

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging

Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging

Colofon

Deze publicatie maakt deel uit van de systeemverkenningen van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, een initiatief van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de deltacommissaris. Het programma levert kennis op over de gevolgen van zeespiegelstijging en hoe Nederland daarmee kan omgaan. Deze kennis wordt gebruikt bij de herijking van het Deltaprogramma in 2026.

Meer informatie over het kennisprogramma en een overzicht van alle publicaties staat op:
kennisprogrammazeespiegelstijging.nl

-

Opsteller: Deltares

-

Auteur: dr. Joost Delsman

-

Geschreven in opdracht van Rijkswaterstaat WVL voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging

-

Datum: 4 november 2024

Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat WVL
Contactpersoon	Jantine Hoekstra, Meinte Blaas
Referenties	
Trefwoorden	doorspoeling, zeespiegelstijging, verzilting

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	04-11-2024
Projectnummer	11211024-002
Document ID	11211024-002-BGS-0002
Pagina's	64
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Joost Delsman	

Samenvatting

Bij zeespiegelstijging neemt de zoutvracht vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater in de kustregio toe. Om zoutconcentraties in het oppervlaktewater op het huidige niveau te houden neemt de doorspoelbehoefte daarom toe. Dit vergroot de watervraag, terwijl de toekomstige waterbeschikbaarheid afneemt. Eerder onderzoek binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging heeft de verwachte toename van de doorspoelbehoefte in beeld gebracht, onder het uitgangspunt dat chlorideconcentraties in het regionale oppervlaktewater gelijk blijven aan de huidige situatie. Voorliggende rapportage verkent in hoeverre er handelingsruimte is in deze berekende toename van de doorspoelbehoefte, gegeven de verwachte toename in zoutvrachten bij zeespiegelstijging.

Deze handelingsruimte is verkend op basis van berekeningen die eerder zijn uitgevoerd binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Op basis van de water- en zoutbalans uit deze berekeningen is per kleinste oppervlaktewatereenheid een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de relatie tussen de streefconcentratie en de doorspoelvraag en de inlaatconcentratie en de doorspoelvraag.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt een standaard verloop van de relatie tussen streefconcentratie en doorspoelvraag en van de relatie tussen inlaatconcentratie en doorspoelvraag. Waar verschillende gebieden zich op dit standaard verloop bevinden blijkt evenwel sterk te verschillen.

Verschillende handelingsperspectieven zijn verkend:

- Het beperkt verhogen van de streefconcentratie vermindert de doorspoelvraag van met name een groot aantal Hollandse polders en de Fries-Groningse kustregio. Dit handelingsperspectief kan leiden tot een 10% afname in de totale landsbrede polder-doorspoelvraag.
- Wanneer landbouw qua waterkwaliteit maar minimaal wordt bediend (aangenomen streefconcentratie van 300 mg/L voor hoogwaardige teelten, 1000 mg/L voor akkerbouwgebieden en 2000 mg/L voor weidegronden, dit zijn bovenwaarden van de bekende spreiding in zouttolerantie van landbouwgewassen), kan de totale landsbrede doorspoelvraag met 40% worden beperkt. In dit perspectief wordt niet alleen de landbouw maar minimaal voorzien, maar dit handelingsperspectief leidt waarschijnlijk tot problemen voor andere functies zoals ecologie.
- Met het aanpassen van doorspoeling aan meteorologische omstandigheden (minder doorspoelen bij droogte, dit vergt bijvoorbeeld in operationeel waterbeheer ook sturen op chlorideconcentraties) lijkt de benodigde polderdoorspoeling met maximaal de helft te kunnen worden teruggebracht. Dit perspectief moet wel goed ruimtelijk worden uitgewerkt, er zijn ook gebieden waar de doorspoelvraag in droge perioden juist toeneemt.
- Wanneer de doorspoelhoeveelheid constant wordt gehouden en niet wordt aangepast aan toenemende zoutvracht, nemen zoutconcentraties in het regionale oppervlaktewater toe. In een aantal gebieden kan met het huidige doorspoelbeheer landbouw niet worden voorzien, concentraties nemen hier met zeespiegelstijging sterk toe. Dit geldt voor de bollenstreek, de kop van Noord-Holland, de Fries-Groningse kustregio en Tholen / st. Philipsland.
- Bij beperkte verhoging van de inlaatconcentratie, bijvoorbeeld door toenemende zoutintrusie of beperkte waterbeschikbaarheid, neemt de totale landsbrede polder-doorspoelvraag toe met zo'n 10%. Andersom kan de polder-doorspoelvraag landsbreed theoretisch met zo'n 10% worden beperkt bij verlaging van de

inlaatconcentratie, bijvoorbeeld door het in bovenstroomse richting verplaatsen van inlaatlocaties.

Over alle onderzochte handelingsperspectieven heen valt vooral op dat lokale oppervlaktewateren (LSWs) sterk ruimtelijk verschillen in hoe de verschillende handelingsperspectieven uitpakken. Het is dan ook niet eenvoudig om een bepaald handelingsperspectief breed te implementeren, lokaal maatwerk lijkt noodzakelijk.

De in dit rapport beschreven analyses betreffen alle verkennende analyses. Hierbij is op basis van bestaande berekeningen (bestaande water- en zoutbalans) en berekeningen van de doorspoelvraag op basis van per LSW opgegeven streef- en inlaatconcentraties een inschatting gemaakt van handelingsperspectief rond de doorspoelvraag. Op de analyses zijn alle uitgangspunten en beperkingen van de onderliggende studie (Delsman et al., 2022) van toepassing. Zo wordt geen rekening gehouden met andere klimatologische (meteorologische) veranderingen dan zeespiegelstijging, zijn aannames gedaan welke wateren wel en niet meestijgen met de zeespiegel, en wordt uitgegaan van de 'gematigde tijdlijn' van de zeespiegelstijging (RCP4.5). Daarnaast zijn er beperkingen in het waterverdelingsmodelconcept, die in deze studie nader zijn onderzocht. Er is verder geen rekening gehouden met ruimtelijke doorwerking tussen LSWs, zodat veranderingen in bovenstroomse LSWs niet doorwerken op benedenstroomse LSWs. Het is daarmee ook niet direct duidelijk wat de gepresenteerde polder-doorspoelhoeveelheden betekenen voor watervraag op de inlaatpunten van het hoofdwatersysteem. Dit vergt nader onderzoek.

Inhoud

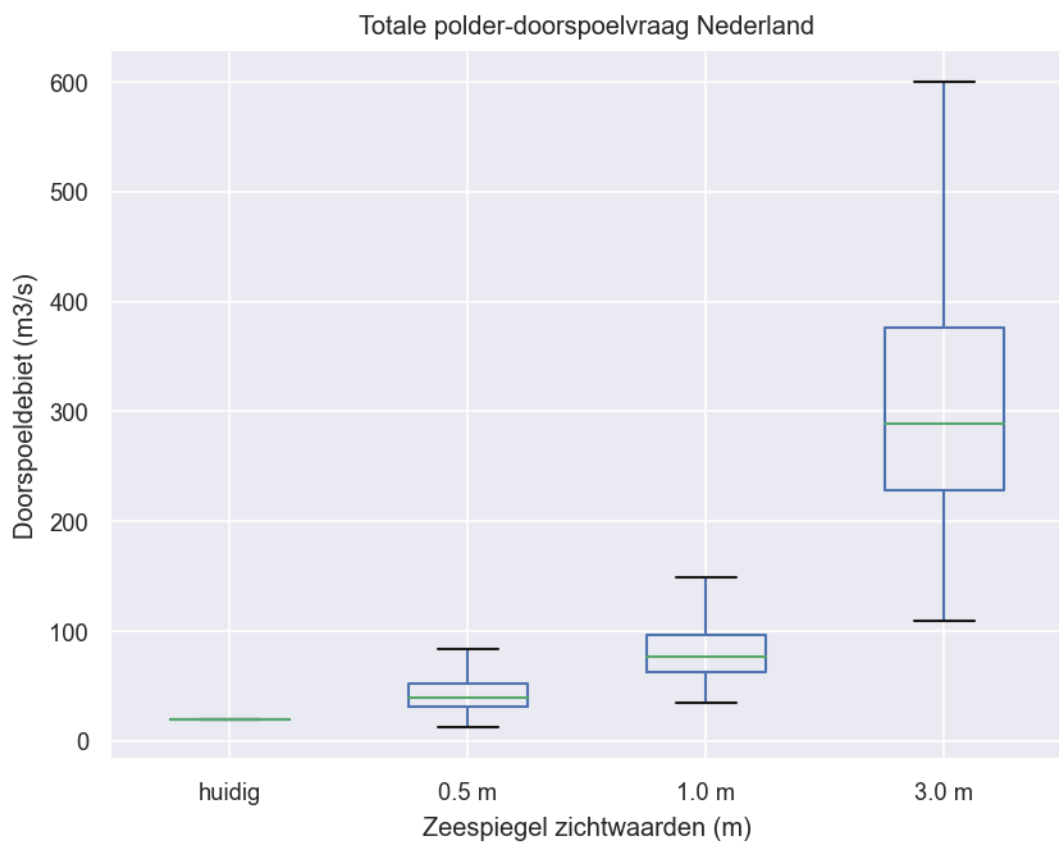
	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Handelingsruimte in doorspoeling	9
2	Methode	10
2.1	Uitgangspunten	10
2.2	Berekening doorspoelvraag	10
2.3	Gevoeligheidsanalyse invloed streefconcentratie op doorspoelvraag	12
2.3.1	Gemiddeld over groeiseizoen	12
2.3.2	Gemiddeld over droge maand juli	12
2.3.3	Differentiatie streefconcentratie landgebruik	13
2.3.4	Analyse concentraties bij gelijkblijvende doorspoeling	14
2.4	Gevoeligheidsanalyse invloed inlaatconcentratie op doorspoelvraag	14
2.4.1	Gemiddeld over groeiseizoen	14
2.4.2	Bepaling concentratie hoofdwatersysteem	15
3	Resultaten	16
3.1	Gevoeligheidsanalyse streefconcentratie	16
3.2	Hoe neemt de doorspoelvraag af bij een hogere streefconcentratie?	18
3.2.1	Waar is de afname sterk en waar niet?	18
3.2.2	Hoe neemt de doorspoelvraag af bij minimaal voorzien landgebruik	20
3.2.3	Hoe anders is de doorspoelvraag in een droge periode?	22
3.2.4	Hoe hoog worden zoutconcentraties wanneer het doorspoelvolumen niet wordt aangepast?	25
3.3	Gevoeligheidsanalyse inlaatconcentratie	29
3.4	Hoe verandert de doorspoelvraag bij een andere inlaatconcentratie	31
3.4.1	Hoeveel hoger is de doorspoelvraag bij verhoging van de inlaatconcentratie?	31
3.4.2	Beperkingen in modelconcept Mozart – Distributiemodel	33
4	Synthese	37
	Referenties	40
A	Gevoeligheidsanalyse streefconcentratie	41
A.1	Huidige situatie	41
A.2	0.5 m zeespiegelstijging	43
A.3	1 m zeespiegelstijging	45
A.4	3 m zeespiegelstijging	47
B	Gevoeligheidsanalyse inlaatconcentratie	49

B.1	Huidige situatie	49
B.2	0.5 m zeespiegelstijging	51
B.3	1 m zeespiegelstijging	53
B.4	3 m zeespiegelstijging	55
C	Analyse gelijk houden doorspoeling	57
C.1	Chloride concentratie regionaal oppervlaktewater	57
C.1.1	Huidig	57
C.1.2	0.5 m zeespiegelstijging	57
C.1.3	1 m zeespiegelstijging	58
C.1.4	3 m zeespiegelstijging	59
C.2	Chloride concentratie uitstromend grondwater	60
C.3	Histogrammen zomergemiddelde chlorideconcentraties	61

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het klimaat verandert en de zeespiegel stijgt, wat zijn weerslag heeft op het watersysteem. Recent is onderzocht wat het effect is van een stijgende zeespiegel op de zoet-zoutverdeling in het grondwater en op de zoutlast van het oppervlaktewater (Delsman et al., 2022). Een belangrijk deel van het regionale oppervlaktewater dat te maken heeft met brakke kwel wordt doorgespoeld om zoutconcentraties in het oppervlaktewater geschikt te maken voor met name agrarisch gebruik. Delsman et al. (2022) hebben berekend hoeveel in de toekomst, bij door zeespiegelstijging toenemende zoutlast, zou moeten worden doorgespoeld om zoutconcentraties vergelijkbaar te houden met de huidige situatie. De doorspoelbehoefte van het regionale systeem blijkt daarbij flink toe te nemen (Figuur 1-1).



Figuur 1-1 Totale polder-doorspoelvraag Nederland (Delsman et al., 2022).

Mens et al., (2024) onderzochten de waterbalans van Nederland in een toekomstige droge zomer, gegeven klimaatverandering en zeespiegelstijging. Deze toegenomen regionale doorspoelvraag is een belangrijke component in de waterbalans van Nederland bij een toekomstig klimaat en zeespiegelstijging (Mens et al., 2024), die significante tekorten laat zien in een toekomstige droge zomer.

1.2 Handelingsruimte in doorspoeling

De berekende polder-doorspoelvraag uit Delsman et al. (2022) is gebaseerd op de aanname dat het toekomstige doorspoelbeheer erop gericht is om de huidige zoutconcentraties in het regionale oppervlaktewater te behouden. Maar wat betekent het om af te wijken van dit uitgangspunt? Door streefconcentraties te verhogen, of ruimtelijk te differentiëren? Is de doorspoelvraag daarmee flink te reduceren? En wat betekent dat dan voor de van dit water afhankelijke functies?

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, Systeemverkenningen, wil een verkennend antwoord op de vraag in hoeverre er handelingsruimte is in de berekende toename van de doorspoelbehoefte, gegeven de verwachte toename in zoutvrachten bij zeespiegelstijging.

2 Methode

2.1 Uitgangspunten

In deze verkenning gaan we uit van de bestaande berekeningen die binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging zijn uitgevoerd naar het effect van zeespiegelstijging op grondwaterverziltting en watervraag (Delsman et al., 2022). De in deze studie berekende toename van de doorspoelvraag bij toenemende verziltting geldt hier als referentiesituatie. De in Delsman et al. (2022) berekende toename van de doorspoelvraag is het resultaat van de aanname dat chlorideconcentraties in het regionaal oppervlaktewater in de toekomst gelijk worden gehouden aan de huidige situatie. Doorspoelvraag is in deze rapportage gedefinieerd als de hoeveelheid doorspoeling die nodig is om een streefconcentratie in een polder te bereiken. Merk op dat de berekeningen niet alleen zeespiegelstijging beschouwen, maar ook de effecten van autonome verziltting en bodemdaling op grondwaterverziltting. Meteorologie is daarentegen constant gehouden in de berekeningen.

De verkenning baseren we op berekeningen per afzonderlijk LSW (eenheid regionaal oppervlaktewater in het Landelijk Hydrologisch Model, LHM). De eerder berekende (Delsman et al., 2022) zoutvrucht uit het grondwater, streefconcentratie en inlaatconcentratie zijn daarbij uitgangspunt of worden gevarieerd in een gevoeligheidsanalyse. De regionale doorwerking van veranderingen in het ene LSW op andere LSWs in het watersysteem wordt in deze verkenning niet beschouwd.

De verkenning heeft verder alleen betrekking op doorspoeling van de inliggende polders, en niet op doorspoeling van de boezem.

2.2 Berekening doorspoelvraag

Voor de berekening van de gevoeligheid van de doorspoelvraag voor verandering van de streefconcentratie en inlaatconcentratie is een eenvoudige methode toegepast. Deze methode is grotendeels gelijk aan de methode zoals toegepast in Delsman et al. (2022). Hierbij wordt op basis van de mengverhouding van seizoen gemiddelde water- en zoutvruchten van de verschillende balansposten berekend bij welke doorspoelhoeveelheid een bepaalde streefconcentratie wordt bereikt. Deze methode is afdoende voor verkennende beleidsstudies, maar verwaarloost korte termijnvariaties en ruimtelijke doorwerking in het watersysteem. Hier wordt in het volgende nader op ingegaan. Het ondervangen van deze tekortkomingen vergt berekeningen met een volledig gekoppeld grond- en oppervlaktewatermodel voor zowel water als zout en was binnen deze studie niet mogelijk.

Voor de analyse is gebruik gemaakt van de beschikbare (Delsman et al., 2022) water- en zoutbalans per LSW. Er zijn geen nieuwe modelberekeningen uitgevoerd. De water- en zoutbalans zijn beschikbaar voor het zomerhalfjaar (april – oktober) van het gemodelleerde jaar 2003, in de huidige situatie en voor zichthorizons 0,5, 1 en 3 m zeespiegelstijging. Deze zichthorizons corresponderen in de in Delsman et al. (2022) gehanteerde zeespiegelcurve met respectievelijk het jaar 2078, 2129 en 2277. In de berekeningen zitten niet alleen effecten van zeespiegelstijging, maar ook de effecten van autonome verziltting en bodemdaling verwerkt. Op basis van de directe modeluitvoer zijn daarnaast de water- en zoutbalans van de maand juli 2003 uit de berekeningen samengesteld.

De doorspoelbehoefte wordt – gelijk aan de berekeningen in Delsman et al. (2022) – berekend volgens:

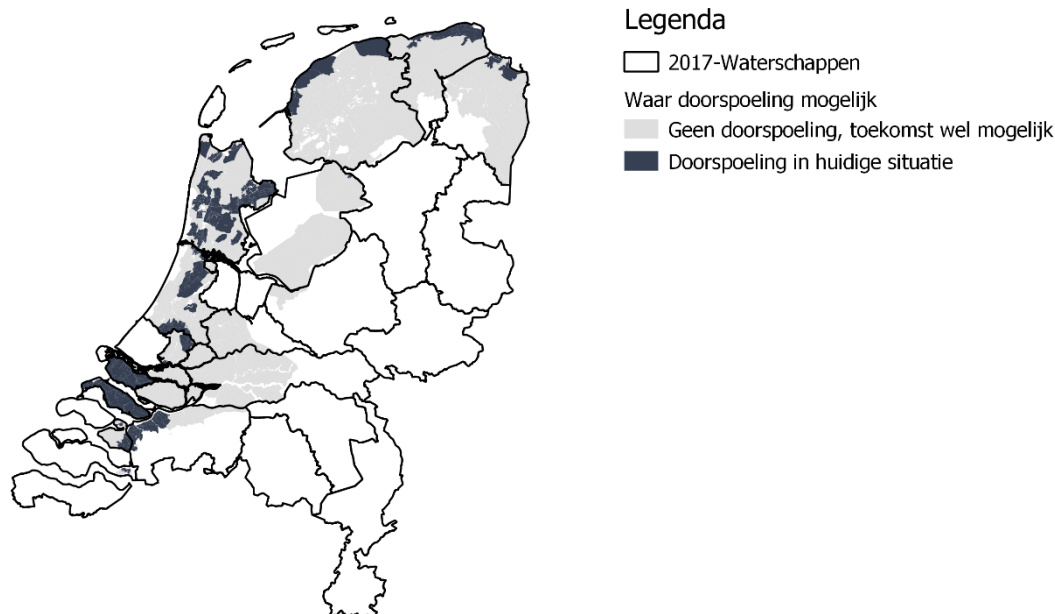
$$Q_{doerspoel} = Q_{lsw} \frac{C_{lsw} - C_{streef}}{C_{streef} - C_{inlaat}}, \quad (1)$$

Met $Q_{doerspoel}$ de doorspoelvraag, Q_{lsw} de gebiedseigen afvoer, C_{lsw} de concentratie van de gebiedseigen afvoer, C_{inlaat} de concentratie van het inlaatwater, en C_{streef} de streefconcentratie van het LSW. Wanneer de inlaatconcentratie gelijk of boven de streefconcentratie ligt, is met doorspoeling de streefconcentratie niet te bereiken. Gelijk aan Delsman et al. (2022) wordt in dat geval de streefconcentratie op de inlaatconcentratie + 50 mg/L gesteld. De streefconcentratie van de verschillende LSWs is in Delsman et al. (2022) bepaald door voor de huidige situatie de gemiddelde berekende concentratie in het zomerhalfjaar (april – oktober) van het droge jaar 2003 te berekenen. Hierbij is uitgegaan van de in het LHM opgenomen vooraf geïnventariseerde doorspoelhoeveelheden (Hunink et al., 2020), en is ervan uitgegaan dat er geen watertekorten optraden. Dit is daarmee een geïdealiseerde, en niet de in werkelijkheid in 2003 opgetreden, situatie.

De berekening van de doorspoelvraag volgens vergelijking (1) is gebaseerd op een evenwichtssituatie, waarbij de in het LSW geborgen water en zout geen rol speelt in het bepalen van de LSW concentratie. Water mengt in een systeem van poldersloten niet als één grote mengbak: inlaatwater bereikt kopsloten veelal niet, en stroomt in een directe lijn tussen inlaatpunt en afvoergemaal (Delsman, 2015; Rozemeijer et al., 2012). Het effectieve watervolume van een poldersysteem is daarom slechts een beperkt deel van het totale watervolume, en al na enkele dagen is het systeem in evenwicht (Delsman, 2015). Bij kleinere interesseperioden (orde dagen) is de aangenomen evenwichtssituatie niet verantwoord en kan vergelijking 1 niet worden toegepast. De interesseperiode is in de hier gepresenteerde analyses minimaal een maand, toepassing van vergelijking (1) is dan ook verantwoord.

De hoeveelheid doorspoeling in polders beïnvloedt de zoutvracht naar de boezem niet, maar wel de hoeveelheid water die door het boezemsysteem stroomt, en daarmee de concentratie van het boezemwater. De berekende doorspoelvraag in LSWs is daarmee ook afhankelijk van de doorspoeling in andere – bovenstroomse – LSWs. Berekeningen worden in de uitgevoerde analyse per LSW afzonderlijk uitgevoerd, interactie tussen LSWs via het boezemsysteem wordt daarmee niet meegenomen. Meenemen van deze interactie was praktisch niet mogelijk. Dit zou immers het doorrekenen van het gehele watersysteem vergen per stap in de gevoeligheidsanalyse per LSW, en bovendien de hoeveelheid bovenstroomse doorspoeling (en daarmee de inlaatconcentratie) als additionele vrijheidsgraad in de gevoeligheidsanalyse introduceren. Met het uitvoeren van zowel een gevoeligheidsanalyse voor streefconcentratie (met vaste inlaatconcentratie) als voor de inlaatconcentratie (met vaste streefconcentratie), wordt aan dit laatste enigszins tegemoet gekomen.

Alle analyses zijn alleen uitgevoerd voor zogeheten 'peilbeheerste' LSWs, niet voor vrij-afwaterende LSWs. Deze laatste kennen namelijk geen mogelijkheid tot doorspoelen. Merk op dat het LHM versie 4.1, zoals gebruikt in Delsman et al. (2022), geen berekeningsresultaten geeft voor de Waddeneilanden. Figuur 2-1 geeft de polders weer, waar in de huidige situatie polder-doorspoeling is opgenomen in het LHM en het gebied waar doorspoeling in de analyse van Delsman et al. (2022) zou kunnen toenemen.



Figuur 2-1 In Delsman et al. (2022) gehanteerde gebieden waar doorspoeling van polders in huidige situatie plaats vindt, en het gebied waar doorspoeling in de analyse mag toenemen (Delsman et al., 2022).

Uitgangspunt in de scenarioberekeningen van Delsman et al. (2022) was voortzetting van het huidige waterbeleid. Voor polder-doorspoeling is dit vertaald naar de aanname dat waterschappen die momenteel hun polders niet apart doorspoelen (het gaat dan specifiek om de inliggende polders, de boezem kan wel worden doorgespoeld), dit in de toekomst ook niet gaan doen. Terwijl waterschappen die momenteel wel polders doorspoelen, in de toekomst ook andere polders kunnen gaan doorspoelen wanneer dat nodig mocht zijn. Delfland en Waternet (Amstel, Gooi en Vecht) zijn voorbeelden van waterschappen die – in ieder geval volgens de schematisatie van het LHM – momenteel polders niet doorspoelen. Dit uitgangspunt uit Delsman et al. (2022) is in deze studie overgenomen. Doorspoelvraag wordt daarmee berekend voor de zwarte en grijze gebieden in Figuur 2-1, niet voor de witte gebieden.

2.3 Gevoeligheidsanalyse invloed streefconcentratie op doorspoelvraag

2.3.1 Gemiddeld over groeiseizoen

In deze gevoeligheidsanalyse is de streefconcentratie in vergelijking (1) per LSW gevarieerd tussen 100 mg/L en 5000 mg/L chloride, in stappen van 50 mg/L. De analyse is uitgevoerd voor zeespiegelhorizonts 0, 0.5, 1 en 3 m zeespiegelstijging. Gebiedseigen water- en zoutflux en inlaatconcentraties per zichthorizon zijn hierbij gelijk gehouden aan de berekeningen van Delsman et al. (2022).

2.3.2 Gemiddeld over droge maand juli

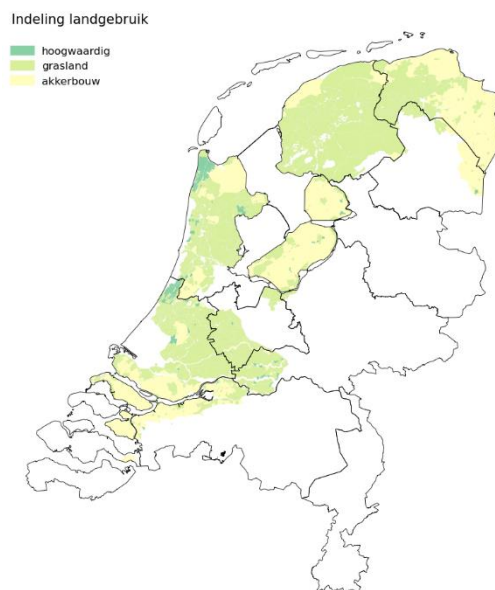
In deze gevoeligheidsanalyse is eerst uit de directe modeluitvoer de maand juli 2003 geselecteerd, en is de water- en zoutbalans per LSW vastgesteld gemiddeld over de maand juli 2003. Dit is verder identiek gebeurd aan hoe de water- en zoutbalans gemiddeld over het groeiseizoen is berekend in Delsman et al. (2022). Vervolgens is de streefconcentratie in vergelijking (1) per LSW gevarieerd tussen 100 mg/L en 5000 mg/L chloride, in stappen van

50 mg/L. De analyse is uitgevoerd voor zeespiegelhorizonts 0, 0.5, 1 en 3 m zeespiegelstijging.

2.3.3 Differentiatie streefconcentratie landgebruik

Voor het toepassen van een gedifferentieerde streefwaarde per landgebruik is het landbouwkundig landgebruik geïnclassificeerd in de hoofd-categorieën grasland, akkerbouw en hoogwaardig. Per LSW is vastgesteld welk landgebruik het grootste aandeel van het landbouwareaal inneemt. Deze categorie is toegekend aan het LSW. Er is in de analyse niet gekozen om de - qua concentratie - meest veeleisende categorie per LSW het landgebruik te laten bepalen, om erg kleine arealen van een bepaalde functie de analyse niet te laten beïnvloeden. De resulterende landgebruiksk kaart is weergegeven in Figuur 2-2.

