

Maatschappelijke effecten van droogte in een veranderd klimaat en afgeleide kengetallen voor maatschappelijke kosten-baten analyses



Maatschappelijke effecten van droogte in een veranderd klimaat en afgeleide kengetallen voor maatschappelijke kosten-baten analyses

Auteur(s)

Janneke Pouwels
Marnix van der Vat
Teun van Woerkom
Ilya America - van den Heuvel
Roel Melman
Bas Knaake
Jesse Reusen
Charlotte van Strien
Nicoletta Nappo
Mandy Korff
Remi van der Wijk
Anna van den Hoek

Maatschappelijke effecten van droogte in een veranderd klimaat en afgeleide kengetallen voor maatschappelijke kosten-baten analyses

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat WVL
Contactpersoon	Erwin Slingerland
Referenties	
Trefwoorden	Watertekorten, Droogte, Deltaprogramma Zoetwater, Schade, Maatschappelijke effect

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	20 mei 2025
Projectnummer	11211541-003
Document ID	11211541-003-ZWS-0001
Pagina's	127
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)		
	Janneke Pouwels Marnix van der Vat Teun van Woerkom Ilja America-van den Heuvel Roel Melman Bas Knaake Jesse Reusen Charlotte van Strien Nicoletta Nappo Mandy Korff Remi van der Wijk Anna van den Hoek	

Samenvatting

Voldoende zoetwater is cruciaal voor ons land. Veel economische sectoren zijn afhankelijk van zoetwater, zoals landbouw, scheepvaart en industrie. En zoetwater is ook cruciaal voor natuur en de stabiliteit van kades. Het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) werkt aan een klimaat-robuust watersysteem in Nederland en het reduceren van droogteproblemen.

Op dit moment wordt binnen het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) gewerkt aan de onderbouwing van de tweede herijking van de Deltabeslissing Zoetwater. In 2024 zijn de hydrologische zoetwaterknelpunten onderzocht in de Knelpuntenanalyse Zoetwater. Het effect van deze knelpunten op de zoetwatergebruiksfuncties is vervolgens onderzocht in een effectanalyse. Helaas bleken de hydrologische modelberekeningen die ten grondslag liggen aan deze twee studies (de Basisprognoses 2024) niet voldoende betrouwbaar. Daarom zijn ook de resultaten van beide studies (knelpuntenanalyse en effectanalyse) niet direct bruikbaar.

Om toch een beeld te krijgen van de economische doorwerking van de toekomstige zoetwateropgave zijn in dit rapport de effecten in beeld gebracht voor de thema's landbouw, CO₂ uitstoot door veenoxidatie en funderingsschade. Voor deze onderdelen zijn effectmodules toegepast op de vorige Basisprognoses (BP18) om het maatschappelijk effect te kwantificeren. De effecten zijn uitgedrukt in de gemiddelde welvaartsverandering en de welvaartsverandering in een T20 droogtesituatie, voor Stoom2050 en indien mogelijk ook voor Stoom2100. Waar mogelijk is de welvaartsverandering uitgesplitst in de welvaartsverandering veroorzaakt door droogte en de welvaartsverandering door andere oorzaken, zoals prijsstijgingen en temperatuuroptoeiname.

De resultaten zijn samengevat in onderstaande tabel. De totale welvaartsverandering van het Deltascenario Stoom2050 ten opzichte van de Referentie wordt geraamd op 1,7 miljard €/jaar, waarvan het grootste deel veroorzaakt wordt door sociaaleconomische factoren. Het effect van meer frequente en ernstigere droogte wordt geraamd op ongeveer 0,25 miljard €/jaar. Opvallend is dat voor landbouw de toegenomen droogteschade gedeeltelijk gecompenseerd lijkt te worden door een stijging van de opbrengst als gevolg van een hogere temperatuur en CO₂ concentratie. Voor veenoxidatie zorgt de stijging van de temperatuur juist voor een negatieve welvaartsverandering, die veel groter is dan de verandering door toenemende droogte.

Tabel-S 1 Samenvatting van de welvaartsverandering gemiddeld en in een T20 droog jaar (beiden in miljoenen euro's per jaar) voor de verschillende sectoren. De effecten voor scheepvaart komen uit Schasfoort et al., 2024. Een aantal onderdelen zijn leeggelaten, deze waren niet mogelijk om te bepalen met de huidige effectmodulen. De uitsplitsingen zijn globaal uitgevoerd.

Sector	Onderdeel	Gemiddelde welvaartsverandering [M euro/jaar]		Welvaartsverandering T20 jaar [M euro/jaar]	
		Stoom 2050	Stoom 2100	Stoom 2050	Stoom 2100
Landbouw	Droogte en beregening	-126	-315	-315	-779
	Klimaat (temperatuur en CO ₂)	+66	+282		
	Landgebruik	-490	-490		

Sector	Onderdeel	Gemiddelde welvaartsverandering [M euro/jaar]		Welvaartsverandering T20 jaar [M euro/jaar]	
	Totaal	-549	-523		
CO2 door veenoxidatie	Droogte	-18			
	Klimaat (temperatuur)	-115			
	Prijsstijging	-780			
	Totaal	-910		-1030	
Scheepvaart	Droogte	-102	-309	-326	-765
Totaal	Droogte	-246			
	Totaal	-1705			

Daarnaast presenteert dit rapport maatschappelijke kengetallen voor de thema's landbouw, CO2 uitstoot door veenoxidatie, funderingsschade en scheepvaart. Deze kengetallen kunnen gebruikt worden om het maatschappelijk effect in te schatten dat bereikt kan worden bij een verandering in de waterbeschikbaarheid door zoetwatermaatregelen.

De volgende kengetallen zijn bepaald:

- Het maatschappelijk effect van verandering in beschikbaarheid van beregeningswater voor de landbouw uit oppervlaktewater;
- Het maatschappelijk effect van verandering in grondwaterstand voor de landbouw;
- Het maatschappelijk effect van verandering in grondwaterstand voor de CO2-uitstoot;
- Het maatschappelijk effect van verandering in grondwaterstand voor schade aan funderingen;
- Het maatschappelijk effect voor scheepvaart (zowel vaarkosten als transportkosten) als gevolg van veranderde debieten en waterdiepten in het hoofdwatersysteem.

Inhoud

Samenvatting	4
Inhoud	6
1 Inleiding	10
1.1 Aanleiding en doel	10
1.2 Aanpak en uitgangspunten	11
1.2.1 Maatschappelijke effecten	11
1.2.2 Maatschappelijke kengetallen	12
1.3 Leeswijzer	12
2 Landbouw	13
2.1 Inleiding	13
2.1.1 Uitgangspunten	14
2.2 Maatschappelijke effecten	15
2.2.1 Methode	15
2.2.1.1 Totale welvaartsverandering	16
2.2.1.2 Effect van droogte	16
2.2.1.3 Niet-droogte gerelateerde welvaartsverandering	17
2.2.2 Resultaten	18
2.2.2.1 Welvaartsverandering in de landbouw op nationale schaal	18
2.2.2.2 Welvaartsverandering in de landbouw per zoetwaterregio	19
2.2.2.3 Zoetwateropgave (T20) in de landbouw per zoetwaterregio	21
2.2.3 Discussie en Conclusies	22
2.3 Maatschappelijke kengetallen	23
2.3.1 Gebruikte gegevens per kengetal	23
2.3.1.1 Schadedefinitie	23
2.3.1.2 Schade door tekort berekening oppervlaktewater	24
2.3.1.3 Schade door te lage grondwaterstand	24
2.3.1.4 Schade door tekort berekening grondwater	25
2.3.2 Methode en voorbeeldberekening	25
2.3.3 Resultaten	27
2.3.3.1 Overzicht belangrijkste resultaten	27
3 Bodemdaling en CO₂-uitstoot	31
3.1 Inleiding	31
3.2 Maatschappelijke effecten	32
3.2.1 Uitgangspunten	32
3.2.2 Methode	33
3.2.2.1 Bodemdaling	33
3.2.2.2 CO ₂ -uitstoot	33
3.2.2.3 Toepassing scenario's	34
3.2.2.4 Temperatuurafhankelijke-oxidatiesnelheid	34

3.2.2.5	Gemiddeld Laagste Grondwaterstand	34
3.2.2.6	Beprijzing CO ₂ -uitstoot	35
3.2.3	Resultaten droogterisico	35
3.2.3.1	Bodemdaling	36
3.2.3.2	CO ₂ uitstoot	38
3.2.4	Resultaten Zoetwateropgave (T=20 jaar)	41
3.2.4.1	Bodemdaling	41
3.2.4.2	CO ₂ -uitstoot	42
3.2.5	Conclusies	44
3.3	Maatschappelijke kengetallen	45
3.3.1	Uitgangspunten	45
3.3.2	Methode	47
3.3.3	Resultaten	48
3.3.3.1	Relatie tussen de grondwaterstand en de CO ₂ uitstoot in het huidige klimaat	48
3.3.3.2	Relatie tussen de grondwaterstand en de CO ₂ -uitstoot in een toekomstig klimaat	49
3.3.4	Rekenvoorbeeld	50
3.3.5	Conclusie	50
3.3.6	Vertaling kengetal naar oppervlaktewater	51
4	Funderingrisico	54
4.1	Inleiding	54
4.1.1	Het funderingschade-risicomodel	54
4.1.2	Aannames in de Funderingsrisico effectmodule	55
4.1.3	Uitgangspunten	55
4.2	Resultaten funderingsrisico	57
4.2.1	Kosten per zoetwater regio (Deelregio)	57
4.2.2	Kosten per zoetwater regio (Hoofdregio)	58
4.2.3	Kosten per stedelijk/landelijk gebied in de zoetwater regio (deelregio)	59
4.2.4	Kosten per stedelijk/landelijk gebied in de zoetwater regio (hoofdregio)	61
4.3	Conclusies funderingrisico	63
4.4	Maatschappelijke kengetallen	63
4.4.1	Methode	64
4.4.2	Resultaten	65
4.4.2.1	Resultaten per regio	65
4.4.2.2	Resultaten landelijk en stedelijk bebouwd gebied	66
4.4.3	Aandachtspunten bij gebruik van de kengetallen	68
5	Scheepvaart	69
5.1	Inleiding	69
5.2	Maatschappelijke kengetallen	70
5.2.1	Rijntakken	71
5.2.1.1	Waal	73
5.2.1.2	IJssel	76
5.2.1.3	Rekenvoorbeeld	79
5.2.2	Maas	80
5.2.2.1	Sluis Born	80
5.2.2.2	Sluis Maasbracht	81
5.2.2.3	Sluis Heel	81
5.2.2.4	Rekenvoorbeeld	81
5.2.3	Betuwepand	82

5.2.3.1	Bernhardsluizen	82
5.2.3.2	Irenesluizen	83
5.2.3.3	Waal benedenstrooms	84
5.2.3.4	Rekenvoorbeeld	85
6	Conclusie en aanbevelingen	86
7	Literatuur	89
A	Kengetallen CO2 emissie	92
A.1	Validatie relatie grondwaterstand – CO2 emissie met metingen	92
A.2	Vergelijking resultaten Atlantis en SOMERS	93
B	Foundation damage model	95
B.1	Introduction to the model	95
B.2	Model structure and updates in 2024	95
B.2.1	Risk equation	99
B.2.2	Cost equation	99
B.3	Resultaten Funderingrisico-effectenmodule: risico op schade	101
B.3.1	Risico per zoetwater regio (Deelregio)	101
B.3.2	Risico per zoetwater regio (Deelregio)	103
B.3.3	Risico per stedelijk/landelijk gebied in de zoetwater regio's (Deelregio en Hoofdregio)	104
C	Additional figures foundation damage	106
C.1	Buildings' distribution per freshwater region (deelregio)	106
C.2	Distribution of risk per freshwater region (Deelregio) in Referentie 2017	107
C.3	Distribution of risk per freshwater region (Deelregio) in Stoom 2050	108
C.4	Buildings' distribution per freshwater region (hoofdregio)	109
C.5	Distribution of risk per freshwater region (hoofdregio) in Referentie 2017	110
C.6	Distribution of risk per freshwater region (hoofdregio) in Stoom 2050	111
C.7	Distribution of reparation costs per freshwater region (deelregio) in Referentie 2017 and Stoom 2050	113
C.8	Distribution of reparation costs per freshwater region (hoofdregio) in Referentie 2017 and Stoom 2050	114
D	Resultaten BP24 Scheepvaart	115
D.1	Scheepvaarteffect	115
D.2	Inleiding	115
D.2.1	Methode	116
D.2.2	Discussie Methode	119
D.3	Resultaten Deltascenario's	120
D.3.1	Droogterisico	120
D.3.2	Zoetwateropgave T=20	122
D.4	Conclusie scheepvaarteffect	123

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Voldoende zoetwater is cruciaal voor ons land. Veel economische sectoren zijn afhankelijk van zoetwater, zoals landbouw, scheepvaart en industrie. Sommige effecten van droogte zijn direct zichtbaar, terwijl andere effecten niet direct worden gevoeld, maar zich opbouwen over de jaren heen. Een voorbeeld hiervan zijn houten paalfunderingen waarbij het draagvermogen na een aantal jaren droogstand wordt aangetast, waardoor huizen kunnen verzakken.

Het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) werkt aan een klimaatrobuust watersysteem in Nederland en het reduceren van droogteproblemen. Dat gebeurt in cycli van zes jaar, waarbij in elke cyclus wordt toegewerkt naar een regeringsbesluit hoe het watersysteem wordt aangepast, de zogenaamde *Herijking Deltabeslissing Zoetwater*. Vervolgens volgt een uitvoeringsfase waarin de maatregelen worden uitgevoerd.

Op dit moment wordt gewerkt aan de onderbouwing van de tweede herijking van de Deltabeslissing Zoetwater. Daarbij worden allereerst de toekomstige zoetwaterknelpunten onderzocht aan de hand van de nieuwste klimaat- en socio-economische prognoses. Vervolgens wordt gekeken welke zoetwatermaatregelen deze knelpunten kunnen reduceren. En ten slotte vindt een economische analyse plaats om de financiering van deze maatregelen te onderbouwen.

In 2024 zijn de hydrologische zoetwaterknelpunten onderzocht in de Knelpuntenanalyse Zoetwater. Het effect van deze knelpunten op de zoetwatergebruiksfuncties is onderzocht in de Effectbepaling. Helaas bleken de hydrologische modelberekeningen die aan de grondslag liggen van deze twee studies (de Basisprognoses 2024) niet voldoende betrouwbaar. Voor meer informatie hierover verwijzen we naar de website van IPLO (IPLO, 2024). Daarom zijn ook de resultaten van beide studies niet direct bruikbaar. Een uitzondering hierop zijn de effecten van de zoetwaterknelpunten op scheepvaart, omdat hierbij de afvoerscenario's als basis zijn gebruikt, en niet de Basisprognoses 2024.

Om toch een beeld te krijgen van de toekomstige zoetwateropgave wordt die uitgewerkt voor de hydrologische opgave en de opgave voor de verschillende zoetwaterfuncties. In dit rapport wordt de opgave in beeld gebracht voor de onderdelen landbouw, CO₂ uitstoot door veenoxidatie en funderingsschade. De hydrologische opgave wordt beschreven in het rapport *Kwalitatieve duiding van het effect van de Deltascenario's 2024 op de zoetwateropgave* (Mens et al., in voorbereiding).

Daarnaast levert dit rapport maatschappelijke kengetallen voor de onderdelen landbouw, CO₂ uitstoot door veenoxidatie, funderingsschade en scheepvaart. Deze kengetallen tonen het maatschappelijk effect dat bereikt kan worden bij een toename in de waterbeschikbaarheid door maatregelen. Deze kengetallen worden in vervolgtrajecten gebruikt om de maatschappelijke baten van zoetwatermaatregelen in te schatten.

1.2 Aanpak en uitgangspunten

Dit rapport geeft een beeld van de maatschappelijke effecten van veranderende waterbeschikbaarheid voor vier sectoren/functies: landbouw, scheepvaart, CO₂ uitstoot door veenoxidatie en funderingsschade. Voor deze vier sectoren zijn effectmodules toegepast om het maatschappelijk effect mee te kwantificeren. De effectmodules berekenen de schade en/of het maatschappelijke effect van droogte en watertekorten voor verschillende watergebruikers op basis van het Nationaal Watermodel.

Het Nationaal Water Model (NWM) berekent onder andere de regionale hydrologie (grondwater, oppervlaktewater), afvoeren, waterstanden en watertemperatuur in het hoofdwatersysteem. Het modelinstrumentarium bestaat uit een modellentrein van meerdere gekoppelde modellen die itererend rekenen, waaronder het Landelijk Hydrologisch Model (LHM). In dit rapport zijn de Basisprognoses 2018 berekeningen met het NWM als uitgangspunt genomen in de effectmodules. Voor een beschrijving van de Basisprognoses 2018 verwijzen we naar de informatie op de website van IPLO (IPLO, 2018).

Tabel 1-1 presenteert voor iedere effectmodule de hydrologische berekeningen die gebruikt zijn als invoer. De CO₂ uitstoot door veenoxidatie en de funderingsschade zijn niet bepaald voor het zichtjaar 2100. Dat had een organisatorische reden: deze modules gebruiken de Basisprognoses2018 mét voorkeurspakket en die is niet beschikbaar voor zichtjaar 2100. In een later stadium is besloten om toch de Basisprognoses2018 zónder voorkeurspakket te gebruiken, maar deze overstap was gezien de doorlooptijd niet meer mogelijk voor CO₂ uitstoot en funderingsschade.

Tabel 1-1 Overzicht welke berekeningen gebruikt zijn per effectmodule.

Effectmodule	Referentie	Stoom2050	Stoom2100
Landbouw	BP2018	BP2018	BP2018
Bodemdaling / CO ₂ -uitstoot	BP2018VK	BP2018VK	-
Funderingsrisico	BP2018VK	BP2018VK	-
Scheepvaart	BP2024	BP2024	BP2024

BP2018 – Basisprognoses 2018: voor de Referentie en Stoom2050 tijdreeks 1911-2011 en voor Stoom2100 tijdreeks 1974-2003 voor referentiejaar 2085

BP2018VK – Basisprognoses 2018 met het voorkeurspakket maatregelen: voor de Referentie en Stoom2050 tijdreeks 1911-2011

BP2024 – Basisprognoses 2024: gebaseerd op 90 jaar synthetisch weer

Dit rapport levert per sector twee typen resultaten:

- Maatschappelijke effecten: De huidige en toekomstige effecten van watertekort.
- Maatschappelijke kengetallen: Deze kengetallen tonen het maatschappelijk effect dat bereikt kan worden bij een toename in de waterbeschikbaarheid door maatregelen.

1.2.1 Maatschappelijke effecten

Dit onderdeel betreft het kwantificeren van de maatschappelijke effecten van de Deltascenario's Stoom2050 en Stoom2100. Het maatschappelijk effect is bepaald ten opzichte van de Referentie en is zoveel mogelijk uitgesplitst in de onderdelen:

- Droogterisico – het effect van tekort aan water
- Niet droogte-gerelateerde klimaateffecten – het effect van verandering in temperatuur en CO₂ concentratie
- Sociaaleconomische effecten – het effect van verandering in bevolking, economische groei en landgebruik.

Het maatschappelijk effect wordt uitgedrukt als een gemiddelde waarde in euro per jaar. Per effectmodule wordt in de volgende hoofdstukken een nadere uitleg gegeven van de bepaling van het maatschappelijke effect en het droogterisico. Het droogterisico is ook berekend voor de Referentie. De andere twee onderdelen van het maatschappelijk effect hebben alleen betrekking op de scenario's.

Ook wordt inzicht gegeven in de droogteschade (of maatschappelijk effect van droogte) bij een herhalingsjild van eens in de 20 jaar, dit wordt gezien als de beleidsopgave van het Deltaprogramma Zoetwater.

De maatschappelijke effecten zijn in 2024 al geanalyseerd met effectmodules (Schasfoort et al., 2024). Echter waren de resultaten hiervan door onzekerheid in de basisprognoses niet bruikbaar voor beleidsondersteuning. Daarom zijn ze in dit rapport opnieuw berekend en geanalyseerd op basis van de Basisprognoses 2018 (zie Tabel 1-1). Een uitzondering hierop vormt de effectmodule scheepvaart. De resultaten hiervan waren wel beschikbaar en zijn in Schasfoort et al (2024) gerapporteerd. Voor scheepvaart zijn daarom enkel de maatschappelijke kengetallen gerapporteerd in dit rapport.

1.2.2 Maatschappelijke kengetallen

Het onderdeel *maatschappelijke kengetallen* betreft het afleiden van getallen die de marginale waarde van water weergeven. Deze getallen zijn afgeleid uit de resultaten van de effectmodules. Met de marginale waarde van oppervlaktewater wordt bedoeld: wat zijn de maatschappelijke baten van een sector wanneer er één m³ water extra beschikbaar zou zijn. Bij grondwater gaat het om de baten bij een hogere grondwaterstand van 1 cm.

De marginale waarde van water varieert ruimtelijk en is zoetwatergebruiksfunctie-afhankelijk. Daarom wordt de marginale waarde per Zoetwater-hoofdregio en per gebruiksfunctie afgeleid vanuit berekeningen met de effectmodules.

De kengetallen zijn zowel afgeleid oppervlaktewater als voor grondwater. Sommige knelpunten zijn namelijk oppervlaktewater-gerelateerd, anderen grondwater-gerelateerd. De kengetallen worden in vervolgetrajecten toegepast om de baten van een maatregel (in euro's) te berekenen. De toepassing van de kengetallen vindt plaats binnen drie lopende trajecten:

- De Sociaaleconomische Analyse (SEA) van DPZW;
- De Ontwikkelpadenkaarten (OPK) van DPZW;
- KZH (Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem)

1.3 Leeswijzer

De volgende hoofdstukken beschrijven de maatschappelijke effecten en kengetallen voor de onderwerpen landbouw (hoofdstuk 2), CO₂ uitstoot door veenoxidatie (hoofdstuk 3), funderingsrisico (hoofdstuk 4) en scheepvaart (hoofdstuk 5).

2 Landbouw

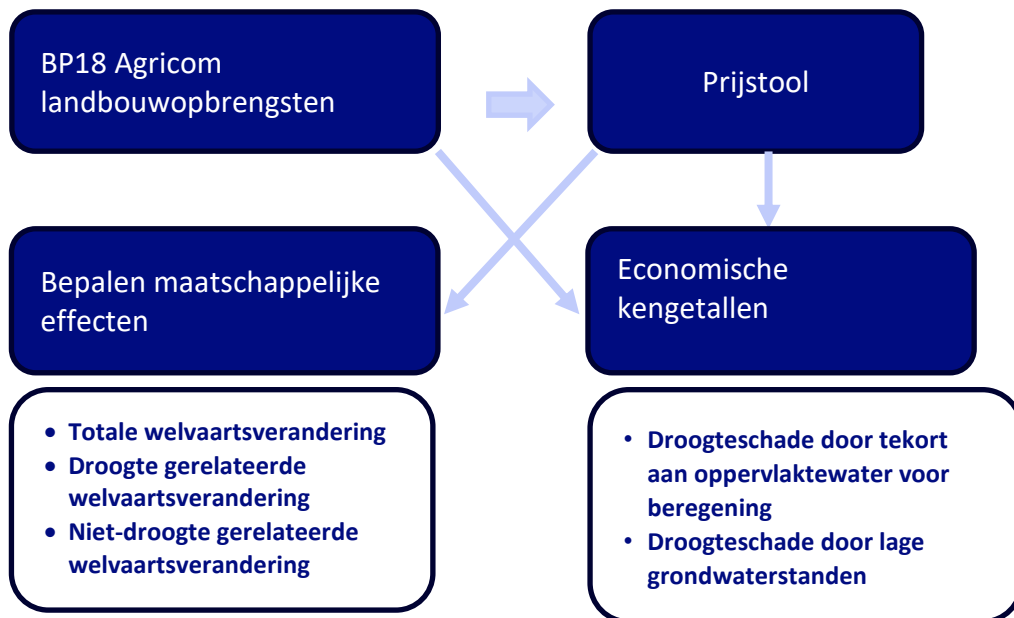
2.1 Inleiding

Droogte en watertekorten hebben effect op de landbouwsector. Een tekort aan water heeft direct effect op de gewasopbrengst en daarmee het inkomen van agrariërs. Een lagere gewasopbrengst kan vervolgens doorwerken in hogere prijzen van landbouwproducten waardoor het negatief effect op het inkomen van de agrariër wordt verkleind. Binnenlandse en buitenlandse consumenten kunnen hierdoor te maken krijgen met hogere prijzen van landbouwproducten. Het effect op producenten en consumenten gezamenlijk heeft effect op de welvaart in Nederland. De effectmodule landbouw kwantificeert het maatschappelijke effect van droogte en watertekorten nu en in de toekomst op de landbouwsector en de doorwerking hiervan op Nederlandse consumenten.

