook hier een negatief effect zij het minder groot dan de Nieuwe sluis. Het gecombineerd effect van de Nieuwe sluis en klimaatverandering kan leiden tot bijna een verdubbeling van de zoutconcentratie ten opzichte van de huidige situatie. De gemiddelde zoutconcentratie in Langerbrugge en Gent kan oplopen tot gemiddeld 10 kg/m³ voor de ganse zomer met zelfs uitschieters tot 12 kg/m³. Het bijkomend capteren heeft dan weer een verwaarloosbaar effect op de gesimuleerde zoutconcentratie.

5 Besluit

In opdracht van North Sea Port i.s.m. VNSC werd aan de afdeling Hydraulica en Geotechniek van KU Leuven gevraagd een waterbalans en zoutmodel op te stellen voor het kanaal Gent – Terneuzen. Dit model beschrijft de opbouw van deze twee modellen die weliswaar volledig apart werken, maar wel gelinkt zijn.

In een eerste stap werden alle relevante waterstromen op het kanaal geïnventariseerd en gekwantificeerd, waar mogelijk volgde een korte controle of validatie van de berekende waarden met externe bronnen. In een volgende stap werd een set van regels opgesteld om het spuien aan het sluisencomplex van Terneuzen te simuleren; deze set van regels werd gekalibreerd voor de periode 2017-2020. Met alle waterstromen gekend was het mogelijk een waterbalans op te stellen voor de periode 1/01/2017-1/11/2022 die, zo bleek uit validatie, er goed in slaagt het waterpeil te simuleren alsook de globale trends op het kanaal te volgen.

Daarna werd ook een zoutmodule opgemaakt die toelaat om de verspreiding van zout in het kanaal te simuleren. Zowel de zoutgradiënt in de lengterichting van het kanaal als de absolute waarde van de zoutgehalten worden voor de meeste meetdata goed benaderd.

Beide modules (waterbalans en zoutmodule) werden in de vervolgoopdracht gebruikt om scenario's door te rekenen. In totaal werden er zes scenario's opgesteld, waarvan het eerste een basis scenario is dat de huidige toestand voorstelt. De scenario's werden doorgerekend voor de periode 1/01/2000-1/11/2022 waardoor het waterbalansmodel enkele aanpassingen moest ondergaan. De randvoorwaarden werden verlengt voor de gehele simulatieperiode en er werd een aangepaste sluisformulering opgesteld die toeliet ook de Nieuwe sluis in Terneuzen te kunnen implementeren.

De doorgerekende scenario's waren het basisscenario, een scenario waarbij de Nieuwe sluis werd geïmplementeerd, twee scenario's waarbij naast de Nieuwe sluis ook het veranderende klimaat werd beschouwd (zowel een midden als hoog impact scenario) en tot slot werden de twee klimaatscenario's nog uitgebreid met de geplande bijkomende captaties in het havengebied van Gent.

De scenario's werden geëvalueerd op zowel waterbeschikbaarheid als waterkwaliteit (zoutconcentratie). De waterbeschikbaarheid is sterk afhankelijk van de boven aanvoer richting Terneuzen en dus heeft ook het veranderende klimaat het sterkste effect op de waterbeschikbaarheid. Er is een duidelijke daling merkbaar wat leidt tot lager peilen en meer stremmingen aan het sluisencomplex van Terneuzen. Ook de Nieuwe sluis en de bijkomende captaties hebben een negatief effect, maar dit is kleiner dan het veranderende klimaat. De Nieuwe sluis is echter wel zeer belangrijk voor de waterkwaliteit, het bouwen van de Nieuwe sluis heeft een negatief effect op de zoutconcentratie met een sterke stijging van de concentratie tot gevolg ongeacht van de locatie op het kanaal. Hoe dichterbij het sluisencomplex van Terneuzen hoe sterker de stijging in concentratie. Het veranderende klimaat heeft eveneens een negatief effect op de waterkwaliteit, maar de bijkomende captaties daarentegen hebben een verwaarloosbaar effect.

6 Referenties

- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O., Bouwer, L., & Yiou, P. (2014). *EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research*. *Regional environmental change*, 14(2), 563-578.
- Koevoets, I. (2023). *Effect sluisstremmingen sluizencomplex Terneuzen*. Vlaams-Nederlandse Scheldec Commissie.
- Luijsterburg, R., & Schiepers, M. (2020). *Algemene beschrijving functionaliteit Spuicomputer*. Engie.
- Marin. (2015). *CAPACITEITSONDERZOEK NIEUWE GROTE ZEESLUIS KANAAL GENT-TERNEUZEN Eindrapport*. Tabel 7-1 p. 33.
- Moervaart en Durme. (2022). Opgehaald van Visuris: <https://www.visuris.be/Moervaart-Durme>
- Rijkswaterstaat. (2017). *Bestrijdingsplan dijkbewaking en waterafvoer 2017 - 2021*.
- Sanders, B., Green, C., Chu, A., & Grant, S. (2021). *Case study: modelling tidal transport of urban runoff in channels using the finite-volume method*. *Journal of Hydraulic engineering*, 127(10): 795-804.
- Taylor, K., Stouffer, R., & Meehl, G. (2012). *An overview of CMIP5 and the experiment design*. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), 485-498.
- Vanderkimpfen, P., Pereira, F., & Mostaert, F. (2012). *Omaak van modellen voor onderzoek naar waterbeschikbaarheid en -allocatiestrategieën in het Scheldestroomgebied: Deelrapport 5 - Zoutintrusie kanaal Gent-Terneuzen*. Versie 4_0. WL Rapporten, 724_04. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Vijverberg, T., Folmer, I., Carron, T., Talstra, H., & Bliet, B. (2010). *Verkenning maritieme toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen: Aanvullend oppervlaktewateronderzoek*. Svazek Hydraulics, HASKONING BELGIUM NS/SAM-KUST & RIVIEREN.
- Vrijburgt, A., & Glerum, A. (2000). *Ontwerp van schutsluizen*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat.
- WATERINFO.be. (sd). *Waterbouwkundig Laboratorium. Metingen en voorspellingen afkomstig uit de databank van het Hydrologisch InformatieCentrum [DATA]*. 16/02/2023.
- Weiler, O., & Burgers, R. (2017). *Zoutindringing door schutsluizen -Overzicht projecten en aanzet formulering t.b.v. netwerkmodellen*. Deltares en Rijkswaterstaat.
- Willems, P. (2013). *Waterloopmodellering*. ACCO.
- Willems, P., & Vrac, M. (2011). *Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change*. *Journal of Hydrology* 402 (3–4), 193–205.

AFDELING HYDRAULICA EN GEOTECHNIEK
Kasteelpark Arenberg 40 bus 2448
3001 HEVERLEE (LEUVEN), BELGIË
tel. + 32 16 32 16 58
tel. secr. +32 16 32 14 74
fax + 32 16 32 19 89
Patrick.Willems@kuleuven.be
kuleuven.be/hydr