Per landgebruikscategorie is in de analyse een streefconcentratie toegekend die min of meer neerkomt op een maximale zoutconcentratie van beregeningswater per landgebruikscategorie gebaseerd op Stuyt et al. (2016). Merk op dat deze zoutconcentraties hoger liggen dan waar in de huidige praktijk van wordt uitgegaan. De kennis over zoutgevoeligheid van landbouwgewassen is evenwel nog in ontwikkeling, er zijn geen algemeen geaccepteerde zoutconcentratie-grenzen beschikbaar. Stuyt et al. (2016) geven op basis van beschikbare studies en experimenten (vaak brede) grenzen per landbouwgewas van zoutconcentratie van beregeningswater, waarboven opbrengstderving werd gerapporteerd. De gekozen streefconcentraties zijn opgenomen in Tabel 2-1. De analyse geeft hiermee een eerste inzicht in de maximale handelingsruimte wanneer het huidige dominante landgebruik nog wel wordt voorzien, maar teelt-technisch wel zo minimaal mogelijk. Aan de eisen van landgebruik binnen LSWs met een beperkter areaal, maar met hogere eisen aan de waterkwaliteit dan het dominante landgebruik wordt niet voldaan. Merk op dat deze grenzen puur het landbouwkundig gebruik betreffen en niets zeggen over eventueel andere zoutgevoelige functies, zoals ecologie.



Figuur 2-2 Toekenning hoofd-landgebruikscategorie per LSW.

Tabel 2-1 Toegekende streefconcentratie per landgebruikscategorie.

Landgebruikscategorie	Streefconcentratie (mg/L)
Grasland	2000 mg/L
Akkerbouw	1000 mg/L
Hoogwaardige teelt	300 mg/L

2.3.4 Analyse concentraties bij gelijkblijvende doorspoeling

In Delsman et al. (2022) wordt bij toenemende zoutvracht door zeespiegelstijging de doorspoelvraag aangepast om de streefconcentratie ook bij toenemende zoutvracht te halen. In deze analyse wordt onderzocht hoezeer de concentraties toenemen bij toenemende zoutvracht door zeespiegelstijging, wanneer doorspoelhoeveelheden niet worden aangepast. Deze analyse is eerder gerapporteerd (Delsman, 2024).

Voor de analyse van de optredende concentratie bij aangepaste doorspoeldebieten, wordt de gemiddelde zoutconcentratie in het LSW berekend als:

$$C_{LSW} = \frac{V_{neerslag} + V_{grondwater} + V_{opp.afstroming} + V_{bovenstrooms\ lsw} + V_{inlaat}}{Q_{neerslag} + Q_{grondwater} + Q_{opp.afstroming} + Q_{bovenstrooms\ lsw} + Q_{inlaat} - Q_{verdamping}}, \quad (2)$$

Met C_{LSW} de berekende zomergemiddelde zoutconcentratie in het LSW, V_{term} de zoutvracht per balanstern en Q_{term} de waterflux per balanstern.

In de balanstern 'inlaatwater' zit onder meer het water dat wordt aangevoerd ten behoeve van doorspoeling. Voor berekenen van de verandering van de zoutconcentratie in het LSW bij een aangepaste doorspoelhoeveelheid moet deze term worden herberekend. Omdat doorspoeling slechts een deel van deze term betreft, is deze term herberekend als:

$$Q_{inlaat\ zss,nieuw} = Q_{inlaat\ zss,org} - \Delta Q_{doorspoel\ zss}. \quad (3)$$

Oftewel, de verandering in doorspoeling ten opzichte van de uitgangssituatie wordt van de hoeveelheid inlaatwater in de uitgangssituatie afgetrokken. Op basis van de herberekende flux wordt vervolgens de zoutvracht van het inlaatwater herberekend:

$$V_{inlaat\ zss,nieuw} = Q_{inlaat\ zss,nieuw} \cdot C_{inlaat\ zss}, \quad (4)$$

waarbij dus wordt aangenomen dat de concentratie van het inlaatwater niet verandert ten opzichte van de bestaande berekeningen. De concentratie in het LSW bij huidige doorspoeling wordt vervolgens berekend volgens bovenstaande vergelijking (2), met de aangepaste vracht en flux van de term 'inlaatwater'.

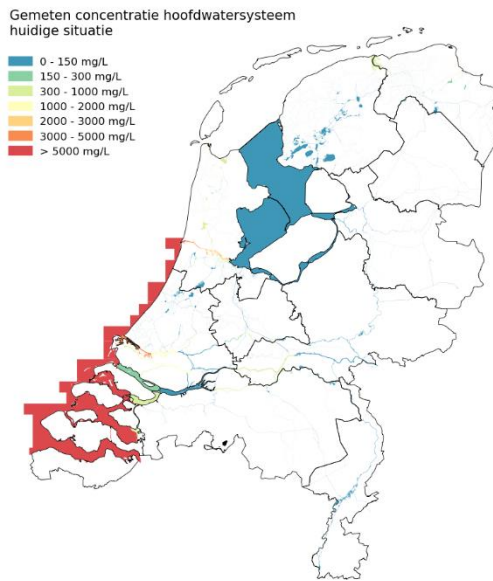
2.4 Gevoeligheidsanalyse invloed inlaatconcentratie op doorspoelvraag

2.4.1 Gemiddeld over groeiseizoen

In deze gevoeligheidsanalyse is de inlaatconcentratie in vergelijking (1) per LSW gevarieerd tussen 50 mg/L en 2500 mg/L chloride, in stappen van 50 mg/L. De analyse is uitgevoerd voor zeespiegelhorizonts 0, 0.5, 1 en 3 m zeespiegelstijging. Gebiedseigen water- en zoutflux en de geldende streefconcentratie is hierbij gelijk gehouden aan de berekeningen van Delsman et al. (2022).

2.4.2 Bepaling concentratie hoofwatersysteem

Op basis van meetgegevens is in het kader van de realisatie van het LHM zoet-zout een interpolatie gemaakt van gemiddeld gemeten zoutconcentraties in het regionale oppervlaktewater (Delsman et al., 2020). Deze interpolatie is binnen bestaande watersysteemgrenzen uitgevoerd, omdat de op puntlocaties gemeten zoutconcentraties alleen representatief zijn voor het lokale watersysteem. De inlaatconcentraties zijn vervolgens bepaald door voor elk district op te zoeken uit welk watersysteem water wordt aangevoerd. Vervolgens is de geïnterpoleerde concentratie binnen de grenzen van dat watersysteem gemiddeld. Let op dat dit de huidige gemiddelde concentraties in het hoofwatersysteem betreft, geïnterpoleerd uit een beperkt aantal meetpunten. Deze analyse negeert daarmee dat concentraties in het aangevoerde water tussen hoofwatersysteem en inlaatpunt van een polder in droge perioden kunnen toenemen, en dat concentraties bij zeespiegelstijging en toenemende zoutlast toenemen. Deze processen worden in de berekende inlaatconcentraties wel meegenomen. Figuur 2-3 geeft de resulterende gemiddelde chloride concentraties in het hoofwatersysteem.



Figuur 2-3 Geïnterpoleerde chloride concentratie in het hoofwatersysteem (Delsman et al., 2020).

3 Resultaten

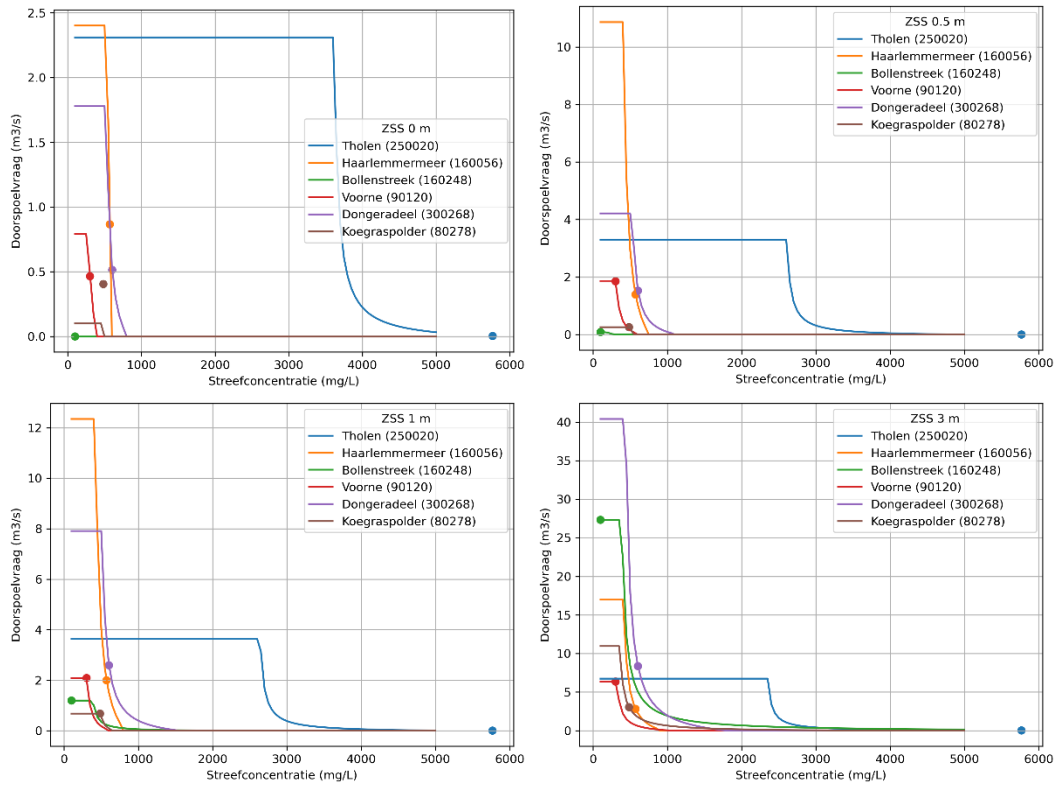
3.1 Gevoeligheidsanalyse streefconcentratie

In een gevoeligheidsanalyse is de streefconcentratie voor alle door te spoelen LSWs gevarieerd van 150 tot 5000 mg/L chloride en is de resulterende doorspoelvraag berekend, bij verder gelijke condities. Resultaten van de berekende doorspoelvraag voor enkele streefconcentraties zijn te vinden in bijlage A, Figuur 3-1 geeft de verkregen relatie tussen streefconcentratie en doorspoelvraag voor enkele geselecteerde LSWs.

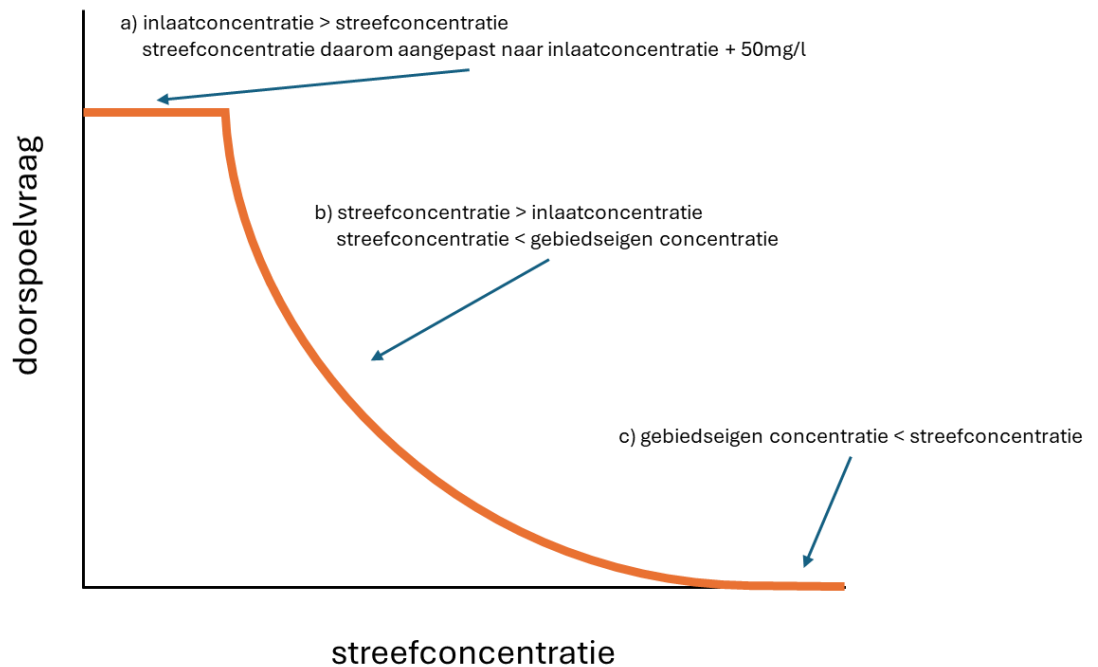
De verkregen relaties tussen streefconcentratie en doorspoelvraag volgen voor alle LSWs eenzelfde verloop. Dit verloop is conceptueel weergegeven in Figuur 3-2. Bij een lage streefconcentratie is het verloop vlak en is de doorspoelvraag maximaal (traject a in Figuur 3-2). Het verloop is vlak omdat de concentratie van het inlaatwater waar mee wordt doorgespoeld hoger is dan de streefconcentratie van het LSW. De streefconcentratie wordt in dit geval in de berekening verhoogd tot de inlaatconcentratie + 50 mg/L, en dientengevolge wordt in dit gehele traject dezelfde doorspoelvraag berekend.

Het volgende traject (traject b in Figuur 3-2) kent een min of meer exponentiële afname van de doorspoelvraag met toenemende streefconcentratie. Deze afname is min of meer exponentieel omdat de relatie tussen doorspoelvraag en streefconcentratie wordt bepaald door het quotiënt van het verschil tussen streef- en gebiedseigen concentratie, en het verschil tussen streef- en inlaatconcentratie. De snelheid van afname is daarbij afhankelijk van het quotiënt tussen gebiedseigen en de inlaatconcentratie.

In het berekende verloop voor de verschillende LSWs komen de verschillende kenmerken van de LSWs tot uiting. Het LSW op Tholen kent een lang traject a, de inlaatconcentratie is hier erg hoog (zie ook paragraaf 3.4.2). De gebiedseigen concentratie is ook hoog, waardoor tot hoge streefconcentraties nog altijd een doorspoelvraag berekend wordt. Het LSW in de Haarlemmermeer heeft een hoge kwelflux, en daarom een hoge initiële doorspoelvraag. De gebiedseigen concentratie is echter niet heel hoog, waardoor de doorspoelvraag snel afneemt bij toenemende streefconcentratie. In de bollenstreek neemt de zoutvracht bij toenemende zeespiegelstijging toe, waarbij ook de concentratie van het kwelwater hoog is. Dit zorgt bij 3 m zeespiegelstijging niet alleen voor een hoge doorspoelvraag bij een lage streefconcentratie, maar laat de doorspoelvraag ook relatief langzaam afnemen.



Figuur 3-1 Relatie tussen opgelegde streefconcentratie en doorspoelvraag voor geselecteerde LSWs voor zichthorizons 0 m (linksboven), 0.5 m (rechtsboven), 1 m (linksonder) en 3 m (rechtsonder) zeespiegelstijging. De geplaatste stip geeft de streefconcentratie / doorspoelvraag aan zoals gehanteerd in Delsman et al. (2022). Voor 0 m ZSS kan de geplaatste stip door mismatch tussen theoretische en geïnventariseerde doorspoelbehoefte buiten de lijn vallen. Let op dat de schaal van de y-as (doorspoelvraag) verschilt tussen de deelfiguren.



Figuur 3-2 Conceptuele weergave van relatie tussen streefconcentratie en doorspoelvraag.

3.2 Hoe neemt de doorspoelvraag af bij een hogere streefconcentratie?

3.2.1 Waar is de afname sterk en waar niet?

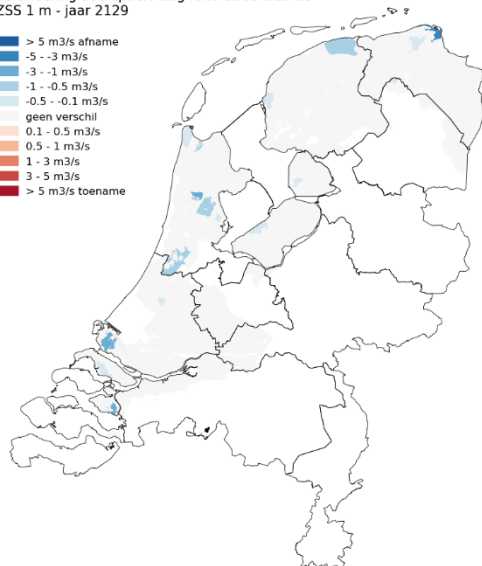
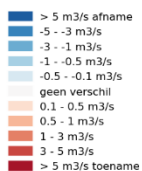
Om te onderzoeken hoe een kleine verhoging van de streefconcentratie de benodigde doorspoelvraag kan verminderen is de streefconcentratie met 50 mg/L verhoogd rondom de huidige streefconcentratie. Figuur 3-3 laat zien waar een beperkte verhoging van de streefconcentratie leidt tot een relatief sterke afname van de doorspoelvraag. Dit betreft een groot aantal Hollandse polders (Haarlemmermeer, Beemster, de Koegraspolder in de kop van Noord-Holland, Voorne), delen van de Fries-Groningse kustregio. Bij 1 m zeespiegelstijging kan daarnaast ook de doorspoelvraag van Flevoland en Tholen relatief eenvoudig worden beperkt. Waar de doorspoelvraag afneemt, betreft die afname een belangrijk deel van de doorspoelvraag, regelmatig meer dan de helft van de vraag. Merk op dat de toename in doorspoelvraag in Flevoland wordt veroorzaakt door autonome verzilting en niet gerelateerd is aan zeespiegelstijging.

De ruimtelijke verschillen ontstaan doordat verschillende LSWs zich op verschillende punten in de streefconcentratie – doorspoelvraagcurve (Figuur 3-2) bevinden. Voor een groot aantal LSWs is geen afname zichtbaar. Dit komt doordat:

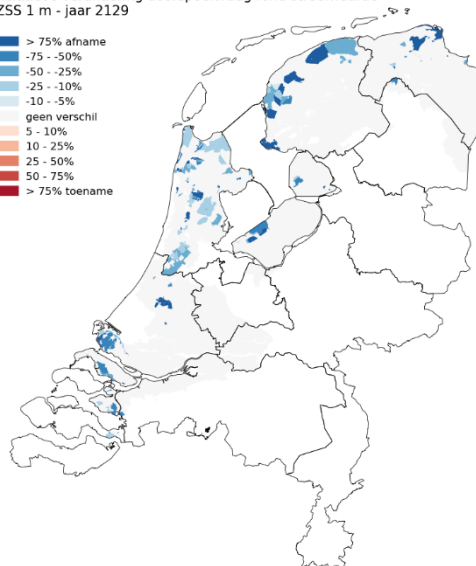
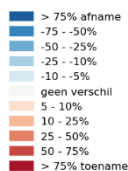
a) de streefconcentratie ook na verhoging lager ligt dan de concentratie van het inlaatwater, en het streefdoel daarmee onhaalbaar is. (De hoeveelheid doorspoeling is in dat geval gemaximeerd (traject a in Figuur 3-2).)

b) de streefconcentratie juist aan de rechterkant van de curve ligt (traject c in Figuur 3-2): hier ligt de streefconcentratie rond of boven de concentratie van het gebiedseigen water.

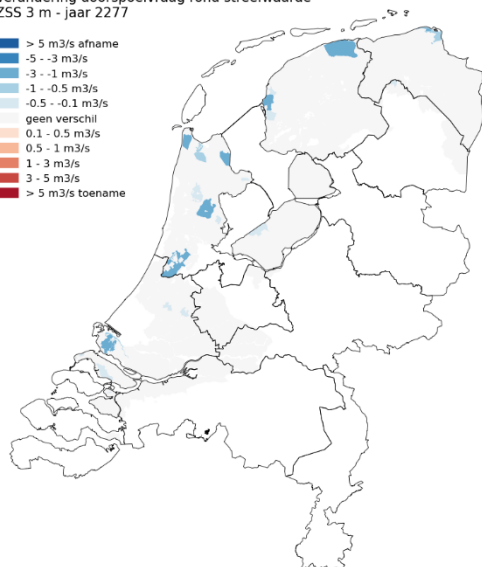
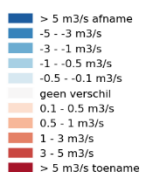
Verandering doorspoelvraag rond streefwaarde
ZSS 1 m - jaar 2129



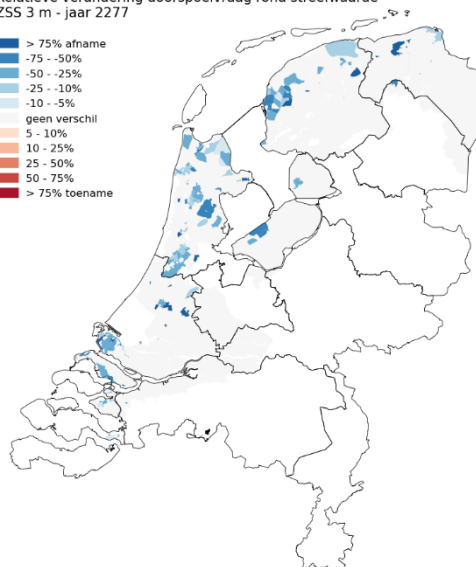
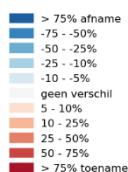
Relatieve verandering doorspoelvraag rond streefwaarde
ZSS 1 m - jaar 2129



Verandering doorspoelvraag rond streefwaarde
ZSS 3 m - jaar 2277

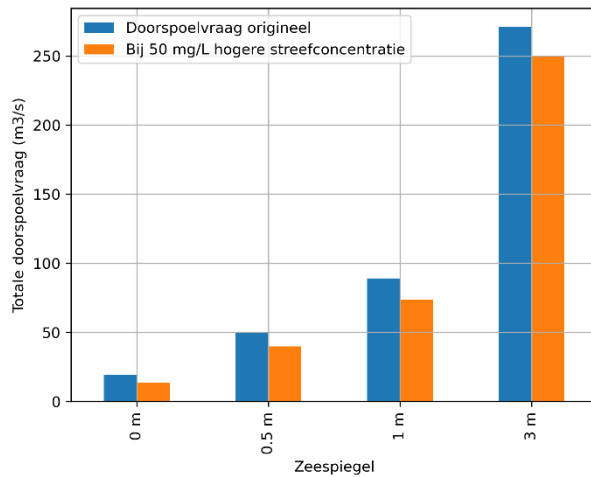


Relatieve verandering doorspoelvraag rond streefwaarde
ZSS 3 m - jaar 2277



Figuur 3-3 Verandering doorspoelvraag bij verhoging streefconcentratie met 50 mg/L rond de geldende streefwaarde, voor zichthorizons 1m (boven) en 3m (onder) zeespiegelstijging. De afname is ten opzichte van het werk van Delsman et al. (2022) waar wordt doorgespoeld om de huidige streefwaardes te behouden. De afname is absoluut (links) en relatief (rechts) weergegeven.

Bij een kleine verhoging van de streefconcentratie wordt de totale landsbrede polderdoorspoelvraag met zo'n 10% teruggebracht (Figuur 3-4). Gegeven dat in de LSWs die een verandering laten zien deze verandering veelal meer dan de helft bedraagt, zitten de LSWs met het merendeel van de doorspoelvraag klaarblijkelijk in traject a of traject c van Figuur 3-2.



Figuur 3-4 Verandering van totale landsbrede polder-doorspoelvraag bij verhoging streefconcentratie met 50 mg/L rond de geldende streefwaarde voor verschillende zeespiegelhorizons.

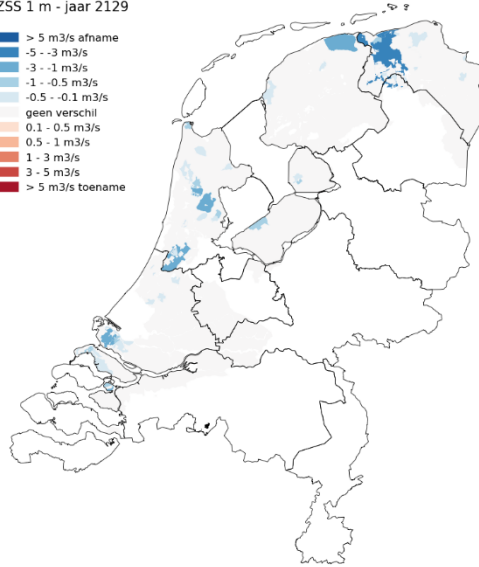
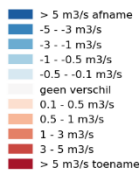
3.2.2 Hoe neemt de doorspoelvraag af bij minimaal voorzien landgebruik

Hoe ver is de doorspoelvraag terug te brengen wanneer het geldende landgebruik minimaal voorzien wordt? In de analyse is per LSW een landgebruikscategorie toegekend, en voor deze landgebruikscategorie een streefconcentratie. De streefconcentratie is hierbij bewust aan de bovenkant van de bekende spreiding van chloridegrenzen in beregeningswater (Stuyt et al., 2016) gekozen, om het maximale handelingsperspectief te bepalen (Tabel 2-1).

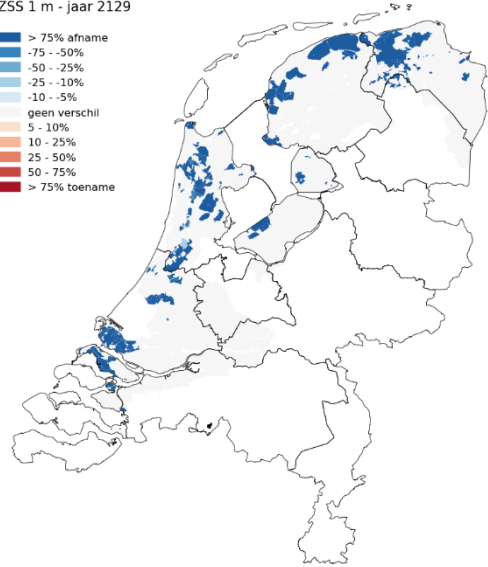
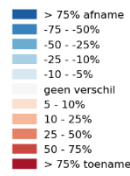
Figuur 3-5 geeft de absolute en relatieve verandering van de doorspoelvraag per LSW wanneer per LSW een minimaal voorzieningsniveau (streefconcentratie volgens Tabel 2-1) gehanteerd wordt. De beoogde streefconcentratie wordt in de meeste LSWs gehaald, de inlaatconcentratie is laag genoeg om de naar boven bijgestelde/toegekende streefconcentratie te realiseren.

De afname van de doorspoelvraag bedraagt voor veel LSWs meer dan 75% (Figuur 3-5). Er wordt echter niet voor alle LSWs een afname berekend. De toegekende streefconcentratie kan onder of rond de huidige streefconcentratie liggen, of het LSW bevindt zich op de curve op traject a (inlaatconcentratie niet laag genoeg om beoogde streefconcentratie te halen). In totaal neemt de doorspoelvraag af met ongeveer 40% (Figuur 3-6). Dit betekent dat er zeker ruimte zit in het verhogen van beoogde streefconcentraties, waarbij de landbouw nog altijd – maar minimaal – wordt voorzien. Merk op dat aan eisen van eventuele functies met hogere waterkwaliteitseisen (ecologie, minderheidsarealen hoogwaardige landbouw) met deze streefconcentraties niet wordt voldaan.