In dit hoofdstuk worden de maatschappelijke effecten en maatschappelijke kengetallen gepresenteerd. Figuur 2-1 geeft een schematisch overzicht van de methodiek. De maatschappelijke effecten zijn in 2024 al geanalyseerd met effectmodules (Schasfoort et al., 2024). Echter waren de resultaten hiervan door onzekerheid in de basisprognoses niet bruikbaar voor beleidsondersteuning. Er is daarom voor gekozen om de herziene methode ten aanzien van de schadebepaling & uitgangspunten van de effectmodule landbouw toe te passen op de resultaten de Basisprognoses 2018 voor de toenmalige versie van de Deltascenario's voor Stoom2050 en Stoom2085. Het gaat hierbij om de destijds met Agricom berekende fysieke landbouwopbrengsten¹. Nieuw in de methode is dat de maatschappelijke effecten zijn uitgesplitst in droogte en niet droogte gerelateerde effecten en dat de schadedefinitie is aangepast (zie paragraaf 2.2 voor verdere toelichting en uitwerking).

De maatschappelijke kengetallen zijn ook nieuw en geven de marginale waarde van water voor de landbouwsector weer. Deze kengetallen kunnen gebruikt worden voor de economische analyse van maatregelen die effect hebben op de waterbeschikbaarheid. Voor landbouw is gekozen om twee verschillende kengetallen te bepalen: de waarde van een kubieke meter oppervlaktewater voor beregening (eenheid euro / m³ / jaar) en de waarde van een cm verandering in de grondwaterstand (in euro / cm / ha / jaar) (zie paragraaf 2.2 voor verdere toelichting en uitwerking).

¹ In de BP24 scenario's waren landbouwopbrengsten berekend door middel van WOFOST en een FAO-methodiek voor de gewassen die met WOFOST doorgerekend konden worden (Schasfoort et al., 2024).



Figuur 2-1 Schematische weergave van methodiek.

Om van Agricom landbouwopbrengsten naar maatschappelijke effecten en maatschappelijke kengetallen te gaan, moeten de landbouwopbrengsten vertaald worden naar maatschappelijke effecten. Hiervoor is de Prijsstool gebruikt (Schasfoort et al., 2019). De prijsstool bepaalt op basis van de berekende opbrengstderving, prijzen per kg gewas, prijselasticiteiten en aandeel van het gewas in de export, het effect op het consumentensurplus en het producentensurplus. De verandering van het producenten en consumentensurplus samen zijn een maat voor de verandering in nationale welvaart door droogte in de landbouw. Door de nieuwe schadedefinitie kan dit worden gezien als de schade. De prijzen in de Prijsstool zijn aangepast naar prijspeil 2023. Voor meer informatie over de Prijsstool verwijzen we naar Schasfoort et al. (2024).

2.1.1 Uitgangspunten

De resultaten van de Basisprognoses uit 2018 (Hunink et al., 2018) voor de referentie en de scenario's Stoom 2050 en Stoom2085 zijn gebruikt als invoer voor het bepalen van de landbouweffecten. Belangrijk om hierbij te vermelden is dat Ref2017 en Stoom2050 destijds met LHM (Janssen et al., 2023) zijn doorgerekend voor de jaren 1911-2011 en dat Stoom2085 voor de jaren 1972-2003 is doorgerekend. Eerder is aangetoond dat de frequentieverdeling van de droogte en het berekende landbouwisico van deze kortere tijdserie redelijk overeenkomt met die van de 101-jarige reeks (Diermanse & Mens, 2019), waardoor vergelijking mogelijk is tussen de 32-jarige reeks (Stoom 2085) met de 101-jarige reeks (Ref 2017 en Stoom 2050). De inspeeljaren zijn in deze analyse ook meegenomen.

Het areaal landbouw en grasland neemt in BP18 Stoom2050 en Stoom2085 respectievelijk met 7% en 13% af (Tabel 2-1). De afname in landbouwareaal heeft effect op de landbouwopbrengst. Door deze verandering wordt er in totaal dus ook een lagere opbrengst verwacht. De toename van het beregend areaal heeft niet alleen een directe invloed op de gewasopbrengst, maar ook op de kosten die agrariërs maken voor beregening. Het beregend areaal groeit van 424.000 ha in REF2017 naar 657.000 ha in Stoom, een stijging van 55% (Hunink et al., 2018).

Tabel 2-1 Verandering van de arealen tussen Ref2017 en Stoom 2050 (Hunink et al., 2018).

	Ref2017 (hectare)	Stoom (%verandering t.o.v. Ref2017)
Gras	1097	-13.3%
Overige landbouw	909	-7.1%
Natuur en bos	951	8%
Stedelijk gebied	747	18.1%

2.2 Maatschappelijke effecten

2.2.1 Methode

De landbouwopbrengsten worden beïnvloed door verschillende factoren, waaronder klimaatverandering (temperatuur, neerslag, verdamping en CO₂-concentraties) en sociaaleconomische veranderingen (landgebruik en beregend areaal). Het klimaateffect kan daarnaast worden onderverdeeld in een negatief droogte effect (in droge periodes kunnen gewassen door watertekort minder goed ontwikkelen) en een positief effect door temperatuur en CO₂ (met hogere temperaturen en hogere CO₂ concentraties ontwikkelen gewassen zich beter). Voor de doelstelling van het Deltaprogramma Zoet Water is het van belang het droogte effect van de landbouw uit het totale klimaateffect te kunnen splitsen.

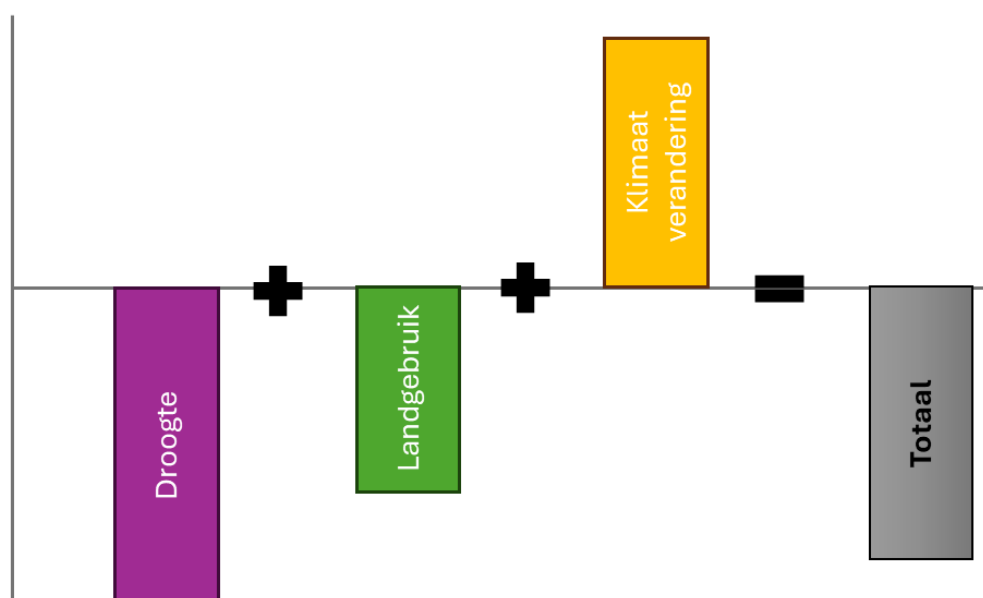
Tijdens droge perioden wordt de landbouwsector geconfronteerd met verminderde opbrengsten en extra kosten voor beregening. Het **maatschappelijke effect** hangt niet alleen af van deze derving, maar ook van mogelijke prijsstijgingen van producten tijdens droogte. Deze prijsstijgingen kunnen een deel van de schade voor boeren compenseren. Het totale maatschappelijke effect van droogte op de landbouw omvat zowel de directe effecten op de landbouwsector als de indirecte effecten op de maatschappij (Schasfoort et al., 2019). Om het totale maatschappelijke effect te berekenen, is de prijsstool landbouw ontwikkeld (Polman et al, 2019). Deze tool gebruikt gegevens over opbrengstderving en beregeningskosten. Vooral de definitie van wat in de praktijk als opbrengstderving wordt ervaren is van belang om een representatief maatschappelijk effect van droogte op de landbouw uit te rekenen.

Hiervoor is in Schasfoort et al. (2024) derving gedefinieerd als het verschil tussen de mediane actuele opbrengst en de actuele opbrengst van het betreffende jaar. Dat leidde echter tot grote schade voor bewolkte en koude jaren, doordat de actuele opbrengst in die jaren veel lager is dan de mediane actuele opbrengst, terwijl dit geen effect is van droogte. Daarom is voor de huidige analyse gekozen voor een methode op basis van de mediane derving. Hierin wordt derving berekend als de potentiële opbrengst min de actuele opbrengst. De methode die in de huidige analyse wordt gebruikt definieert **droogteschade** als het maatschappelijke effect van droogte op de landbouw in die jaren, waarin de derving groter is dan de mediane derving in de referentie op die locatie. In koude jaren is er vaak een lage potentiële opbrengst, maar verschilt de actuele opbrengst niet veel van het potentieel, resulterende in een lage derving. We zien het droogte-effect dus terug wanneer de derving groter is dan de mediane derving, wat in koude jaren niet het geval is. Dit correspondeert ook met de modelsituatie omdat de geschematiseerde gewasontwikkeling alleen geremd wordt door watertekorten in de DP2018 simulaties. De **welvaartsverandering** wordt tenslotte gedefinieerd als de gemiddelde jaarlijkse verandering van consumenten- en producentensurplus tussen de referentie en de scenario's.

Zoals al eerder benoemd worden de maatschappelijke effecten op de landbouw beïnvloed door verschillende factoren, waaronder klimaatverandering (temperatuur, neerslag, verdamping en CO₂-concentraties) en sociaaleconomische veranderingen (landgebruik en beregend areaal). De volgende paragraaf richt zich op de berekening van de totale welvaartsverandering en de effecten van de drie factoren apart:

- toenemende droogte en verandering in beregend areaal (omdat beregend areaal LHM-invoer is kan het effect hiervan niet apart gekwantificeerd worden zonder het LHM opnieuw te draaien)
- verandering in landgebruik,
- niet-droogte-gerelateerde klimaatverandering (temperatuur en CO₂-concentratie)

Welvaartsverandering



Figuur 2-2 Schematische illustratie van bepaling totale welvaartsverandering.

De prijsstool bepaalt op basis van de berekende opbrengstderving, prijzen per kg, prijselasticiteiten en aandeel van het gewas in de export, het effect op het consumentensurplus en het producentensurplus. Bij de bepaling van initiële prijzen wordt uitgegaan van de mediane gewasopbrengsten van het Referentie scenario.

2.2.1.1 Totale welvaartsverandering

De totale welvaartsverandering van een scenario ($W_{scenario}$) kunnen we berekenen als het verschil in maatschappelijke effect (E) op basis van de mediane opbrengst (A_{med}) van dat scenario:

$$W_{scenario} = E(A_{med,scenario})$$

2.2.1.2 Effect van droogte

Droogteschade verwijst naar het maatschappelijke effect dat droogte heeft op de landbouw. Hierbij wordt rekening gehouden met de mediane opbrengst in een scenario, en hoeveel derving er in een jaar plaats vindt. Zoals eerder besproken gaat het specifiek over die jaren (D^i), waarin de derving groter is dan de mediane derving in de referentie.

$$E^i_{Droogteschade} = E\left(\text{Max}(0, D^i - D_{med,Ref})\right)$$

Het **droogterisico** wordt beschouwd als de gemiddelde droogteschade over alle jaren met derving door droogte, oftewel de som van dit verschil over alle jaren gedeeld door het aantal jaar n .

$$Risiko_{Droogte} = \frac{\sum_{i=0}^n (E(A_{med}) - E^i_{Droogteschade})}{n}$$

Hierbij is $E(A_{med})$ het maatschappelijk effect van een fictief jaar met voor elk gewas de mediane actuele opbrengst. De droogteschade is daarmee niet gelijk aan het droogterisico, omdat in elk jaar met kleine periodes van droogte wat droogteschade op treedt, maar alleen de extremere helft daadwerkelijk als risico wordt ervaren. Door het verschil te berekenen tussen de maatschappelijke effecten van een mediaan jaar en de maatschappelijke effecten van een relatief droog jaar (het droogterisico), worden overige klimaateffect (temperatuur en CO₂) niet meegenomen, net als de landgebruiksaspecten van de scenario's. Wel zit hierin het effect van de verandering in het beregend areaal.

2.2.1.3 Niet-droogte gerelateerde welvaartsverandering

Naast het effect van droogte zijn er ook verschillende niet droogte gerelateerde effecten van de scenario's, waaronder veranderingen in landbouwareaal, beregend areaal, en opbrengstveranderingen veroorzaakt door temperatuuroptename en verandering in CO₂ concentratie in de lucht. Het effect van droogte en van de verschillende niet-droogte effecten gecombineerd zijn gelijk aan de totale welvaartsverandering van een scenario.

De maatschappelijke effecten van veranderingen in het landbouwareaal (E^*) kunnen worden berekend door de invoerbestanden in de Prijsstool aan te passen. Hierbij worden de effecten (E) berekend van de combinatie van de gemiddelde gewasopbrengsten A [kg/ha] van het scenario en de landgebruiksarealen [ha] van het referentiescenario:

$$E^*(A_{Scenario}) = E(A_{Scenario} \text{ met } A_{arealen_{Referentie}})$$

De Prijsstool berekent dan het maatschappelijk effect voor een toekomstig scenario waarin het landgebruik niet is veranderd. Het verschil tussen de maatschappelijke effecten met en zonder aanpassing van het areaal geeft de welvaartsverandering (W) als gevolg van de veranderingen in het landgebruik weer, (waarbij allen gekeken wordt naar het effect op de landbouwsector en niet naar effecten van het nieuwe landgebruik):

$$W_{Landgebruik} = E^*(A_{Scenario}) - E(A_{Scenario})$$

De effecten van klimaatverandering die veroorzaakt worden door hogere temperaturen en veranderende CO₂-concentraties, kunnen tenslotte worden geïsoleerd door het effect van droogte en het effect van landgebruik van de totale welvaartsverandering af te trekken. Dit effect van klimaat ($W_T + CO_2$) weerspiegelt de gevolgen van klimaatverandering die niet het gevolg zijn van watertekorten.

$$W_{T + CO_2} = W_{Scenario} - W_{Landgebruik} - ToenameRisiko_{Droogte, Scenario}$$

2.2.2 Resultaten

In deze sectie worden de resultaten besproken in termen van de welvaartsverandering. De welvaartsverandering is de som van consumenten- en producentensurplus van een scenario (Tabel 2-2) en combineert de stijging van kosten en daling van inkomsten van boeren en de verminderde consumptie en hogere prijzen voor gebruikers.

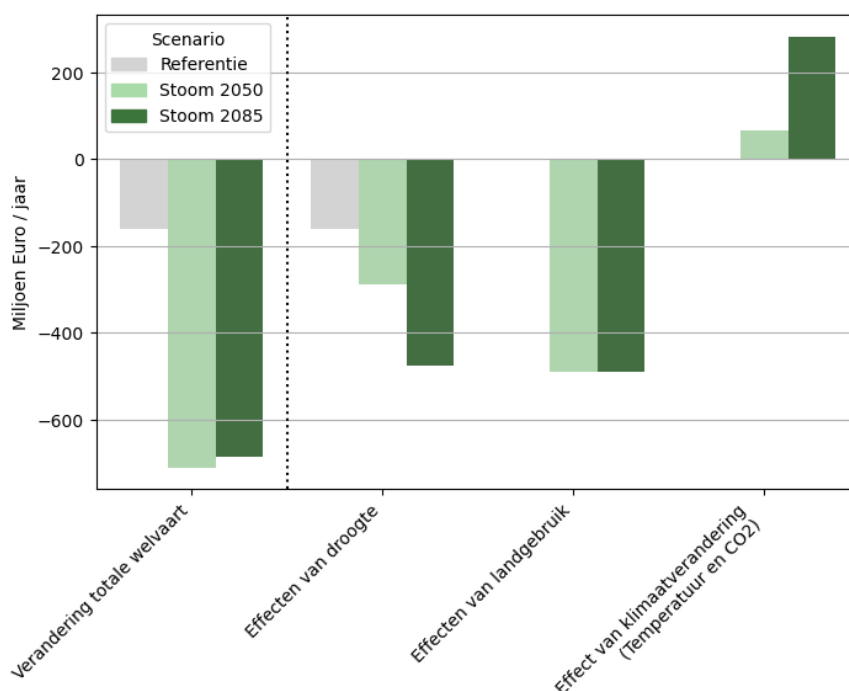
2.2.2.1 Welvaartsverandering in de landbouw op nationale schaal

In de referentie, Stoom 2050 en Stoom 2085 neemt de welvaart in totaal af met respectievelijk 161, 711 en 684 miljoen euro per jaar. Ten opzichte van de referentie is de totale welvaartsverandering is voor Stoom 2050 en Stoom 2085 van eenzelfde ordergrootte, met een afname van 549 (Stoom 2050) en 523 miljoen euro per jaar (Stoom 2085). Deze totale welvaartsverandering kan worden uitgesplitst naar het aandeel van toenemende droogte, afname landbouwareaal, en toename temperatuur en CO₂ die gunstiger zijn voor plantengroei (Figuur 2-3). De effecten van de afname van het landbouwareaal en de toename van de temperatuur worden hierbij in beide Stoom scenario's bepaald ten opzichte van de referentie. In de referentie is de verandering in de totale welvaart dus gelijk aan de verandering door droogte: 161 miljoen euro per jaar. In Stoom 2050 wordt 287 miljoen euro per jaar van de totale welvaartsverandering veroorzaakt door droogte, in Stoom 2085 loopt dat verder op naar 476 miljoen euro per jaar. Het effect van het landbouwareaal ten opzichte van de referentie) is echter nog groter. . De verandering in landbouwareaal, met een afname van ongeveer 10% areaal in de beide scenario's ten opzichte van de referentie, zorgt voor een afname van de welvaart met 490 miljoen euro per jaar. Door de toename van temperatuur en CO₂ ontstaat er in beide Stoom-scenario's daarentegen een gunstiger groeiklimaat voor de gewassen. In Stoom 2050 kan een welvaartstoename van +66 miljoen euro per jaar worden toegeschreven aan dit effect en in Stoom 2085 is dit +282 miljoen euro per jaar. Hieruit blijkt dat op nationale schaal de negatieve effecten van toenemende droogte en de positieve effecten van hogere concentraties CO₂ en hogere temperaturen elkaar deels uitmiddelen.

Tabel 2-2; Verandering consumentensurplus en producentensurplus, die samen het droogterisico van de landbouw vormen.

	Scenario	Hoge Zandgronden Oost	Hoge Zandgronden Zuid	Noord	Rivierengebied	West	Zuid-westelijke Delta
verandering consumenten surplus	Referentie	-52	-40	-80	-8	-14	-24
	Stoom 2050	-173	-143	-377	-39	-101	-161
	Stoom 2085	-209	-156	-440	-44	-107	-183
veranderingen producentensurplus	Referentie	17	-4	10	1	7	-11
	Stoom 2050	115	55	299	27	89	87
	Stoom 2085	125	32	299	26	86	55

Welvaartsverandering per scenario



Figuur 2-3 De voor heel Nederland gesommeerde verandering in totale welvaart (in miljoen euro per jaar) als gevolg van droogte voor de landbouw, voor de referentie en scenario's Stoom 2050 en Stoom 2085. De verandering in de totale welvaart kan worden uitgesplitst in effecten van toenemende droogte, effecten van veranderend landgebruik (afname landbouwareaal), en effecten van het klimaat die gunstiger zijn voor plantengroei.

2.2.2.2 Welvaartsverandering in de landbouw per zoetwaterregio

De totale welvaartsverandering van landbouw is in alle regio's negatief, oftewel er is een afname van de economische bijdrage van de landbouw in zowel de referentie, Stoom 2050 als Stoom 2085. De grootste bijdrage aan de landelijke welvaartsverandering komt uit regio Noord, met een afname van 59, 204 en 212 miljoen euro/jaar in de referentie, Stoom 2050 en Stoom 2085. In het Rivierengebied is er een veel kleinere daling in de welvaart te zien, met 5 miljoen euro/jaar in de referentie, 45 miljoen euro/jaar in Stoom 2050 en 40 miljoen euro/jaar in Stoom 2085.

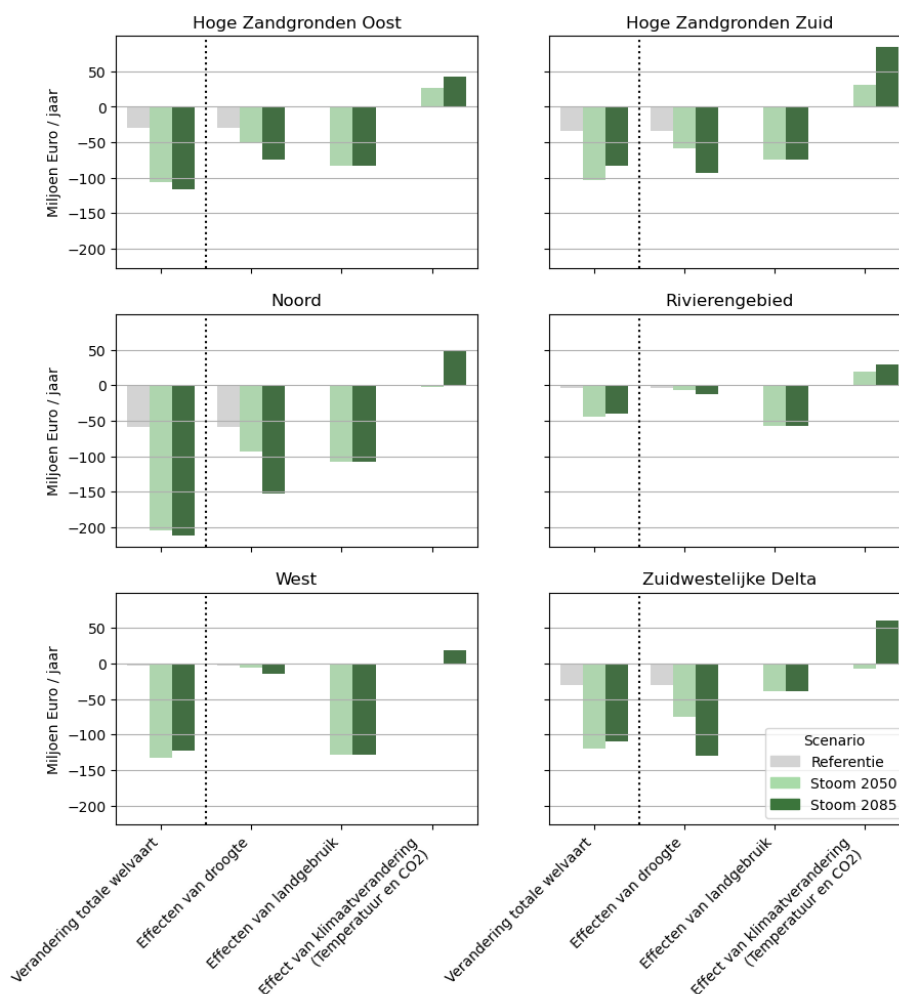
Als we inzoomen op het aandeel van droogte in de totale welvaartsverandering (ook wel: verandering van droogterisico), dan neemt de welvaart door droogte in alle regio's af in scenario Stoom2050. Verdere klimaatverandering richting 2085 zorgt voor een nog grotere toename van het droogterisico en dus afname de welvaart. (Figuur 2-4). Het droogterisico neemt ten opzichte van de referentie het sterkst toe in de Zuidwestelijke Delta, met 44 miljoen euro per jaar in Stoom 2050 en 99 miljoen euro per jaar in Stoom 2085. Dit betekent dat de welvaartsbijdrage van landbouw in deze regio als gevolg van droogte en watertekort met gemiddeld 44 miljoen en 99 miljoen euro per jaar afneemt ten opzichte van de referentie. In het Rivierengebied en West is de verandering van het droogterisico veel kleiner: van 5 miljoen, naar 6 miljoen, naar 12 miljoen euro per jaar in het Rivierengebied en van 4 miljoen, naar 5 miljoen, naar 14 miljoen euro per jaar in West voor de referentie, Stoom 2050 en Stoom 2085.