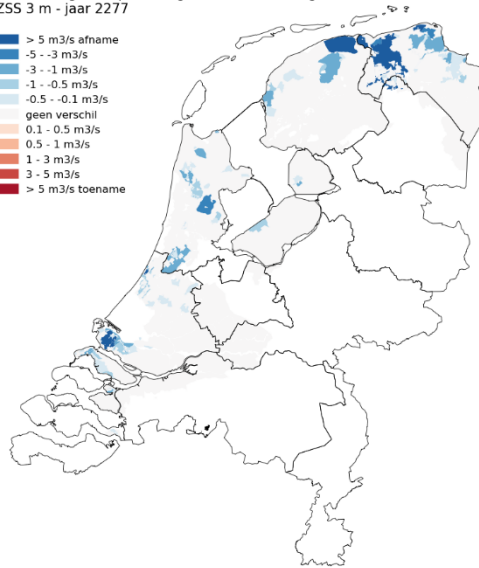
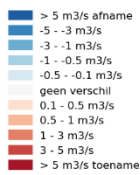
Verandering doorspoelvraag differentiatie landgebruik
ZSS 1 m - jaar 2129



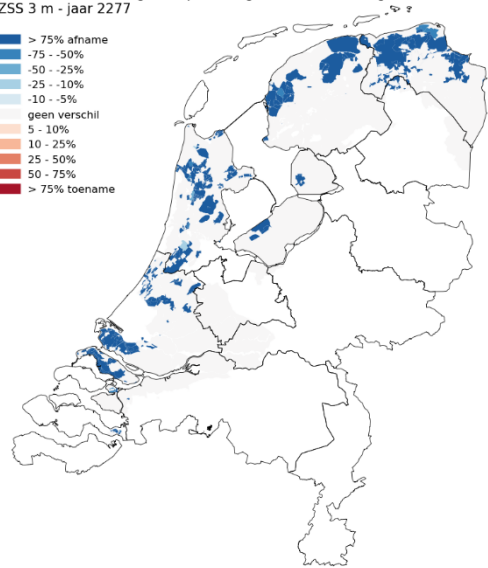
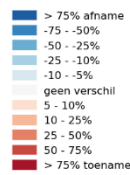
Relatieve verandering doorspoelvraag differentiatie landgebruik
ZSS 1 m - jaar 2129



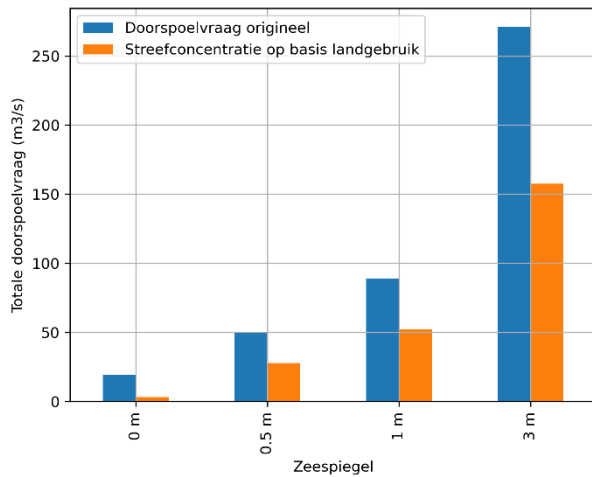
Verandering doorspoelvraag differentiatie landgebruik
ZSS 3 m - jaar 2277



Relatieve verandering doorspoelvraag differentiatie landgebruik
ZSS 3 m - jaar 2277



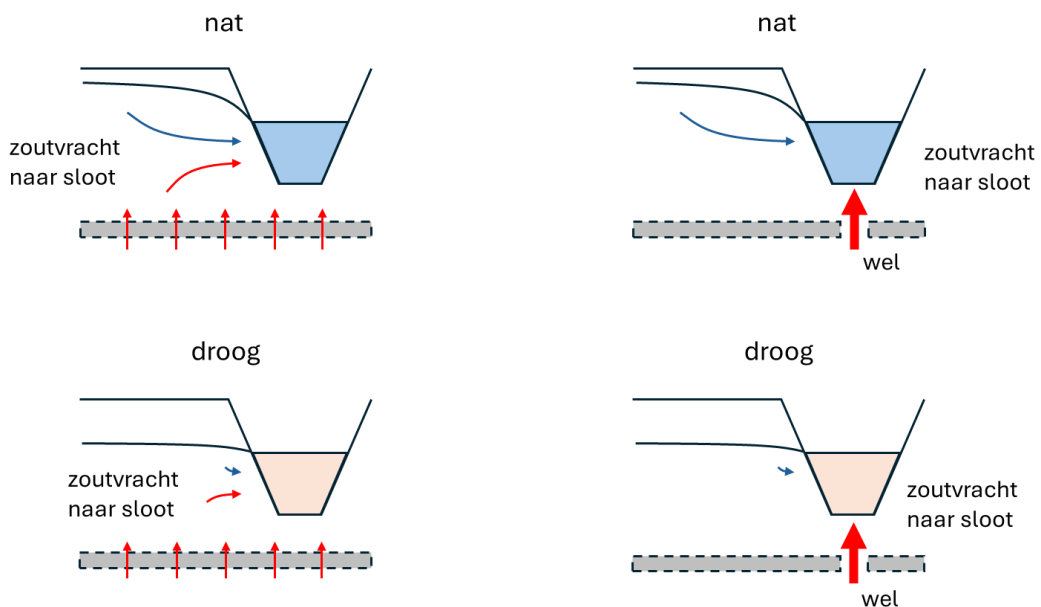
Figuur 3-5 Verandering doorspoelvraag bij streefconcentratie per landgebruikscategorie, voor zichthorizons 1m (boven) en 3m (onder) zeespiegelstijging. De afname is absoluut (links) en relatief (rechts) weergegeven.



Figuur 3-6 Verandering totale landsbrede polder-doorspoelvraag bij streefconcentratie per landgebruikscategorie voor verschillende zeespiegelhorizonten.

3.2.3 Hoe anders is de doorspoelvraag in een droge periode?

In een droge periode is de water- en zoutbalans in een polder anders dan gemiddeld over het groeiseizoen. Hoe anders verschilt per gebied. Waar de zoutvracht met name komt van ondiepe brakke kwel, die diffuus uitstroomt naar de sloot, is de zoutvracht in een droge periode laag, ondanks dat de concentratie hoog is. Er is dan relatief weinig water nodig om de zoutvracht te verdunnen tot de streefconcentratie. In gebieden met een door het jaar heen meer constante kwelflux is de zoutvracht in droge en meer gemiddelde tijden gelijk. Hier wordt de zoutvracht in nattere tijden echter sterk verdund, waardoor er juist dan minder doorspoelwater nodig is om een streefconcentratie te bereiken. Dit speelt bijvoorbeeld in diepe polders waar wellen de zoutvracht domineren (bijvoorbeeld Polder de Noordplas, 65% (De Louw et al., 2010), Zuidoosthoek Haarlemmermeer, 80% (Delsman et al., 2013)). Figuur 3-7 geeft een conceptuele weergave van deze twee verschillende typen gebieden.

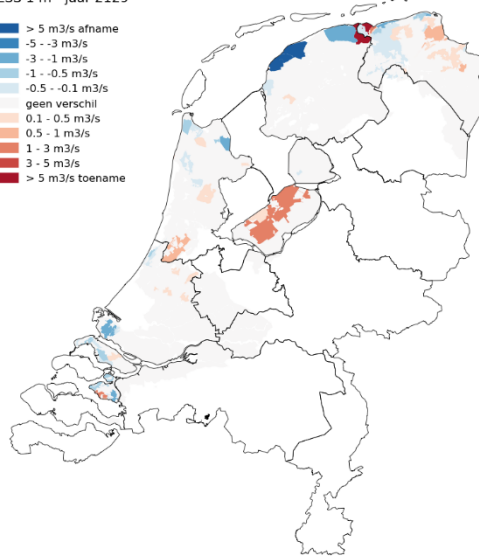
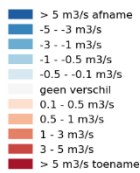


Figuur 3-7 Conceptuele weergave natte (boven) en droge (onder) omstandigheden in een polder met ondiepe brakke kwel (links) en polders waar de zoutvracht vooral door wellen naar het oppervlaktewater stroomt (rechts).

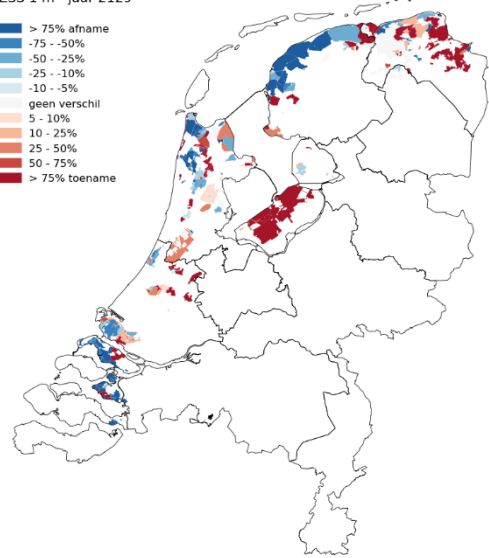
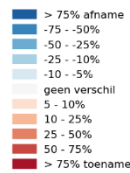
Wanneer doorspoelen meer operationeel wordt gestuurd op het bereiken van streefconcentraties, en daarmee beter gebruik maakt van de geldende omstandigheden, is een beperking van de vraag te bereiken zonder in te leveren op de streefconcentratie (zie ook Delsman en Kramer, 2017). Figuur 3-8 geeft de verschillen in doorspoelvraag tussen de doorspoelvraag berekend op basis van de gemiddelde water- en zoutbalans over het groeiseizoen (zoals in Delsman et al. (2022) en de doorspoelvraag voor alleen de maand juli binnen dat jaar. In het huidige waterbeheer worden polder-doorspoelhoeveelheden gedurende het groeiseizoen veelal niet aangepast (Delsman, 2015). De keuze voor een seizoensgemiddelde streefconcentratie en daarmee gepaard gaande doorspoelhoeveelheid komt daarom min of meer overeen met het huidige waterbeheer.

De kaarten laten een duidelijk ruimtelijk patroon zien in de verschillen. De diepe polders komen veelal naar voren als gebieden waar in juli juist meer doorspoelwater wordt gevraagd dan gemiddeld over het groeiseizoen om dezelfde streefconcentratie te handhaven. In deze gebieden is sprake van een min of meer constante zoutvracht; in de droge maand juli is er dan extra inlaatwater nodig bij gebrek aan gebiedseigen verdunning. In de ondiepere polders langs de kust is juist sprake van een afname van de doorspoelvraag in juli in vergelijking met het hele groeiseizoen. Hier is in juli de zoutvracht aanmerkelijk lager, zodat juist met minder inlaatwater genoeg doorgespoeld wordt om de streefconcentratie te behalen.

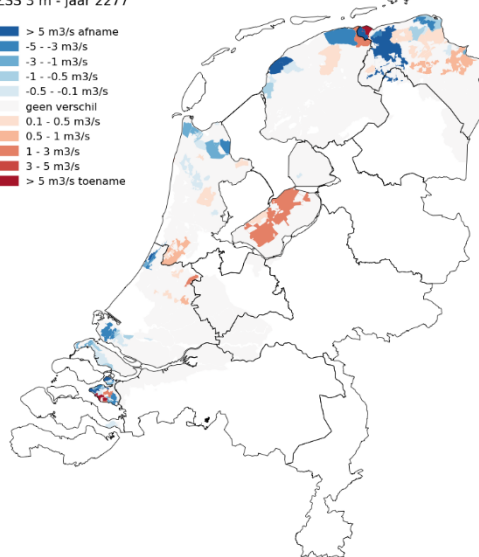
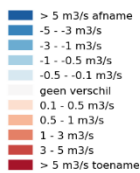
Verandering doorspoelvraag droge maand juli
ZSS 1 m - jaar 2129



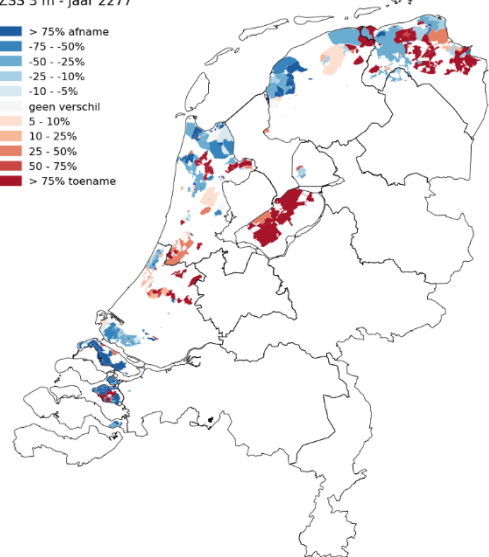
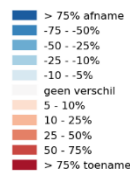
Relatieve verandering doorspoelvraag droge maand juli
ZSS 1 m - jaar 2129



Verandering doorspoelvraag droge maand juli
ZSS 3 m - jaar 2277



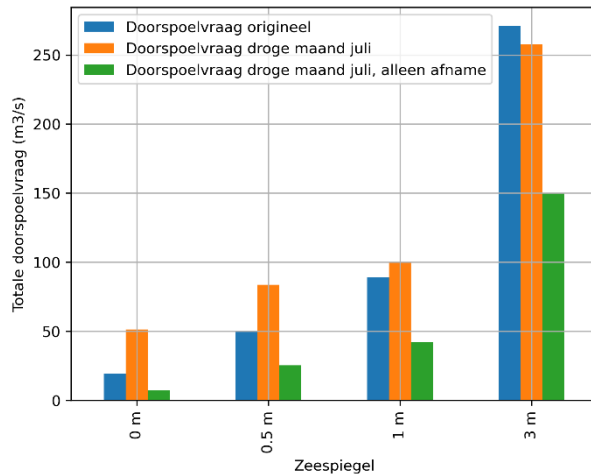
Relatieve verandering doorspoelvraag droge maand juli
ZSS 3 m - jaar 2277



Figuur 3-8 Verandering doorspoelvraag voor droge maand juli versus gemiddeld over groeiseizoen, voor zichthorizons 1m (boven) en 3m (onder) zeespiegelstijging. De afname is absoluut (links) en relatief (rechts) weergegeven.

Gezien de grote ruimtelijke verschillen in hoe de doorspoelvraag afwijkt voor juli ten opzichte van het gehele groeiseizoen is niet alleen het totale verschil in doorspoelvraag getoond in Figuur 3-9, maar is ook het totale verschil weergegeven wanneer alleen de LSWs worden meegenomen die een lagere doorspoelvraag berekenen in juli. De andere LSWs houden de doorspoelvraag berekend voor het groeiseizoen. Dit geeft min of meer het maximale handelingsperspectief, wanneer het (operationele) doorspoelbeheer perfect wordt afgestemd op de kenmerken van de LSWs. Merk op dat hierbij, zoals ook in de originele berekeningen, wordt geaccepteerd dat concentraties in de andere gebieden in droge perioden toenemen tot boven de seizoensgemiddelde concentratie. Figuur 3-9 laat zien dat tot en met 1 m zeespiegelstijging de totale doorspoelvraag in een droge maand hoger ligt dan gemiddeld voor het groeiseizoen, bij 3 m zeespiegelstijging ligt de doorspoelvraag in een droge maand een paar procent lager. Wanneer alleen naar LSWs wordt gekeken waar de doorspoelvraag

in een droge maand lager ligt, zou de doorspoelvraag voor alle zichthorizonten met ongeveer de helft af kunnen nemen.



Figuur 3-9 Verandering totale landsbrede polder-doorspoelvraag voor droge maand juli versus gemiddeld over groeiseizoen voor verschillende zeespiegelhorizonten. In de groene balk zijn alleen de LSWs aangepast waar in juli met een lagere doorspoelvraag eenzelfde streefconcentratie kan worden bereikt, voor de overige LSWs is de seizoensgemiddelde doorspoelvraag aangehouden.

3.2.4 Hoe hoog worden zoutconcentraties wanneer het doorspoelvolume niet wordt aangepast?

Het effect van het gelijk houden van de hoeveelheid doorspoeling op optredende chlorideconcentraties in het regionale oppervlaktewater is gerapporteerd in Delsman (2024). Onderstaande is overgenomen uit deze studie.

Door het gelijk houden van de hoeveelheid doorspoeling nemen concentraties langs de kust zoals verwacht toe. De brakke kwel die uittreedt in het oppervlaktewater neemt door zeespiegelstijging immers toe, en wordt niet langer gecompenseerd door een toename in doorspoeling. Figuur 3-10 geeft het ruimtelijke beeld van de zomergemiddelde chlorideconcentraties wanneer de doorspoeling toeneemt zoals aangenomen in Delsman et al. (2022) (links), dan wel gelijk blijft aan de huidige situatie (rechts) bij 1 m en 3 m zeespiegelstijging. Figuur 3-11 geeft vervolgens de optredende verschillen in concentratie tussen de doorspoeling wel of niet laten toenemen (links), en de verandering in concentratie door zeespiegelstijging (en autonome ontwikkelingen en bodemdaling) wanneer doorspoeling op het huidige niveau wordt gehouden (rechts). Dezelfde figuren zijn voor alle zichthorizonten zeespiegelstijging opgenomen in bijlage C.

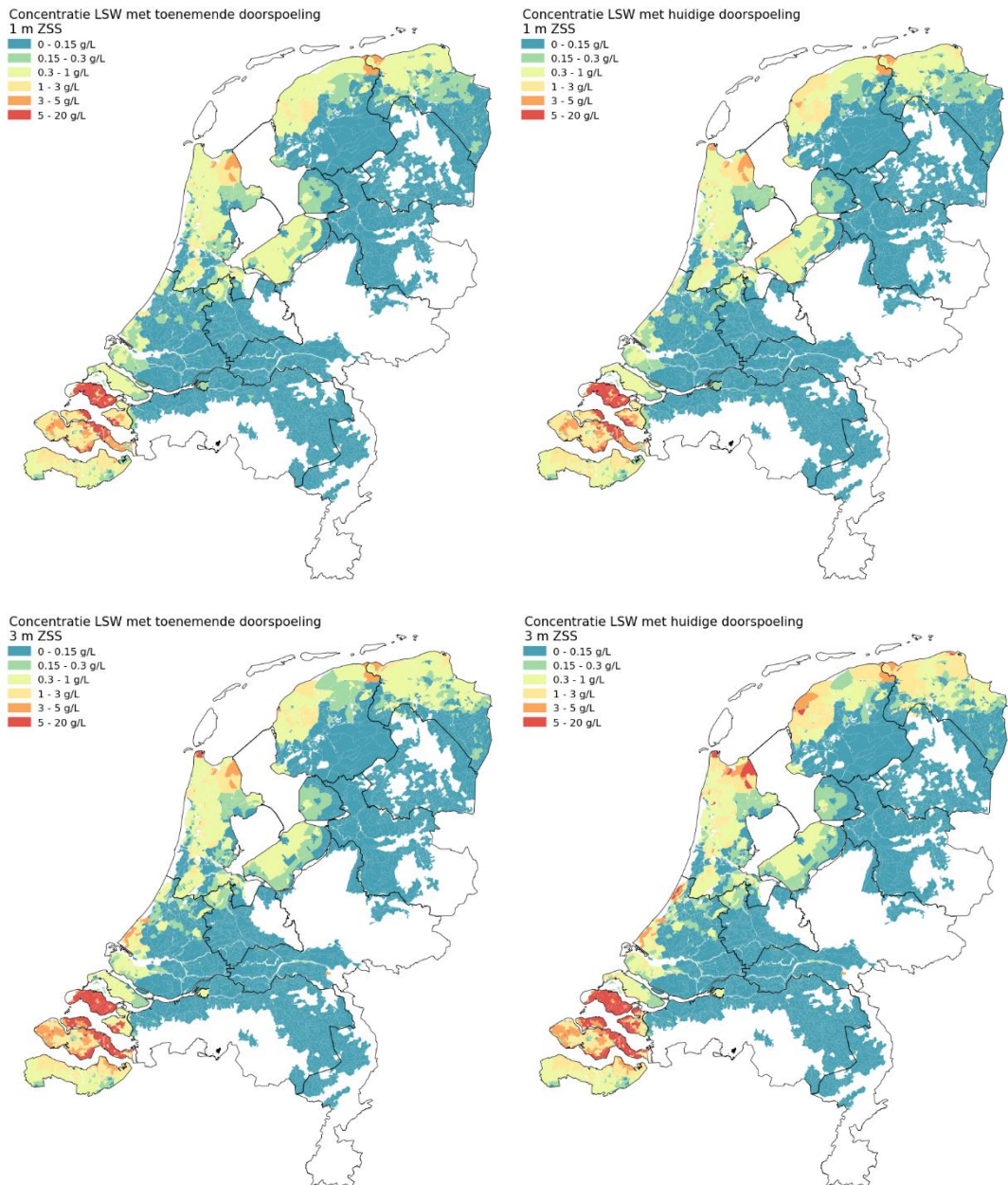
Merk allereerst op dat berekende chlorideconcentraties op een aantal gebieden in het kustgebied ook bij toegenomen doorspoeling niet als zoet zijn te beschouwen. Dit komt allereerst voor in brakke gebieden die niet worden doorgespoeld (Zeeland, de polders van Delfland, AGV). Deze gebieden laten in de analyse ook geen verschillen zien (Figuur 3-11, links). Daarnaast speelt dat ook in de huidige situatie concentraties met de in het model opgenomen doorspoeling¹ niet laag gehouden worden (bijvoorbeeld Wieringermeer, delen van Friesland, zie Figuur in bijlage C). Deze concentratie is vervolgens de streefwaarde voor de toename van doorspoeling. Merk overigens op dat door de gekozen aanpak in de bepaling van de toename van doorspoeling in de eerdere analyse (Delsman et al., 2022)

¹ Doorspoeling wordt in het LHM opgegeven als een vast debiet per LSW. Er wordt in de modelberekening dus niet gestuurd op een streefconcentratie. Zie Figuur in bijlage C voor de in het LHM opgenomen doorspoeldebieten.

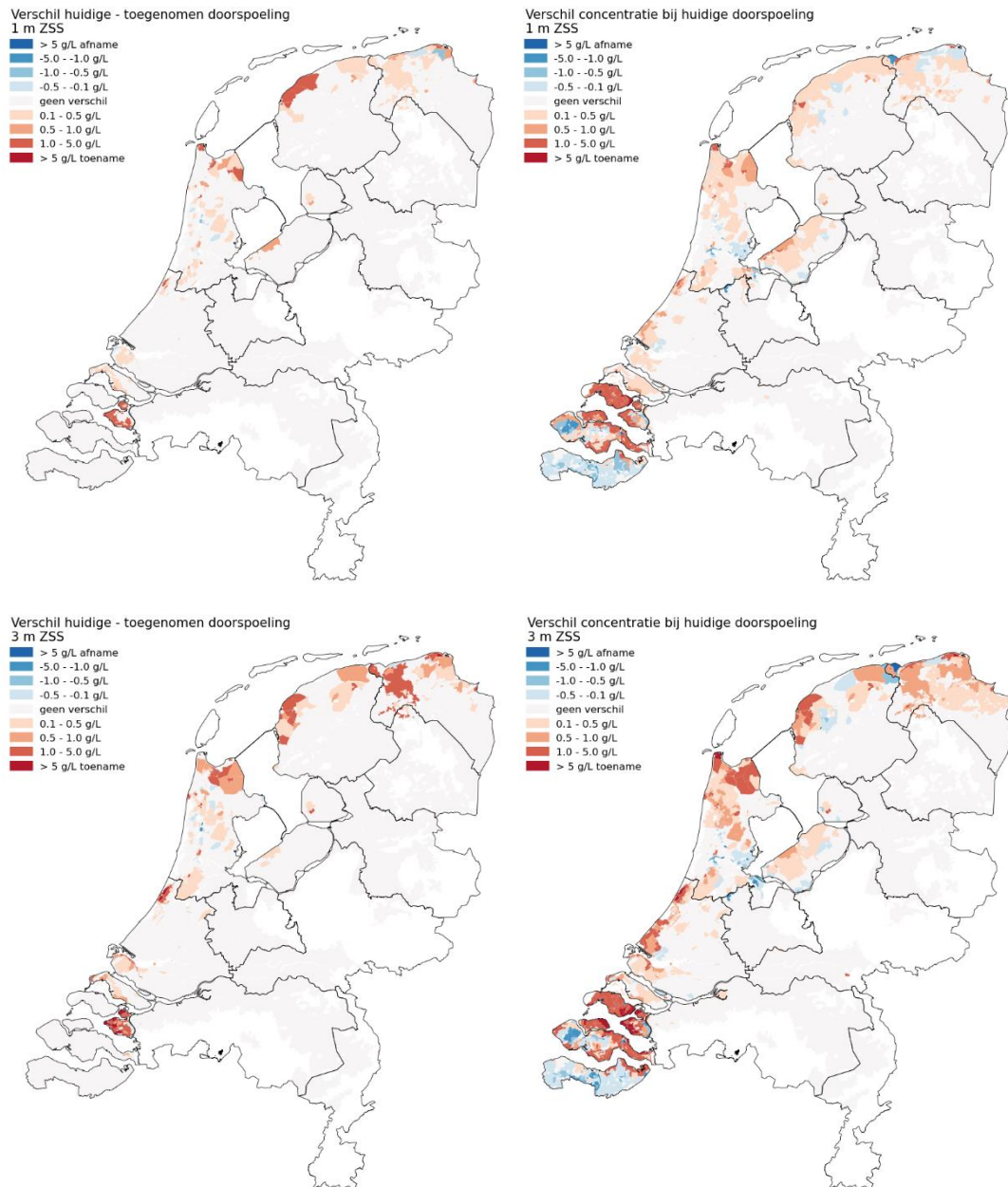
deze streefwaarde niet perfect wordt behaald; uiteindelijke concentraties liggen rond, maar niet precies op deze streefwaarde.

In zijn algemeenheid nemen seizoensgemiddelde concentraties in het grootste deel van de kustregio onder de huidige in plaats van toegenomen polder-doorspoeling beperkt toe. Concentraties bij huidige doorspoelhoeveelheden liggen in het kustgebied bij 3 m zeespiegelstijging voor een groot deel in de range 300 – 1000 mg/L, waarbij alleen de meest zoutgevoelige gewassen problemen ondervinden (Stuyt et al., 2016). Er zijn echter ook gebieden waar concentraties duidelijk hoger liggen bij huidige doorspoeling. Concentraties in het regionale oppervlaktewater liggen duidelijk hoger in met name de bollenstreek (met name vanaf 1 m zeespiegelstijging), de kop van Noord-Holland, de Fries-Groningse kustregio en op Tholen / st. Philipsland. Zo nemen chlorideconcentraties in delen van de bollenstreek bij 1 m zeespiegelstijging op enkele locaties toe tot meer dan 1000 mg/L, bij 3 m zeespiegelstijging is de chlorideconcentratie in een groot deel van de bollenstreek opgelopen tot meer dan 5000 mg/L. Dit is ook het geval op Tholen en st. Philipsland. Het huidige landgebruik lijkt in dit geval in deze gebieden niet langer mogelijk. De toename in concentratie in het bollengebied in de kop van Noord-Holland is – ondanks een sterke toename van de zoutvrucht – beperkter. In dit gebied is inlaat van water voor beregening een groot deel van de waterbalans, waardoor de toegenomen zoutvrucht ook zonder extra doorspoeling minder tot uitdrukking komt in de concentratie van het oppervlaktewater.

Er zijn overigens ook enkele LSWs waarbij de concentratie bij huidige doorspoeling juist wat afneemt. Dit komt doordat de huidige doorspoeling in een aantal gevallen hoger is dan de aangepaste doorspoeling, wanneer in de onderliggende modelberekening de zoutlast af- in plaats van toeneemt. Dit laatste komt doordat in de modelberekening niet alleen zeespiegelstijging een rol speelt, maar ook bodemdaling en autonome processen: de autonome aanpassing van de zoet-zoutverdeling in het grondwater aan landschapontwikkeling op langere tijdschalen.