De afname van het landbouwareaal zorgt in alle regio's voor een daling van de bijdrage van landbouw aan de welvaart. Het effect is het grootst in de zoetwaterregio West: 128 miljoen euro per jaar.

Klimaatverandering (verhoogde temperatuur en CO₂-concentraties) heeft deels ook een positief effect op de gewasgroei en leidt tot een hogere opbrengst, wat een positief welvaartsverandering betekent. Dit neemt toe tussen Stoom 2050 en Stoom 2085, met de sterkste toename in de Hoge Zandgronden Zuid, waar het effect van verhoogde temperatuur en CO₂-concentraties 30 miljoen euro/jaar bedraagt voor Stoom 2050 en 85 miljoen euro/jaar voor Stoom 2085 toeneemt en opzichte van de referentie. Opvallend is dat de Zuidwestelijke Delta en Noord in Stoom 2050 ondanks een gunstiger groeiklimaat toch een licht negatieve maatschappelijke impact laten zien. In Stoom 2085 keert dit echter om en draagt het verbeterde groeiklimaat ook in deze regio's positief bij aan de welvaart.

Wanneer de individuele effecten van droogte, verandering in landbouwareaal en klimaatverandering (temperatuur en CO₂) worden opgeteld, blijkt dat de totale welvaartsverandering voor landbouw in alle regio's negatief is. Dit komt vooral door de afname van het landbouwareaal in de scenario's. Daarnaast is het negatieve effect van de toename van het droogterisico groter dan het positieve effect van de verandering in temperatuur en CO₂ concentraties op de landbouwopbrengst.

Welvaartsverandering per scenario

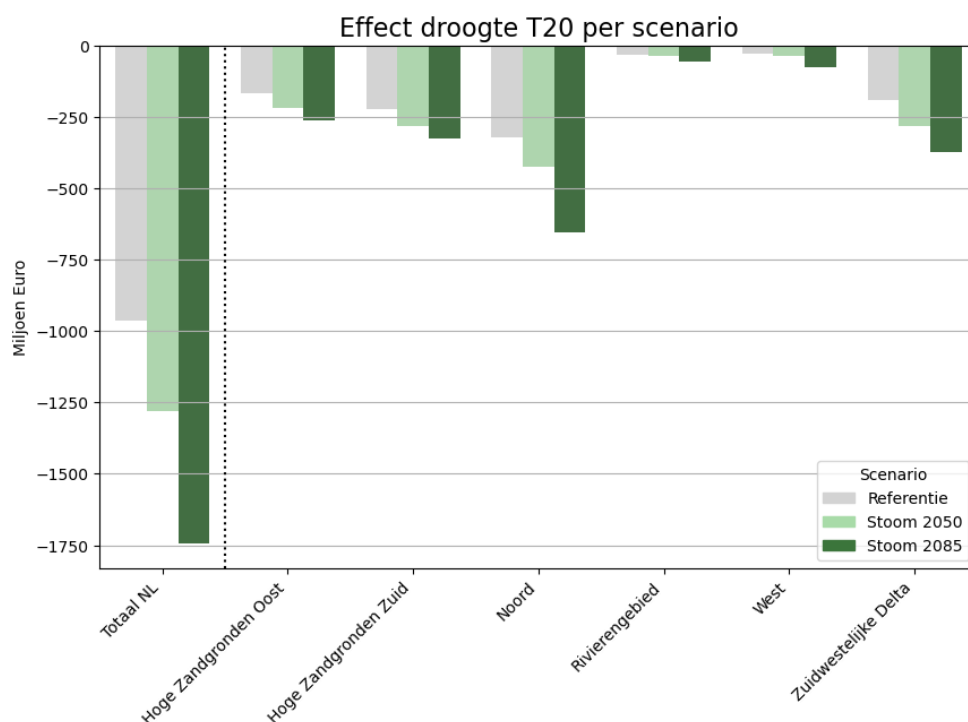


Figuur 2-4 De verandering in totale welvaart van de landbouw, voor de referentie en de scenario's Stoom 2050 en Stoom 2085, onderverdeeld per zoetwaterregio.

2.2.2.3 Zoetwateropgave (T20) in de landbouw per zoetwaterregio

De zoetwateropgave voor landbouw is gedefinieerd als het maatschappelijke effect van een droogte die gemiddeld eens per 20 jaar wordt overschreden (T20). Hiervoor wordt de opbrengstderving eerst in kg/ha bepaald (potentieel-actueel) en gecorrigeerd voor de mediaan van de droogtederving (over alle jaren) in de referentie. De zoetwateropgave (oftewel: T20 droogteschade) is zoals verwacht groter dan het droogterisico. Het effect op de welvaart van een T20 droog jaar is in de referentie een daling met ongeveer 965 miljoen euro. Dit neemt toe tot ongeveer 1280 miljoen euro/jaar voor Stoom 2050 en 1743 miljoen euro/jaar voor Stoom 2085 (Figuur 2-5).

Deze toename is verspreid over alle zoetwaterregio's. Regio Noord heeft de grootste negatieve welvaartsverandering in een T20 jaar van 323 miljoen euro in de referentie naar 424 en 654 miljoen euro per jaar voor Stoom 2050 en Stoom 2085. Waar Zuidwestelijke Delta ook een relatief hoog droogterisico kende in vergelijking met andere regio's (Figuur 2-4), komt dat in de zoetwateropgave minder sterk naar voren, al heeft deze regio nog steeds één van de grootste toenames. De kleinste veranderingen zijn net als voor het droogterisico zichtbaar in het Rivierengebied en West. In het Rivierengebied neemt de droogteschade toe van 30 miljoen euro in de referentie naar 37 miljoen euro in Stoom 2050 naar 75 miljoen euro in Stoom 2085, wat een kleine afname is ten opzichte van andere regio's. Relatief gezien is er eenzelfde orde van grootte verandering te zien tussen de scenario's, maar de absolute verschillen zijn groot tussen de regio's, wat de noodzaak benadrukt om droogterisico's per regio te analyseren en maatwerkoplossingen te ontwikkelen.



Figuur 2-5 Effect van droogte voor een T20 jaar in miljoen euro. Het effect van droogte voor heel Nederland (links) is de som van alle zoetwaterregio's. De waarden zijn het maatschappelijk effect van droogte in de landbouw ten opzichte van een mediaan jaar in de referentie.

2.2.3 Discussie en Conclusies

Uit de resultaten blijkt dat droogte in zowel het Stoom 2050- als het Stoom 2085-scenario leidt tot een negatieve impact op de landbouw, waarbij de effecten in Stoom 2085 groter zijn dan in Stoom 2050. De afname van het landbouwareaal is de belangrijkste oorzaak van de totale welvaartsvermindering, ondanks de positieve effecten van een hoger CO₂-gehalte en stijgende temperaturen op gewasgroei. Regionaal gezien ondervinden de regio's Zuidwestelijke Delta en regio Noord het grootste negatieve maatschappelijke effect door droogte, gevolgd door de regio's Hoge Zandgronden Oost en Zuid, terwijl de negatieve maatschappelijke effecten door droogte beperkt blijven in regio Rivierengebied en regio West.

In regio Rivierengebied en regio West zijn in de praktijk grotere watertekorten ervaren dan het model berekent, wat wijst op een discrepantie tussen modeluitkomsten en realiteit. Dit kan voortkomen uit vereenvoudigde aannames over waterbeschikbaarheid en gebruikspatronen: Modellen kunnen extreme omstandigheden, zoals acute droogtepieken en watertekorten, mogelijk niet volledig weergeven, waardoor de werkelijke impact wordt onderschat. Daarnaast kunnen regionale verschillen in waterbeheerstrategieën en landbouwpraktijken afwijken van de modellering.

De verwachting was dat het effect van niet-droogte gerelateerde klimaatverandering op gewasgroei niet negatief zou zijn. Dat in sommige regio's toch negatieve waarden zijn berekend, wijst mogelijk op onnauwkeurigheden in de uitsplitsing van klimaateffecten en andere factoren zoals droogte en landgebruik. Daarnaast is in de BP18 berekeningen die hiervoor gebruikt zijn het klimaateffect (CO_2 en temperatuur) waarschijnlijk onderschat, met mogelijk een onderschatting van de positieve effecten van klimaatverandering op gewasgroei. Dit benadrukt dat de getallen in de risico-uitsplitsing in absolute zin onzeker zijn, maar wel een goed beeld geven van het relatieve aandeel van droogte.

De resultaten laten zien dat het droogterisico in de landbouw op nationale schaal aanzienlijk toeneemt van de referentie naar de Stoom 2050- en Stoom 2085-scenario's, resulterende in een afname van de welvaart van 161 miljoen euro per jaar, naar 287 miljoen euro per jaar en 476 miljoen euro per jaar. In een T20-jaar bedraagt het maatschappelijke effect van droogte in de landbouw 965, 1280 en 1743 miljoen euro voor de referentie, Stoom 2050 en Stoom 2085.

In de uitsplitsing van de totale welvaartsverandering voor landbouw, blijkt dat de positieve effecten van verhoogde CO_2 -concentraties en temperaturen zorgen voor een gunstiger groeiklimaat, maar dat deze voordelen tenietgedaan worden door het toenemende watertekort. Regionale verschillen zijn groot, waarbij de Zuidwestelijke Delta de grootste toename in droogterisico laat zien, terwijl in het Rivierengebied en West de toename relatief klein is.

2.3 Maatschappelijke kengetallen

De maatschappelijke kengetallen voor landbouw zijn gebaseerd op het effect van droogte op de landbouw, en geven op een eenvoudige manier weer wat de waarde is van water voor de landbouwsector. Er is gekozen voor twee verschillende kengetallen: de waarde van een kubieke meter oppervlaktewater voor berekening (eenheid $\text{euro} / \text{m}^3 / \text{jaar}$) en de waarde van een cm verandering in de grondwaterstand (in $\text{euro} / \text{cm} / \text{ha} / \text{jaar}$). Deze kengetallen worden per scenario gerapporteerd en per zoetwaterregio.

2.3.1 Gebruikte gegevens per kengetal

2.3.1.1 Schadedefinitie

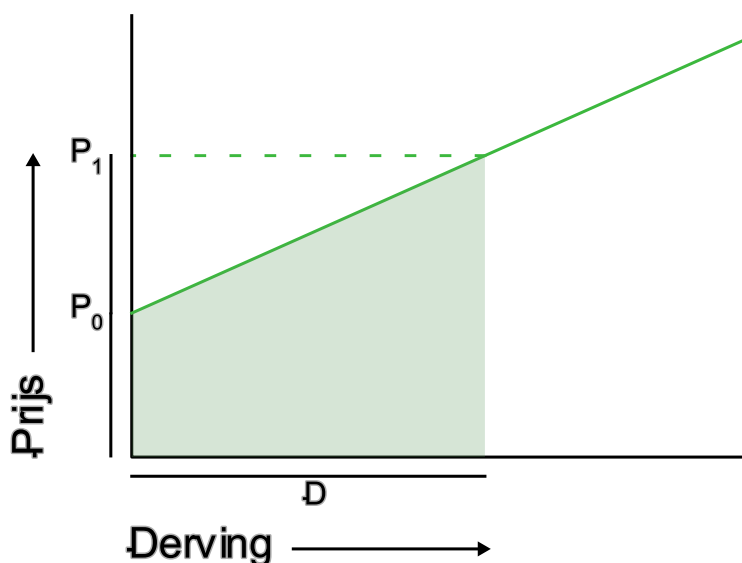
De kengetallen gebruiken een andere schadedefinitie dan de effectmodule. De resultaten uit de effectmodule en de kengetallen zijn daarmee niet volledig 1-op-1 vergelijkbaar. Om de onderdelen goed op elkaar aan te laten sluiten, worden de gewasprijzen per deelregio overgenomen uit de effectmodule. Waar de effectmodule de schade in euro's berekent per zoetwater-deelregio, is voor de uitsplitsing in twee typen kengetallen de landbouw droogteschade en het bijbehorende watertekort op hoge resolutie nodig, zodat alleen die gebieden worden meegenomen waar dat type kengetal relevant is. Hierdoor vallen we voor de kengetallen terug op ruimtelijke gegevens van Agricom, namelijk de potentiële opbrengst en actuele opbrengst in kg/ha . De derving (D) is daarbij gedefinieerd als de potentiële opbrengst min de actuele opbrengst, en wordt gesommeerd per zoetwater-deelregio. Volgens de economische principes in de prijstool (Schasfoort et al, 2019) is er een bepaalde

basisprijs, en neemt de prijs toe als er meer derving (en dus minder opbrengst is). De prijzen voor de verschillende gewassen in de deelregio's worden wel over genomen uit de effectmodule om de twee onderdelen zo goed mogelijk op elkaar aan te laten sluiten. De schade (in euro's) is daarmee de integraal van de derving-prijs grafiek, oftewel het oppervlak onder de lijn in Figuur 2-6. Deze berekening kan op basis van de berekening van de maatschappelijke effecten gemaakt worden per scenario-jaar, gewas en zoetwater-deelregio.

De integraal van deze formule kan versimpeld worden tot

$$S = D * p_0 + \frac{D * (p_1 - p_0)}{2}$$

waarmee de schade (S) in euro per jaar, gewas en deelregio berekend kan worden met de originele prijs (p_0) zonder derving en de nieuwe prijs (p_1) rekening houdend met de derving in dat jaar.



Figuur 2-6 Illustratief overzicht van de schadedefinitie zoals gebruikt in de kengetallen. De prijs neemt toe bij hogere derving, en de schade kan worden gezien als het groene oppervlak onder de lijn.

2.3.1.2 Schade door tekort beregening oppervlaktewater

Een tekort aan beregening ontstaat wanneer door droogte onvoldoende oppervlaktewater beschikbaar is om gewassen voldoende irrigatiewater te voorzien. Dit kan één van de oorzaken zijn van droogteschade in de landbouw. Deze schadevariant is alleen relevant op locaties waar ook daadwerkelijk wordt beregend uit het oppervlaktewater (Figuur 2-7, paars). Daarom wordt bij het beoordelen van schade door een tekort aan beregening uit oppervlaktewater het beregeningstekort, zoals berekend in LHM-Mozart per LSW, de zogenaamde Local Surface Water (Janssen et al., 2023), te vergelijken met de schade op daadwerkelijk beregende oppervlakten (LHM-Metaswap). Dit resulteert in een kengetal met de eenheid: euro schade per gemiddelde m³ watertekort per jaar in een lsw-eenheid.

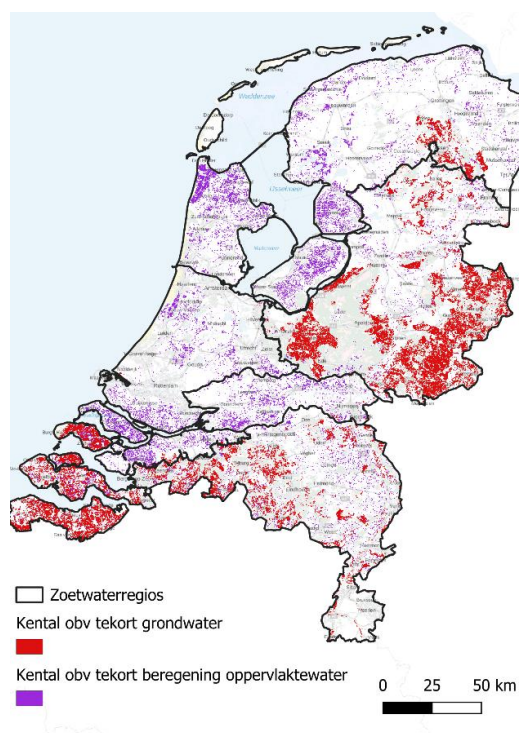
2.3.1.3 Schade door te lage grondwaterstand

In gebieden waar niet beregend wordt en geen aanvoer van oppervlaktewater mogelijk is, vormt de grondwaterstand de belangrijkste waterbron voor gewassen. Schade door droogte ontstaat wanneer de grondwaterstand in de zomer (GLG) onvoldoende hoog is om, samen met de capillaire nalevering, de wortelzone van de gewassen (vastgesteld op 1 meter) te bereiken. De capillaire werking zorgt ervoor dat water vanuit het grondwater omhoog getrokken kan worden, maar wanneer de afstand tussen het grondwater en de wortelzone te

groot is, blijft deze nalevering beperkt. Deze schadevariant is dus alleen relevant waar niet wordt beregend, en waar geen wateraanvoer mogelijk is (Figuur 2-7, rood). Van deze gebieden wordt de afstand tussen het maaiveld en de bovenkant van de zone met capillaire nalevering gezien als watertekort. Dit resulteert in een kengetal met de eenheid: euro schade per jaar per hectare per cm verlaging van de grondwaterstand. De eenheid van grondwater kan helaas niet eenduidig worden omgerekend naar m³ water, onder andere omdat de porieruimte afhankelijk is van het materiaal in de ondergrond, waardoor we de het kengetal het makkelijker te meten en interpreteren eenheid van cm verandering geven.

2.3.1.4 Schade door tekort beregning grondwater

In het LHM wordt ervanuit gegaan dat er altijd uit het grondwater beregend kan worden, als een gridcel in de beregeningskaart hiervoor aangemerkt en als er een bodemvochttekort optreedt. Daarom wordt er door Agricom geen droogteschade berekend voor cellen met beregning uit grondwater en kan er hiervoor dus ook geen kengetal afgeleid worden.



Figuur 2-7 Ruimtelijk overzicht van de locaties waarvan de gegevens worden meegenomen voor de berekening van de twee typen kengetallen voor landbouw.

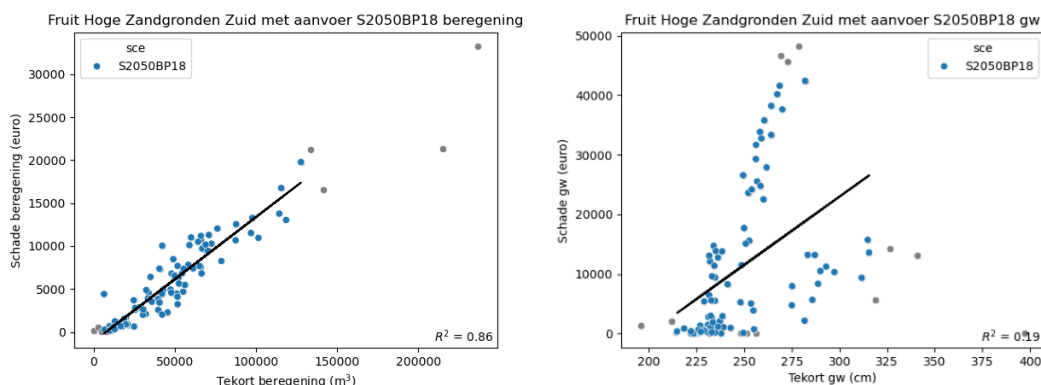
2.3.2 Methode en voorbeeldberekening

Bovenstaande waarden van (grond)watertekort en landbouwschade worden opgesteld per jaar, gewas, en deelregio. Dit zorgt dat er per gewas en regio 234 jaar aan data is (101 jaar referentie, 101 jaar Stoom 2050 en 32 jaar Stoom 2085), oftewel 234 combinatiewaarden van tekort en schade. Uit deze combinaties van tekort en schade wordt een lineaire relatie afgeleid, waarvan de helling een representatieve weergave is van de schadegevoeligheid van het desbetreffende gewas en deelregio, oftewel: De hoeveelheid droogteschade (in euro) in de landbouw die wordt opgelopen per eenheid (cm of m³) tekort aan water. Vervolgens worden deze kengetallen verder gegroepeerd, zodat uiteindelijk per scenario een getal per gewas en hoofdregio over blijft. Ook worden alle gewassen samengevoegd tot een kengetal per hoofdregio.

Om hier een zinvol kengetal uit af te leiden, worden alle jaren met een verwaarloosbare schade (< 1 euro) of een verwaarloosbaar tekort (< 1 m³ of < 1 cm) niet meegenomen in de analyse. In een eerste analysefase bleek daarnaast dat de trendlijn in sommige gevallen sterk werd beïnvloed door enkele datapunten die ver buiten de overige waarden lagen. Daarom worden voor zowel de schade als het tekort, ook waarden die buiten de 2,5 – 97,5 percentiel range vallen, niet meegenomen in de bepaling van het kengetal. In de sommatie van de sub-regionale kengetallen naar de kengetallen per hoofdregio, wordt daarnaast ook nog rekening gehouden met de betrouwbaarheid van het kengetal. In deze sommatie worden alleen de sub-regionale kengetallen meegenomen, waarvan de r^2 groter is dan 0,2, en de trendlijn waaruit het kengetal is afgeleid dus daadwerkelijk in enige mate een lineair verband tussen de data representeert.

Om het afleiden van de kengetallen en de spreiding van de modeluitkomsten te illustreren, worden de uitkomsten voor het gewas *Fruit* in deelregio *Hoge Zandgronden Zuid met aanvoer* voor scenario *Stoom 2050* hier in meer detail besproken (Figuur 2-8). Voor de schade door een tekort aan beregening met oppervlaktewater is er een sterke correlatie ($r^2 = 0,86$) te zien met de droogteschade die ontstaat in deze gebieden. Het kengetal (hellingscoëfficiënt van de trendlijn) voor schade door een tekort aan beregening uit oppervlaktewater dat hierbij hoort is €0,14 schade per m³ tekort aan beregeningswater. Voor de schade door een te lage grondwaterstand is de correlatie een stuk minder sterk ($r^2 = 0,19$), vooral veroorzaakt door een duidelijke tweedeling in de data. De trendlijn vangt hier wel het gemiddelde van de regio en het gewas, maar is dus niet direct representatief voor de individuele jaren. Het kengetal voor grondwater dat hierbij hoort komt dan uit op is €229 schade per cm verlaging van de grondwaterspiegel. Echter, doordat de r^2 kleiner is dan 0.2 wordt deze data niet meegenomen in het bepalen van het uiteindelijke kengetal op hoofd-zoetwaterregio niveau.