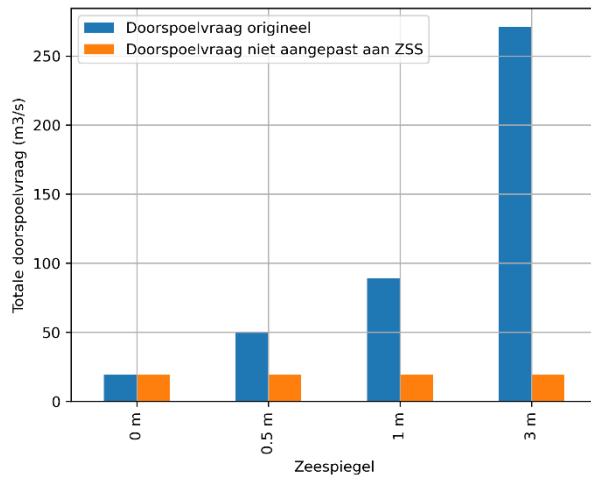


Figuur 3-10 Boven: berekende zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW voor zichthorizon 1 m zeespiegelstijging (jaar 2129), met toenemende doorspoeling (links, Delsman et al., 2020), en bij doorspoeling gelijk aan de huidige situatie (rechts). Let op dat hier alle peilbeheerste LSWs worden getoond, en niet alleen de LSWs waar wordt of kan worden doorgespoeld. Bron: Delsman (2024). Onder: idem, voor situatie zichthorizon 3 m zeespiegelstijging (jaar 2277).



Figuur 3-11 Boven: berekend absolute verschil in zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW voor zichthorizon 1 m zeespiegelstijging (jaar 2129) tussen toenemende en huidige doorspoeling (links), en tussen de situatie voor zichthorizon 1 m zeespiegelstijging (jaar 2129) en de huidige situatie, beide bij huidige doorspoeling (rechts). Bron: Delsman (2024). Onder: idem, voor situatie zichthorizon 3 m zeespiegelstijging (jaar 2277).

De doorspoelvraag wordt in deze analyse niet aangepast aan de veranderde zoutvracht in de verschillende zichthorizons, waar dit in Delsman et al. (2022) wel gebeurt. Door de sterke toename in doorspoelvraag in Delsman et al. (2022) neemt het verschil in doorspoelvraag sterk toe bij toenemende zeespiegelstijging. Bij zichthorizont 3 m zeespiegelstijging neemt de totale landsbrede polder-doorspoelvraag ten opzichte van Delsman et al. (2022) af met meer dan 90% (Figuur 3-12).

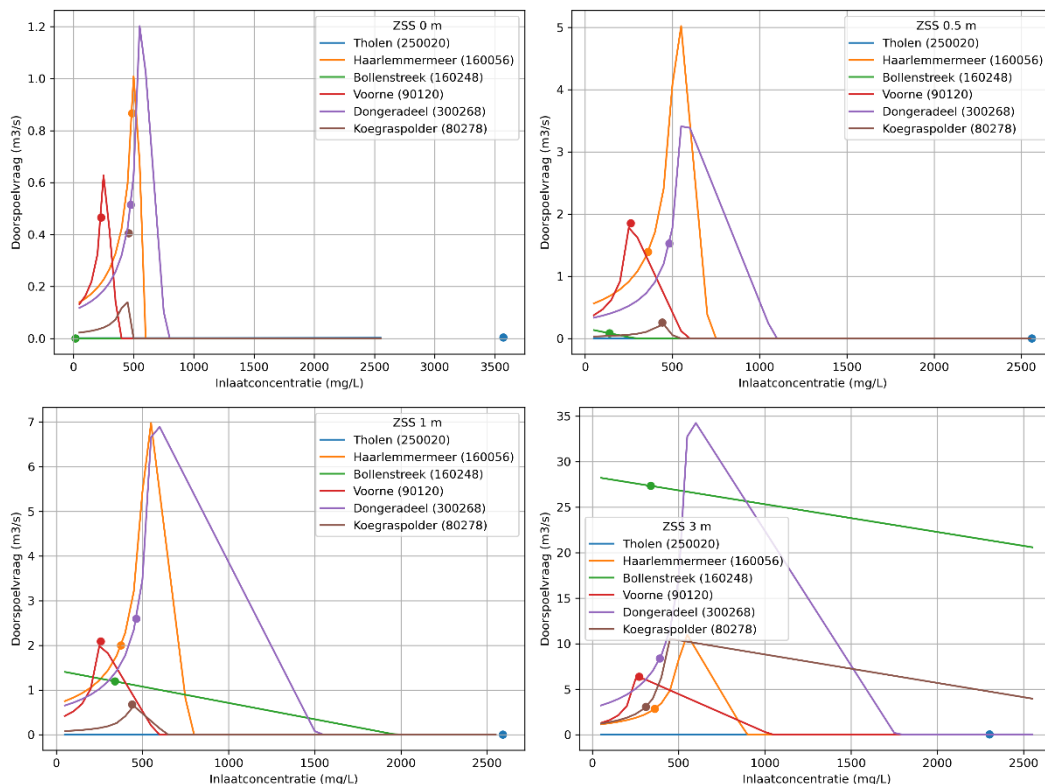


Figuur 3-12 Verandering totale landsbrede polder-doorspoelvraag bij constant houden doorspoelvraag versus aanpassen doorspoelvraag aan veranderde zoutvracht voor verschillende zeepiegelhorizonten.

3.3 Gevoeligheidsanalyse inlaatconcentratie

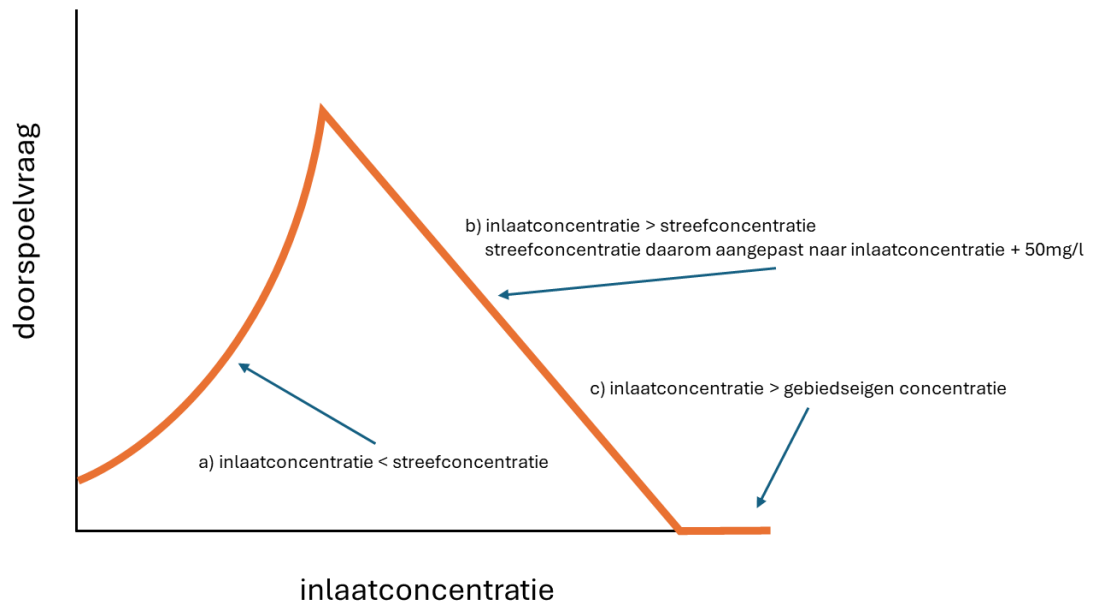
In een gevoeligheidsanalyse is de inlaatconcentratie voor alle door te spoelen LSWs gevarieerd van 50 tot 2500 mg/L chloride en is de resulterende doorspoelvraag berekend, bij verder gelijke condities en streefconcentratie. Resultaten van de berekende doorspoelvraag voor een zestal van deze inlaatconcentraties zijn te vinden in bijlage B, Figuur 3-13 geeft de verkregen relatie tussen inlaatconcentratie en doorspoelvraag voor enkele geselecteerde LSWs. Een conceptuele weergave van het optredende relatie is weergegeven in Figuur 3-14.

De relatie tussen inlaatconcentratie en doorspoelvraag kent een exponentieel stijgende doorspoelvraag bij oplopende inlaatconcentratie, totdat de inlaatconcentratie gelijk is aan de streefconcentratie van het LSW (traject a in Figuur 3-14). Vervolgens neemt de doorspoelvraag bij toenemende inlaatconcentratie lineair af (traject b in Figuur 3-14), tot er geen doorspoelvraag meer is (traject c in Figuur 3-14). Dit punt wordt bereikt als de inlaatconcentratie gelijk is aan de gebiedseigen concentratie van het LSW. De exponentiële toename in doorspoelvraag in traject a volgt uit het feit dat - anders dan bij variatie in de streefconcentratie - alleen de noemer in de quotiënt in vergelijking 1 verandert. Vanaf traject b geldt dat de streefconcentratie niet kan worden gehaald met doorspoelen met inlaatwater, aangezien het inlaatwater zouter is dan de streefconcentratie. Aangenomen wordt dan dat de LSW wordt doorgespoeld tot het water in de polder een zoutconcentratie van 50 mg/L boven de inlaatconcentratie heeft bereikt. In vergelijking 1 is de noemer dan vast (de 50 mg/L), terwijl de teller lineair afneemt, tot de streefconcentratie (inlaatconcentratie + 50 mg/L) hoger wordt dan de gebiedseigen concentratie. De doorspoelvraag wordt dan op nul gesteld (traject c).



Figuur 3-13 Relatie tussen en doorspoelvraag voor geselecteerde LSWs voor zichthorizonten 0 m (linksboven), 0.5 m (rechtsboven), 1 m (linksonder) en 3 m (rechtsonder) zeespiegelstijging. De geplaatste stip geeft de inlaatconcentratie / doorspoelvraag aan zoals gehanteerd in Delsman et al. (2022). Voor 0 m ZSS kan de geplaatste stip door mismatch tussen theoretische en geïnventariseerde doorspoelbehoefte buiten de lijn vallen. Let op dat de schaal van de y-as (doorspoelvraag) verschilt tussen de deelfiguren.

In het berekende verloop voor de verschillende LSWs laten de LSWs Dongeradeel, Haarlemmermeer, Voorne en ook de Koegraspolder het conceptuele verloop duidelijk zien. De LSWs verschillen in streefconcentratie en gebiedseigen concentratie, zodat de inlaatconcentraties van de verschillende trajecten verschillen. Daarbij verschilt door de verschillen in zoutbelasting uiteraard ook de grootte van de berekende doorspoelvraag. Het LSW in de Bollenstreek kent geen traject a. De streefconcentratie van dit LSW is 100 mg/L, gelijk aan de laagste onderzochte waarde van de inlaatconcentratie (50 mg/L), plus de aangenomen 50 mg/L. Uit het verloop bij 3 m zeespiegelstijging is af te leiden dat de gebiedseigen concentratie van dit LSW beduidend hoger ligt dan de maximale gehanteerde inlaatconcentratie, traject c is nog lang niet bereikt. Het LSW op Tholen kent in de gevoeligheidsanalyse geen significante doorspoelvraag, maar blijkt zich volledig in traject c te bevinden.



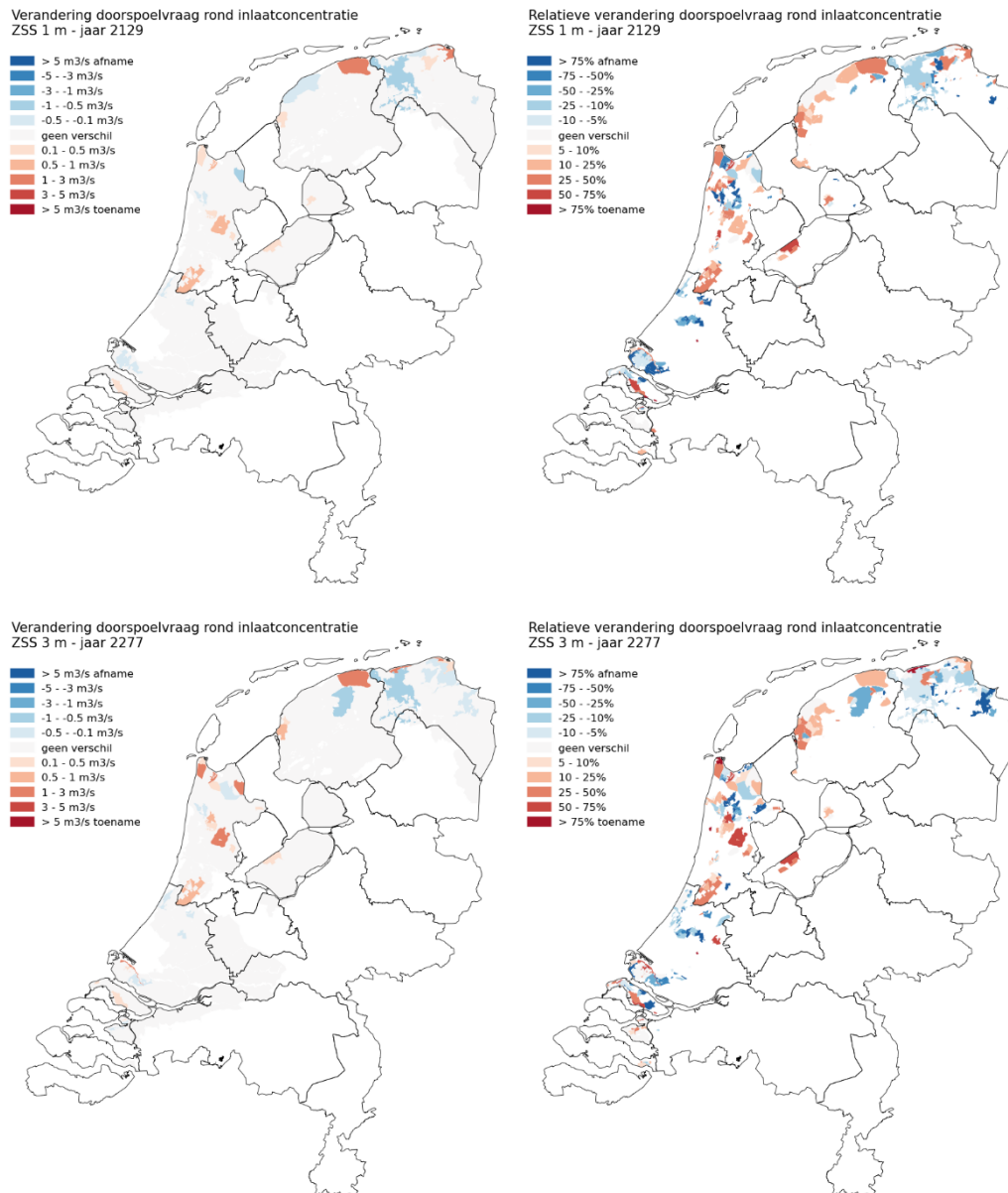
Figuur 3-14 Conceptuele weergave van relatie tussen inlaatconcentratie en doorspoelvraag.

3.4 Hoe verandert de doorspoelvraag bij een andere inlaatconcentratie

3.4.1 Hoeveel hoger is de doorspoelvraag bij verhoging van de inlaatconcentratie?

Bij een hogere zeespiegel en bij toekomstige langere perioden van droogte wordt het moeilijker om het hoofdwatersysteem zoet te houden, en kunnen inlaatconcentraties toenemen. Om te onderzoeken hoe een kleine verhoging van de inlaatconcentratie de benodigde doorspoelvraag verhoogt is de inlaatconcentratie met 50 mg/L verlaagd rondom de huidige inlaatconcentratie.

Een verlaging van de inlaatconcentratie is ook mogelijk, een verlaging is bijvoorbeeld te bereiken door het verplaatsen van inlaatpunten. Doordat de analyse kijkt naar de verandering van de inlaatconcentratie rondom de inlaatconcentratie uit Delsman et al. (2022), laat deze analyse ook min of meer zien hoe de doorspoelvraag verandert bij een lichte verlaging van de inlaatconcentratie. Hiervoor dienen onderstaande figuren 'andersom' geïnterpreteerd te worden (afname = toename, en toename = afname).



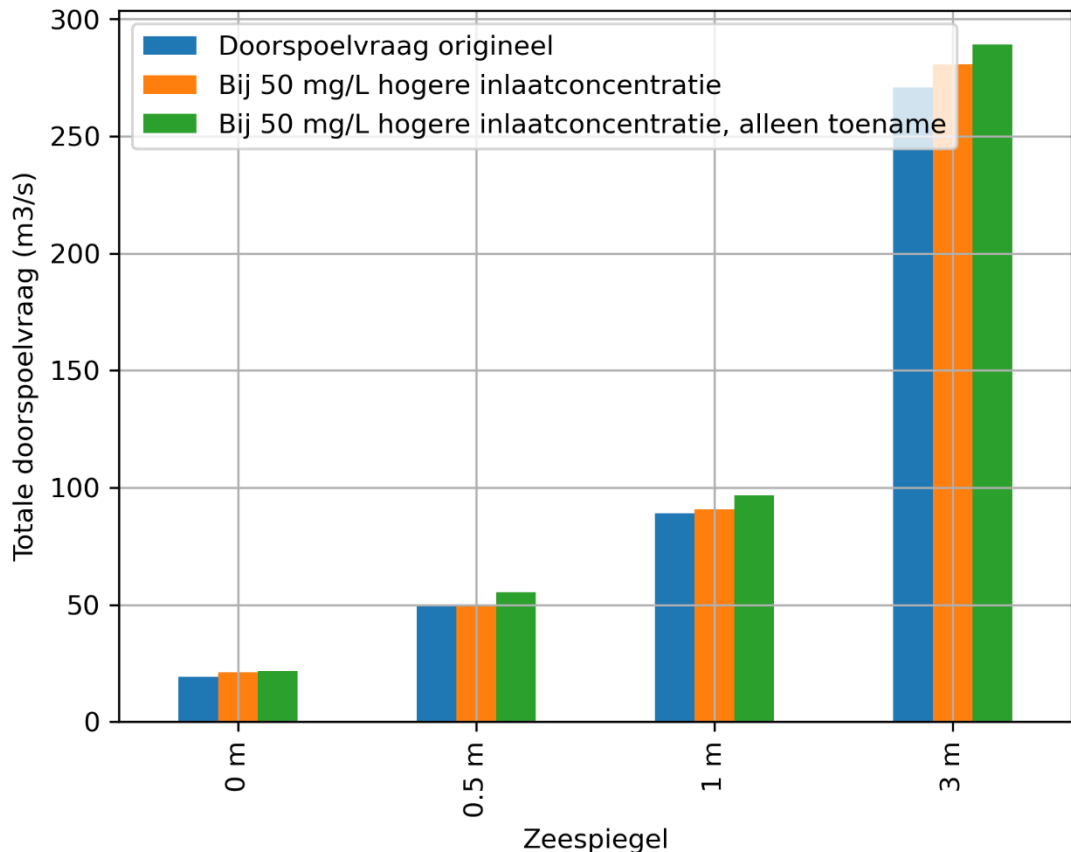
Figuur 3-15 Verandering doorspoelvraag bij verhoging inlaatconcentratie met 50 mg/L rond de in Delsman et al. (2022) berekende inlaatconcentratie, bij 1m (boven) en 3m (onder) zeespiegelstijging. De verandering is absoluut (links) en relatief (rechts) weergegeven.

De verandering van de doorspoelvraag bij een verhoging van de inlaatconcentratie met 50 mg/L is weergegeven in Figuur 3-15. Figuur 3-15 toont zowel LSWs waar de doorspoelvraag toeneemt, als LSWs waar de doorspoelvraag afneemt bij een verhoging van de inlaatconcentratie. Een afname van de doorspoelvraag bij een toename van de inlaatconcentratie is tegen-intuïtief; het betekent dat de betreffende LSWs zich op traject b bevinden in Figuur 3-14, waar de inlaatconcentratie hoger is dan de streefconcentratie van het LSW.

De LSWs waar een significante verhoging zichtbaar is in de doorspoelvraag bij verhoging van de inlaatconcentratie hebben een sterke overlap met de analyse van de verhoging van de streefconcentratie (paragraaf 3.2.1). Dit betreft een groot aantal Hollandse polders (Haarlemmermeer, Beemster, de Koegraspolder in de kop van Noord-Holland, Voorne), delen van de Fries-Groningse kustregio. Waar de doorspoelvraag toeneemt, betreft die

toename een belangrijk deel van de doorspoelvraag, regelmatig meer dan de helft van de vraag. Figuur 3-16 geeft de totale verandering van de doorspoelvraag bij een verhoging van de inlaatconcentratie met 50 mg/L. De netto verandering – inclusief de LSWs die een verlaging in doorspoelvraag laten zien (traject b in Figuur 3-14) – is beperkt (< 5%). Worden alleen de LSWs beschouwd die een verhoging laten zien, neemt de doorspoelvraag bij een verhoging van de inlaatconcentratie toe met zo'n 10%.

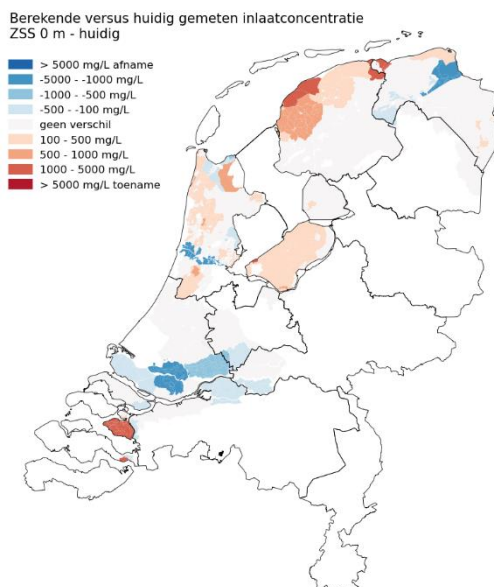
Andersom is met een verlaging van de inlaatconcentratie, bijvoorbeeld door het bovenstrooms verplaatsen van inlaatpunten, de watervraag met zo'n 10% te beperken. We nemen hierbij de LSWs die zich op traject b bevinden wederom niet mee. We maken dan impliciet de keuze om LSWs waarbij het inlaatwater zouter is dan de streefconcentratie niet extra door te spoelen bij toenemend zoutgehalte van het inlaatwater.



Figuur 3-16 Verandering van de totale landsbrede polder-doorspoelvraag bij verhoging inlaatconcentratie met 50 mg/L rond de in Delsman et al. (2022) berekende inlaatconcentratie voor verschillende zeespiegelhorizons.

3.4.2 Beperkingen in modelconcept Mozart – Distributiemodel

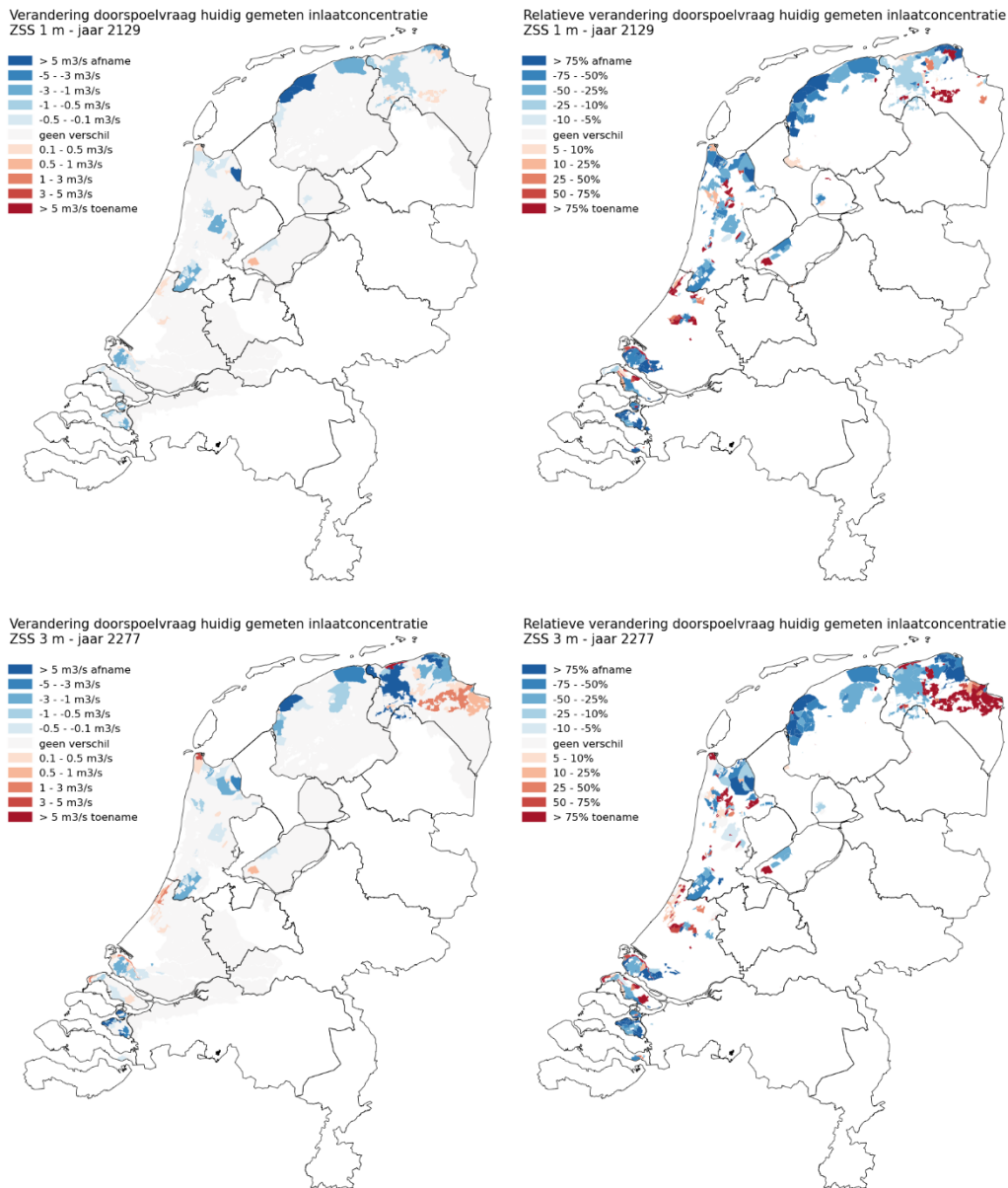
In de modelberekeningen wordt de concentratie van het inlaatwater berekend door het gekoppelde waterverdelingsmodel Mozart – Distributiemodel. Dit gekoppelde model kent verschillende beperkingen op het gebied van het modelleren van de stroming van zout door het watersysteem. Deze beperkingen zijn reeds onderkend in de onderliggende studie (Delsman et al., 2022). De belangrijkste beperking heeft te maken met het mogelijke 'rondpompen' van zout, waarbij water op inlaatpunten gemengd wordt met de zoutlast van benedenstrooms gelegen afvoerpunten.



Figuur 3-17 Verandering berekende inlaatconcentratie voor de huidige situatie en de geïnterpoleerde gemiddelde gemeten concentratie van het hoofdwatersysteem (Delsman et al., 2020). Een toename betekent dat de gehanteerde berekende inlaatconcentratie hoger ligt dan de geïnterpoleerde gemiddelde gemeten concentratie.

Figuur 3-17 geeft het verschil tussen de inlaatconcentratie zoals berekend in het LHM, en de geïnterpoleerde chlorideconcentratie van het hoofdwatersysteem. Enkele LSWs komen naar voren als waar de berekende concentratie belangrijk hoger zijn dan uit de metingen blijkt (rode gebieden). Dit betreft met name Tholen en delen van de Friese kustregio (met name Ropta, Zwarte Haan en Lauwersmeer). Merk op dat voor gebieden rond de Rijn-Maasmond, langs het Noordzeekanaal en Fivelingo in Groningen inlaatconcentraties in de berekeningen juist aanmerkelijk lager liggen (blauwe gebieden).

De invloed van de berekende versus gemeten inlaatconcentraties is bepaald door als inlaatconcentratie niet de met het model berekende concentratie te hanteren, maar de concentratie zoals deze is gemeten op verschillende meetpunten in het watersysteem. De gemeten waarde is een jaargemiddelde concentratie en betreft daarmee waarschijnlijk een onderschatting van de inlaatconcentratie tijdens innameperioden. De hiermee berekende doorspoelbehoefte betreft daarmee waarschijnlijk ook een onderschatting. Dit is nog meer het geval waar het de hogere zeespiegelhorizonten betreft. De verwachte toename van de inlaatconcentratie door toename van de zoutvracht wordt immers niet weerspiegeld in de huidige gemeten concentraties.

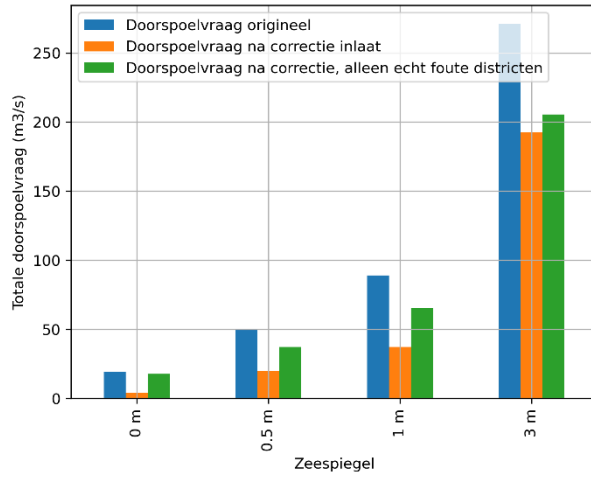


Figuur 3-18 Verandering doorspoelvraag bij aanpassing van de berekende inlaatconcentratie naar de huidige gemeten inlaatconcentratie, voor zichthorizonten 1m (boven) en 3m (onder) zeespiegelstijging. De verandering is absoluut (links) en relatief (rechts) weergegeven.

De analyse geeft geen uitsluitel over waar modelbeperkingen verantwoordelijk zijn voor te hoog berekende inlaatconcentraties. Wel zijn er op basis van Figuur 3-17, Figuur 3-18 en de onderliggende data, LSWs aan te wijzen waar duidelijke aanwijzingen voor zijn dat modelbeperkingen deels verantwoordelijk zijn voor hoge berekende doorspoelvragen. Dit betreft met name Tholen, Reigersbergse polder, Ropta, Zwarte Haan en Lauwersmeer. Dit zijn LSWs waarbij de berekende inlaatconcentratie beduidend hoger ligt dan plausibele waarden (meer dan 1500 mg/L), en gemeten concentraties daar inderdaad ook beduidend onder liggen (> 500 mg/L lager).

Figuur 3-19 geeft het totale effect van aanpassing van de inlaatconcentratie naar gemiddelde gemeten waarden op de doorspoelvraag. In totaal neemt de doorspoelbehoefte bij de lagere zeespiegelhorizonten met meer dan 50% af. Bij 3 m zeespiegelstijging is de afname met zo'n 25% relatief minder. Wanneer we alleen de districten met duidelijke aanwijzingen voor

foutieve inlaatconcentraties bekijken is de afname zo'n 20%. De exponentiële toename van de doorspoelvraag bij stijgende zeespiegel komt ook in deze analyse naar voren in de resultaten. Merk op dat deze resultaten vallen binnen de onzekerheidsmarges zoals aangegeven in Delsman et al. (2022) (zie ook Figuur 1-1).



Figuur 3-19 Totale afname van doorspoelvraag voor verschillende zeespiegelhorizonten bij aanpassing inlaatconcentratie naar de huidige gemeten inlaatconcentratie.

Deze rapportage brengt op basis van verkennende analyses het handelingsperspectief rond doorspoelen van polders bij sterke zeespiegelstijging verder in kaart. Om dit handelingsperspectief in kaart te brengen is een analyse uitgevoerd naar de gevoeligheid van de doorspoelbehoefte voor verandering van streefconcentratie en inlaatconcentratie.

De gevoeligheidsanalyses laten voor zowel de gevoeligheid voor streefconcentratie als voor de inlaatconcentratie een standaard verloop zien van de berekende doorspoelvraag (Figuur 3-2 en Figuur 3-14). Daarbij verschilt per LSW waar dit gebied zich op de respectievelijke verlopen bevindt. Dit heeft te maken met verschillen in zoutlast per LSW (kwelflux én concentratie), streefconcentratie en inlaatconcentratie. Door deze onderlinge verschillen blijkt de respons van LSWs op gebiedsdekkend opgelegde veranderingen sterk heterogeen. Voor districten, een schaalniveau hoger dan LSWs, is het berekende verloop van de berekende gesommeerde doorspoelvraag daarom al onzekerder.

Maar wat is nu het handelingsperspectief, gebaseerd op de hier gepresenteerde analyses? Oftewel, wat kan worden gedaan om de doorspoelvraag van polders te beperken?

Lichte verhoging streefconcentratie waar mogelijk

Voor een aantal gebieden is met een kleine verhoging van de streefconcentratie, en daarmee een min of meer gelijk voorzieningsniveau, een relatief grote afname van de doorspoelvraag te bereiken. Dit betreft een groot aantal Hollandse polders (Haarlemmermeer, Beemster, de Koegraspolder in de kop van Noord-Holland, Voorne), en delen van de Fries-Groningse kustregio. Dit handelingsperspectief heeft relatief weinig impact op de functies in een gebied, noch is implementatie technisch moeilijk uitvoerbaar. Het is echter geen landsbreed toepasbare oplossing, zij is alleen effectief in de genoemde gebieden. In totaal is de afname die op deze manier te bereiken is zo'n 10% van de doorspoelvraag.

Waterkwaliteit voor teelten minimaal bedienen

Uit de analyses blijkt dat er een flinke besparing op doorspoelvraag mogelijk is wanneer de meest voorkomende teelt in landbouwgebieden qua streefconcentratie slechts minimaal wordt bediend. Hierbij zijn streefconcentraties gekozen aan de bovenkant van de volgens de geldende kennis bekende spreiding in streefconcentraties voor de meest voorkomende teelt. Aangenomen streefconcentraties in deze analyse waren 300 mg/L voor hoogwaardige teelten, 1000 mg/L voor akkerbouwgebieden en 2000 mg/L voor weidegronden. De doorspoelbehoefte kan in dit handelingsperspectief met ongeveer 40% worden teruggebracht. Een belangrijke kanttekening bij dit handelingsperspectief is dat gelet op de ecologie in de watergangen (poldersloten met al dan niet een KRW-status) de chloridegehalten ver boven de huidige streefwaarden uit komen. Ook andere functies, zoals eventueel veeleisendere teelten, worden niet voorzien.

Doorspoeling aanpassen aan meteorologische omstandigheden

In gebieden waar de zoutvracht sterk varieert met meteorologische omstandigheden (kweldruk gedomineerd door neerslag), is in droge perioden minder water nodig om door te spoelen. Er is dan namelijk minder zoutvracht om te verdunnen. In deze gebieden kan in totaal in droge perioden – wanneer er ook het minste water beschikbaar is – de doorspoelvraag worden teruggebracht met ongeveer de helft. Maatregelen om dit te realiseren zijn het operationaliseren van de inlaat, of een meer in de tijd gedifferentieerd inlaatregime (Delsman en Kramer, 2017). Het is dan wel zaak dit goed ruimtelijk te variëren. In andere LSWs (landsbreed ongeveer evenveel in aantal) is er in een droge periode juist

meer water nodig om dezelfde concentratie te bereiken. Bij implementatie van dit handelingsperspectief in alleen de juiste LSWs kan de polder-doorspoelvraag met ongeveer de helft worden beperkt.

Huidige doorspoeling voortzetten

Wanneer het huidige doorspoelbeheer wordt voortgezet, nemen concentraties in het regionale oppervlaktewater in het grootste deel van de kustregio toe. Concentraties bij huidige doorspoelhoeveelheden liggen in het kustgebied bij 3 m zeespiegelstijging voor een groot deel in de range 300 – 1000 mg/L, waarbij alleen de meest zoutgevoelige gewassen problemen ondervinden (waarden voor concentraties in het beregeningswater, Stuyt et al., 2016). In een aantal gebieden kan met het huidige doorspoelbeheer het huidige landgebruik niet worden voorzien, concentraties nemen hier met zeespiegelstijging sterk toe. Dit geldt voor de bollenstreek, de kop van Noord-Holland, de Fries-Groningse kustregio en Tholen / st. Philipsland. Verandering van landgebruik, zodat men minder afhankelijk is van beregeningswater, zal in dit perspectief aan de orde zijn. Merk op veel landbouwgebieden in Nederland al niet beregend worden, doordat er geen zoet water beschikbaar is, of het oppervlaktewater om andere redenen ongeschikt is (bijvoorbeeld bruinrot).

Verandert de doorspoelvraag bij verhoging van de inlaatconcentratie?

Door verminderde waterbeschikbaarheid en toenemende zoutinrusie kan de inlaatconcentratie toenemen, met toenemende doorspoelvraag tot gevolg. In met name de Noord-Hollandse polders en de Friese kustregio leidt een toenemende inlaatconcentratie tot een toenemende doorspoelvraag. De polder-doorspoelvraag kan met zo'n 10% toenemen bij een met 50 mg/L toenemende inlaatconcentratie. Andersom laat de analyse zien dat bij verlaging van de inlaatconcentratie – bijvoorbeeld door het bovenstrooms verplaatsen van inlaatpunten – de polder doorspoelvraag met zo'n 10% kan afnemen.

Maatwerk nodig

Over alle onderzochte handelingsperspectieven heen valt vooral op dat LSWs sterk ruimtelijk verschillen in hoe de verschillende handelingsperspectieven uitpakken. Het is dan ook niet eenvoudig om een bepaald handelingsperspectief breed te implementeren, lokaal maatwerk lijkt noodzakelijk. Daarbij is met maatwerk, ook bij verder gelijkblijvende omstandigheden en streefconcentratie, vaak een reductie in doorspoelvraag te realiseren, in Delsman en Kramer (2017) worden verschillende stappen voorgesteld om doelmatiger door te spoelen op polderniveau. Deze stappen omvatten het in beeld brengen van (1) de huidige situatie (actueel zoetwaterregime), (2) de doelen voor doorspoeling en hun eisen (optimaal zoetwaterregime), (3) doelrealisatie en knelpunten, (4) gewenst zoetwaterregime, op basis waarvan (5) maatregelen kunnen worden gedefinieerd. Voorliggende rapportage geeft een eerste verkenning in welke gebieden welke richting het meest kansrijk lijkt.

Aanpakken beperking modelconcept voor toekomstige analyses

Beperkingen in het waterverdelingsmodel Mozart-Distributiemodel zorgen in bepaalde LSWs voor een hogere inlaatconcentratie en daarmee doorspoelvraag dan te verwachten op basis van daadwerkelijk optredende zoutconcentraties. Deze beperkingen lijken verantwoordelijk voor zo'n 20% van de doorspoelvraag. Merk op dat deze getallen ruim binnen de in Delsman et al. (2022) gepresenteerde onzekerheidsband vallen. Momenteel wordt gewerkt aan een opvolger van het waterverdelingsinstrumentarium in het NHI op basis van vernieuwde RIBASIM software. Het wordt aanbevolen de geconstateerde beperkingen in deze opvolger te herstellen en een nieuwe analyse naar doorspoelvraag en handelingsperspectief uit te voeren.

Beperkingen analyse

De hier gerapporteerde analyses betreffen alle verkennende analyses. Hierbij is op basis van bestaande berekeningen (bestaande water- en zoutbalans) en berekeningen van de

doorspoelvraag op basis van per LSW opgegeven streef- en inlaatconcentraties een inschatting gemaakt van handelingsperspectief rond de doorspoelvraag.

Allereerst zijn alle uitgangspunten en beperkingen van de onderliggende studie (Delsman et al., 2022) van toepassing op deze analyse. Zo wordt geen rekening gehouden met klimatologische (meteorologische) veranderingen, zijn aannames gedaan welke wateren wel en niet meestijgen met de zeespiegel, en wordt uitgegaan van de 'gematigde tijdlijn' van de zeespiegelstijging (RCP4.5). Daarnaast zijn er beperkingen in het waterverdelingsmodelconcept, die in deze studie nader zijn onderzocht.

In deze analyses wordt daarbij geen rekening gehouden met ruimtelijke doorwerking tussen LSWs, zodat veranderingen in bovenstroomse LSWs niet doorwerken op benedenstroomse LSWs. Het is daarmee ook niet direct duidelijk wat de gepresenteerde polderdoorspoelhoeveelheden betekenen voor watervraag op de inlaatpunten van het hoofdwatersysteem. Dit vergt nader onderzoek, waar de vernieuwing van het waterverdelingsmodel in het LHM een belangrijke rol in kan spelen. In het algemeen kan gesteld worden – zoals ook in Delsman et al. (2022) – dat de hier gepresenteerde opgetelde getallen een bovengrens aangeven voor de watervraag aan het hoofdwatersysteem, omdat er geen rekening wordt gehouden met hergebruik van water in het regionale oppervlaktewatersysteem.

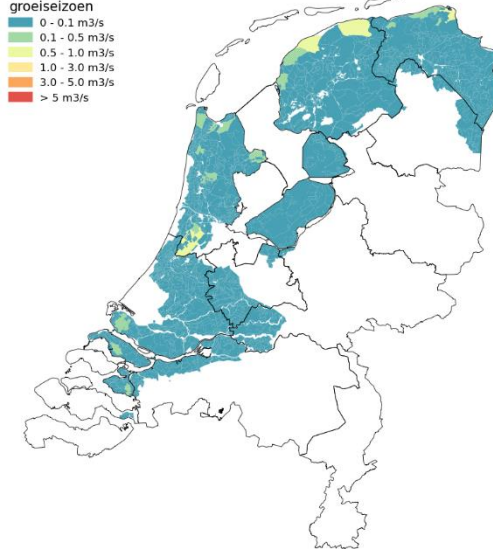
Referenties

- De Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Stuyfzand, P. J., & Van der Zee, S. E. A. T. M. (2010). Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands. *Journal of Hydrology*, 394(3–4), 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.009>
- Delsman, J. R. (2015). Saline groundwater - surface water interaction in coastal lowlands. In PhD thesis, VU University Amsterdam. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-518-0-i>
- Delsman, J. R., Waterloo, M. J., Groen, M. M. A., Groen, J., & Stuyfzand, P. J. (2014). Investigating summer flow paths in a Dutch agricultural field using high frequency direct measurements. *Journal of Hydrology*, 519, 3069–3085. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.058>
- Delsman, J. R., Oude Essink, G. H. P., Beven, K. J., & Stuyfzand, P. J. (2013). Uncertainty estimation of end-member mixing using generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE), applied in a lowland catchment. *Water Resources Research*, 49, 4792–4806. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20341>
- Delsman, J. R. (2015). Saline groundwater - surface water interaction in coastal lowlands. *PhD thesis, VU University Amsterdam*. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-518-0-i>
- Delsman, J. R., & Kramer, M. (2017). Handreiking doelmatiger doorspoelen. *Deltares rapport 11200588-030*.
- Delsman, J. R., Mulder, T., & America, I. (2022). Grondwaterverziltting en watervraag bij een stijgende zeespiegel. *Deltares rapport 11206798-014*.
- Delsman, J.R., (2024). Zoutconcentraties regionaal oppervlaktewater bij zeespiegelstijging. *Deltares memo*.
- Hunink, J. C., Walsum, P. van, Vermeulen, P., Pouwels, J., Bootsma, H., Janssen, G., Swierstra, W., Prinsen, G., Meshgi, A., Veldhuizen, A., Lange, W. de, Hummelman, H. J., Bos-Burgering, L., & Kroon, T. (2020). Veranderingsrapportage LHM 4.0. *Deltares rapport 11203718-000-BGS-0002*.
- Mens, M., Pouwels, J., Weiler, O., Delsman, J., & Huismans, Y. (2024). De zoetwaterbalans van laag Nederland in een warmer klimaat. *Deltares rapport 11210362-000-ZWS-0001*.
- Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S., & De Louw, P. G. B. (2010). Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resources Research*, 46(10), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2009WR008719>
- Rozemeijer, J. C., Siderius, C., Verheul, M., & Pomarius, H. (2012). Tracing the spatial propagation of river inlet water into an agricultural polder area using anthropogenic gadolinium. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2405–2415. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2405-2012>
- Stuyt, L. C. P. M., Blom-Zandstra, M., & Kselik, R. A. L. (2016). Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens. In *Wageningen Environmental Research report 2739*.

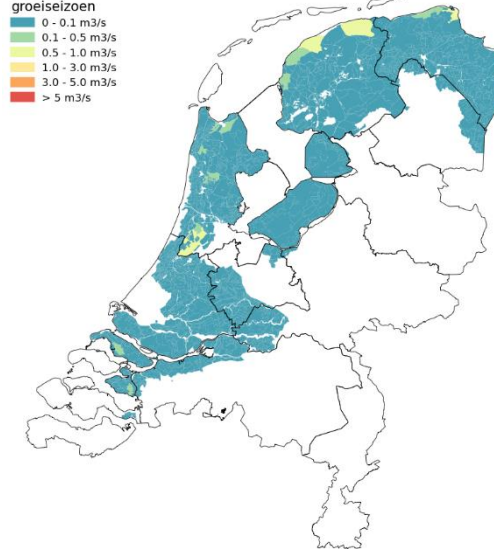
A Gevoeligheidsanalyse streefconcentratie

A.1 Huidige situatie

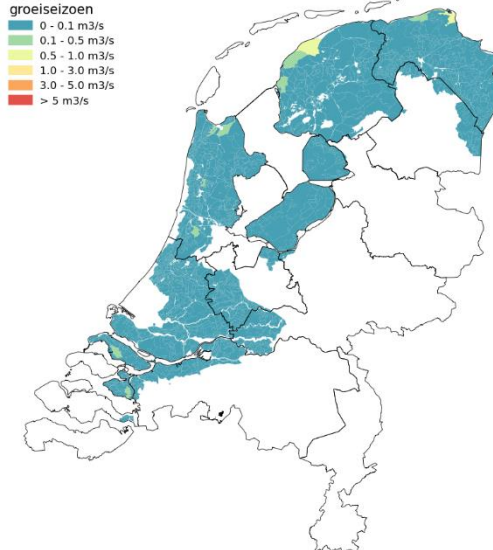
Doorspoelvraag bij 250 mg/L
ZSS 0m
groeiseizoen



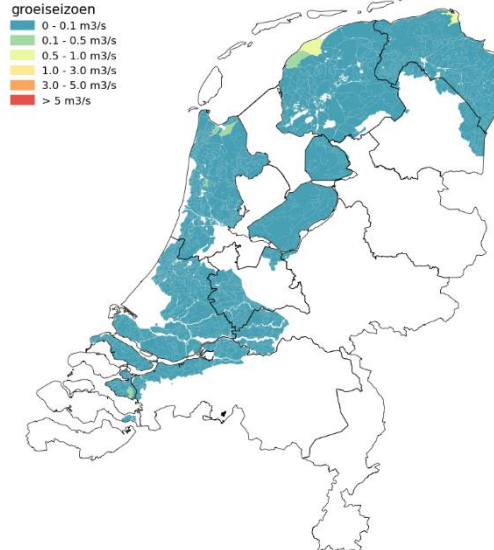
Doorspoelvraag bij 500 mg/L
ZSS 0m
groeiseizoen

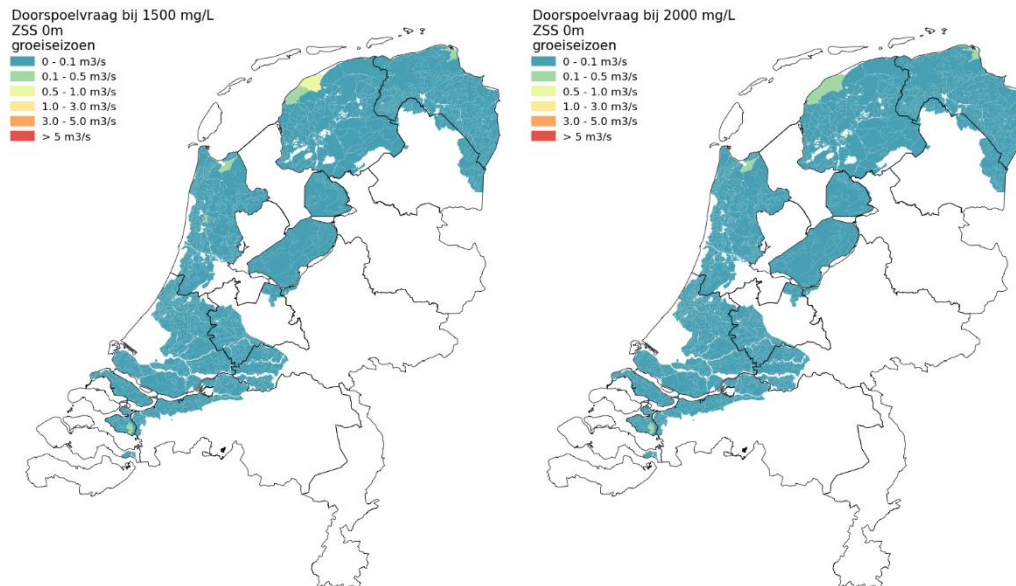


Doorspoelvraag bij 750 mg/L
ZSS 0m
groeiseizoen

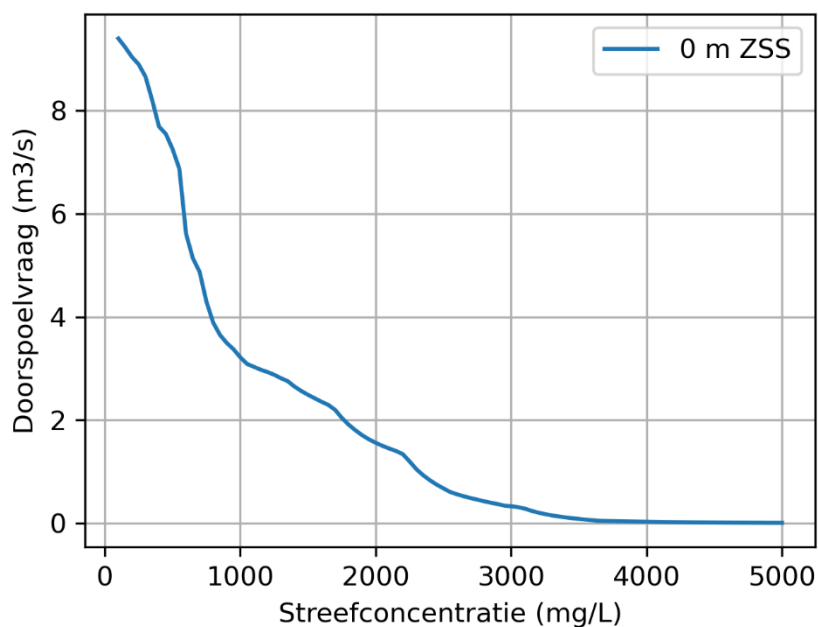


Doorspoelvraag bij 1000 mg/L
ZSS 0m
groeiseizoen





Figuur A-1 Doorspoelvraag per LSW bij streefconcentratie 250 mg/L, 500 mg/L, 750 mg/L, 1000 mg/L, 1500 mg/L en 2000 mg/L voor de huidige situatie.



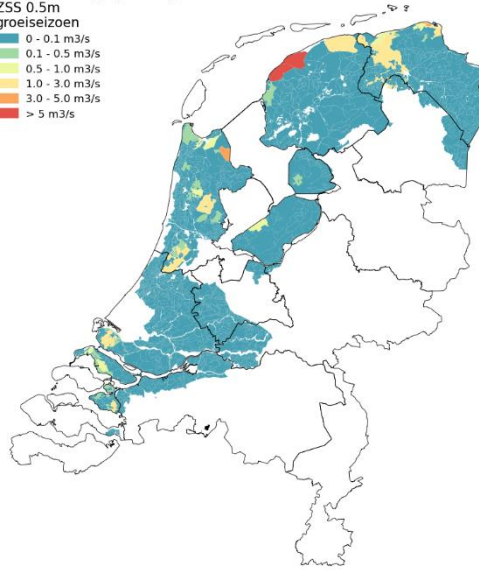
Figuur A-2 Afname totale polder-doorspoelvraag bij toenemende streefconcentratie voor de huidige situatie².

² Merk op dat de grafiek niet begint bij 19 m³/s, het huidige polder-doorspoeldebiet. Dit komt door inconsistentie tussen doorspoelhoeveelheden gebaseerd op inventarisatie bij waterschappen (de 19 m³/s) en gebaseerd op modelberekeningen van de zoutvracht.