Daarnaast maakt dit voorbeeld duidelijk dat er pas schade ontstaat door een tekort aan grondwater als de diepte van de capillaire nalevering ten tijde van de jaarlijks laagste grondwaterstand gemiddeld in de regio en op locaties waar fruit als gewas aanwezig is, meer dan 220 cm onder maaiveld ligt. In andere woorden: Er is een bepaalde grenswaarde waaronder schade pas echt gaat optreden, of waarbij geen aanvullend positief maatschappelijk effect is als de grondwaterstand verder wordt verhoogd. Om dit mee te kunnen nemen in de analyse, zijn deze grenswaarden per hoofdregio eveneens gerapporteerd (Figuur 2-8).

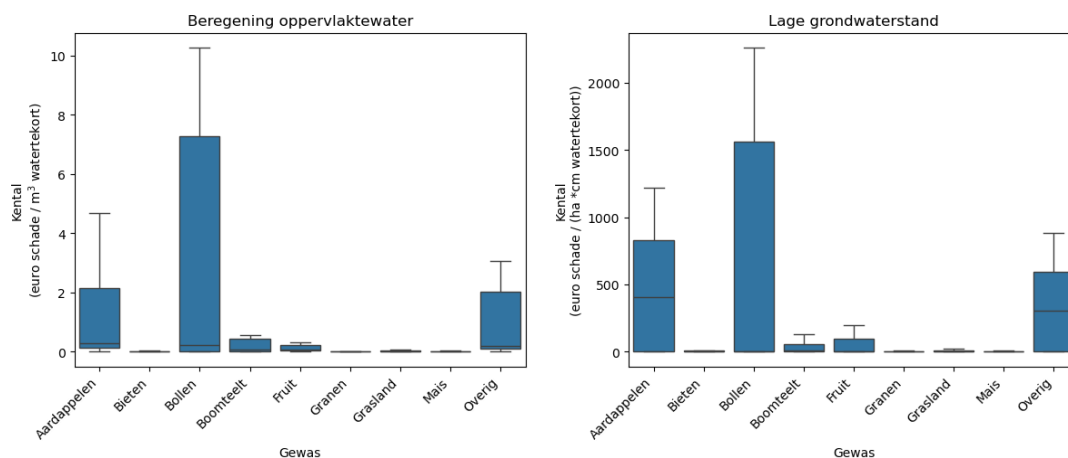


Figuur 2-8 Voorbeeld van het afleiden van de kengetallen voor een zoetwater-deelregio, scenario en gewas. In sommige gevallen (in dit geval voor het tekort aan beregening uit oppervlaktewater) is er slechts weinig variatie in de relatie tussen schade en tekort, maar dat is niet altijd zo, zoals te zien in de relatie voor schade door een tekort aan grondwater.

2.3.3 Resultaten

2.3.3.1 Overzicht belangrijkste resultaten

Het kengetal voor een tekort aan beregening varieert gemiddeld over alle regio's en gewassen tussen € 0,03 en € 2,50 per m³ beregening uit oppervlaktewater. Het kengetal voor een te lage grondwaterstand varieert tussen € 3 en € 597 per cm verandering in de grondwaterstand (Tabel 2-4). Over het algemeen zijn de kengetallen voor grondwater van een andere ordegrootte dan die van beregening, maar ze zijn niet één op één te vergelijken door de andere eenheid. Daarnaast is het kengetal voor een te lage grondwaterstand alleen geldig als de grondwaterstand dieper is (en het tekort groter) dan een bepaalde grenswaarde (Tabel 2-3). Voor de meeste regio's ligt deze grenswaarde rond de 250 cm onder maaiveld. In regio West ligt de grondwaterstand gemiddeld dichterbij het oppervlak dan in andere deelregio's, en speelt grondwater bovendien een minder grote rol vanwege het beperkte aantal relevante gebieden (waar de landbouw afhankelijk is van grondwaterstanden). Als deze grenswaarde wordt bereikt, heeft het verder verhogen van de grondwaterstand geen extra positief maatschappelijk effect op de landbouw. Als de kengetallen per regio worden uitgesplitst per gewas, is voor zowel beregening uit oppervlaktewater als voor een te lage grondwaterstand een duidelijk verschil te zien tussen de gewassen (Figuur 2-9). Bollen, aardappelen en overig zijn de gewascategorieën met de meeste maatschappelijke schade per eenheid watertekort, gevolgd door boomteelt en fruit. Bieten, granen, grasland en mais zijn gewasgroepen met minder maatschappelijke schade hebben per eenheid watertekort. De oorzaak hiervoor is een combinatie van hoe snel een gewas last heeft van droogte en de prijs per gewaseenheid. Voor bollen is er zowel veel droogteschade als een hoge prijs, resulterende in het grootste kengetal. Aan de andere kant is er bijvoorbeeld voor bieten, grasland en mais wel redelijk wat droogtederving (in kg), maar door de relatief lage prijs per kg blijft het maatschappelijke effect beperkt. Granen daarentegen hebben ook al een relatief lage derving (in kg) bij een watertekort, waardoor dit effect leidend is in de bepaling van het kengetal.



Figuur 2-9 Boxplots van kengetallen per gewas voor schade in de landbouw, voor watertekorten voor beregening via het oppervlaktewater, en tekorten aan grondwater resulterende in een te lage grondwaterstand. Bollen, aardappelen en overig zijn de gewastypen met de meeste euro schade per eenheid watertekort.

Tabel 2-3 Grenswaarden bij gebruik van de kengetallen van grondwater (cm-mv). Het kengetal voor grondwater is alleen geldig bij een GLG dieper dan deze grenswaarde.

Hoofdregio	REF2017BP18	S2050BP18	S2085BP18
Hoge Zandgronden Oost	230	240	240
Hoge Zandgronden Zuid	240	230	230
Noord	230	230	230
Rivierengebied	270	280	270
West	130	30	180
Zuidwestelijke Delta	250	260	270

Tabel 2-4; Kengetallen per regio voor schade in de landbouw (gemiddeld over alle gewassen), voor watertekorten voor berekening via het oppervlaktewater, en tekorten aan grondwater resulterende in een te lage grondwaterstand. De eenheid van berekening oppervlaktewater is euro schade per gemiddelde m3 watertekort in een lsw-eenheid. De eenheid van grondwater is euro schade per hectare per cm verlaging van de grondwaterstand.

Scenario	Tekort aan:	Hoge Zandgronden Oost	Hoge Zandgronden Zuid	Noord	Rivierengebied	West	Zuidwestelijke Delta
Referentie	Berekening oppervlakte water	€ 1,01	€ 1,62	€ 0,18	€ 0,12	€ 0,05	€ 0,17
	Grondwater	€ 11	€ 36	€ 29	€ 8	€ 4	€ 180
Stoom 2050	Berekening oppervlakte water	€ 0,79	€ 1,93	€ 0,04	€ 0,09	€ 0,03	€ 0,13
	Grondwater	€ 18	€ 55	€ 34	€ 23	€ 1,86	€ 278
Stoom 2085	Berekening oppervlakte water	€ 1,23	€ 2,50	€ 0,10	€ 0,13	€ 0,03	€ 0,28
	Grondwater	€ 22	€ 62	€ 52	€ 35	€ 3	€ 597

De scenario's Stoom 2050 en Stoom 2085 tonen een duidelijke trend van stijgende kosten voor grondwater, vooral in de regio's waar al sprake is van een hogere gevoeligheid voor watertekorten. Deze stijgende kosten kunnen worden verklaard door de hogere potentiële productie, waardoor bij eenzelfde hoeveelheid watertekort meer derving optreedt dan in de referentie. Voor de berekening uit oppervlaktewater zien we in Stoom 2050 in veel regio's juist een afname van de prijs per m³ watertekort. Dat komt omdat relatief meer gewassen met minder opbrengst worden berekend (Stratelligence, 2021). Hoge Zandgronden Zuid wijkt af van dit patroon, hierin is het vooral opvallend dat de waarde van oppervlakte beregeningswater voor bollen toeneemt in Stoom 2050.

Er zijn duidelijke regionale verschillen in de kosten voor zowel oppervlaktewater als grondwater. Het Rivierengebied heeft over het algemeen de laagste kosten voor beide waterbronnen, en ook West heeft relatief lage kosten. Aan de andere kant zien we in de Zuidwestelijke Delta een flinke stijging van de kosten van schade door een te lage grondwaterstand, wat waarschijnlijk te maken heeft met de toenemende schaarste doordat de droge periodes intenser worden en er in deze regio weinig mogelijkheid is om zoet water aan te voeren en daarmee te beregenen. Regio's zoals de Hoge Zandgronden vertonen ook een stijging in de kosten voor zowel oppervlaktewater als grondwater, wat erop duidt de hoeveelheid derving en de daar bijbehorende monetaire schade sneller toeneemt dan het tekort aan beregeningswater. Deze uitkomst is grotendeels in lijn met de resultaten van de effectmodule landbouw (paragraaf 2.2), welk dezelfde regionale gevoeligheid voor droogte laat zien.

Voorbeeldberekening gebruik kengetallen

In deze voorbeeldanalyse worden de landbouwkundige baten van watermaatregelen op de hoge zandgronden zuid voor Stoom 2050 bepaald op basis van twee typen effecten: (1) vermindering van beregeningstekorten in gebieden die beregenen met oppervlaktewater, en (2) verhoging van de grondwaterstand (GLG) in gebieden waar geen beregening plaatsvindt, maar waar gewassen afhankelijk zijn van bodemvocht uit het grondwater.

Voor de eerste categorie wordt gekeken naar een extra beschikbaar volume in beregeningswater als gevolg van de maatregel. Een voorbeeld betreft een gebied waar door een maatregel het beregeningstekort gemiddeld met 2 miljoen m³ per jaar afneemt. De economische waarde per m³ bespaard water is vastgesteld op € 1,93. Daarmee worden de baten voor de landbouw berekend als het product van de volumebesparing en de waarde per eenheid: 2 miljoen m³ × € 1,93/m³ = € 3,86 miljoen per jaar.

Voor de tweede categorie wordt de verhoging van de grondwaterstand uitgedrukt in centimeters, waarbij per centimeter waarde per hectare wordt gehanteerd. In een voorbeeldgebied ligt de huidige GLG op 250 cm onder maaiveld en wordt deze door een maatregel verhoogd met 2 cm. De waarde van deze maatregel bedraagt € 55 per cm per ha, wat leidt tot jaarlijkse baten van 2 cm × € 55/cm/ha = € 110 per ha. Hierbij is van belang dat niet alleen de absolute diepte van de GLG wordt beschouwd, maar ook de effectieve afstand tot de wortelzone via capillaire nalevering. Deze capillaire nalevering verschilt per bodemtype en bepaalt in hoeverre grondwater daadwerkelijk beschikbaar komt voor gewassen.

In gebieden waar de GLG al relatief hoog ligt, bijvoorbeeld op 150 cm onder maaiveld, kan een verdere verhoging geen extra baten opleveren als deze al binnen de bereikbare zone voor wortels valt. In zo'n situatie wordt bij een GLG-verhoging van 2 cm uitgegaan van een waarde van € 0 per cm per ha, aangezien de grenswaarde van de grondwaterstand waarboven geen verdere schadereductie wordt behaald al is bereikt. Ook hier geldt dat de combinatie van GLG en capillaire nalevering bepaalt of verhoging van het grondwater leidt tot economische meerwaarde.

Discussie

In de economische analyse die is uitgevoerd voor fase 2 van DPZW zijn ook kengetallen voor landbouw gemaakt en toegepast (Stratelligence, 2021). Het grootste verschil in methodiek is dat er in 2021 per zoetwaterregio en scenario slechts één kengetal is afgeleid, en dat deze zowel voor grondwater als oppervlaktewater is toegepast. In de analyse van 2025 is apart een kengetal voor grondwater afgeleid uit modelresultaten. Dit levert een beter onderbouwd kengetal voor grondwater, omdat hierbij de doorwerking van een grondwaterstandsverandering via bodemvochtverandering naar waterbeschikbaarheid voor het gewas expliciet zijn meegenomen in de achterliggende modelberekeningen met het LHM. Ook is het kengetal in fase 3 beschikbaar ten opzichte van centimeter grondwaterstandsverandering. In fase 2 is het kengetal voor oppervlaktewater 'vertaald' naar centimeter grondwaterstandsverandering met behulp van een generiek getal voor poriënvolume. Het poriënvolume verschilt echter per bodemtype. Deze factoren kunnen de verschillen tussen de kengetallen uit fase 2 en de huidige kengetallen mogelijk verklaren, aangezien de kengetallen voor oppervlaktewater over het algemeen lager zijn dan de kengetallen uit fase 2, met uitzondering van de Hoge Zandgronden. Het is niet mogelijk om het belang van elk van deze factoren uit te splitsen.

3 Bodemdaling en CO₂-uitstoot

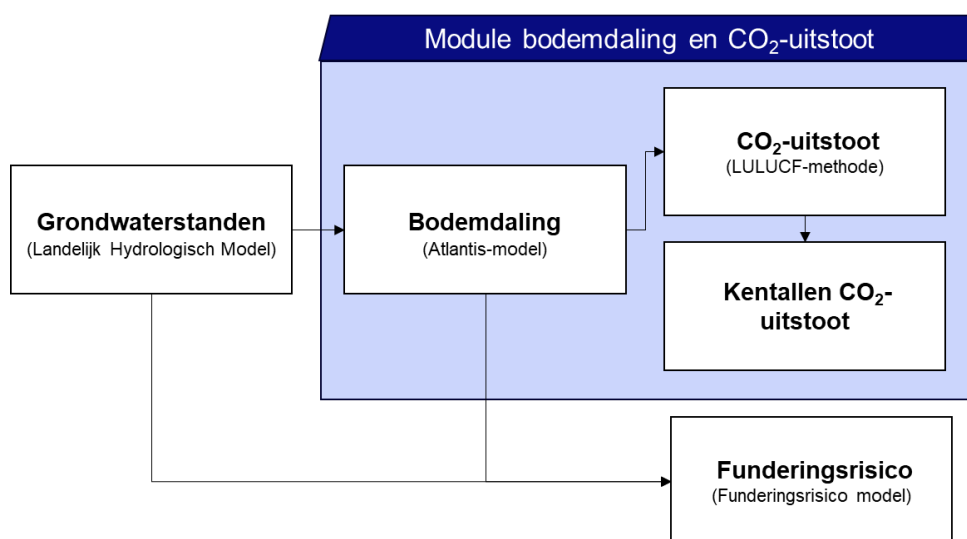
3.1 Inleiding

Het huidige waterbeheer en landgebruik in de kustvlakte van Nederland leidt in gebieden met klei- en organische gronden tot bodemdaling en in gebieden met organische gronden tot broeikasgasemissies (Erkens & Melman, 2020). De effectmodule bodemdaling geeft meer inzicht in de effecten van klimaatopwarming, sociaaleconomische ontwikkelingen en zoetwatermaatregelen op de bodemdaling en CO₂-uitstoot uit organische bodems in Nederland. De basis van de effectmodule vormt het door Deltares ontwikkelde bodemdalingsmodel, Atlantis. De specifieke inzet van Atlantis voor de effectmodule bodemdaling en CO₂-uitstoot en de bijbehorende resultaten worden in dit hoofdstuk besproken. Meer informatie over de modelconcepten in Atlantis is te vinden in Bootsma et al. (2020). Daarnaast is een meer uitgebreide toelichting over de inzet van Atlantis voor de effectmodule bodemdaling te vinden in Melman et al. (2023).

De effectmodule voor bodemdaling en CO₂-uitstoot bestaat uit drie stappen (Figuur 3.1):

- 1 Bodemdalingskaarten worden geproduceerd met het bodemdalingsmodel Atlantis. Een belangrijke input hiervoor is de gesimuleerde grondwaterstand met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM).
- 2 Vervolgens wordt de oxidatiecomponent van de bodemdalingskaarten gebruikt om CO₂-uitstoot te berekenen. Dit gebeurt met behulp van de relaties die de taakgroep Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) ook gebruikt voor de nationale rapportage van CO₂-uitstoot uit het Nederlandse veenweidegebied.
- 3 De berekende CO₂-uitstoot wordt gebruikt om kengetallen op te stellen voor het gebruik in Kosten-batenanalyses.

De berekening van het funderingsrisico op basis van berekende bodemdaling wordt in het volgende hoofdstuk verder toegelicht.



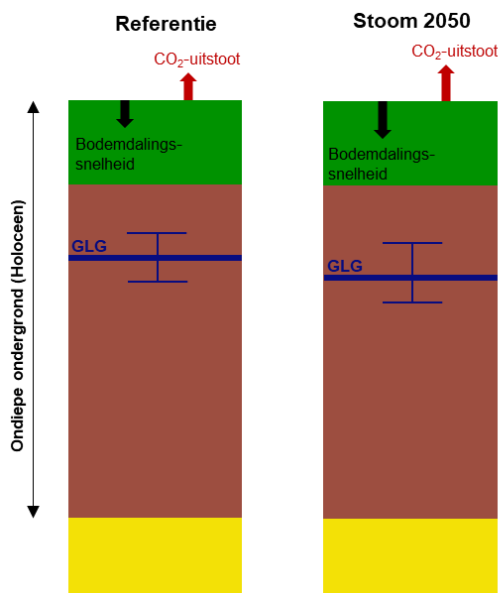
Figuur 3-1 Schematische weergaven van de stappen in de berekening van bodemdaling, CO₂-uitstoot uit organische bodems en kengetallen CO₂-uitstoot.

3.2 Maatschappelijke effecten

3.2.1 Uitgangspunten

Het doel van de effectbepaling is om voor de referentie en toekomstscenario('s) een representatieve, ruimtelijk gedefinieerde bodemdalingssnelheid en CO₂-uitstoot te bepalen, gebaseerd op de voor dat scenario berekende GLG en de luchttemperatuur. Er wordt geen rekening gehouden met veranderingen in de ondergrond als gevolg van bodemdeformatie of wijzigingen in landgebruik (zie Figuur 3.2). Het indirecte effect van gewijzigd landgebruik op de grondwaterstand, wat weer effect heeft op de bodemdalingssnelheid, is wel meegenomen. Deze benadering maakt expliciet zichtbaar welk effect het (klimaat)scenario heeft op de bodemdaling en CO₂-uitstoot. Hieronder worden de belangrijkste uitgangspunten verder toegelicht:

- Voor inzet van Atlantis in de effectmodule bodemdaling is gebruik gemaakt van de volgende bronbestanden: (1) de met het LHM berekende grondwaterstanden per Deltascenario, de zogenaamde Basisprognoses2018 (IPLO, 2018), (2) het Atlantis ondergrondmodel (Erkens et al., 2021) en (3) door KNMI geproduceerde temperatuurtijdreeksen voor het toekomstig klimaat per klimaatscenario (KNMI 2014).
- Er wordt aangenomen dat de effecten van klimaat en sociaaleconomische ontwikkelingen de bodemdaling en CO₂-uitstoot uit organische bodems op twee manieren beïnvloeden. Ten eerste via de grondwaterstand. Veranderingen in neerslagpatronen, temperatuur en landgebruik kunnen leiden tot een andere grondwaterstanddynamiek en dus bodemdaling. Ten tweede via de snelheid van oxidatieprocessen in de bodem als gevolg van klimaatopwarming. Bij hogere (bodem)temperaturen is de microbiële activiteit hoger, waardoor organisch materiaal sneller wordt afgebroken. Dit kan leiden tot een toename in de snelheid van bodemdaling en CO₂-uitstoot.
- Er wordt gebruik gemaakt van een vast ondergrondmodel (3D schematisatie van de relevante eigenschappen van de ondergrond) voor alle berekeningen (zie Figuur 3-2). Dit model houdt geen rekening met veranderingen in de ondergrond, zoals bodemdaling, het verdwijnen van organisch materiaal of wijzigingen in landgebruik.
- Er wordt geen rekening gehouden met bodemdaling door rijping. Rijping is vooral relevant in Flevoland, waar als gevolg van rijping van de voormalige Zuiderzeebodem nog steeds bodemdaling plaats vindt. De verwachting is dat de invloed van rijping op bodemdaling in de komende decennia zal afnemen, waardoor het minder relevant is om dit in voorspellingen op basis van het huidige ondergrondmodel op te nemen. Bovendien hebben klimaat- en sociaaleconomische factoren slechts een beperkte invloed op rijping.
- Bij de berekening van de CO₂-uitstoot wordt wat betreft landgebruik en areaal zo veel mogelijk aangesloten op de huidige officiële rapportagemethode van de LULUCF (Arets et al., 2023). CO₂-uitstoot vindt alleen plaats uit veen- en moerige bodems volgens de BRO bodemkaart (Wageningen Environmental Research, 2023) met de landgebruikstypen grasland, akkerland, bebouwing, heide en gedeeltelijk bos. Gegeven de onzekerheden in de modelinvoer, wordt in de effectmodule de relatieve verandering in uitstoot berekend ten opzichte van de huidige gerapporteerde CO₂-uitstoot van 6,03 megaton CO₂. De uitstoot van andere broeikasgassen zoals methaan (CH₄) en lachgas (N₂O) uit organische bodems wordt niet meegenomen.



Figuur 3-2 Schematische weergave van de ontwikkelde aanpak op één puntlocatie. Voor dezelfde ondergrondkolom (klei-op-veen-op-zand in dit geval) wordt een bodemdalingssnelheid en CO₂-uitstoot voor het referentie- en stoom 2050 scenario berekend. Hierbij wordt telkens dezelfde bodemkolom gebruikt zonder te corrigeren voor veranderingen als gevolg van toekomstige bodemdaling of landsgebruiksveranderingen.

3.2.2 Methode

3.2.2.1 Bodemdaling

Met Atlantis wordt voor ieder scenario op basis van het ondergrondmodel, de GLG uit het LHM en representatieve temperatuur voor oxidatie, verticale bodemdaling berekend door oxidatie en compactie per bodemkolom van 100 x 100 meter. De bodemdaling wordt berekend per lopende periode van acht jaar, waarbij de GLG en oxidatiesnelheid niet aangepast worden. De berekende bodemdaling heeft wel invloed op de bodemkolom, maar deze effecten zijn voor een periode van acht jaar erg klein. De eerste drie jaar (van de 8 jaar) dienen als inlooperperiode, omdat de initiële stressverdeling in sommige gevallen tot onrealistische resultaten leidt. De gemiddelde bodemdalingssnelheid van de laatste vijf jaar wordt gebruikt in verdere analyse. Zie voor verdere uitleg de paragraaf 'Gemiddeld Laagste Grondwaterstand' in dit hoofdstuk.