A.2 0.5 m zeespiegelstijging

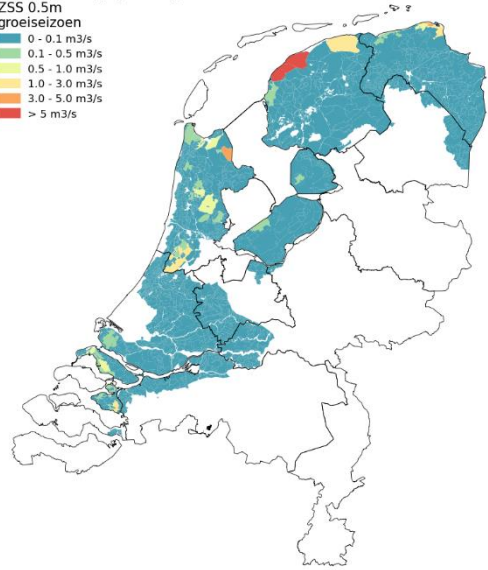
Doorspoelvraag bij 250 mg/L
ZSS 0.5m
groei seizoenen

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



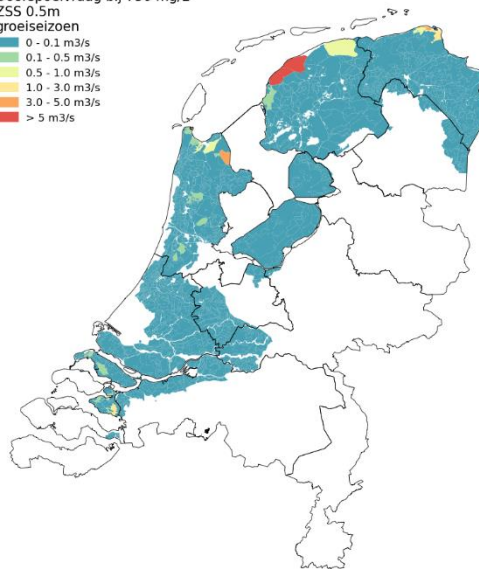
Doorspoelvraag bij 500 mg/L
ZSS 0.5m
groei seizoenen

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



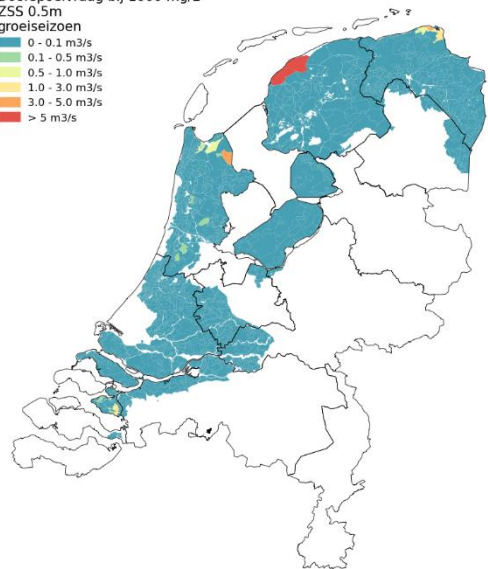
Doorspoelvraag bij 750 mg/L
ZSS 0.5m
groei seizoenen

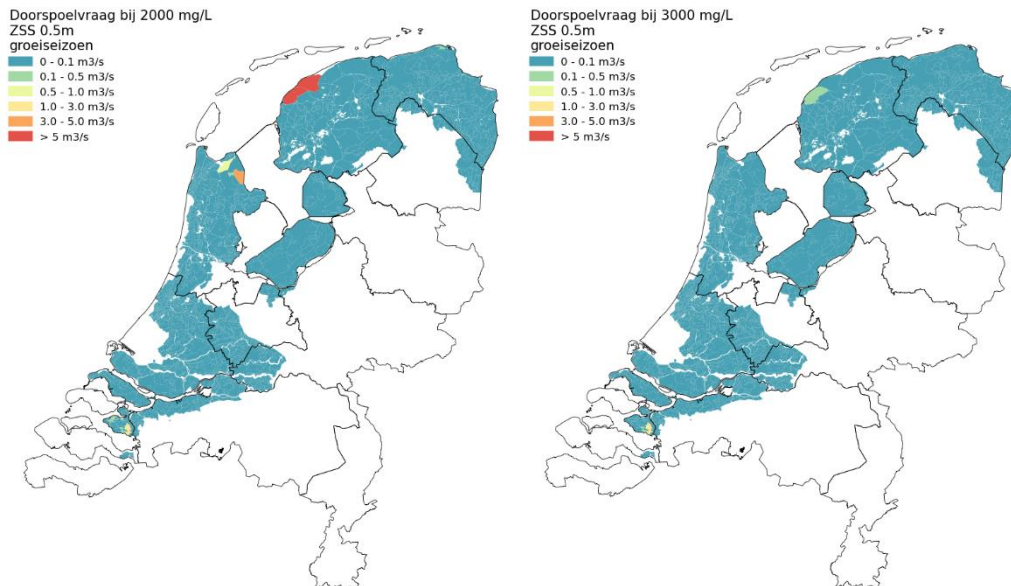
- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



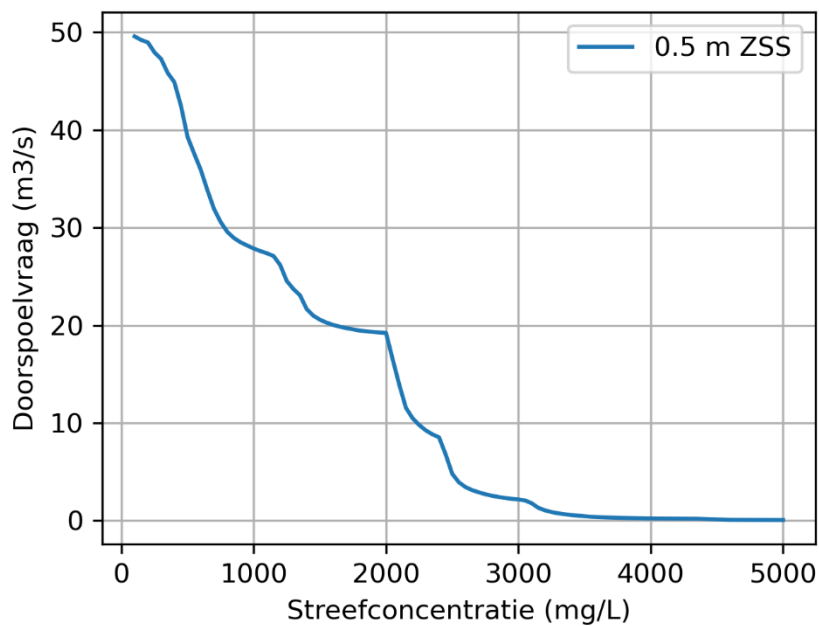
Doorspoelvraag bij 1000 mg/L
ZSS 0.5m
groei seizoenen

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s





Figuur A-3 Doorspoelvraag per LSW bij streefconcentratie 250 mg/L, 500 mg/L, 750 mg/L, 1000 mg/L, 2000 mg/L en 3000 mg/L bij 0.5 m zeespiegelstijging. De doorspoelvraag is gemaximeerd op de doorspoelvraag bij de geldende streefconcentratie in Delsman et al. (2022).

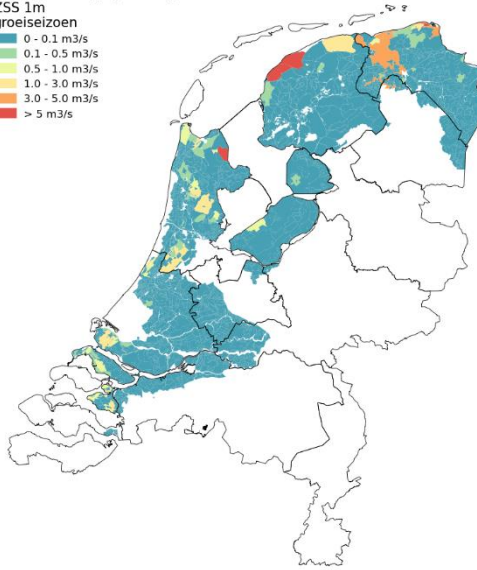


Figuur A-4 Afname totale polder-doorspoelvraag bij toenemende streefconcentratie bij 0.5 m zeespiegelstijging.

A.3 1 m zeespiegelstijging

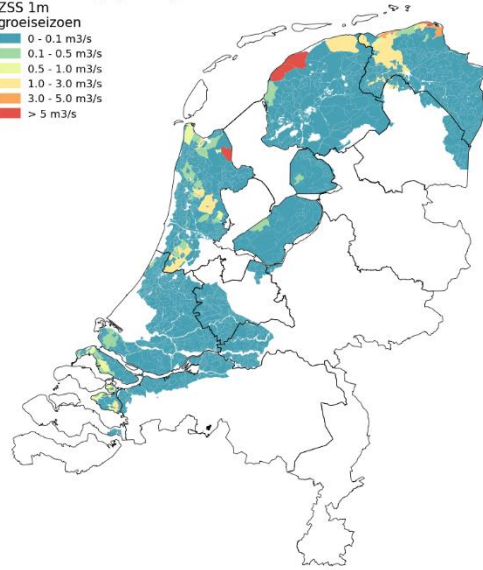
Doorspoelvraag bij 250 mg/L
ZSS 1m
groei seizoen

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



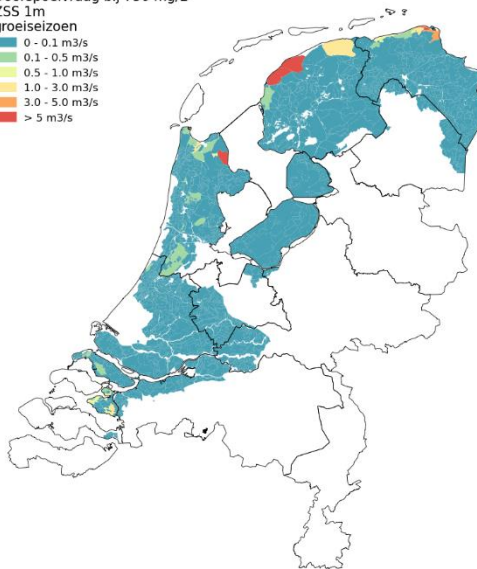
Doorspoelvraag bij 500 mg/L
ZSS 1m
groei seizoen

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



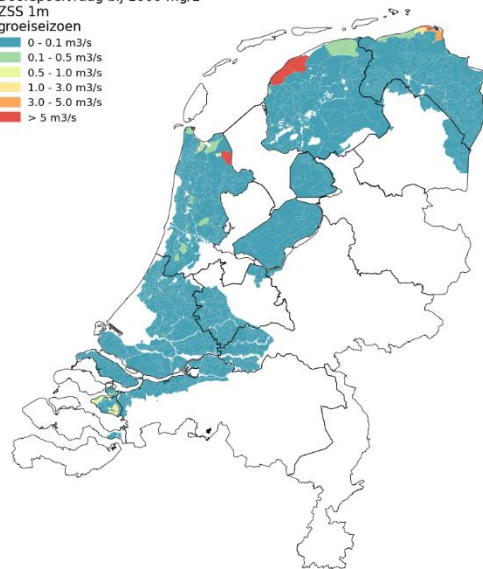
Doorspoelvraag bij 750 mg/L
ZSS 1m
groei seizoen

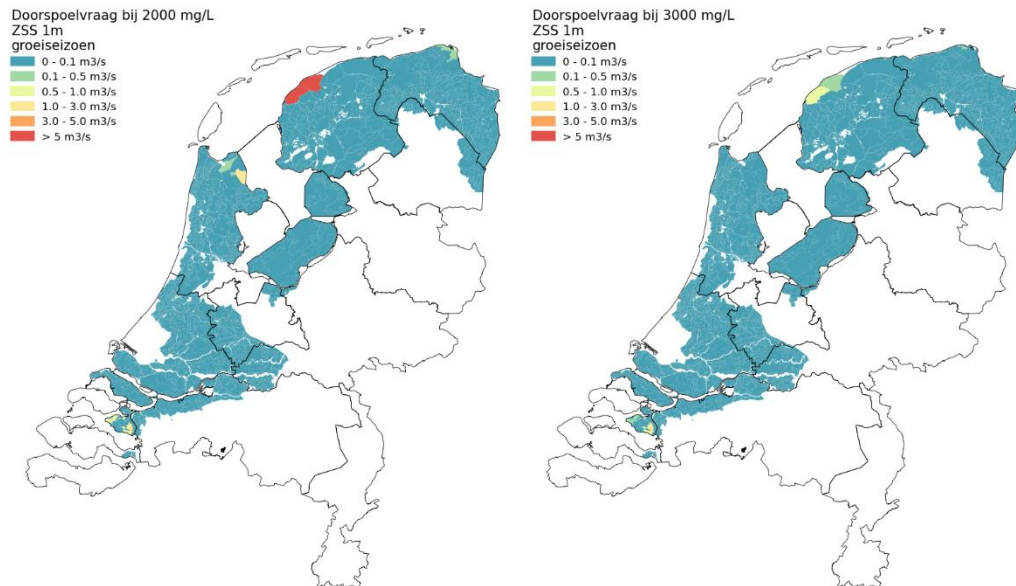
- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



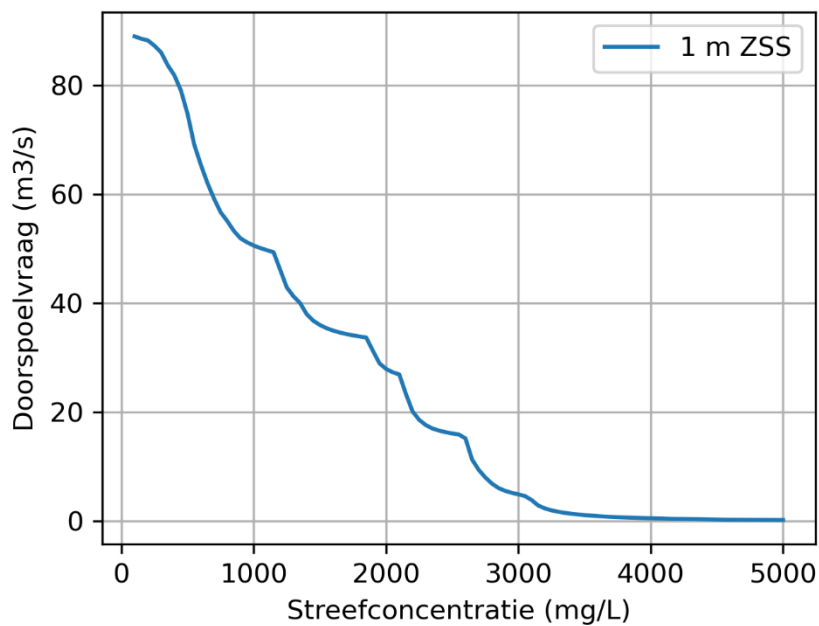
Doorspoelvraag bij 1000 mg/L
ZSS 1m
groei seizoen

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s





Figuur A-5 Doorspoelvraag per LSW bij streefconcentratie 250 mg/L, 500 mg/L, 750 mg/L, 1000 mg/L, 2000 mg/L en 3000 mg/L bij 1 m zeespiegelstijging. De doorspoelvraag is gemaximeerd op de doorspoelvraag bij de geldende streefconcentratie in Delsman et al. (2022).

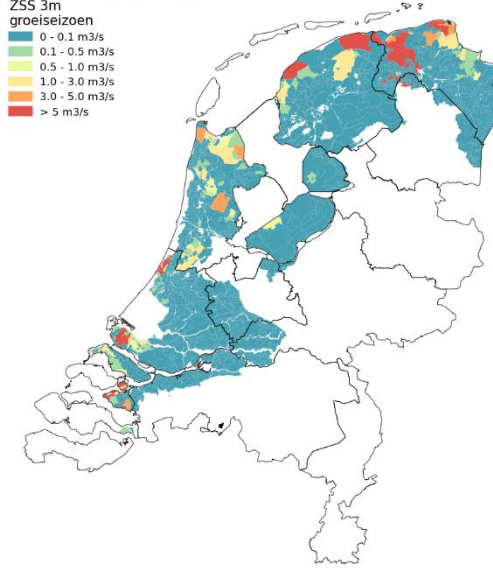


Figuur A-6 Afname totale polder-doorspoelvraag bij toenemende streefconcentratie bij 1 m zeespiegelstijging.

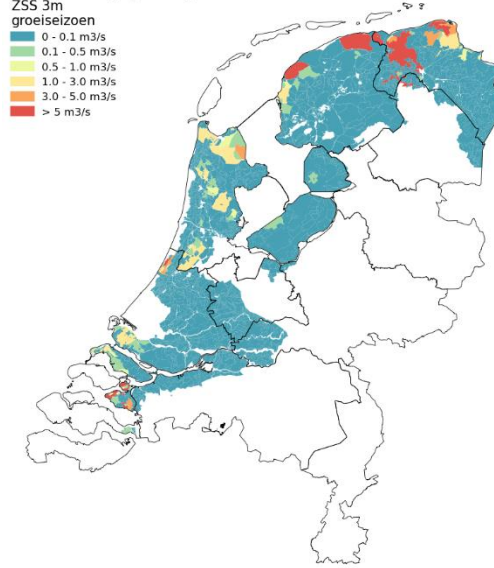
A.4

3 m zeespiegelstijging

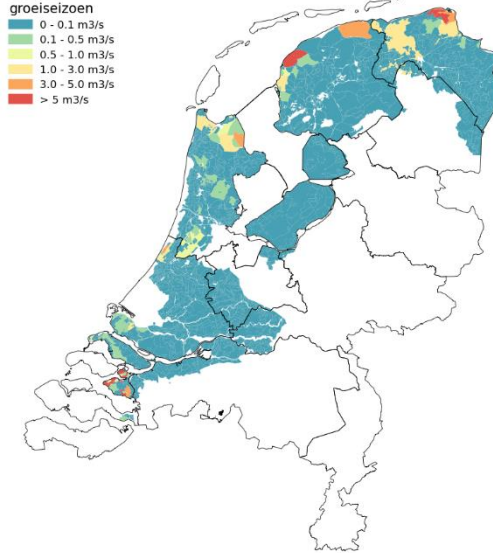
Doorspoelvraag bij 250 mg/L
ZSS 3m
groei seizoen



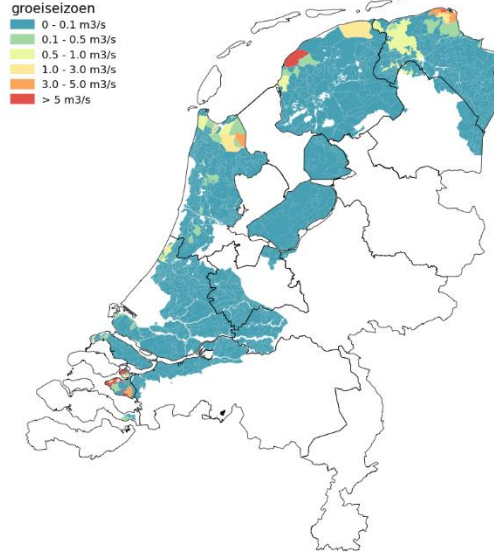
Doorspoelvraag bij 500 mg/L
ZSS 3m
groei seizoen

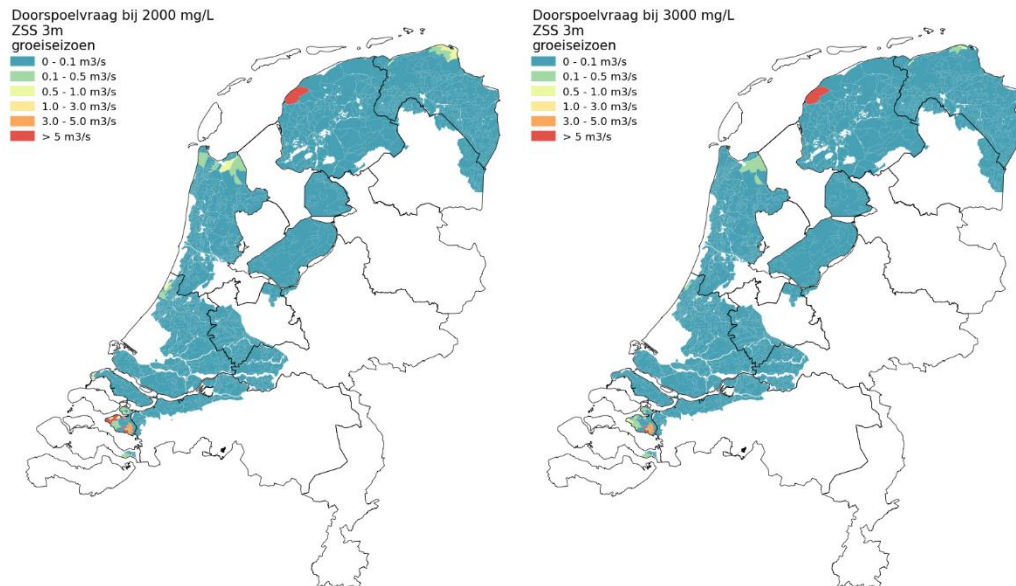


Doorspoelvraag bij 750 mg/L
ZSS 3m
groei seizoen

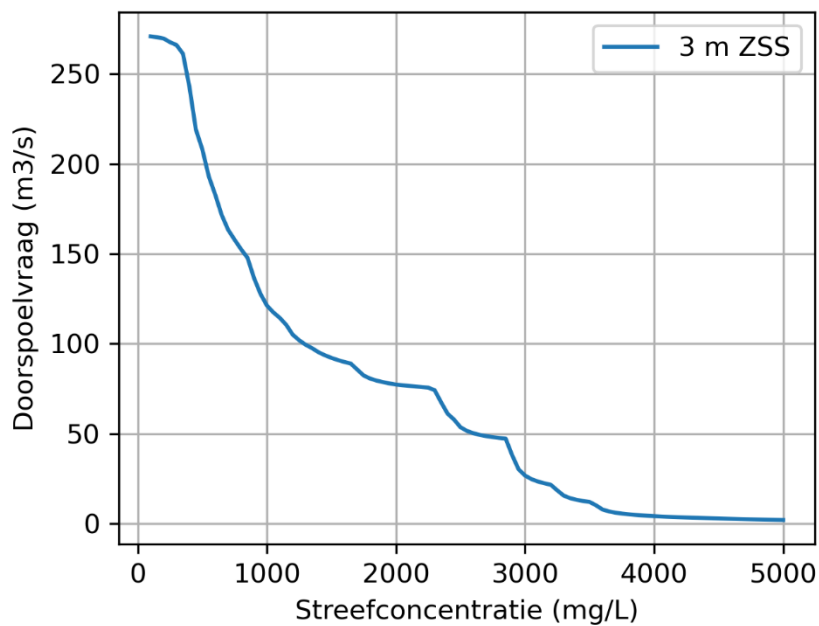


Doorspoelvraag bij 1000 mg/L
ZSS 3m
groei seizoen





Figuur A-7 Doorspoelvraag per LSW bij streefconcentratie 250 mg/L, 500 mg/L, 750 mg/L, 1000 mg/L, 2000 mg/L en 3000 mg/L bij 3 m zeespiegelstijging. De doorspoelvraag is gemaximeerd op de doorspoelvraag bij de geldende streefconcentratie in Delsman et al. (2022).

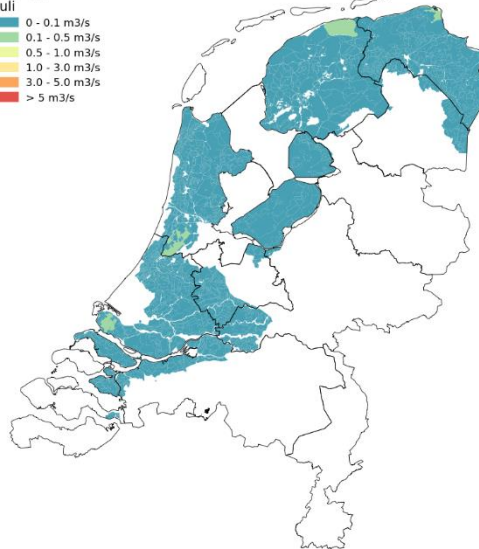
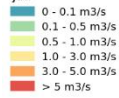


Figuur A-8 Afname totale polder-doorspoelvraag bij toenemende streefconcentratie bij 3 m zeespiegelstijging.

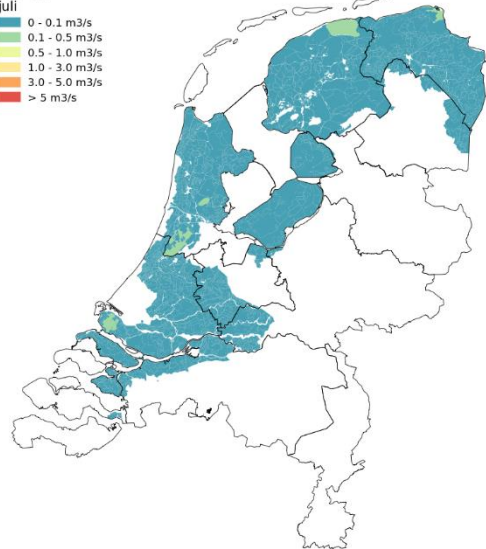
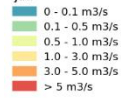
B Gevoeligheidsanalyse inlaatconcentratie

B.1 Huidige situatie

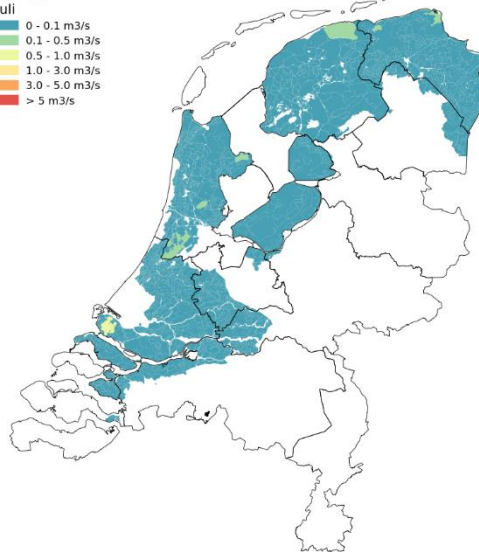
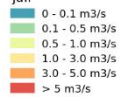
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 50 mg/L
ZSS 0m
juli



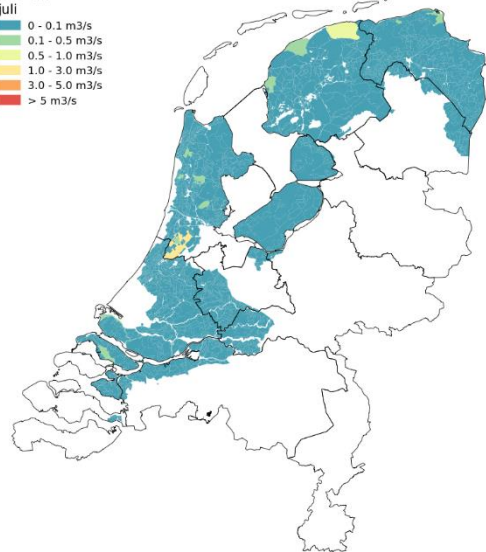
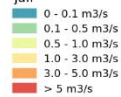
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 150 mg/L
ZSS 0m
juli

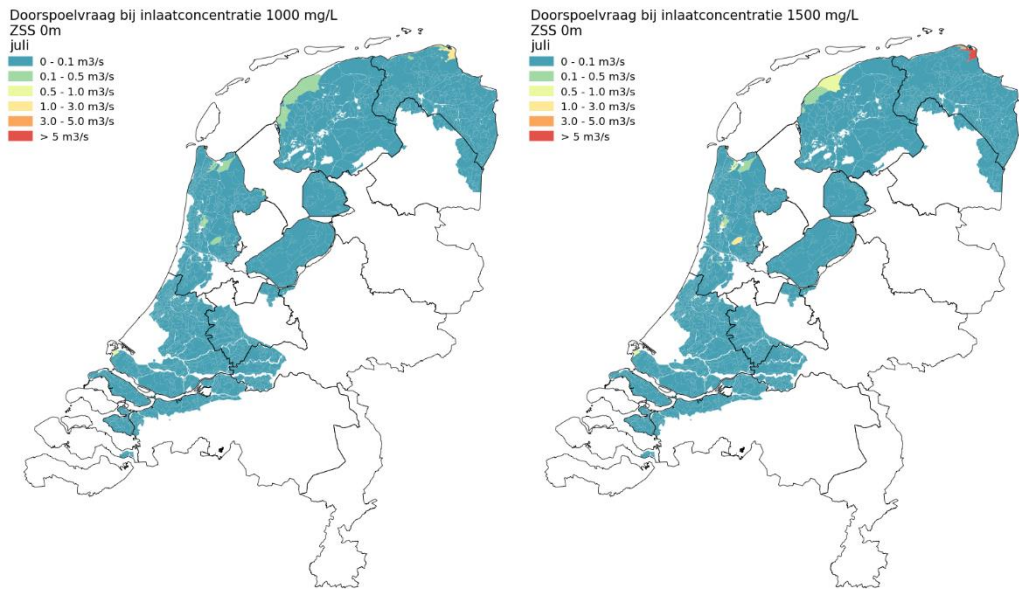


Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 250 mg/L
ZSS 0m
juli

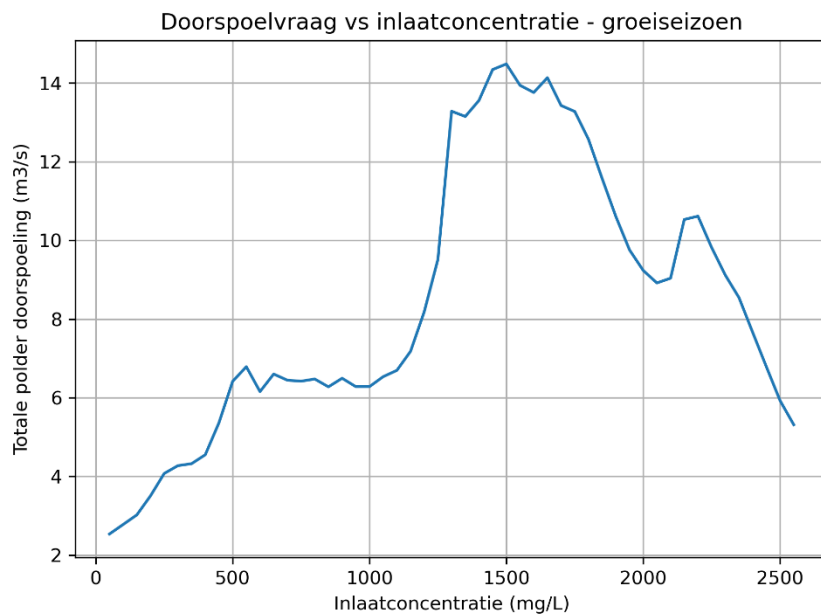


Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 500 mg/L
ZSS 0m
juli





Figuur B-1 Doorspoelvraag per LSW bij inlaatconcentratie 50 mg/L, 150 mg/L, 250 mg/L, 500 mg/L, 1000 mg/L en 1500 mg/L voor de huidige situatie.