3.2.2.2 CO₂-uitstoot

Atlantis is voor de effectmodule uitgebreid met de functionaliteit om de CO₂-uitstoot uit organisch rijke bodems te berekenen volgens de methode die de Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF)-taakgroep gebruikt voor de emissieregistratie van CO₂-uitstoot uit veen- en moerige gronden (Arets et al., 2023). Voor de LULUCF-rapportage wordt berekende bodemdaling in veen en moerige-gronden omgezet in CO₂-uitstoot op basis van landelijk gemiddelde kenmerken van veen met de volgende formule:

$$C_{em} = h_{oxidatie} \cdot \rho_{bulk} \cdot f_{om} \cdot f_{fossil}$$

Hierin is:

- C_{em} : de uitstoot van C in $kg\ C\ m^{-2}\ jr^{-1}$
- $h_{oxidatie}$: bodemdaling door oxidatie ($m\ jr^{-1}$)
- ρ_{bulk} : de bulk dichtheid van bodem ($\frac{kg}{m^3}$)
- f_{om} : de massafractie organisch materiaal (—)
- f_{fossil} : de massafractie fossiel koolstof in organisch materiaal, standaard op 0.55 (—)

Voor de effectmodule wordt iets van deze methode afgeweken door gebruik te maken van de lokale bulkdichtheid van het veen in plaats van het landelijke gemiddelde, welke onderdeel is van het ondergrondmodel. Zo wordt er beter rekening gehouden met variaties in veenbodemsommen, waardoor de berekende CO₂-uitstoot en veranderingen hierin per deelgebied betrouwbaarder zijn. Op deze manier wordt de bijdrage van iedere modelcel aan de uitstoot van fossiel bodemkoolstof door veenoxidatie voor iedere tijdstap berekend. Als nabewerking wordt tenslotte het verlies van fossiel bodemkoolstof (C) in $kg\ C\ m^{-2}\ jr^{-1}$ naar de uitstoot van $kg\ CO_2\ ha^{-1}\ jr^{-1}$ omgerekend op basis van het moleculair gewicht van koolstof in CO₂ en het aantal meters in één hectare.

3.2.2.3 Toepassing scenario's

De maatschappelijke effecten zijn bepaald voor het referentiescenario en het scenario Stoom 2050 van de Deltascenario's 2018 (Wolters et al., 2017). Voor beide scenario's wordt het effect van de grondwaterstand en temperatuur op bodemdaling en CO₂-uitstoot berekend. Door deze scenario's met elkaar te vergelijken, kan een indruk worden verkregen van het effect van klimaatverandering op bodemdaling en CO₂-uitstoot. Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen resultaten:

- Het droogterisico: dit geeft inzicht in de bodemdalingssnelheid en CO₂-uitstoot in het referentiescenario en toekomstscenario tijdens gemiddelde condities.
- De zoetwateropgave: hierbij wordt inzicht verkregen in het effect van de GLG die eens in de 20 jaar voorkomt op bodemdaling en CO₂-uitstoot, en hoe dit verandert als gevolg van klimaatverandering. Er is alleen gekeken naar het extra droogte-effect op bodemdaling en CO₂-uitstoot via de GLG. Voor de temperatuur is de gemiddelde temperatuur van het scenario gebruikt.

3.2.2.4 Temperatuurafhankelijke-oxidatiesnelheid

Aangezien de afbraaksnelheid van organisch materiaal (oxidatiesnelheid) gecorreleerd is met (bodem)temperatuur, zal een structurele stijging van de gemiddelde luchttemperatuur door klimaatverandering ook de oxidatiesnelheid beïnvloeden. De oxidatiesnelheid wordt in de prognoses daarom gecorrigeerd voor de verwachte temperatuurstijging uit de klimaatscenario's (KNMI, 2014). De gemiddelde representatieve temperatuur voor het referentiescenario bedraagt 12,27 °C en voor scenario Stoom 2050 14,03 °C.

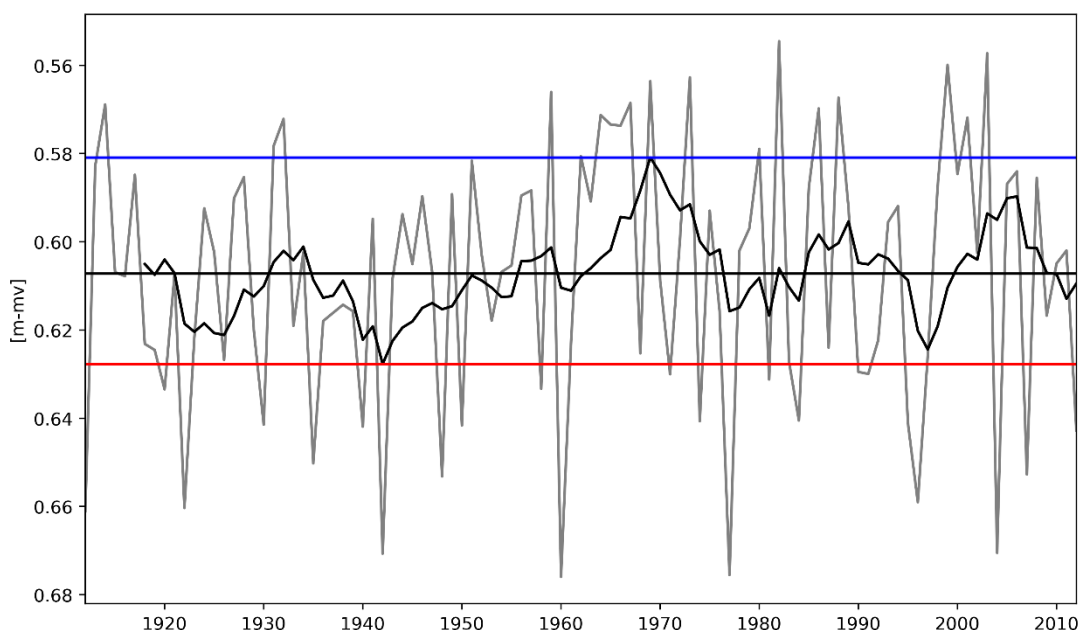
3.2.2.5 Gemiddeld Laagste Grondwaterstand

Atlantis berekent bodemdaling en CO₂-uitstoot op basis van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). De GLG is gedefinieerd als de gemiddeld laagste grondwaterstand berekend over ten minste acht hydrologische jaren. Het gemiddelde van de drie laagste grondwaterstanden per jaar (LG3) is standaard uitvoer van LHM. Voor de bodemdalingberekeningen wordt de LG3-tijdreeks (101 jaar voor één scenario) op basis van het lopend gemiddelde van acht jaar omgezet in een GLG-tijdreeks (95 waarden voor één scenario). Deze GLG-tijdreeks wordt representatief geacht voor de fluctuatie van de GLG voor het desbetreffende scenario.

Voor beide onderzochte scenario's (paragraaf 3.2.2.3) is op vier manieren een GLG waarde bepaald vanuit de GLG-tijdreeks: de minimale GLG, de gemiddelde GLG, de maximale GLG en de GLG die hoort bij een droogtejaar met een herhalingsperiode van 20 jaar. Deze resultaten worden als volgt geïnterpreteerd voor respectievelijk het droogterisico en de zoetwateropgave:

- Voor het *droogterisico* wordt gebruik gemaakt van de bodemdalingssnelheid en CO₂-uitstoot die passen bij het gemiddelde van de 95-jarige GLG-reeks. De bodemdaling en CO₂-uitstoot die horen bij de minimum en maximum van de 95-jarige GLG-reeks worden gebruikt om de bandbreedte te bepalen binnen het scenario.

- Voor de *zoetwateropgave* dient inzicht te worden gekregen in de effecten een GLG die één keer in de 20 jaar voorkomt op bodemdaling en CO₂-uitstoot. Dit effect is in werkelijkheid heel moeilijk te bepalen en is daarmee dus zeer onzeker. Verder moet worden opgemerkt dat de GLG wordt berekend over periodes van 8 jaar. Daardoor treedt de laagste GLG die eens in de 20 jaar voorkomt dus niet per sé op hetzelfde moment op als het droogste jaar in 20 jaar.



Figuur 3-3 De grijze lijn geeft LG3-tijdreeks per scenario op een gegeven locatie zoals volgt uit de LHM-berekeningen. Voor toepassing in de effectmodule wordt dit omgezet naar GLG-tijdreeksen op basis van het 8-jarige lopend gemiddelde (in zwart). De stippellijnen rode lijn geeft de minimum GLG aan en de blauwe lijn maximum GLG.

3.2.2.6 Beprijzing CO₂-uitstoot

De verandering in absolute broeikasgasuitstoot wordt geprijsd aan de hand van de CO₂ prijzen uit het handboek milieuprijzen (CE Delft, 2023). Hiervoor gebruiken we de bovengrens van de CO₂ prijs geschikt voor gebruik in Nederlandse MKBA's. De basis voor de prijzen uit het handboek milieuprijzen zijn de efficiënte CO₂ prijzen uit de WLO-scenario's (CPB, 2015). We kiezen enkel de bovengrens, omdat recente studies laten zien dat met de huidige klimaatambities van overheden de CO₂ prijs een stuk hoger zal uitkomen dan de bovengrens van de CO₂ prijzen uit de WLO-scenario's. Wanneer we de ondergrens en de bovengrens zouden nemen lijkt dit op een onzekerheidsmarge, terwijl de onzekerheid in CO₂ prijzen in werkelijkheid een stuk groter is dan deze marge.

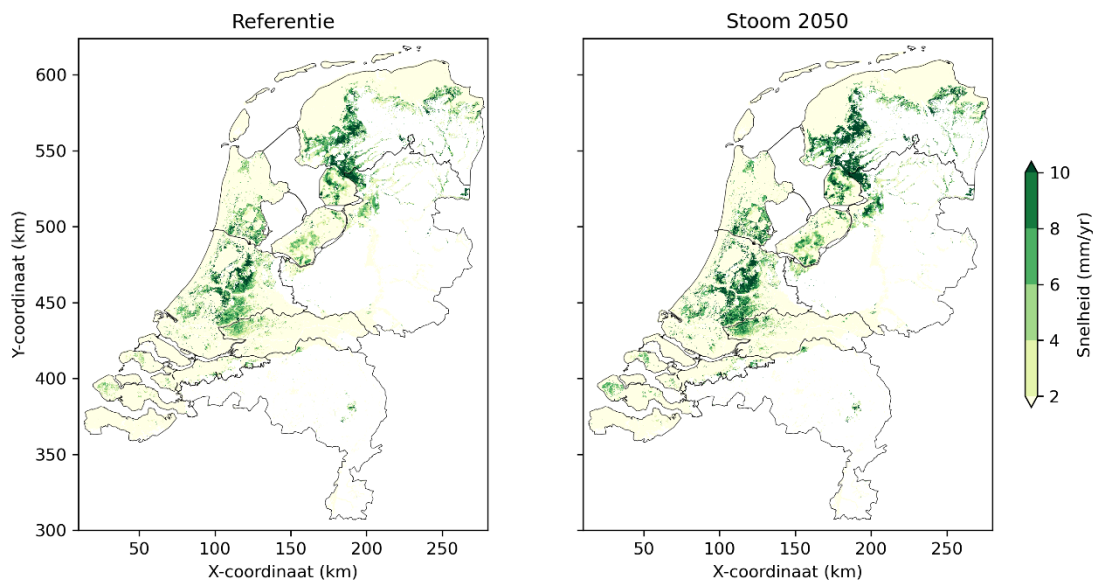
Er is gekozen om voor de CO₂ prijzen gebruik te maken van de bovengrens uit 2024 voor referentie en voor het scenario Stoom 2050. Alle prijzen zijn geïndexeerd naar prijspeil 2023. In dit rapport wordt een prijspeil gehanteerd van € 75 per ton CO₂. De verwachting is dat er in 2025 nieuwe prijzen beschikbaar komen, zowel voor referentie als voor het Stoom2050-scenario. Te zijner tijd zal er dus nog een vermenigvuldiging moeten plaatsvinden.

3.2.3 Resultaten droogterisico

Voor het droogterisico is berekend hoe bodemdaling, CO₂-uitstoot en de bijbehorende kosten zich ontwikkelen onder gemiddelde omstandigheden in het Deltascenario Stoom 2050. Overigens komt de bodemdaling hierin niet alleen door droogte, maar ook door het huidig waterbeheer (lage waterpeilen).

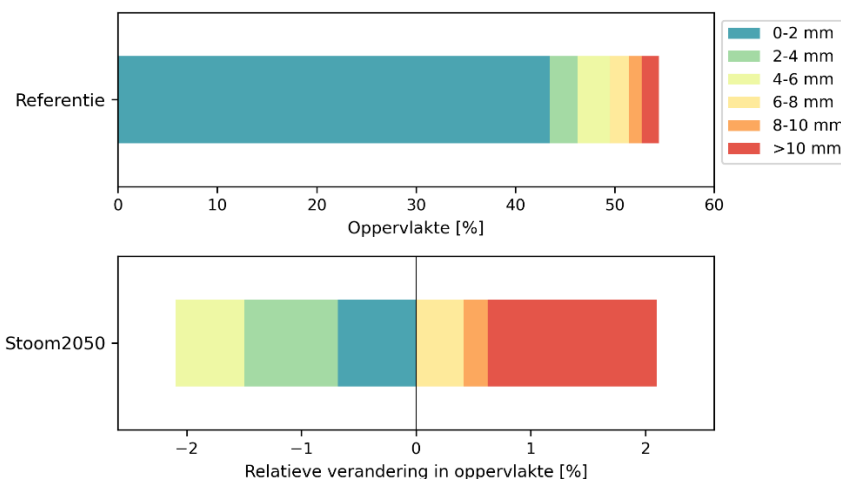
3.2.3.1 Bodemdaling

Bodemdaling speelt zich met name af in laaggelegen gebieden in West- en Noord-Nederland. In de meeste bodemdalingsgevoelige gebieden kunnen snelheden voorkomen van 8 millimeter per jaar of meer. Figuur 3-4 laat dit zien aan de hand van de berekende bodemdalingssnelheden in de referentiesituatie en scenario Stoom 2050. Het is te zien dat het ruimtelijk patroon van bodemdaling hetzelfde blijft onder klimaatverandering, maar dat de snelheid toeneemt.



Figuur 3-4 Bodemdalingssnelheden (mm/jaar) in Nederland in de referentie situatie en het scenario Stoom 2050.

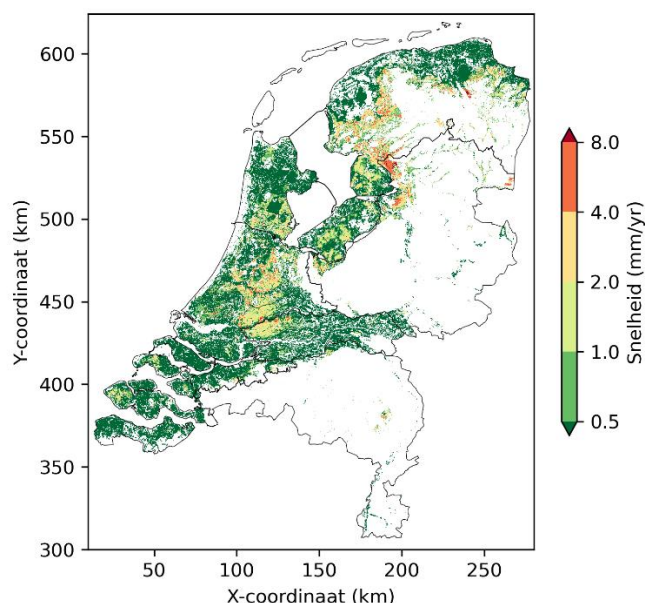
Het bovenste paneel in Figuur 3-5 toont voor de referentie situatie hoeveel procent van het totale oppervlakte van Nederland gevoelig is voor bodemdaling, en hoeveel procent daarvan binnen een bepaalde snelheidsklasse valt: in ongeveer 55% van het Nederlandse oppervlak vindt bodemdaling plaats. In het overgrote deel van de bodemdalingsgebieden vallen de gemodelleerde snelheden op basis van Atlantis binnen de klasse tot 2 mm/jaar.



Figuur 3-5 Indicatief percentage van het totale areaal van Nederland dat binnen een bepaalde bodemdalingssnelheidsklasse valt (bovenste paneel) en percentage verandering van snelheden in scenario Stoom 2050 ten opzichte van de referentie (onderste paneel). Het totale areaal waarin bodemdaling plaatsvindt neemt vrijwel niet toe of af dus het verschil in het onderste paneel laat een verandering van de bodemdalingssnelheid zien.

Het onderste paneel in Figuur 3-5 laat voor het Stoom 2050 scenario de verandering van het oppervlak per snelheidsklasse zien ten opzichte van de referentie. De veranderingen zijn relatief klein: de maximale verandering van Nederlands areaal binnen een snelheidsklasse is 1.5%. Belangrijk hierbij is dat het totale areaal waarin bodemdaling plaatsvindt vrijwel niet toe- of afneemt en dat de verschillen dus veranderingen van de bodemdalingssnelheid zijn in gebieden die nu ook al bodemdaling ondervinden. De figuur laat duidelijk zien dat het oppervlakte in de laagste drie snelheidsklassen afneemt en toeneemt in de hoogste drie klassen. Dat wil zeggen dat het areaal waarin de bodem met 6-10 mm per jaar daalt met circa 2% toeneemt. De grootste verandering in oppervlakte is te zien in de hoogste klasse (>10 mm/jaar). In deze klasse komt er meer dan 500 km² aan areaal bij. Dat de toenames het grootst zijn in de klassen met hogere snelheden, komt met name door de toename van temperatuur als gevolg van klimaatverandering. De verhoogde temperatuur veroorzaakt een snellere afbraak van organisch materiaal wat terug te zien is in een hogere bodemdalingssnelheid.

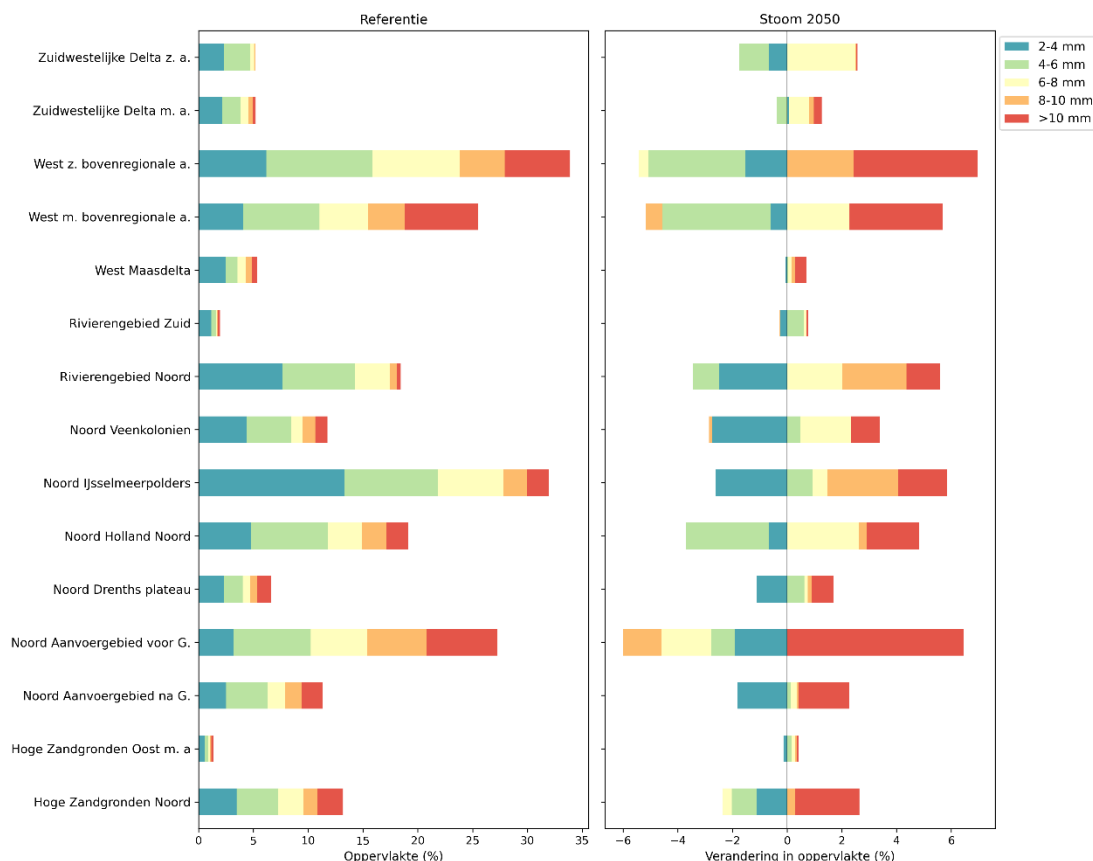
Figuur 3-6 laat de veranderingen in bodemdalingssnelheid tussen de referentie en Stoom 2050 op kaart zien. Hierin blijkt duidelijk dat de grootste veranderingen plaatsvinden in de laaggelegen veenweidepolders, waar bodemdaling in de huidige situatie al het grootst is met meer dan 8 mm/jaar. Hier neemt op veel locaties de absolute bodemdalingssnelheid toe met 2 tot 4 mm/jaar met lokale uitschieters tussen 4 tot 8 mm/jaar of meer.



Figuur 3-6 Verandering in bodemdalingssnelheid (mm/jaar) in Nederland in het scenario Stoom 2050 ten opzichte van de referentie situatie.

In Figuur 3-7 is het ruimtelijke patroon van bodemdalingsgevoelige gebieden goed terug te zien. Met name in regio's als Noord-Holland Noord, Noord-Aanvoergebied voor Gaarkeuken, Noord IJsselmeerpolders en West met en zonder bovenregionale aanvoer is een groot percentage van het oppervlak gevoelig voor bodemdaling.

Het rechterpaneel van Figuur 3-7 laat zien dat de veranderingen areaal per bodemdalingssnelheid-klasse per regio door klimaatverandering relatief klein zijn, net als voor heel Nederland (Figuur 3-5). De grootste verandering bedraagt 6,5% in regio's West zonder bovenregionale aanvoer (ongeveer provincie Utrecht) en Noord aanvoergebied voor Gaarkeuken (Friesland). Opvallend is de grote toename in de klasse >10mm/jaar in regio Noord Aanvoergebied voor Gaarkeuken in Friesland. Andere regio's die ook zeer bodemdalingsgevoelig zijn, zoals West met en zonder bovenregionale aanvoer, kennen ook relatief veel toename maar niet alleen in de hoogste snelheidsklasse.



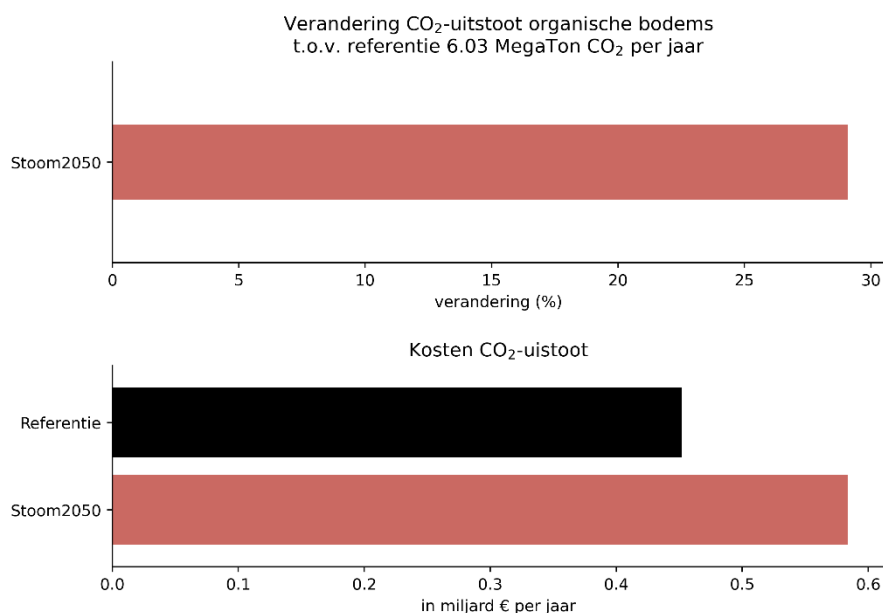
Figuur 3-7 Indicatief percentage areaal van een zoetwater-regio dat binnen een bodemdalingssnelheid klasse ligt in de referentiesituatie (links) en de verandering in oppervlakte per klasse in het Stoom 2050 scenario (rechts).