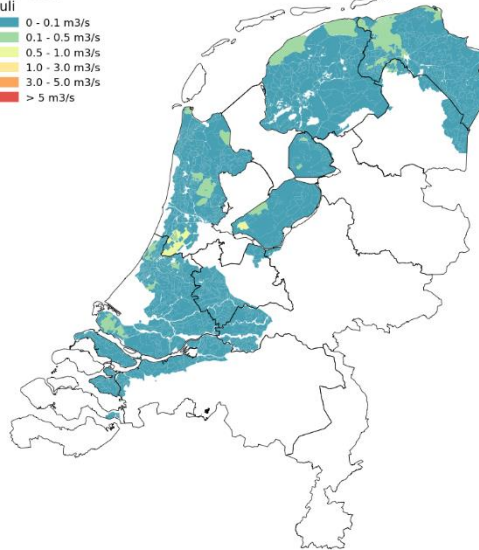


Figuur B-2 Verandering totale polder-doorspoelvraag bij toenemende inlaatconcentratie voor de huidige situatie².

B.2 0.5 m zeespiegelstijging

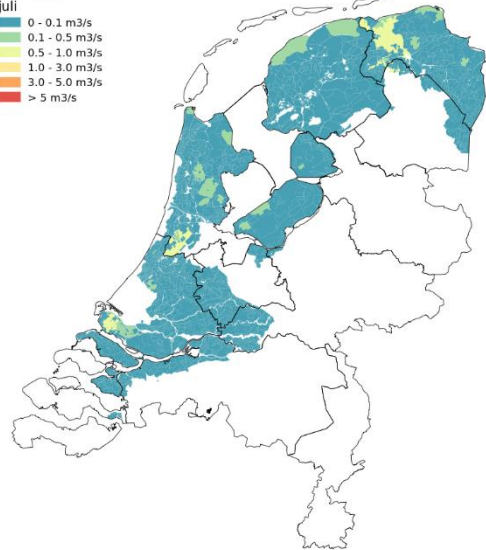
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 50 mg/L
ZSS 0.5m
juli

0 - 0.1 m³/s
0.1 - 0.5 m³/s
0.5 - 1.0 m³/s
1.0 - 3.0 m³/s
3.0 - 5.0 m³/s
> 5 m³/s



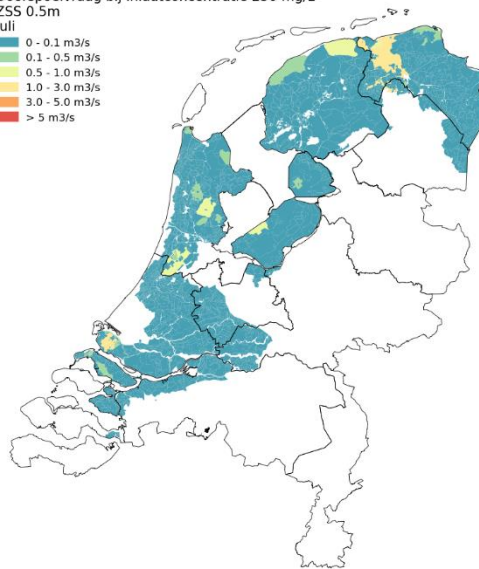
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 150 mg/L
ZSS 0.5m
juli

0 - 0.1 m³/s
0.1 - 0.5 m³/s
0.5 - 1.0 m³/s
1.0 - 3.0 m³/s
3.0 - 5.0 m³/s
> 5 m³/s



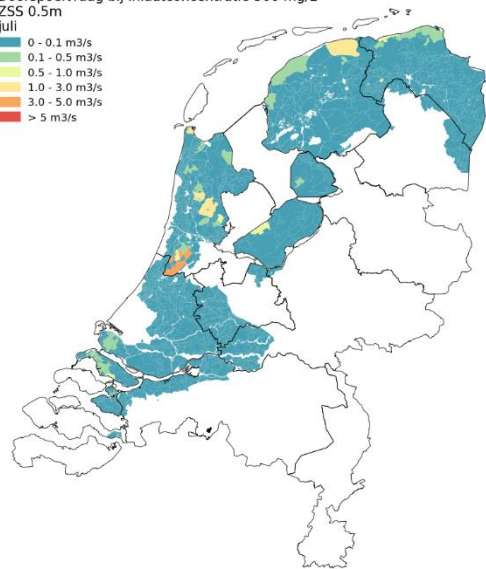
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 250 mg/L
ZSS 0.5m
juli

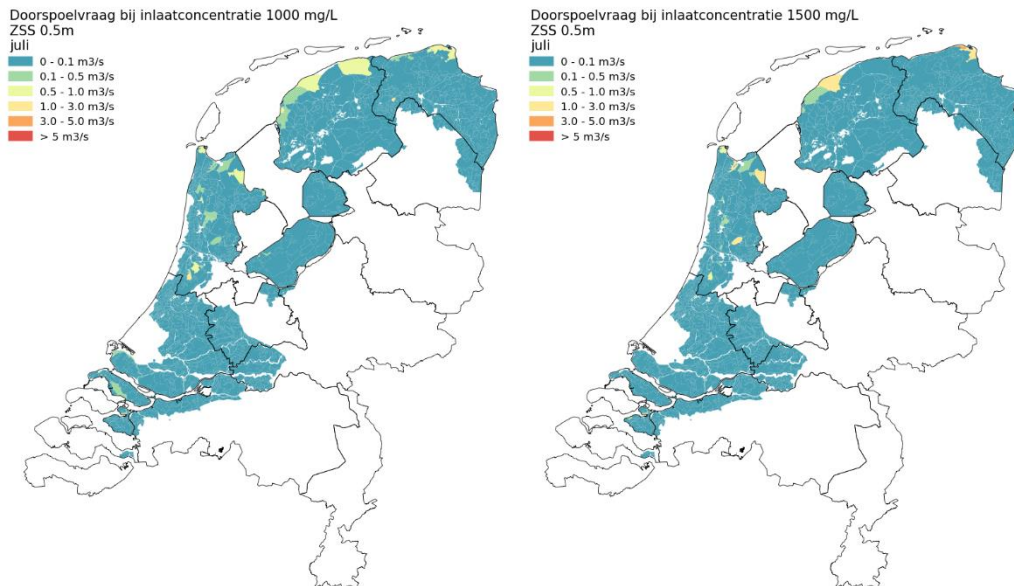
0 - 0.1 m³/s
0.1 - 0.5 m³/s
0.5 - 1.0 m³/s
1.0 - 3.0 m³/s
3.0 - 5.0 m³/s
> 5 m³/s



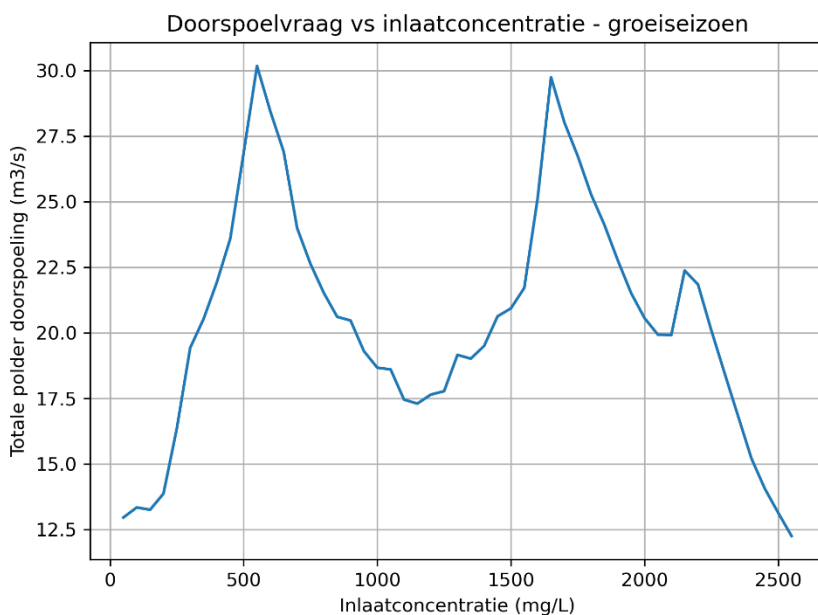
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 500 mg/L
ZSS 0.5m
juli

0 - 0.1 m³/s
0.1 - 0.5 m³/s
0.5 - 1.0 m³/s
1.0 - 3.0 m³/s
3.0 - 5.0 m³/s
> 5 m³/s





Figuur B-3 Doorspoelvraag per LSW bij inlaatconcentratie 50 mg/L, 150 mg/L, 250 mg/L, 500 mg/L, 1000 mg/L en 1500 mg/L voor zichthorizon 0.5 m zeespiegelstijging.

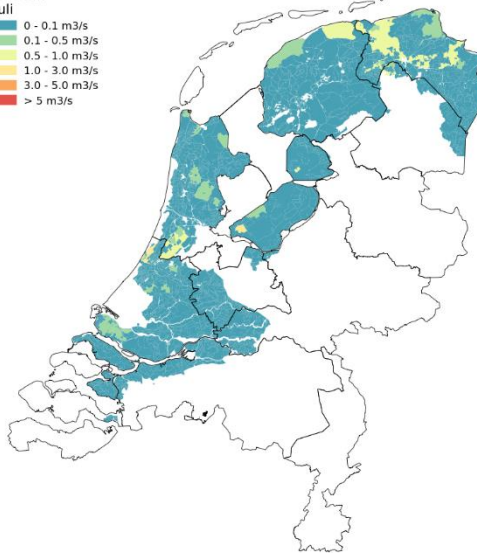


Figuur B-4 Verandering totale polder-doorspoelvraag bij toenemende inlaatconcentratie voor zichthorizon 0.5 m zeespiegelstijging.

B.3 1 m zeespiegelstijging

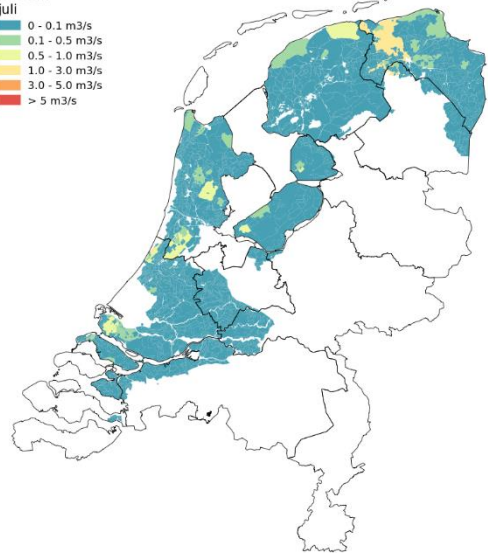
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 50 mg/L
ZSS 1m
juli

0 - 0.1 m³/s
0.1 - 0.5 m³/s
0.5 - 1.0 m³/s
1.0 - 3.0 m³/s
3.0 - 5.0 m³/s
> 5 m³/s



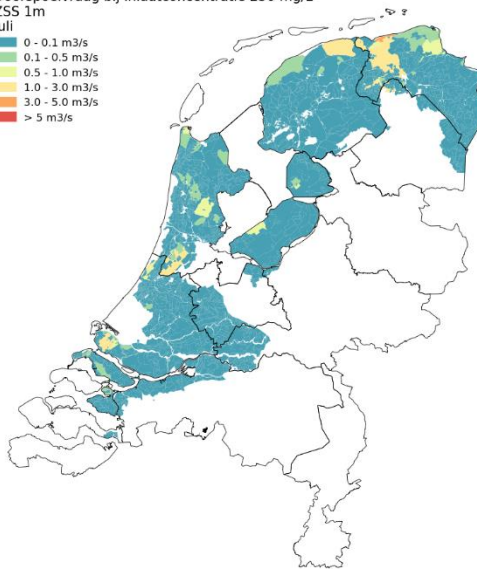
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 150 mg/L
ZSS 1m
juli

0 - 0.1 m³/s
0.1 - 0.5 m³/s
0.5 - 1.0 m³/s
1.0 - 3.0 m³/s
3.0 - 5.0 m³/s
> 5 m³/s



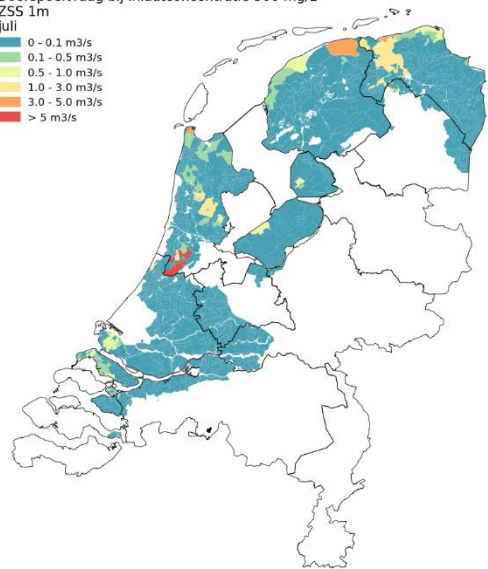
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 250 mg/L
ZSS 1m
juli

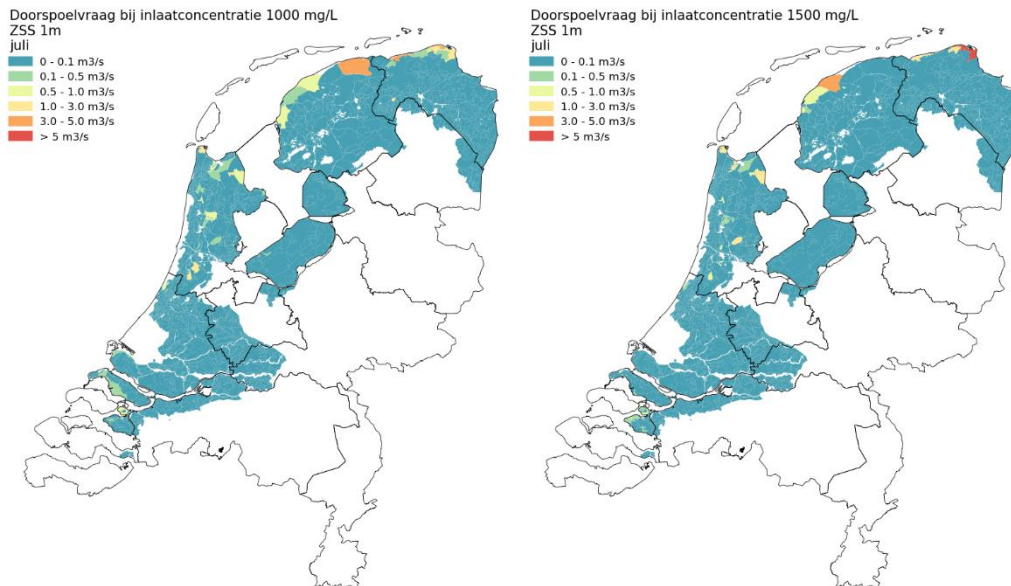
0 - 0.1 m³/s
0.1 - 0.5 m³/s
0.5 - 1.0 m³/s
1.0 - 3.0 m³/s
3.0 - 5.0 m³/s
> 5 m³/s



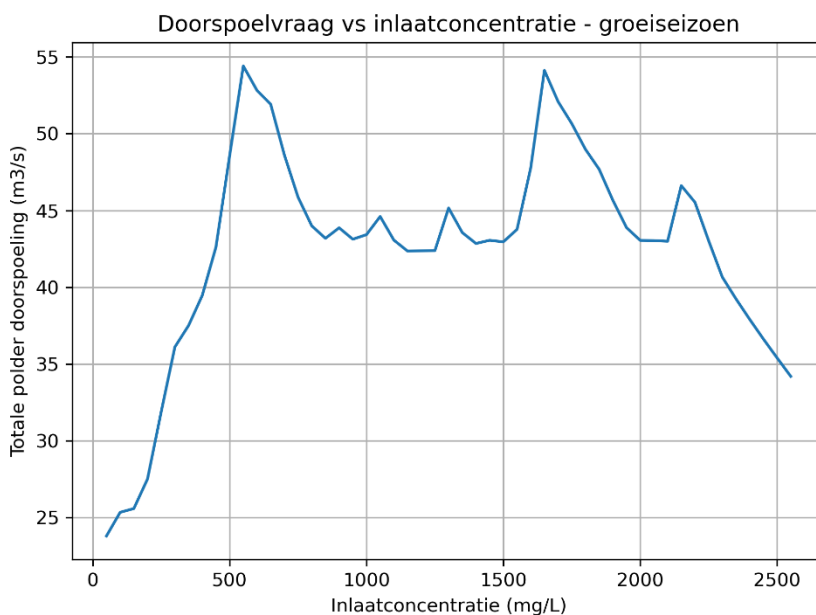
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 500 mg/L
ZSS 1m
juli

0 - 0.1 m³/s
0.1 - 0.5 m³/s
0.5 - 1.0 m³/s
1.0 - 3.0 m³/s
3.0 - 5.0 m³/s
> 5 m³/s





Figuur B-5 Doorspoelvraag per LSW bij inlaatconcentratie 50 mg/L, 150 mg/L, 250 mg/L, 500 mg/L, 1000 mg/L en 1500 mg/L voor zichthorizon 1 m zeespiegelstijging.

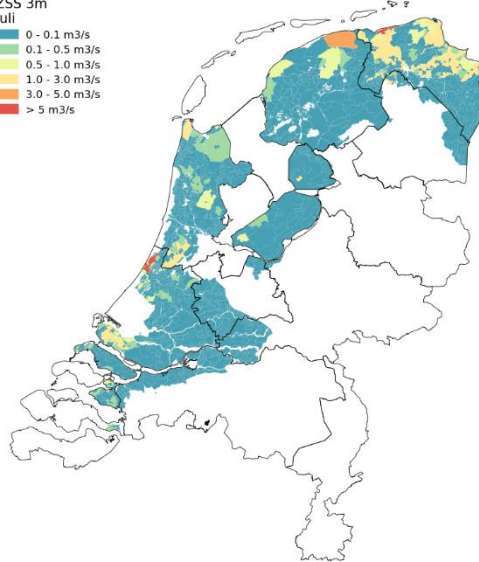


Figuur B-6 Verandering totale polder-doorspoelvraag bij toenemende inlaatconcentratie voor zichthorizon 1 m zeespiegelstijging.

B.4 3 m zeespiegelstijging

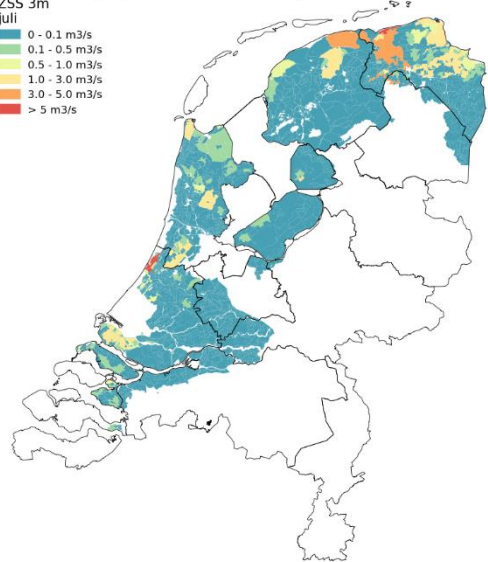
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 50 mg/L
ZSS 3m
juli

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



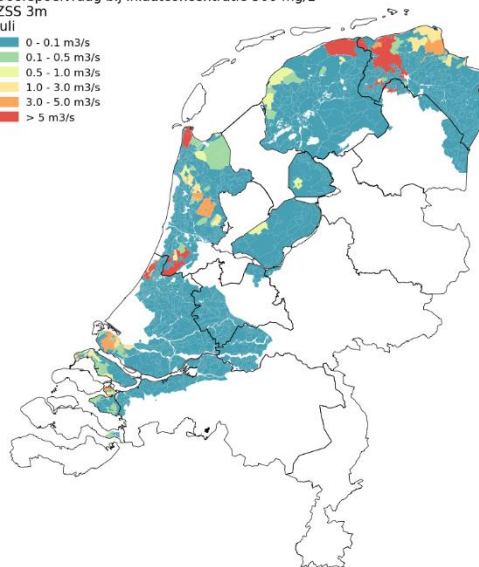
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 150 mg/L
ZSS 3m
juli

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



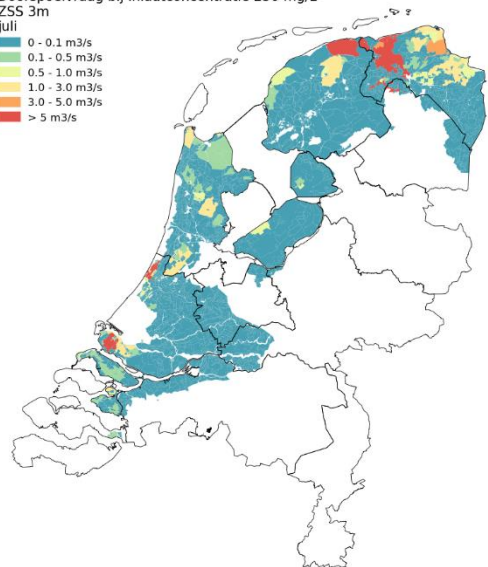
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 500 mg/L
ZSS 3m
juli

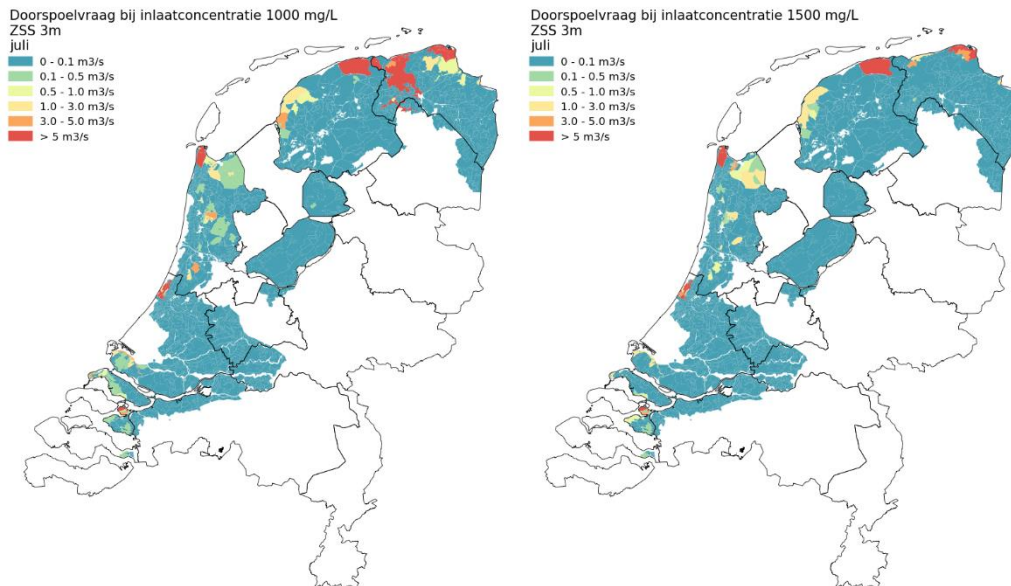
- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s



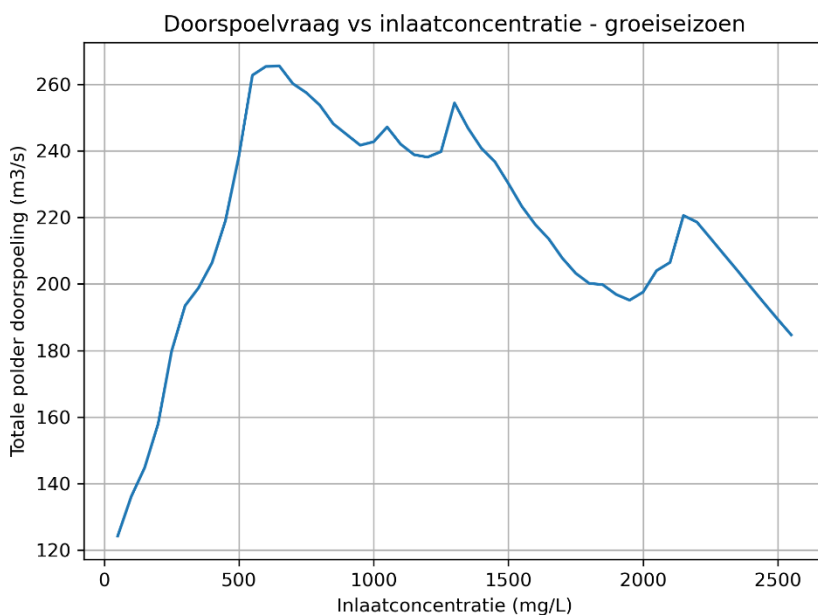
Doorspoelvraag bij inlaatconcentratie 250 mg/L
ZSS 3m
juli

- 0 - 0.1 m³/s
- 0.1 - 0.5 m³/s
- 0.5 - 1.0 m³/s
- 1.0 - 3.0 m³/s
- 3.0 - 5.0 m³/s
- > 5 m³/s





Figuur B-7 Doorspoelvraag per LSW bij inlaatconcentratie 50 mg/L, 150 mg/L, 250 mg/L, 500 mg/L, 1000 mg/L en 1500 mg/L voor zichthorizon 3 m zeespiegelstijging.



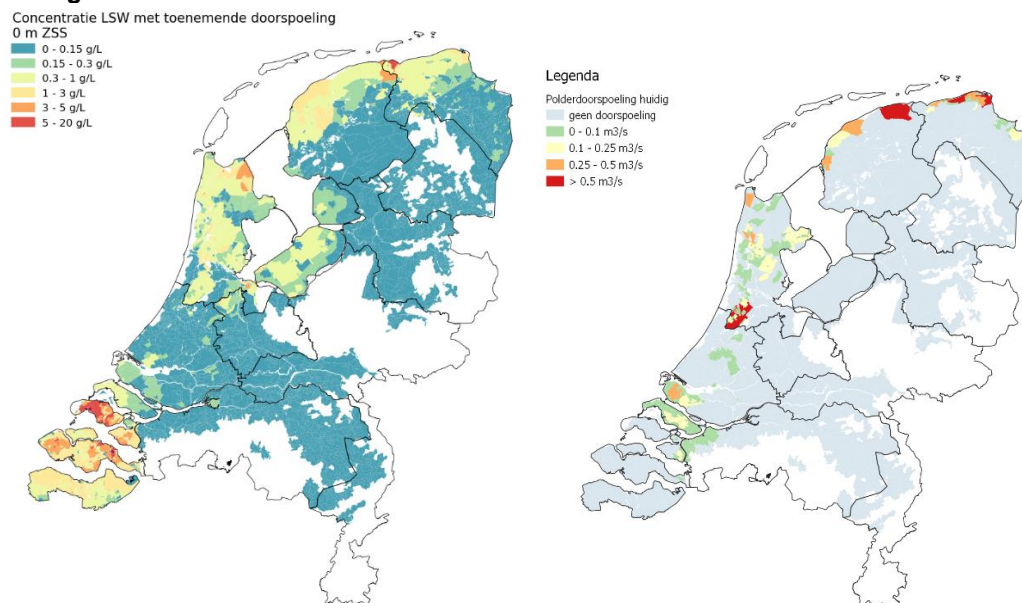
Figuur B-8 Verandering totale polder-doorspoelvraag bij toenemende inlaatconcentratie voor zichthorizon 3 m zeespiegelstijging.

C Analyse gelijk houden doorspoeling

(eerder gepubliceerd als Delsman, 2024)

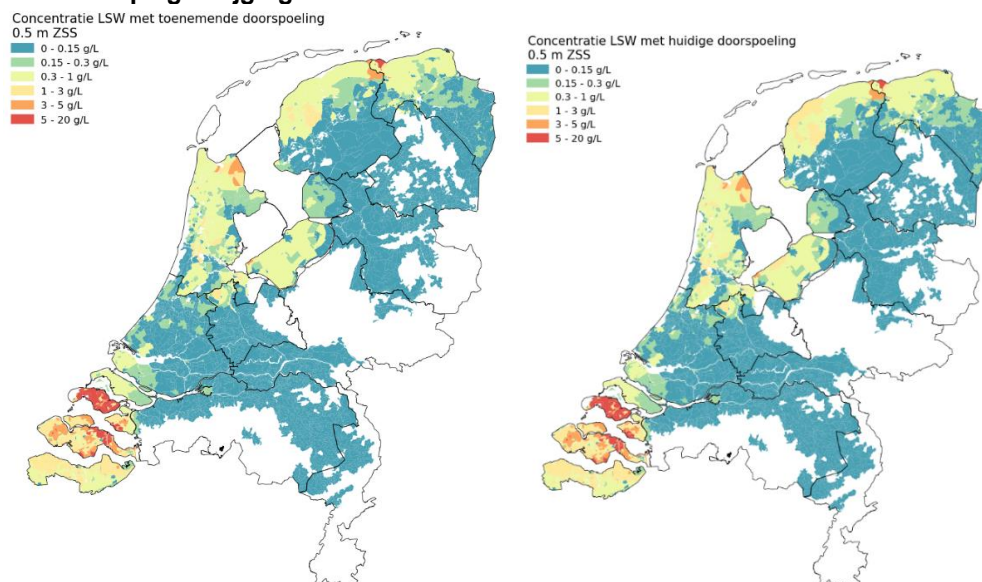
C.1 Chloride concentratie regionaal oppervlaktewater

C.1.1 Huidig

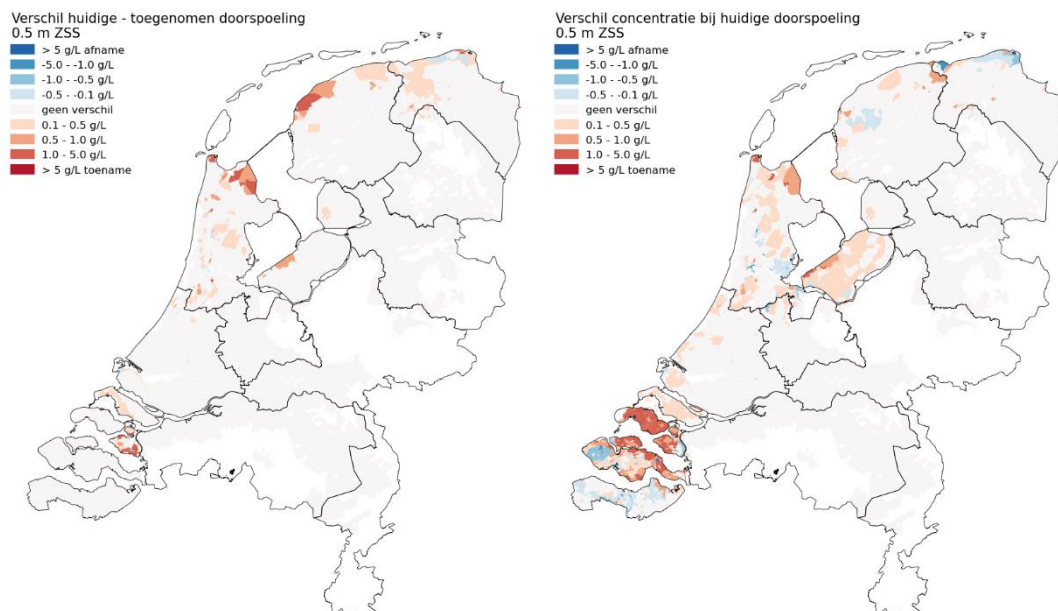


Figuur C-1 Berekende zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW in de huidige situatie (links) en huidige doorspoeldebieten zoals opgenomen in LHM 4.1 (rechts).

C.1.2 0.5 m zeespiegelstijging

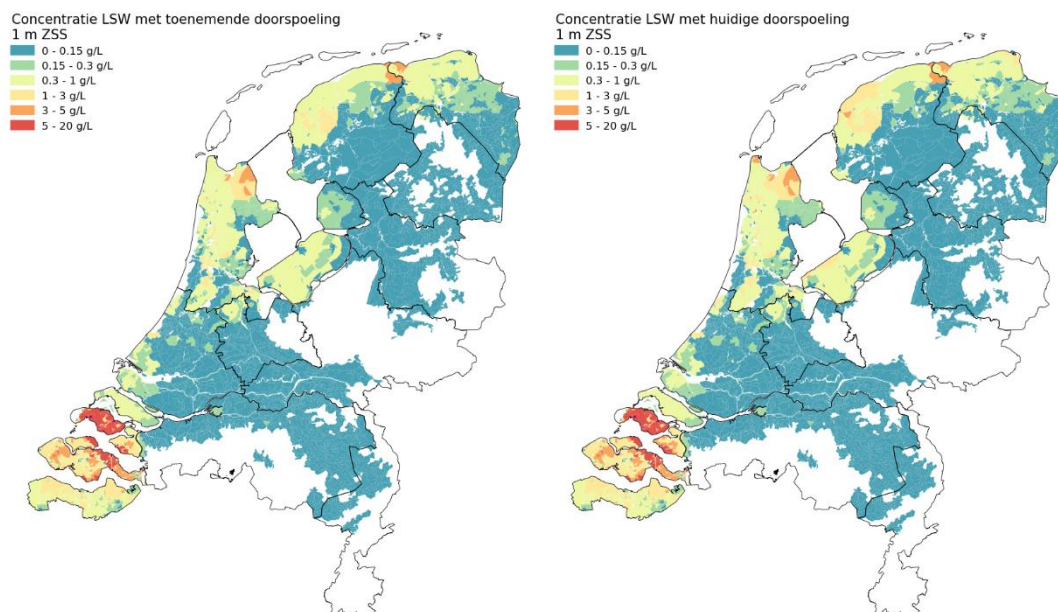


Figuur C-2 Berekende zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW bij 0.5 m zeespiegelstijging, met toenemende doorspoeling (links, Delsman et al., 2020), en bij doorspoeling gelijk aan de huidige situatie (rechts).

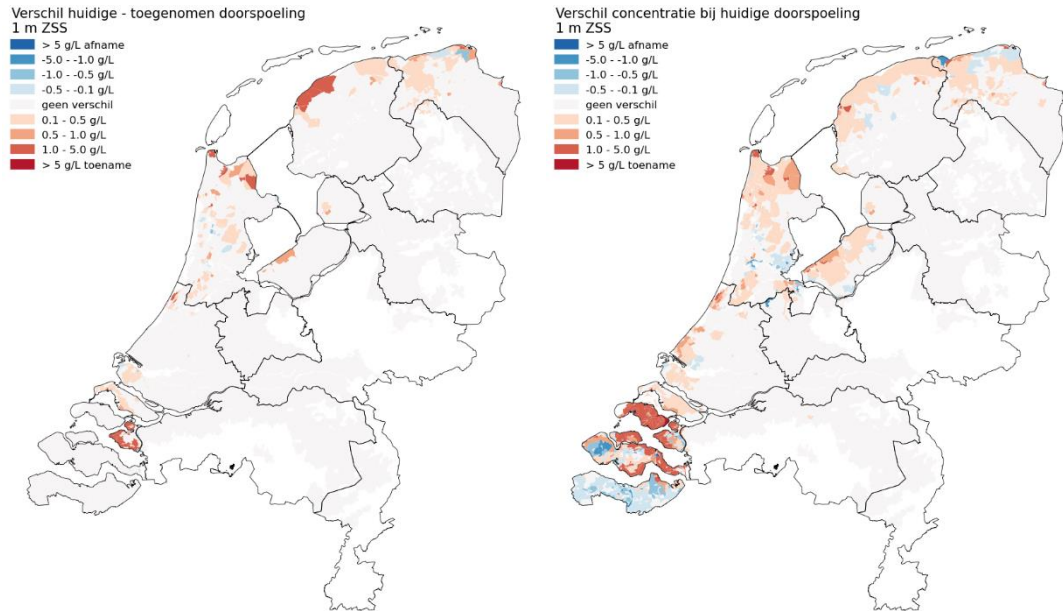


Figuur C-3 Berekend verschil in zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW bij 0.5 m zeespiegelstijging tussen toenemende en huidige doorspoeling (links), en tussen de situatie bij 0.5 m zeespiegelstijging en de huidige situatie, beide bij huidige doorspoeling (rechts).

C.1.3 1 m zeespiegelstijging

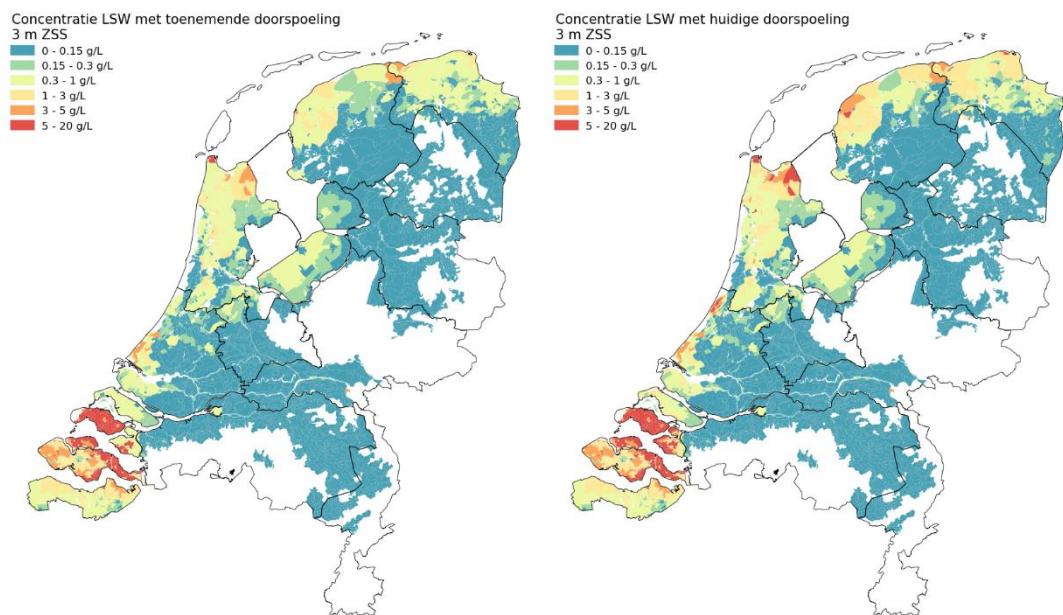


Figuur C-4 Berekende zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW bij 1 m zeespiegelstijging, met toenemende doorspoeling (links, Delsman et al., 2020), en bij doorspoeling gelijk aan de huidige situatie (rechts).

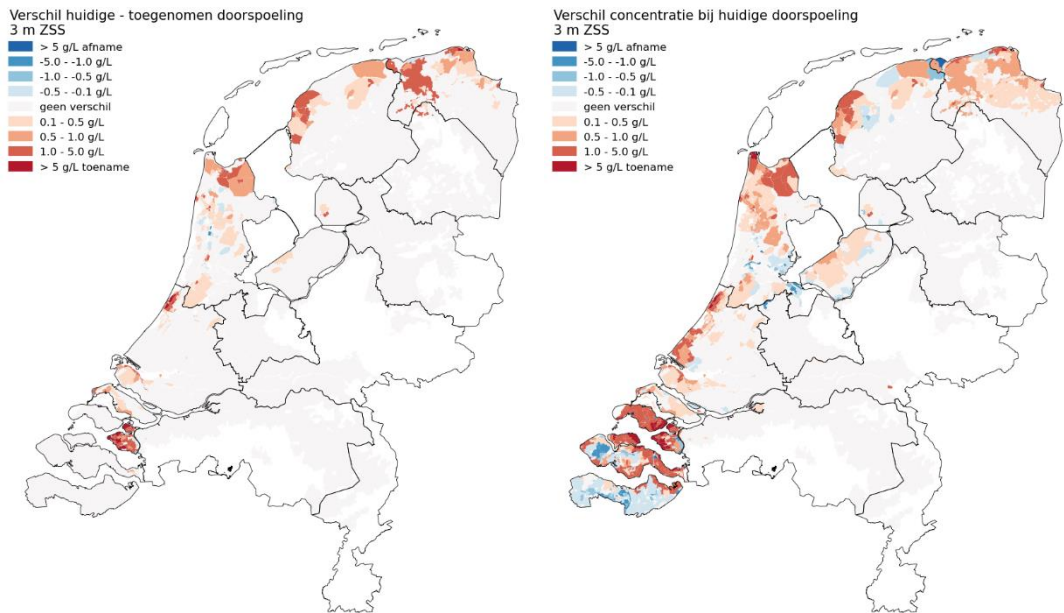


Figuur C-5 Berekend verschil in zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW bij 1 m zeespiegelstijging tussen toenemende en huidige doorspoeling (links), en tussen de situatie bij 1 m zeespiegelstijging en de huidige situatie, beide bij huidige doorspoeling (rechts).

C.1.4 3 m zeespiegelstijging

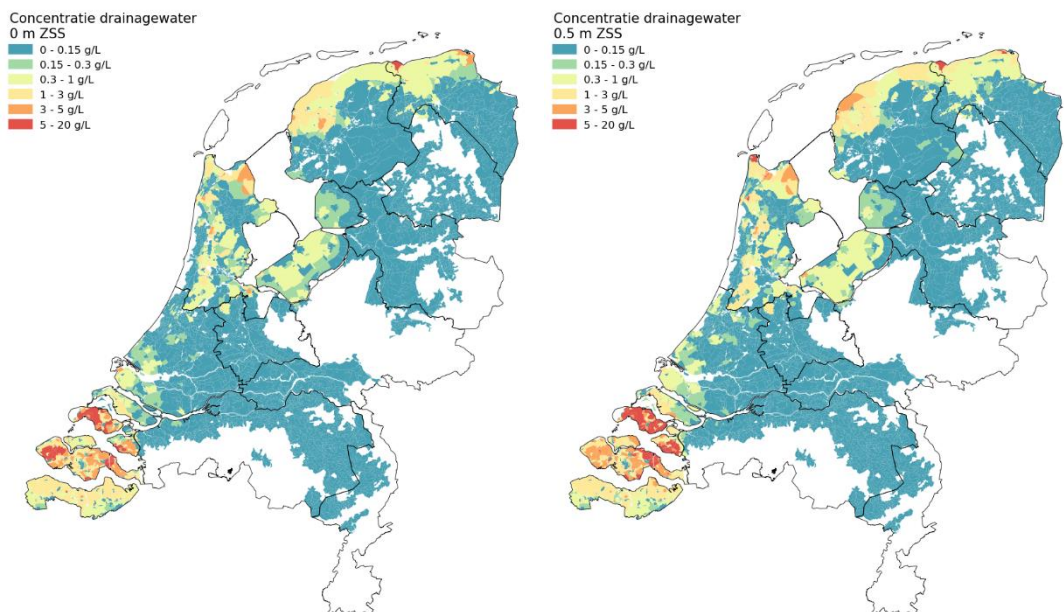


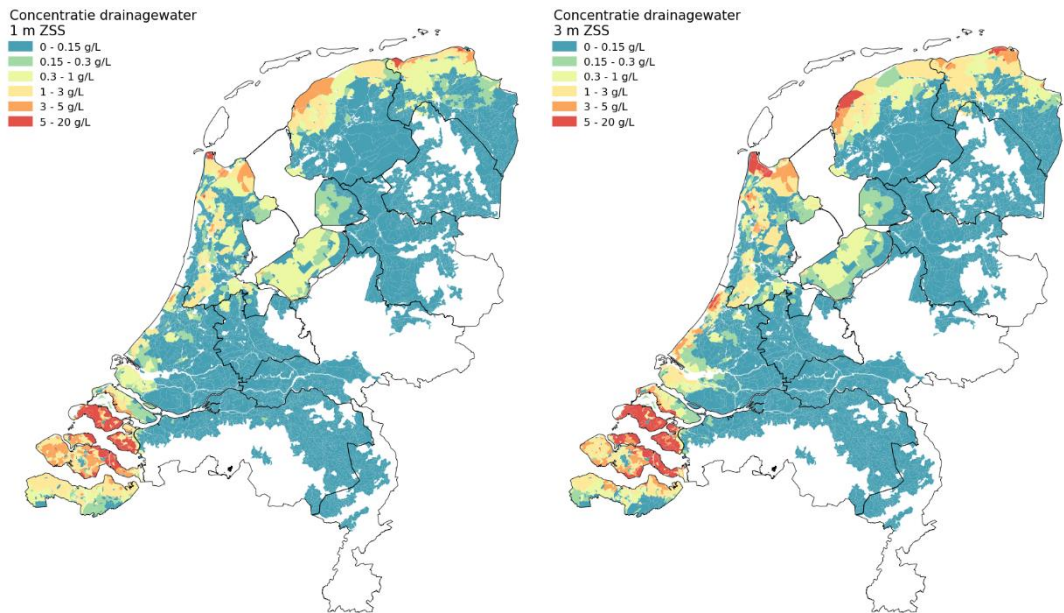
Figuur C-6 Berekende zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW bij 3 m zeespiegelstijging, met toenemende doorspoeling (links, Delsman et al., 2020), en bij doorspoeling gelijk aan de huidige situatie (rechts).



Figuur C-7 Berekend verschil in zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW bij 3 m zeespiegelstijging tussen toenemende en huidige doorspoeling (links), en tussen de situatie bij 3 m zeespiegelstijging en de huidige situatie, beide bij huidige doorspoeling (rechts).

C.2 Chloride concentratie uitstromend grondwater

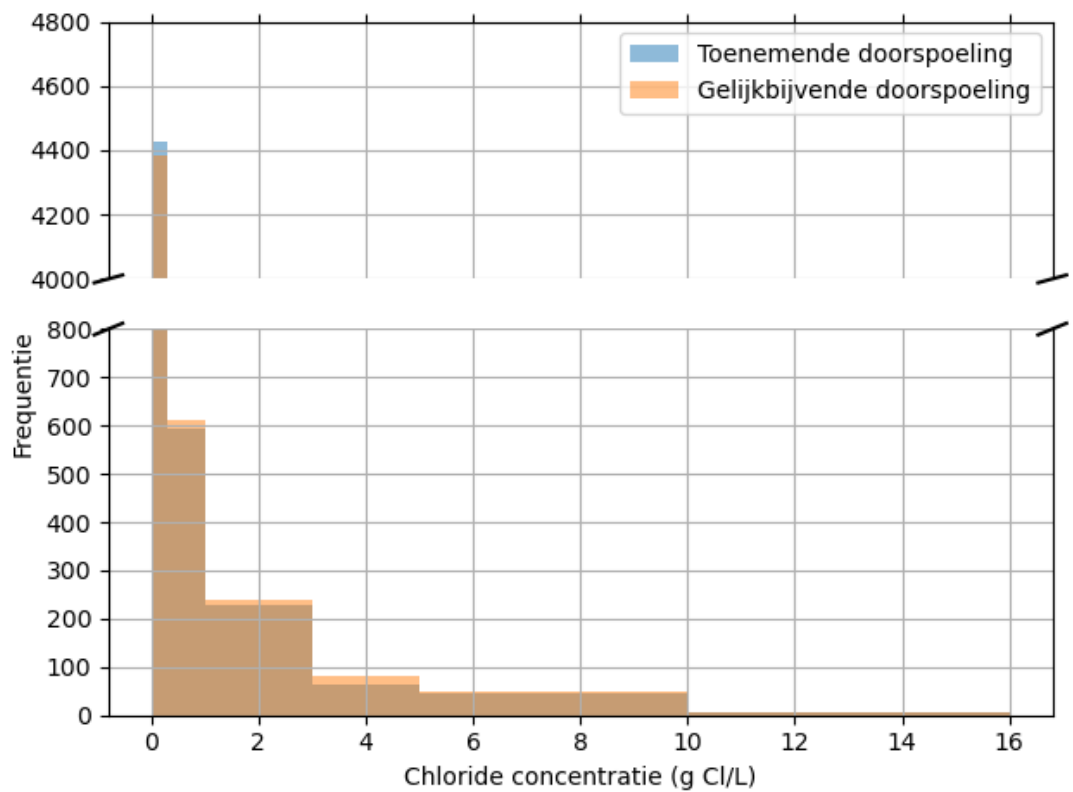
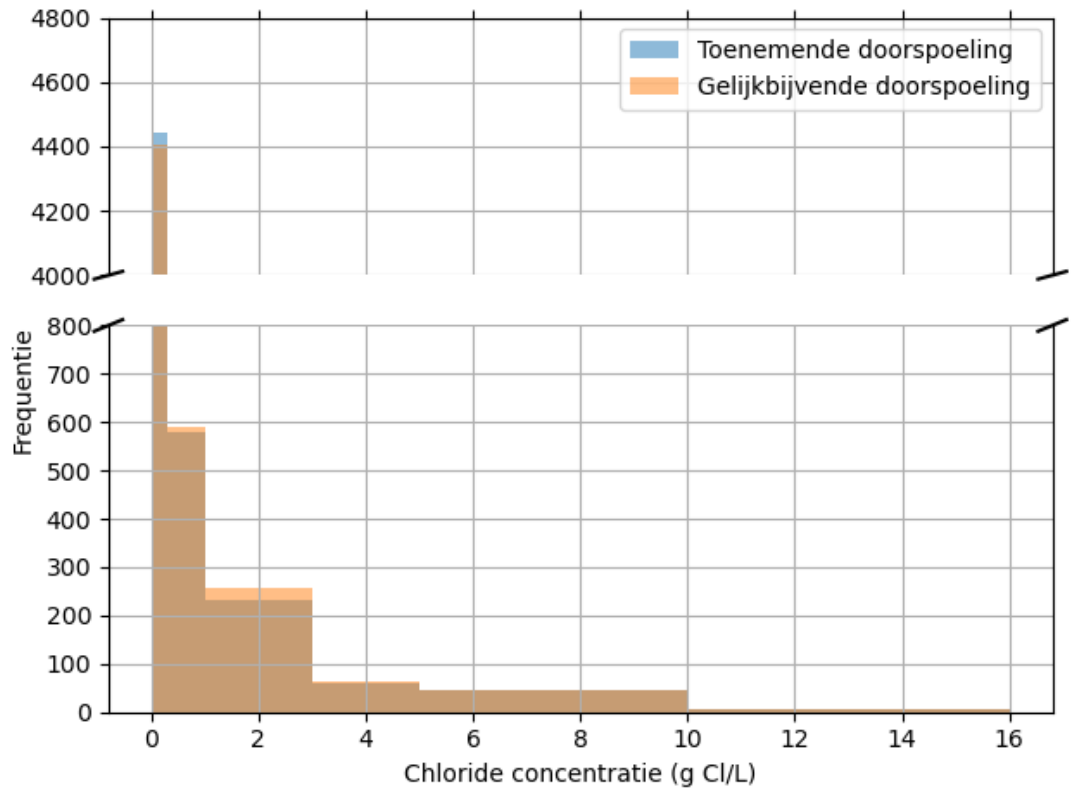


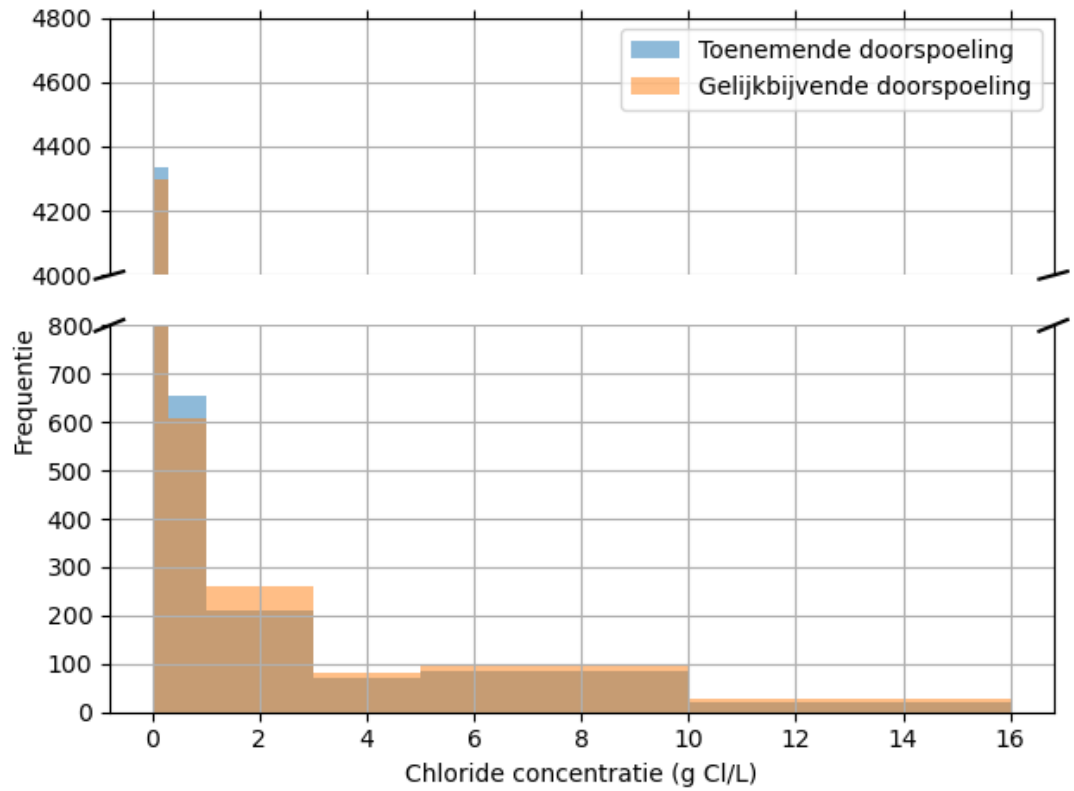


Figuur C-8 Berekende zomergemiddelde chlorideconcentratie van het naar het oppervlaktewater uittredende grondwater (mix van brakke kwel en ondiepe afvoer van het neerslagoverschot).

C.3 Histogrammen zomergemiddelde chlorideconcentraties

Onderstaande histogrammen geven weer hoeveel LSWs een zomergemiddelde chlorideconcentratie hebben van een bepaalde klasse (< 0.3, 0.3 – 1, 1 – 3, 3, - 5, 5 – 10, > 10). Het blauwe histogram is de verdeling van optredende concentraties bij toenemende doorspoeling, het oranje histogram de verdeling van optredende concentraties bij huidige doorspoeling. Het totaal aantal LSWs is daarbij voor beide verdelingen gelijk. De histogrammen laten zien dat de verdeling van concentraties bij huidige doorspoeling hogere concentraties kent dan bij toegenomen doorspoeling.





Figuur C-9 Histogrammen zomergemiddelde chlorideconcentratie per LSW voor de situatie bij toenemende doorspoeling en gelijkblijvende doorspoeling, voor 0.5 m (boven), 1 m (midden) en 3 m zeespiegelstijging (onder). Let op dat de y-as voor betere zichtbaarheid discontinu is.