3.2.3.2 CO₂ uitstoot

Ten opzichte van het referentiescenario neemt de landelijke CO₂-uitstoot uit organische bodems in Stoom 2050 met 29% toe volgens de modelberekening (bovenste paneel Figuur 3-8). Deze toename is grotendeels te verklaren doordat de snelheid van het oxidatieproces in dit scenario 25% hoger ligt als gevolg van de verwachte temperatuurstijging. Dit percentage is een invoerwaarde van de effectmodule, maar kan lokaal iets lager uitvallen als het organisch stofgehalte zo laag is dat dit in Stoom 2050 sneller beperkend werkt dan in het referentiescenario. Daarnaast kan een verlaging van de grondwaterstand in Stoom 2050 ten opzichte van het referentiescenario op sommige plekken leiden tot extra CO₂-uitstoot, doordat hierdoor meer organisch materiaal voor oxidatie beschikbaar komt. Een grondwaterstandsverlaging kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een toename in gewasverdamming of door grotere peilbeheertekorten in Stoom 2050.

De totale kosten die worden toegekend aan deze CO₂-uitstoot stijgen ten opzichte van het referentiescenario met 0,13 miljard euro tot 0,58 miljard euro per jaar in Stoom 2050 (onderste paneel in Figuur 3-8). Deze prijsstijging wordt alleen veroorzaakt door de stijging van de CO₂-uitstoot, de prijs per ton CO₂ is in beide scenario's hetzelfde gehouden. Als we de verandering in CO₂ uitstoot verder uitsplitsen naar enkele zoetwaterregio's, waar relatief veel CO₂-uitstoot plaatsvindt (Tabel 3-2), zien we dat de regionale verschillen behoorlijk groot zijn. Enkele gebieden vallen op met grotere veranderingen dan het landelijk gemiddelde. De grootste relatieve toename vindt plaats in Hoge Zandgronden Midden (73%), Rivierengebied Noord (48%), het Noord Drents plateau (41%) en Hoge Zandgronden Noord (39%). In deze gebieden vindt voor een relatief groot areaal een matige tot forse grondwaterstandverlaging plaats, waardoor dit bovenop het temperatuureffect tot een forse toename in de uitstoot binnen het gebied leidt. De meest opvallende stijging in de Hoge Zandgronden Midden valt te wijten aan een toename van drinkwateronttrekkingen in het gebied rondom de Utrechtse Heuvelrug in scenario Stoom 2050. Hierdoor zal het aangrenzende veengebied rondom de monding van de Eem in het Eemmeer flink verdrogen, waardoor er een forse toename in uitstoot is.

Noord Veenkoloniën (19%) en West met bovenregionale aanvoer (24%) hebben juist een kleinere toename dan gemiddeld (Tabel 3-1). In beide gebieden is er in delen van de gebieden met organische gronden sprake van zowel een grondwaterstandsverhoging (door toename in kweldruk) als verlaging, waardoor het netto effect wat lager is dan het landelijk gemiddelde.



Figuur 3-8 Boven: Verwachte toename van de landelijke CO₂-uitstoot (in %) in Stoom 2050 ten opzichte van het referentiescenario (6.03 Megaton CO₂ per jaar). Onder: De bijbehorende CO₂-kosten (in miljarden) voor zowel het referentiescenario (gebaseerd op een LULUCF-uitstoot van 6,03 megaton CO₂ per jaar) als Stoom 2050.

Tabel 3-1: Overzicht van CO₂-uitstoot in referentiescenario en verwachte toename CO₂-uitstoot in Stoom 2050 t.o.v. van het referentiescenario uitgesplitst per zoetwaterregio.

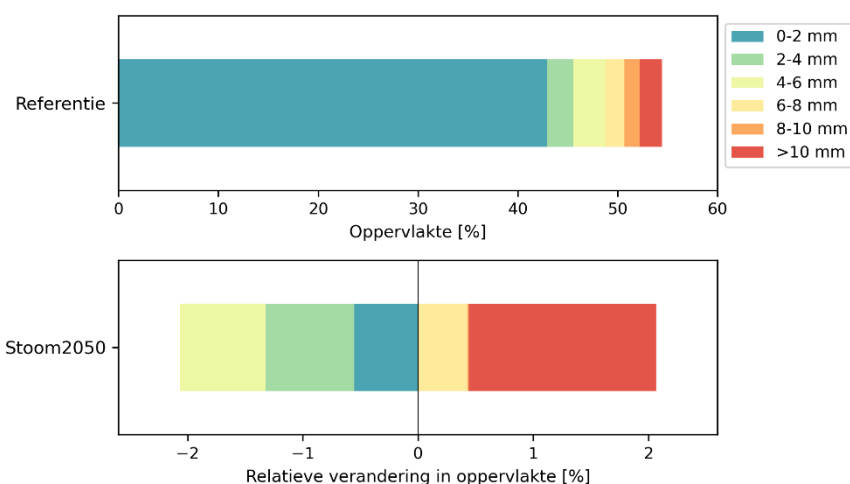
	Referentie Uitstoot (kTon CO ₂ / jr)	Referentie Kosten (miljard euro/jr)	Stoom 2050 toename (%)
Noord	2692	0.202	27
Noord Drents plateau	500	0.038	41
Noord Aanvoergebied voor Gaarkeuken	1099	0.083	27
Noord Aanvoergebied na Gaarkeuken	204	0.015	27
Noord IJsselmeerpolders	63	0.005	8
Noord Holland Noord	430	0.032	27
Noord Waddeneilanden	-	-	-
Noord Veenkoloniën	387	0.029	19
West	1407	0.106	25
West zonder bovenregionale aanvoer	843	0.064	26
West met bovenregionale aanvoer	550	0.041	24
West Maasdelta	14	0.001	21
Rivierengebied	298	0.022	48
Rivierengebied Zuid	4	0.0003	20
Rivierengebied Noord	294	0.022	48
Zuidwestelijke Delta	63	0.005	22
Zuidwestelijke Delta zonder aanvoer	2	0.0002	64
Zuidwestelijke Delta met aanvoer	61	0.005	21
Hoge Zandgronden Oost	1417	0.106	41
Hoge Zandgronden Noord	1014	0.076	39
Hoge Zandgronden Midden	180	0.014	73
Hoge Zandgronden Oost zonder aanvoer	110	0.008	26
Hoge Zandgronden Oost met aanvoer	113	0.008	26
Hoge Zandgronden Zuid	153	0.011	34
Zuid Limburg	3	0.0002	17
Hoge Zandgronden Zuid zonder aanvoer	47	0.003	30
Hoge Zandgronden Zuid met aanvoer	103	0.008	34
Nederland	6030	0.452	29

3.2.4 Resultaten Zoetwateropgave (T=20 jaar)

Hierboven is het maatschappelijk effect van veenoxidatie in een gemiddelde situatie beschreven. In onderstaande paragrafen wordt het maatschappelijk effect in een droge situatie beschreven. Dit wordt ook wel de zoetwateropgave genoemd. De zoetwateropgave laat zien hoe bodemdaling, CO₂-uitstoot en de bijbehorende kosten zich ontwikkelen in een situatie met een gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) die eens in de 20 jaar voorkomt voor het referentie- en Stoom 2050 scenario.

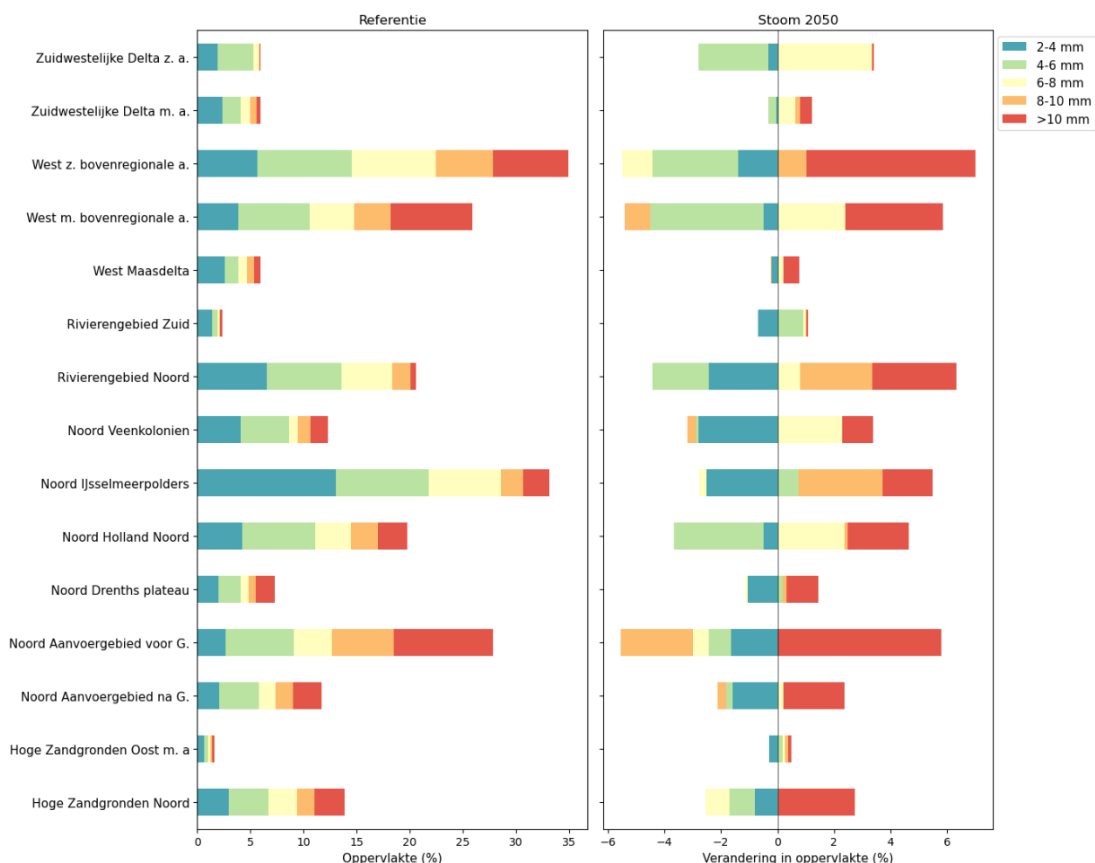
3.2.4.1 Bodemdaling

Figuur 3-9 laat de resultaten voor bodemdaling zien tijdens een situatie waarin de grondwaterstanden gelijk zijn aan een GLG met een herhalingsperiode van 20 jaar. Het bovenste paneel toont voor de referentiesituatie hoeveel procent van de totale oppervlakte van Nederland gevoelig is voor bodemdaling, en hoeveel procent daarvan binnen een bepaalde snelheidsklasse valt. Het onderste paneel toont de verandering per klasse door klimaatverandering (scenario Stoom 2050) t.o.v. de referentie 1/20 GLG-situatie. Te zien is dat de totale oppervlakte van Nederland dat gevoelig is voor bodemdaling (ca. 55%) vrijwel niet verandert. Ten opzichte van de gemiddelde resultaten voor het droogterisico (Figuur 3-5) zijn de verschillen relatief klein: het areaal met de hoogste snelheidsklasse (>10 mm/jaar) neemt heel licht toe, maar “ten koste van” het areaal in klasse 6-8 mm/jr. Gemiddeld genomen neemt de bodemdalingssnelheid echter iets toe omdat de GLG over het algemeen lager ligt.



Figuur 3-9 Indicatie van het totale areaal van Nederland dat binnen een bepaalde bodemdalingssnelheidsklasse valt (1/20jaar; bovenste paneel) en percentage verandering van snelheden in scenario Stoom 2050 ten opzichte van de referentie in 1/20 jaar (onderste paneel).

In de verschillende zoetwaterregio's (Figuur 3-10) zijn ook geen opvallende verschillen zichtbaar ten opzichte van de droogterisico resultaten (Figuur 3-7).



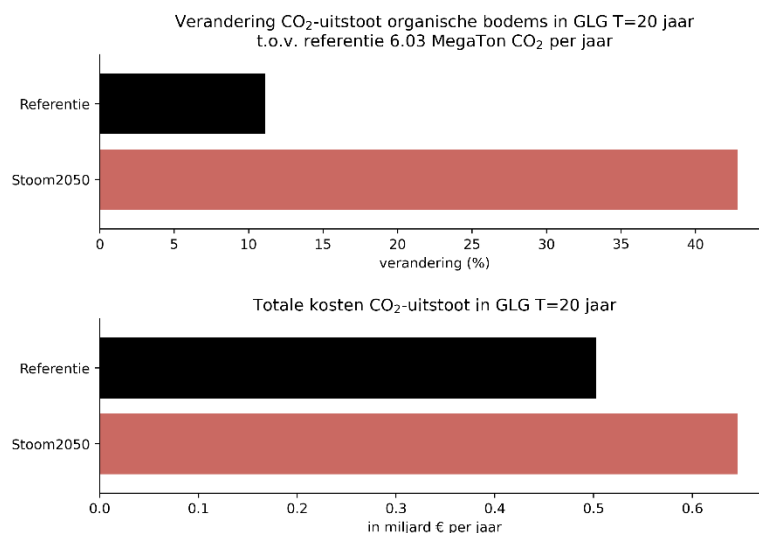
Figuur 3-10 Indicatief percentage areaal van een zoetwater-regio dat binnen een bodemdalingssnelheid klasse ligt in de referentiesituatie (links) en de verandering in oppervlakte per klasse in het Stoom 2050 scenario (rechts) op basis van de zoetwateropgave resultaten behorende bij een GLG-situatie met herhalings tijd $T=20$ jaar.

3.2.4.2 CO₂-uitstoot

Bij een GLG-situatie met een herhalings tijd van 20 jaar neemt de landelijke CO₂-uitstoot in Stoom 2050 met 32 procentpunt toe ten opzichte van het referentieklimaat, van 11% naar 43% van de gemiddelde referentie uitstoot (droogterisico) (Tabel 3-2 en Figuur 3-11). Dit betekent dat bovenop de structurele toename van CO₂-uitstoot door klimaatopwarming en lagere grondwaterstanden, een $T=20$ droogtejaar in Stoom 2050 leidt tot een extra uitstoot. Deze extra CO₂-uitstoot komt voort uit een verdere daling van de grondwaterstanden bij droogte, wat leidt tot meer afbraak van organisch materiaal (dieper in het profiel) en dus een hogere CO₂-emissie.

De totale kosten van deze extra CO₂-uitstoot stijgen met 0,15 miljard euro tijdens een $T=20$ droogte in Stoom 2050 t.o.v. het referentiescenario (Figuur 3-4). Hierbij is de prijs van per ton CO₂ weer gelijk gehouden tussen Stoom 2050 en het referentiescenario, en is de toename in kosten puur toe te schrijven aan de toename in de CO₂-uitstoot.

De verdeling van de CO₂-uitstoot over de verschillende deelgebieden laat in zowel het referentiescenario als in het Stoom 2050-scenario dezelfde patronen zien als bij het droogterisico (Tabel 3-2). De hoogste toenames worden opnieuw berekend in Hoge Zandgronden Midden (86 procentpunt extra t.o.v. $T=20$ in referentie), Rivierengebied Noord (60 procentpunt extra), en Noord-Drenths Plateau (47 procentpunt extra). In deze gebieden veroorzaakt de 1/20 droogte een forse grondwaterstands daling, wat leidt tot een sterke stijging van de CO₂-uitstoot. Het effect van de temperatuurstijging op de oxidatiesnelheid is immers in alle gebieden ongeveer gelijk.



Figuur 3-11 Boven: Verwachte toename van de landelijke CO₂-uitstoot (in %) in GLG-situatie met een herhalingsstijg van 20 jaar (T=20) voor Referentie en Stoom 2050. De toename is (in %) ten opzichte van de gemiddelde situatie in het referentiescenario (6.03 Megaton CO₂ per jaar). Onder: De bijbehorende CO₂-kosten (in miljarden) voor zowel het referentiescenario als Stoom 2050.

Daarentegen blijven de relatieve toenames in CO₂-uitstoot beperkt in Noord Veenkoloniën (21 procentpunt extra) en West-Nederland met bovenregionale aanvoer (28 procentpunt extra).

Tabel 3-2: Overzicht van CO₂-uitstoot in referentiescenario en verwachte toename CO₂-uitstoot tijdens een GLG-situatie met een herhalingsstijg T=20 jaar uitgesplitst per zoetwaterregio voor het referentie- en Stoom 2050 scenario. De toename is (in %) ten opzichte van de gemiddelde situatie in het referentiescenario (6.03 Megaton CO₂ per jaar).

	Referentie gemiddeld Uitstoot (kTon CO ₂ / jr)	Referentie gemiddeld Kosten (miljard euro/jr)	Referentie 1/20 toename (%)	Stoom 2050 1/20 toename (%)
Noord	2692	0.202	11	40
Noord Drents plateau	500	0.038	19	66
Noord Aanvoergebied voor Gaarkeuken	1099	0.083	10	39
Noord Aanvoergebied na Gaarkeuken	204	0.015	9	38
Noord IJsselmeerpolders	63	0.005	7	17
Noord Holland Noord	430	0.032	13	41
Noord Waddeneilanden	-	-	-	-
Noord Veenkoloniën	387	0.029	4	25
West	1407	0.106	8	34
West zonder bovenregionale aanvoer	843	0.064	9	37
West met bovenregionale aanvoer	550	0.041	6	31
West Maasdelta	14	0.001	10	32

	Referentie gemiddeld Uitstoot (kTon CO ₂ /jr)	Referentie gemiddeld Kosten (miljard euro/jr)	Referentie 1/20 toename (%)	Stoom 2050 1/20 toename (%)
Rivierengebied	298	0.022	26	86
Rivierengebied Zuid	4	0.0003	8	28
Rivierengebied Noord	294	0.022	26	87
Zuidwestelijke Delta	63	0.005	8	33
Zuidwestelijke Delta zonder aanvoer	2	0.0002	32	123
Zuidwestelijke Delta met aanvoer	61	0.005	8	30
Hoge Zandgronden Oost	1417	0.106	15	60
Hoge Zandgronden Noord	1014	0.076	15	57
Hoge Zandgronden Midden	180	0.014	23	109
Hoge Zandgronden Oost zonder aanvoer	110	0.008	5	33
Hoge Zandgronden Oost met aanvoer	113	0.008	13	44
Hoge Zandgronden Zuid	153	0.011	11	45
Zuid Limburg	3	0.0002	14	34
Hoge Zandgronden Zuid zonder aanvoer	47	0.003	17	52
Hoge Zandgronden Zuid met aanvoer	103	0.008	11	45
Nederland	6030	0.452	11	43

3.2.5 Conclusies

De resultaten laten zien dat klimaatverandering in Stoom 2050 een behoorlijk effect heeft op bodemdaling van slappe bodems en de daarbij horende CO₂-uitstoot uit organische bodems. Bij hogere (bodem)temperaturen en een lagere grondwaterstand als gevolg van meer verdamping zal veenaafbraak versnellen. Voor het droogterisico in een gemiddelde situatie gaat het om een stijging met 0,13 miljard euro per jaar tot 0,58 miljard euro per jaar in Stoom 2050. In een T=20 GLG-situatie gaat het om een stijging van 0,15 miljard euro tot 0,65 miljard euro in een 1/20 GLG-jaar in Stoom 2050, t.o.v. een 1/20 GLG-jaar in het referentiescenario.

De resultaten zijn gebaseerd op diverse aannames en onzekerheden en kunnen mogelijk behoorlijk afwijken van de realiteit. De methode is vooral bedoeld om relatieve veranderingen van bodemdaling en CO₂-uitstoot tussen scenario's te onderzoeken. In de aanpak effectmodule bodemdaling (Melman et al., 2023) wordt ingegaan op diverse beperkingen van Atlantis. In het algemeen geldt dat het mechanistische begrip van de processen die verantwoordelijk zijn voor bodemdaling en veenaafbraak nog volop in ontwikkeling is, en dat de in deze studie gebruikte modelconcepten noodzakelijkerwijs vereenvoudigd zijn en de onzekerheid daardoor groot is.

Binnen de effectmodule is ook gekeken naar onzekerheden. Met onzekerheden wordt hierbij de variatie in lokale bodemdalingssnelheid bedoeld die mogelijk is als gevolg van de verschillende bandbreedte van de GLG binnen een scenario. Tabel 3-3 laat de onzekerheidsmarges in bodemdalingssnelheden zien voor de referentie en Stoom 2050 scenario's. De tabel laat zien dat de onzekerheden in beide situaties nagenoeg gelijk zijn. De minimale en maximale bodemdalingssnelheid kunnen zo'n 4% lager (referentie) en 16% hoger (Stoom2050) liggen. Uitgedrukt in bodemdalingssnelheid kan gemiddeld genomen dus rekening worden gehouden met een onzekerheid van ongeveer 1 mm/jaar.

Lokaal kan de onzekerheid echter wel veel groter zijn en oplopen tot 25% of meer. Hierdoor kan lokaal de snelheid met ongeveer 3 mm/jaar onderschat worden.

Tabel 3-3 Gemiddelde onzekerheidsmarge in de bodemdalingssnelheden voor de referentie en scenario Stoom 2050. De onzekerheid is uitgedrukt als de gemiddelde verhouding tussen de minimale snelheid en de gemiddelde snelheid (Lager) en de gemiddelde verhouding tussen de maximale snelheid en gemiddelde snelheid (Hoger) in het totale bodemdalingsgevoelige gebied (waar de snelheid hoger is dan 0.1 mm/jaar). Lokaal kan de onzekerheid dus groter uitvallen.

	Lager (%)	Hoger (%)
Referentie	-4%	+11%
Stoom 2050	-4%	+12%

Tenslotte is ook gekeken naar het effect van de variatie van de GLG binnen de scenario Stoom 2050 voor de landelijke CO₂-projecties. De berekende landelijke toename van CO₂-uitstoot door veenoxidatie van 27% heeft een bandbreedte tussen de 12% en 40%. Per zoetwaterdeelregio kunnen deze verschillen uiteraard groter zijn.

3.3 Maatschappelijke kengetallen

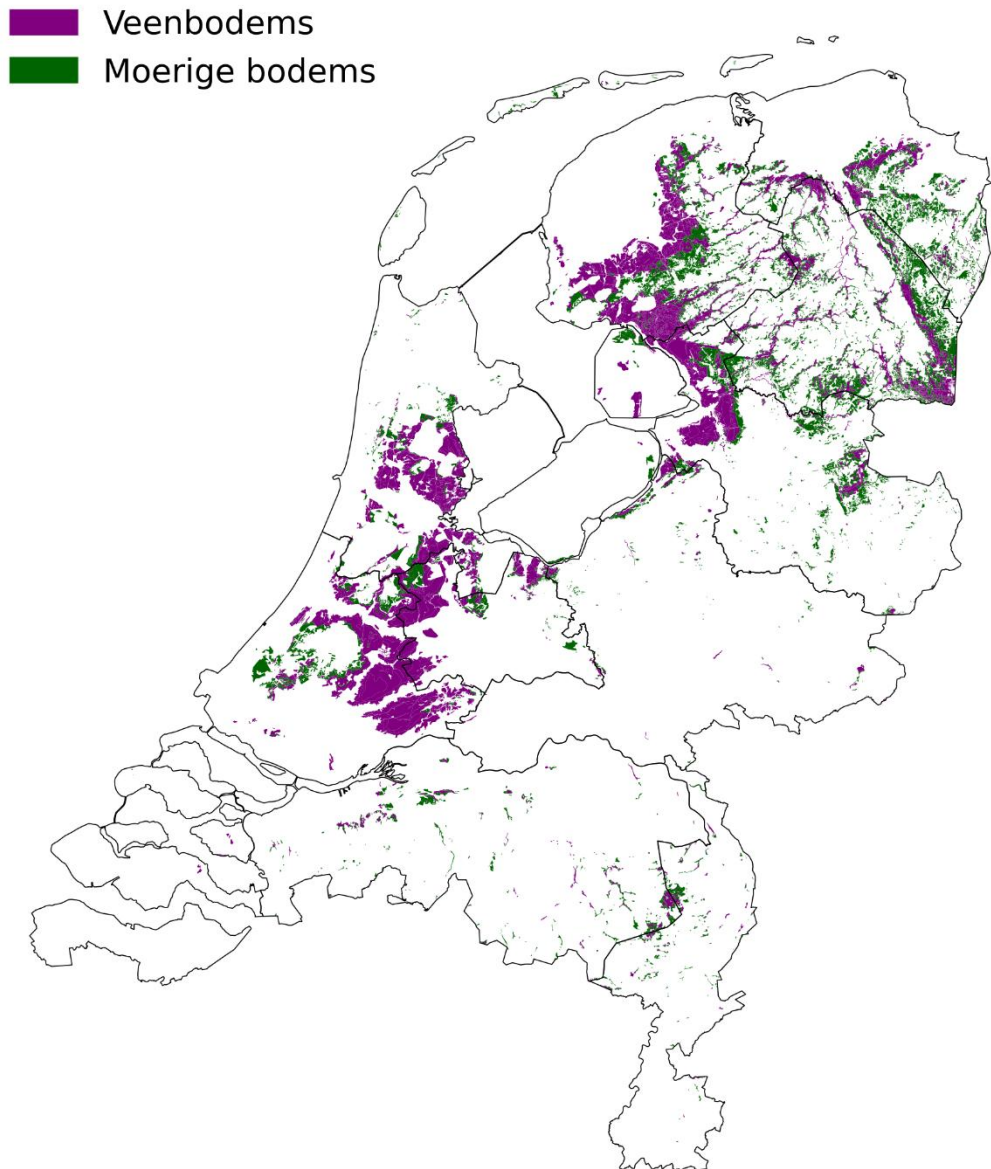
Een kengetal laat zien wat het maatschappelijk effect is van veranderingen in waterbeschikbaarheid. Het doel van de maatschappelijke kengetallen is om op een eenvoudige wijze het effect van grondwaterstandsverandering op de CO₂-uitstoot uit organische gronden te berekenen voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat.

3.3.1 Uitgangspunten

De uitstoot van CO₂ uit organische bodems is een complex proces dat door veel verschillende factoren wordt bepaald. Op dit moment wordt er aan een procesmodel gewerkt, SOMERS (Melman et al., 2024), wat beter rekening houdt met de complexiteit van de uitstootprocessen. Bij de kengetallen is er echter expliciet voor gekozen om een groot deel van deze complexiteit te negeren en eenvoudige relaties op te stellen op basis van de volgende uitgangspunten:

- Er bestaan al meerdere lineaire relaties tussen de grondwaterstand en CO₂-uitstoot op basis van metingen of modellen (e.g. Aben et al., 2024; Arets et al., 2023). Er is echter gekozen om een nieuwe relatie op te stellen tussen de GLG en de gemodelleerde CO₂-uitstoot op basis van de resultaten van de effectmodule, zodat de aanpak van de kengetallen aansluit op de werkwijze van de effectmodule.

- Er wordt een aparte relatie opgesteld voor veenbodems en moerige bodems, maar er wordt verder geen onderscheid gemaakt in de invloed van het bodemtype (bijv. aanwezigheid van een kleilaag of hoeveelheid organische stof) (Figuur 3-12). De gevonden relaties kunnen gebruikt worden om voor grote gebieden een orde-grootte inzicht te krijgen in het effect van een verandering van de grondwaterstand op de CO₂-uitstoot, maar heeft weinig waarde op kleine schaal.
- Bij het berekenen van de kengetallen is alleen gekeken naar het effect op de CO₂-uitstoot. Uitstoot van lachgas en methaan wordt in dit rapport niet meegenomen.
- De kengetal-relaties zijn berekend voor de CO₂ uitstoot zoals deze uit het Atlantis-model komt. Hier zijn vervolgens geen verdere correcties op toegepast. Voor de helling (het kengetal) is de absolute waarde van de uitstoot namelijk van belang. Eerdere resultaten uit de effectmodule bodemdaling presenteren veelal relatieve getallen waarvoor de absolute waarde van de uitstoot minder uitmaakt, maar hier is deze dus wel belangrijk.
- De gevonden relatie tussen de grondwaterstand en de CO₂-uitstoot wordt gevalideerd aan de hand van resultaten van het SOMERS-model (Melman et al., 2024). SOMERS is een procesmodel en gevalideerd voor de CO₂-uitstoot uit veenbodems. Er is gekozen om SOMERS te gebruiken en niet direct de metingen uit Aben et al. (2024), omdat de metingen uit Aben et al. (2024) zijn opgesteld ten opzichte van de gemiddelde zomergrondwaterstand en niet de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG). Met SOMERS kan de relatie ten opzichte van de GLG wel worden opgesteld. SOMERS is gevalideerd met metingen voor veenbodems. Dit is echter nog niet gedaan voor moerige bodems vanwege het ontbreken van metingen op dit soort bodems. De kengetallen voor moerige bodems kennen dan ook een grotere onzekerheid. Zie voor een vergelijking met metingen Appendix A.1 en voor een vergelijking tussen resultaten van Atlantis en SOMERS Appendix A.2.



Figuur 3-12 Verdeling van veen en moerige bodems in Nederland volgens de Bro Bodemkaart v2023 (Wageningen Environmental Research, 2023).

3.3.2 Methode

De lineaire relatie is opgesteld tussen de voor de effectmodule bodemdaling berekende gemiddelde GLG (zie sectie 3.2.2.5) en gemodelleerde CO₂-uitstoot voor 2 scenario's op basis van de Basisprognoses2018 (IPLO, 2018). Beide scenario's zijn gedraaid met het voorkeurspakket.

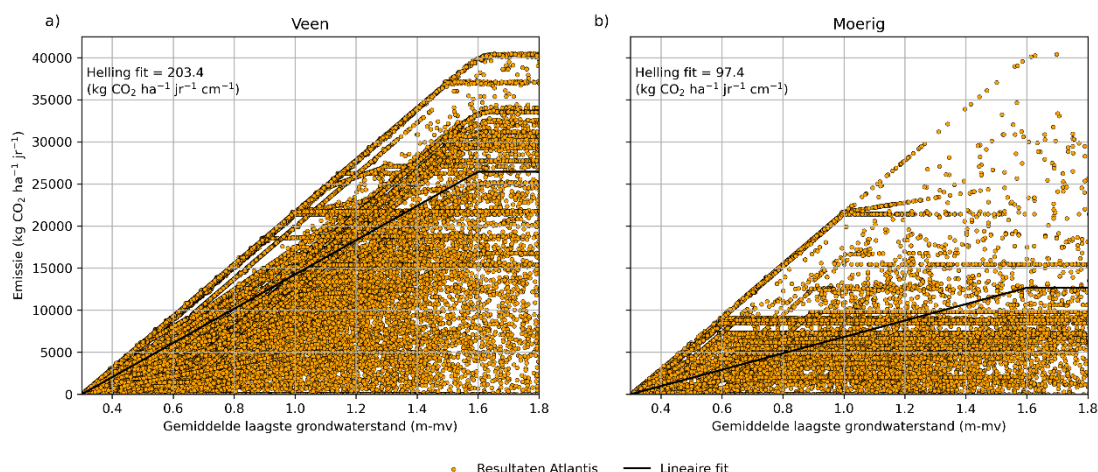
- Scenario Referentie 2017: dit is het scenario voor het huidige klimaat zonder socio-economische verandering.
- Scenario Stoom 2050: dit toekomstscenario voor 2050 gaat uit van een sterke bevolkings- en economische groei gecombineerd met een sterke klimaatverandering (Wolters et al., 2017). De sterke bevolkings- en economische groei zorgt voor meer verstedelijking, een toename van de ruimtelijke druk en een verandering in het water- en landgebruik. Bij een scenario met een sterke klimaatverandering hoort een grote temperatuurstijging en wordt de neerslag heviger. Ook is er een toename van de droogte en een groter neerslagtekort dan in het referentiescenario.

De relaties zijn apart opgesteld voor de CO₂-uitstoot uit veenbodems en moerige bodems. Deze veenbodems en moerige bodems zijn geselecteerd op basis van de indeling in de BRO bodemkaart v2023 (Wageningen Environmental Research, 2023). De resultaten voor de GLG en de CO₂-emissie zijn tegen elkaar uitgezet in een puntenwolk. Door deze puntenwolken is vervolgens een lineaire trend bepaald. De helling hiervan geeft aan hoeveel kg CO₂ reductie er gemiddeld is over alle veen- of moerige bodems in Nederland voor een bepaalde verhoging van de grondwaterstand. Hierbij zijn alle punten meegenomen met een grondwaterstand van minder dan 1.6 meter onder maaiveld. In Atlantis is daarnaast vastgelegd dat er bij een GLG van minder dan 0.3 meter onder maaiveld er geen oxidatie plaats vindt. Om deze reden snijdt de lineaire fit hier het nulpunt.

3.3.3 Resultaten

3.3.3.1 Relatie tussen de grondwaterstand en de CO₂ uitstoot in het huidige klimaat

Na deze validatie stappen zijn, voor veenbodems en voor moerige bodems afzonderlijk, de GLG en CO₂-emissies tegen elkaar uitgezet in een grote puntenwolk (Figuur 3-13). De GLG staat in dit figuur op de x-as in meter ten opzichte van het maaiveld. De emissies zijn zichtbaar op de y-as in kg CO₂ per hectare per jaar. Ieder punt van de puntenwolk is hierin een gridcel op een veen- of moerige bodem in Nederland.



Figuur 3-13 De grondwaterstanden uitgezet tegen de bijbehorende CO₂ uitstoot in het referentie klimaat voor a) veenbodems en b) moerige bodems. Met oranje bolletjes zijn de modelresultaten weergegeven en de zwarte lijn is een lineaire fit door deze gemodelleerde resultaten.

De volgende relatie tussen de uitstoot en de grondwaterstand kan worden verkregen:

$$CO2_{veen,ref} = 306.8(GLG - 30) * O_{max}$$

Hierbij is:

- $CO2_{veen,ref}$ is de CO₂-uitstoot uit veenbodems voor het referentiescenario in $kg\ ha^{-1}jr^{-1}$
- GLG de gemiddeld laagste grondwaterstand in cm-mv
- O_{max} het percentage oxidatie dat kan plaatsvinden. Dit percentage is voor referentie gemiddeld 66.3% voor veengronden en 31.5% voor moerige gronden.

De bovenstaande relatie is geldig voor grondwaterstanden tussen de 30 cm en 160 cm onder maaiveld.

Het kengetal is vervolgens gelijk aan 306.4 vermenigvuldigd met O_{max} . Op basis van de lineaire fit is er voor veengronden dus een reductie van $66.3\% \cdot 306.8 = 203.4$ kg CO₂ per hectare per jaar voor een grondwaterstand verhoging van 1 cm. Voor moerige gronden is de reductie minder groot met $31.5\% \cdot 306.8 = 97.4$ kg CO₂ per hectare per jaar voor een verhoging van de grondwaterstand met 1 cm (Tabel 3-4). Dit verschil komt doordat moerige bodems binnen het bodemprofiel minder organisch materiaal bevatten, waardoor bij een gelijke grondwaterstand er minder organisch materiaal beschikbaar is voor afbraak dan bij veenbodems.

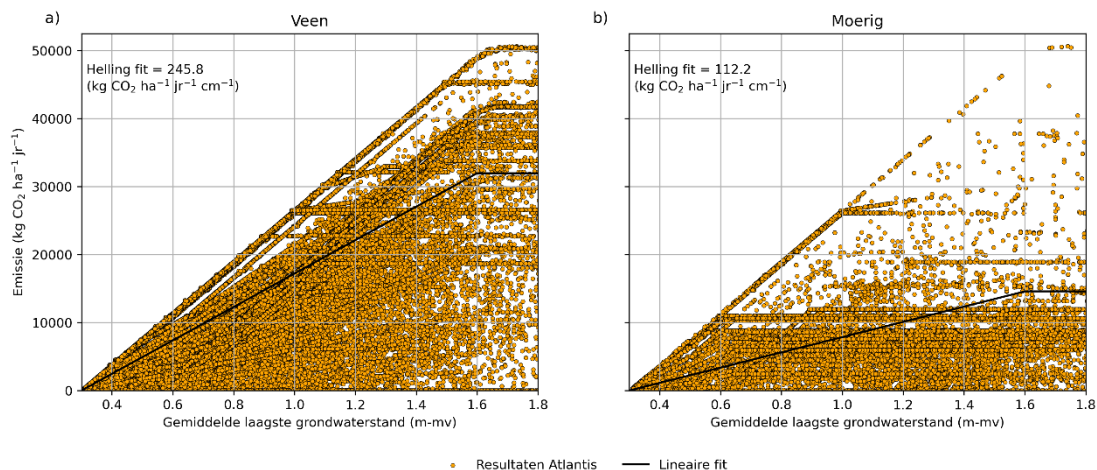
Verder is in Figuur 3-13 een grote spreiding te zien in de gemodelleerde emissies, zowel voor veenbodems als voor moerige bodems: bij een gelijke grondwaterstand komen er zowel hoge als lage emissies voor. Deze spreiding kan grotendeels verklaard worden variaties in het organisch stofgehalte binnen het bodemprofiel. Indien er een kleilaag bovenop een veenlaag aanwezig is, heeft dit een limiterende werking op de uitstoot. De bovengrens van de emissie in Figuur 3-13 wordt gehaald wanneer er voldoende organische massa aanwezig is voor maximale oxidatie en vrijkomen van CO₂. In dat geval vormt de hoogte van de grondwaterstand de enige limitatie.

3.3.3.2 Relatie tussen de grondwaterstand en de CO₂-uitstoot in een toekomstig klimaat

Door klimaatopwarming zal de gemiddelde bodemtemperatuur in de toekomst hoger liggen. Bij een hogere bodemtemperatuur verlopen oxidatieprocessen efficiënter, wat leidt tot een toename van de CO₂-uitstoot vanuit organische bodems. In Figuur 3-14 is de emissie uitgezet tegen de grondwaterstand voor het Stoom2050-klimaat. De uitstoot is nu inderdaad hoger bij een gelijke grondwaterstand dan in het referentiescenario. De helling, en dus het kengetal, neemt ook toe ten opzichte van het referentiescenario. Dit betekent dat de reductie die in het Stoom2050-scenario wordt behaald met een verhoging van de grondwaterstand groter is dan in het referentiescenario. De volgende relatie kan worden opgesteld voor het Stoom2050-scenario:

$$CO2_{veen,ref} = 376.4(GLG - 30) * O_{max}$$

Het percentage oxidatie (O_{max}) voor Stoom2050 is 65.3% voor veenbodems en 29.8% voor moerige bodems. Deze percentages verschillen iets van de percentage horende bij het referentie scenario. Dit komt omdat er in het Stoom2050-scenario een groter deel van het bodemprofiel beschikbaar is voor oxidatie, aangezien de GLG gemiddeld gezien lager ligt. Bij veenbodems is de reductie in het Stoom2050-klimaat dus gemiddeld $65.3\% \cdot 376.4 = 245.8$ kg CO₂ per hectare per jaar voor een verhoging van de grondwaterstand met 1 cm. Bij moerige bodems is deze reductie $29.8\% \cdot 376.4 = 112.2$ kg CO₂ per hectare per jaar voor dezelfde verhoging van de grondwaterstand in dit toekomstscenario. Ten opzichte van het referentieklimaat neemt de helling in het Stoom2050-klimaat toe met 21% voor veenbodems en 15% voor moerige bodems.



Figuur 3-14 De grondwaterstanden uitgezet tegen de bijbehorende CO₂ uitstoot in het Stoom2050 klimaat voor a) veenbodems en b) moerige bodems. Met oranje bolletjes zijn de modelresultaten weergegeven en de zwarte lijn is een lineaire fit door deze gemodelleerde resultaten.

3.3.4 Rekenvoorbeeld

Uitgangssituatie: Veenbodem met een grondwaterstand van 50 cm onder het maaiveld.

Nieuwe situatie: er wordt een maatregel uitgevoerd waardoor de GLG naar 20 cm onder maaiveld gaat.

Berekening: In dit voorbeeld is er een GLG-verhoging met 30 cm. Volgens de kengetallen draagt een verhoging boven de 30 cm onder maaiveld niet meer bij aan een reductie van CO₂-uitstoot. Dit beeld komt overeen met de observatie dat bij dusdanig natte condities weinig ruimte is voor veenoxidatie. Dit betekent dat alleen de 20 cm verhoging van 50 cm-mv naar 30 cm onder maaiveld zorgt voor een afname van de CO₂-uitstoot. Deze 20 cm grondwaterstandsverhoging heeft als gevolg dat de emissie in het referentie scenario gereduceerd wordt met $203.4 \times 20 = 4068$ kg CO₂ per hectare per jaar. In het Stoom 2050 klimaat is de reductie $245.8 \times 20 = 4916$ kg CO₂ per hectare per jaar voor eenzelfde verhoging van de grondwaterstand.

3.3.5 Conclusie

De gevonden kengetallen voor beide scenario's zijn samengevat in Tabel 3-4 en kunnen worden gebruikt in economische verkenningen. Deze kengetallen gelden voor grondwaterstanden tussen de 30 en 160 cm onder het maaiveld. De kengetallen zijn enkel bruikbaar voor grondwaterstandsveranderingen binnen veengronden en moerige gronden.

Tabel 3-4: Kengetallen voor beide scenario's per cm verandering van de grondwaterstand, voor veengronden en voor moerige gronden. De getoonde kengetallen zijn in kg CO₂ per hectare per jaar per cm verandering van de grondwaterstand.

	Veengronden	Moerige gronden
Referentie 2017	203.4	97.4
Stoom 2050	245.8	112.2

Met behulp van de CO₂-prijzen (zie Tabel 3-1) kunnen deze kengetallen omgerekend worden naar euro's:

Tabel 3-5: Kengetallen voor beide scenario's per cm verandering van de grondwaterstand, voor veengronden en voor moerige gronden. De getoonde kengetallen zijn in euro per hectare per jaar per cm verandering van de grondwaterstand.

	Veengronden	Moerige gronden
Referentie 2017	€ 15,26	€ 7,31
Stoom 2050	€ 18,43	€ 8,42

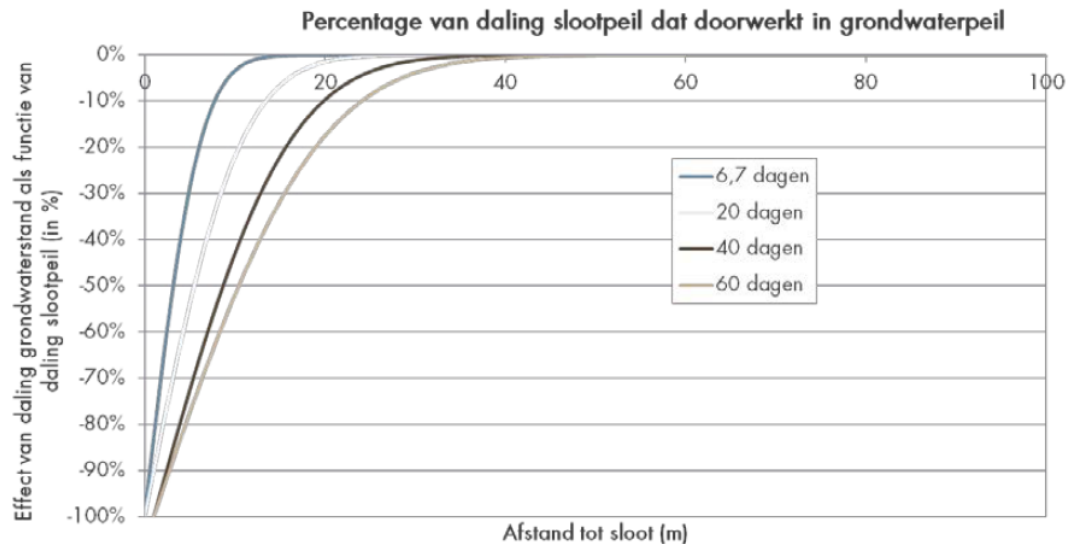
3.3.6 Vertaling kengetal naar oppervlaktewater

In deze paragraaf wordt beredeneerd wat de relatie is tussen de wateraanvoer naar de sloten en de uitzakking van de grondwaterstanden per zoetwaterregio. Kortom: hoeveel oppervlaktewater is er nodig om de GLG met 1cm te reduceren en dus CO₂ uitstoot te beperken? Met deze relatie kunnen de kengetallen voor CO₂ uitstoot (per cm grondwaterstandstijging) worden omgerekend naar kengetallen die betrekking hebben op oppervlaktewater. Hiermee kan het effect van een oppervlaktewater-maatregel op CO₂ uitstoot worden bepaald.

Veenafbraak en dus CO₂ uitstoot hebben een sterke relatie met de oppervlakte- en grondwaterstanden en dus droogte. De veenafbraak is sterk gerelateerd aan de zomergrondwaterstand: een hogere zomergrondwaterstand vermindert de maaiveldddaling. Dat juist de grondwaterstand in de zomer van belang is voor dit proces, heeft ermee te maken dat veenafbraak een temperatuur gestuurd proces is en de grondwaterstanden in de zomer dalen: 80% van de zakking vindt plaats in het zomerhalfjaar.

De grondwaterstand zelf is een resultante van de af- en aanvoer in de bovengrond (verdamping en neerslag) en de toe- of afvoer uit de sloot. Door het slootpeil dus op niveau te houden, kan uitzakking van de grondwaterstand beperkt worden. Tijdens perioden van droogte is echter vaak sprake van watertekort waardoor het slootpeil niet gehandhaafd kan worden en de grondwaterstanden mee uitzakken.

De analyse voor de relatie tussen oppervlaktewater en grondwater is gebaseerd op een eerdere studie van Deltares, Stratelligence en LEI (Deltares et al., 2015) waarin onder andere hydrologische functies zijn uitgewerkt via een analytische formule die het geïsoleerde effect van een peilverlaging op de grondwaterstand beschrijft. Op basis hiervan kan het effect van een peildaling worden bepaald op de grondwaterstand op verschillende afstanden van de sloot in het perceel. Er is rekening gehouden met de combinatie van de mate van uitzakking (in centimeter ten opzichte van het streefpeil) en de duur (in dagen). Doordat historische data over polderpeilen ontbraken, is gebruik gemaakt van met het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) gesimuleerde slootpeilen voor de periode 1961-2010. Figuur 3-15 laat zien dat op zo'n 50 m afstand van de sloot het effect verdwenen is en dat het invloedgebied toeneemt als de uitzakking van het slootpeil langer duurt. Bijvoorbeeld: wanneer het slootpeil gedurende 40 dagen 10 cm gezakt is, zakt de grondwaterstand 1 cm uit op een afstand van 20 m vanaf de sloot. Wanneer het slootpeil op hetzelfde niveau wordt gehouden, kan deze daling dus worden voorkomen.



Figuur 3-15 Relatie daling slootpeil en grondwaterstand naast sloot afhankelijk van duur peiluitzakking (figuur uit Deltares et al. (2015) op basis van data afkomstig van Deltares, NHI).

Op basis van de hydrologische functies in Figuur 3-15 zou je kunnen voorspellen hoeveel grondwaterstand verlaging er is bij een bepaalde daling van het slootpeil. Hiervoor is per zoetwaterregio bepaald (1) wat de gemiddelde slootafstand is, (2) wat de gemiddelde duur is van watertekort voor peilbeheer in het zomerhalfjaar. Vervolgens kan met behulp van het totale oppervlak aan oppervlaktewater bepaald worden hoeveel oppervlaktewater nodig is om een (extra) grondwaterstandsuitzakking van 1 cm in het zomerhalfjaar te voorkomen. Door het slootpeil op niveau te houden kan dus een daling van de grondwaterstand tegen worden gegaan.

De data en aannames die gebruikt zijn voor de berekening zijn als volgt.

- De gemiddelde perceelsbreedte is gebruikt vanuit de database van het SOMERS model. Percelen waar geen organisch stof aanwezig is, en dus ook geen sprake is van veenoxidatie, zijn dan ook niet meegenomen.
- Het effect van het slootpeil op de grondwaterstand is bepaald op 1/3^e vanaf de sloot tot aan het midden van het perceel. De uitzakking op dit punt is immers redelijk representatief voor de uitzakking in het midden van het perceel.
- De duur van de peiluitzakking is bepaald aan de hand van LHM resultaten tussen 2013 en 2019. De duur is gedefinieerd als het gemiddelde maximale dagen aan tekort voor peilbeheer tijdens het zomerhalfjaar. In alle deelregio's was de gemiddelde maximale duur van het tekort 60 dagen of meer. Daarom is uitgegaan van de functie behorende bij 60 dagen.
- Het totale oppervlakte aan oppervlaktewater per deelregio is bepaald aan de hand van LHM invoer voor het Mozart model.
- Er wordt aangenomen dat alle sloten verticale wanden hebben.
- Er wordt aangenomen dat de grafieken in Figuur 3-15 van toepassing zijn op alle percelen met organisch stofgehalte in Nederland. In werkelijkheid zal het effect van slootuitzakking op de grondwaterstand zeer verschillen tussen percelen en regio's.

De resultaten voor de benodigde (extra) oppervlaktewateraanvoer is te vinden in Tabel 3-6. Voor de meeste deelregio's is het benodigde water tussen 1 en 2 Mm³/jaar. De percelen in de noordelijke regio's zijn over het algemeen breder (gemiddeld 80 meter vergeleken met minder dan 40 meter in de regio's West), waardoor grondwaterstanden minder kunnen worden beïnvloed door het slootpeil. Regio IJsselmeerpolders springt ver boven de andere regio's uit wat betreft benodigd oppervlaktewater. Deze regio heeft immers relatief veel oppervlaktewater, maar ook zeer brede percelen (200 meter).

Tabel 3-6 Oppervlaktewater in Mm³/jaar per deelregio dat nodig is om via slootpeilverhoging de grondwaterstand één centimeter minder te laten uitzakken tijdens een periode van droogte.

	Benodigd oppervlaktewater (Mm³/jaar)
Hoge Zandgronden Noord	1.7
Hoge Zandgronden Oost met aanvoer	1.0
Noord Aanvoergebied na Gaarkeuken	1.9
Noord Aanvoergebied voor Gaarkeuken	3.4
Noord Drents plateau	1.4
Noord Holland Noord	2.0
Noord IJsselmeerpolders	71.6
Noord Veenkoloniën	2.9
Rivierengebied Noord	1.1
West Maasdelta	1.2
West met bovenregionale aanvoer	1.6
West zonder bovenregionale aanvoer	2.1
Zuidwestelijke Delta zonder aanvoer	0.8

4 Funderingrisico

4.1 Inleiding

De funderingrisico-effectmodule onderzoekt de impact van deltasce­nario's en zoetwatermaatregelen op de funderingen van gebouwen in Nederland. De gevolgen voor funderingen worden gekwantificeerd in termen van schade aan gebouwen en de bijbehorende herstelkosten. Schade aan gebouwen kan ontstaan door langdurig lage grondwaterstanden (die houten paalfunderingen aantasten) en verschildzettingen als gevolg van bodemdaling (die ondiepe funderingen beïnvloeden). Beide schadeprocessen treden nu al op en kunnen worden versterkt door klimaatverandering.

Dit hoofdstuk geeft eerst een korte toelichting over de gehanteerde methode en de wijzigingen ten opzichte van eerdere onderzoeken. Daarna worden de resultaten per zoetwaterregio gepresenteerd en besproken. Een uitgebreidere beschrijving van de methode is te vinden in Appendix B en van de resultaten in Appendix C. Appendix E presenteert een overzicht van de kengetallen voor funderingrisico.

4.1.1 Het funderingschade-risicomodel

Het funderingschade-risicomodel is een landelijk instrument, ontwikkeld door Deltares, om het risico op schade aan gebouwen door condities in de ondergrond te beoordelen. In het model worden twee schadeprocessen gemodelleerd: de aantasting van houten paalfunderingen door lage grondwaterstanden en verschildzettingen van ondiepe funderingen als gevolg van bodemdaling. Het model bestaat uit drie componenten:

- Invoer: GLG, bodemdalingskaart (uit module Bodemdaling), gebouweigenschappen en grondeigenschappen
- Rekenhart: afhankelijk van het type fundering (en het bijbehorende schademechanisme), wordt het effect van verschillende klimaatscenario's ingeschat en uitgedrukt in een schade­klasse per gebouw (op basis van internationale standaardindeling) en bijbehorende reparatiekosten per gebouw.
- Uitvoer: Vanaf de schade­klasse per gebouw (per type fundering) wordt het risiconiveau bepaald op het gewenste niveau van aggregatie (wijk, buurt, gemeente of in dit geval zoetwaterregio). Daarnaast wordt voor de schadekosten een sommatie gemaakt voor dit niveau van aggregatie.

Twee Deltascenario's zijn beschouwd in deze analyse: Referentie 2017 en Stoom2050. De kostenraming is gebaseerd op het kostenniveau van 2024. De daadwerkelijke kosten voor 2017 en 2050 zullen voor inflatie moeten worden gecorrigeerd. De kosten zijn gerelateerd aan de bepaalde schade­klasse per gebouw. De totale schadekosten bestaan uit inspectiekosten + reparatiekosten.

Ten opzichte van eerdere toepassingen van het funderingsschade-risicomodel (bijvoorbeeld in de klimaateffectatlas) zijn behalve reparatiekosten ook inspectiekosten toegevoegd. De resulterende kosten zijn opgenomen in Tabel 4-1. De kosten zijn inclusief BTW op basis van het prijspeil in 2024. Indirecte kosten en baten voor bijvoorbeeld het verlies of de verbetering van de (publieke) leefruimte zijn niet meegenomen. Voor monumenten gelden hogere kosten dan voor gewone gebouwen (factor 1,7). Voor meer details over de opbouw van het model, zie de artikelen Kok et al. (2020), Costa et al. (2020) en Klimaateffectatlas (2021).

Tabel 4-1 Inspectie en herstelkosten voor gebouwen bij funderingsschade – kostenniveau 2024.

Schadeklasse	Werkzaamheden	Totaal van inspectie en herstelkosten gemiddeld pand = schadekosten
Zeer laag	Schilderwerk binnen	€ 817
Laag	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers	€ 3.770
Matig	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers, herstel pleisterwerk; eenvoudige inspectie	€ 13.568
Hoog	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers, herstel pleisterwerk, herstel kozijnen, vloeren; uitgebreide inspectie	€ 52.503
Zeer hoog	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers, herstel pleisterwerk, herstel kozijnen, vloeren, herstel fundering; uitgebreide inspectie	€ 169.672

4.1.2 Aannames in de Funderingsrisico effectmodule

Het funderingsschade model gebruikt deterministische invoer. Het is dan ook met het huidige model niet mogelijk de variaties in GLG en bodemdaling mee te nemen. Er wordt daarom gewerkt met een gemiddelde waarde voor GLG en bodemdalingssnelheid voor elk scenario. Alleen gebouwen met een woonfunctie zijn beschouwd in de analyse en voor deze gebouwen is de kans op het funderingstype ingeschat (houten palen, ondiepe fundering of anders/betonnen palen). Bedrijfsgebouwen en andere gebouwfuncties (sporthallen et cetera) zijn geen onderdeel van het model, omdat deze gebouwen andere data en relaties aangaande funderingsschade behoeven die niet compleet beschikbaar is. Meer details hierover zijn te vinden in Klimaat-effectatlas (2021). Voor de volledige methodologie en onderliggende aannames, zie Schasfoort et al., 2024.

4.1.3 Uitgangspunten

In deze analyse wordt de Referentie 2017 beschouwd en het Deltascenario Stoom2050. Voor beide zijn de volgende resultaten per zoetwaterregio (Deelregio en Hoofdregio) gegenereerd:

- Risico op schade
- Risico op schade per stedelijk/landelijk gebied
- Herstelkosten
- Herstelkosten per stedelijk/landelijk gebied

Het risico op schade wordt uitgedrukt in vijf kwalitatieve klassen: **zeer laag, laag, matig, hoog, zeer hoog**. Tabel 4-2 toont de bijbehorende waarden per klasse. Deze waarden zijn bepaald op basis van de herstelkosten die gerelateerd zijn aan elk schadeniveau (zie Schasfoort et al., 2024).

Tabel 4-2 Schadeklassen en bijbehorende schaderisico vastgesteld op basis van herstelkosten*.

	Schadeklasse	Risico
1	Zeer laag	< 1
2	Laag	1 – 2.2
3	Matig	2.2 – 7.4
4	Hoog	7.4 – 27.4
5	Zeer hoog	> 27.4

* De totale schaal van het risico loopt van 0 tot 100. Een waarde van 0 staat gelijk aan de situatie dat in het gebied geen enkel pand enig risico loopt op schade terwijl bij een waarde van 100 alle panden de maximale schade hebben, en dus de maximale herstelkosten. Omdat de herstelkosten niet lineair verlopen (de hoogste schadeklasse heeft 27,4 maal hogere herstelkosten dan de laagste klasse), verlopen ook de scores voor de risicoklassen niet lineair.

Per zoetwaterregio is het funderingsrisico als volgt berekend (voor meer toelichting op de gebruikte formules zie Bijlage B).

Het funderingsrisico per funderingstype is de sommatie van de kans per funderingstype (houten fundering of ondiepe fundering) voor alle gebouwen, vermenigvuldigd met de schadeklasse volgens het model, vermenigvuldigd met de weegfactor voor schadeklasse. De weegfactoren zijn gegeven in Bijlage B en de totalen zijn opgebouwd uit de individuele resultaten per gebouw. Het risico is uitgedrukt in een score tussen 0 en 100. Bij score 0 is er geen enkel gebouw van het specifieke funderingstype met schade of zijn er geen gebouwen met dit funderingstype. Bij score 100 vallen alle gebouwen van dit funderingstype in de maximale schadeklasse (zeer hoog).

Het funderingsrisico per gebied/zoetwaterregio combineert de verschillende risico's per funderingstype:

*Risico op schade = Risico houten palen * kans op houten palen + risico ondiepe fundering * kans op ondiepe fundering + risico andere fundering (=0) * kans op andere fundering (betonpalen).*

Per gebied betekent een funderingsrisico van 0 dat alle gebouwen volledig schadevrij zijn en 100 dat alle gebouwen in het gebied in de hoogste schadeklasse (Tabel 4-2) vallen en derhalve een nieuwe fundering nodig hebben en volledige renovatie.

De berekende risico's per gebied zijn afhankelijk van de verdeling van de funderingstypen per gebied. Ter indicatie: het percentage houten palen bedraagt 0% tot maximaal 24% (regio 16). De regio's met de hoogste percentages (>10%) houten palen zijn regionummers 7, 8, 16, 17, 18 en 21. De hoogste percentages (>40%) betonnen palen (die dus geen risicobijdrage hebben) zijn te vinden in regionummers 7, 8, 11, 14, 16, 17, 18 en 21. Relatief veel ondiepe funderingen (ca 70- 80%) zijn te vinden in regionummers 1, 3, 4, 5, 6, 12, 13 en 15. Zie Figuur 4.1 voor de corresponderende regionamen bij de regionummers.

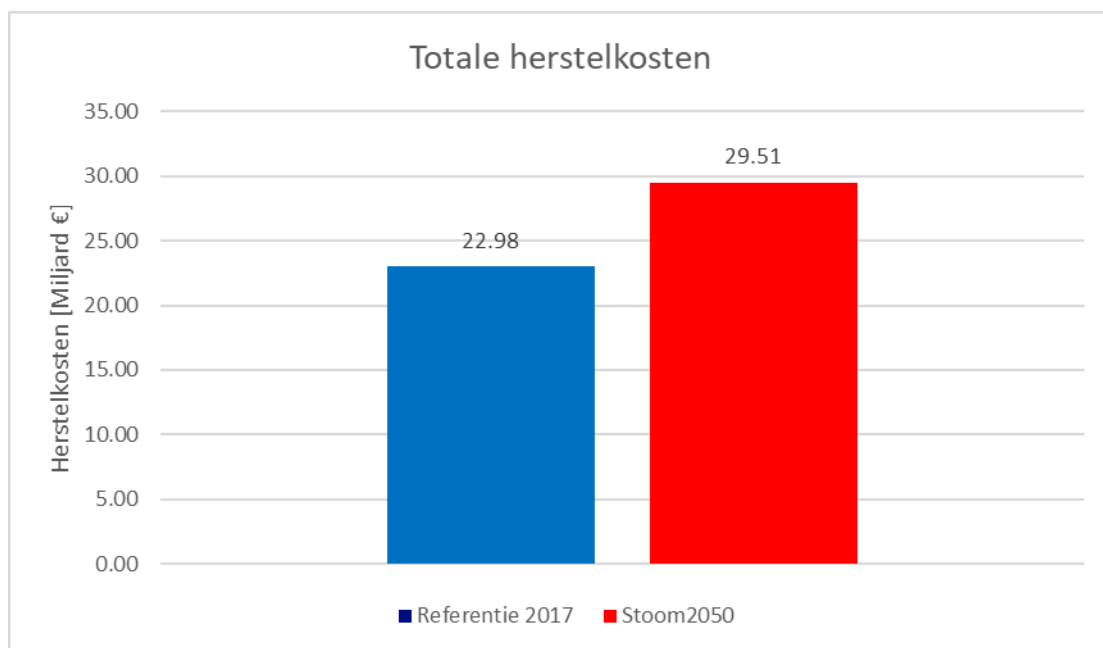
Zowel het risiconiveau als de kostenraming zijn een gemiddelde waarde per scenario. De resultaten zijn in de volgende paragrafen gegeven.

4.2 Resultaten funderingsrisico

4.2.1 Kosten per zoetwater regio (Deelregio)

Zoals weergegeven in Figuur 4-1, bedragen de geschatte herstelkosten voor de Referentie 2017 ongeveer € 23 miljard, met een toename van ongeveer € 6,5 miljard in het Stoom2050 scenario. Uitgaande van een lineair stijging tussen 2017 en 2050, bedraagt de jaarlijkse stijging van herstelkosten €0,2 miljard. De toename wordt voor 85% bepaald door gebouwen op houten palen en voor 15% door gebouwen op ondiepe funderingen.

Het grootste deel van de kostentoename (85% van € 6,5 miljard) in Stoom2050 is het gevolg van de veroudering van gebouwen tussen 2017 en 2050. Deze kosten worden veroorzaakt door de duur en hevigheid van droogstand (GLG ten opzichte van de houten paalkoppen) in de 33 jaar. Doordat klimaatverandering zorgt voor verdere uitzakking van de GLG, wordt dit proces versterkt. Dit zorgt voor de overige toename in herstelkosten (15%). Het effect van verschillen in zettingen tussen referentie en Stoom2050 is verwaarloosbaar.

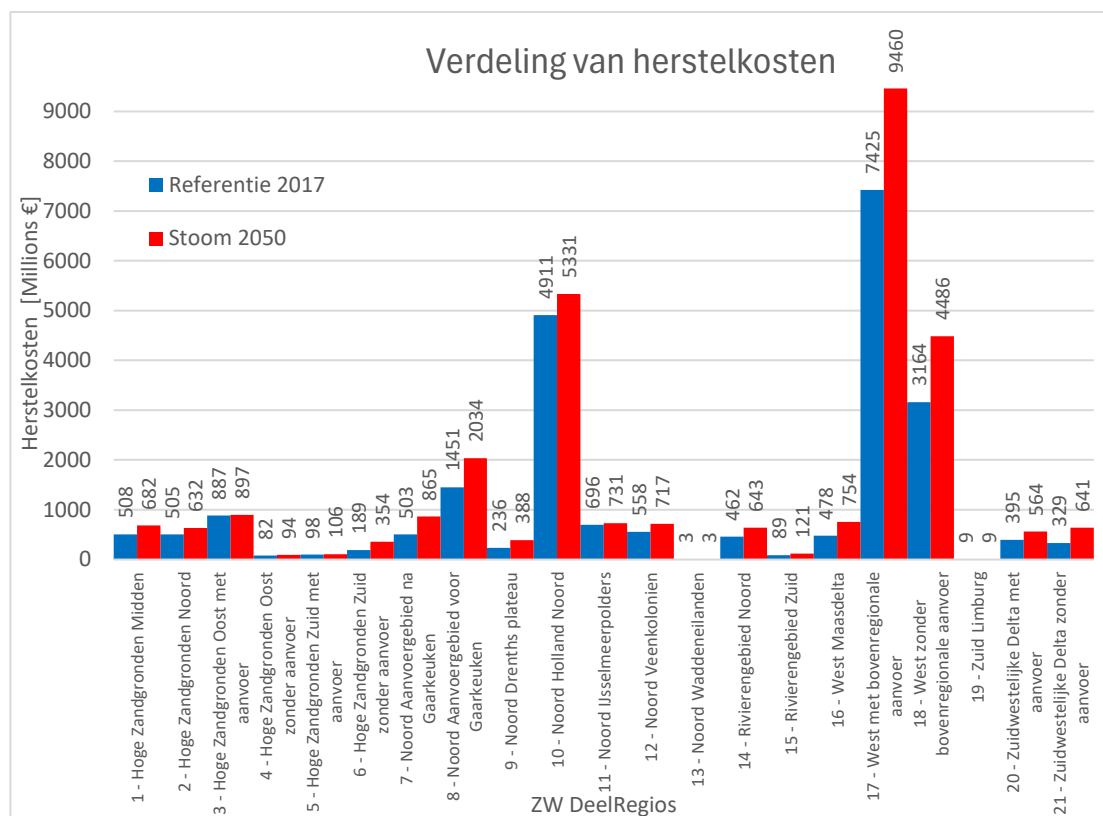


Figuur 4-1 Totale herstelkosten in Referentie 2017 en Stoom2050 in Nederland.

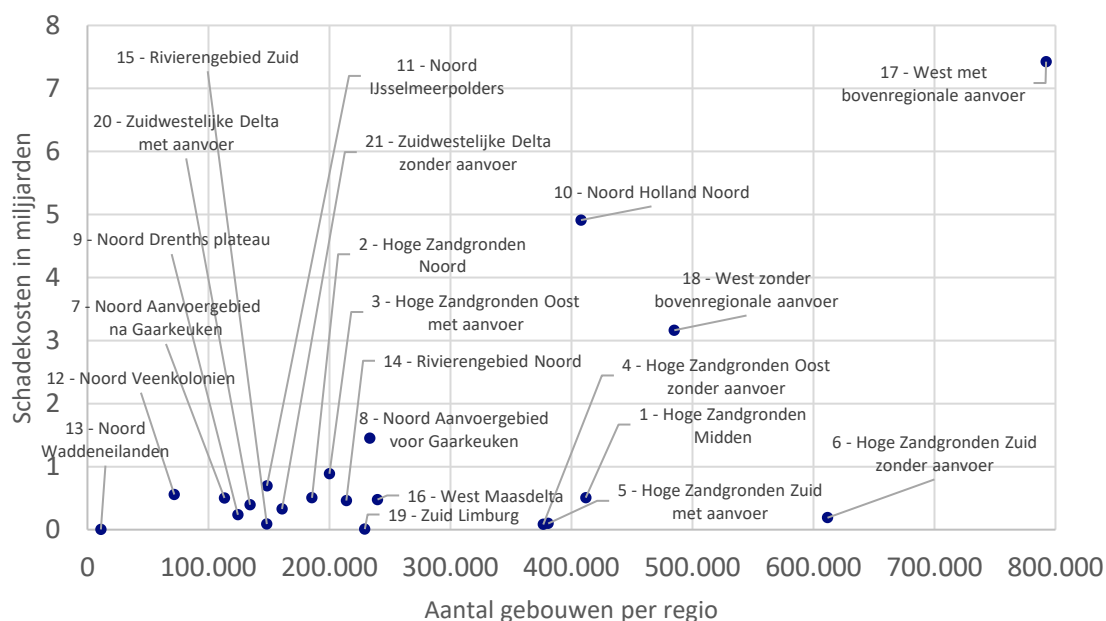
Figuur 4-2 toont de verdeling van de herstelkosten per zoetwaterregio voor beide onderzochte scenario's. West met bovenregionale aanvoer, Noord-Holland en West zonder bovenregionale aanvoer zijn de top drie regio's met de hoogste herstelkosten. In 18 van de 21 regio's stijgen de herstelkosten in Stoom 2050; voor de overige 3 regio's blijven de kosten in beide scenario's gelijk.

Figuur 4-3 toont de verdeling van de herstelkosten per zoetwaterregio voor het Referentie 2017 scenario.

Details over de herstelkosten per funderingstype zijn te vinden in Bijlage C7.



Figuur 4-2 Verdeling van herstelkosten in Referentie 2017 en Stoom2050 per zoetwaterregio (Deelregio).

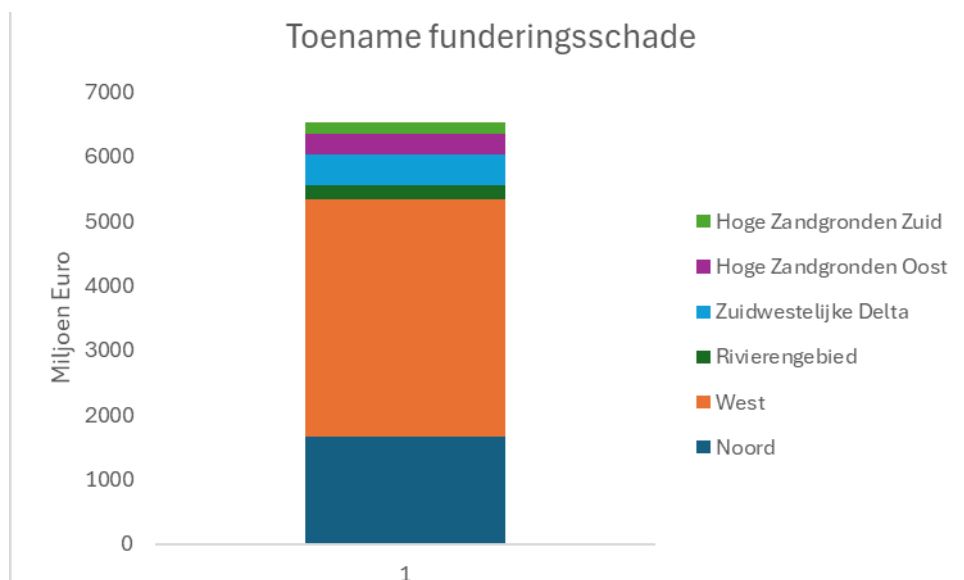


Figuur 4-3 Indicatieve kosten per regio als functie van het aantal gebouwen (Referentie 2017).

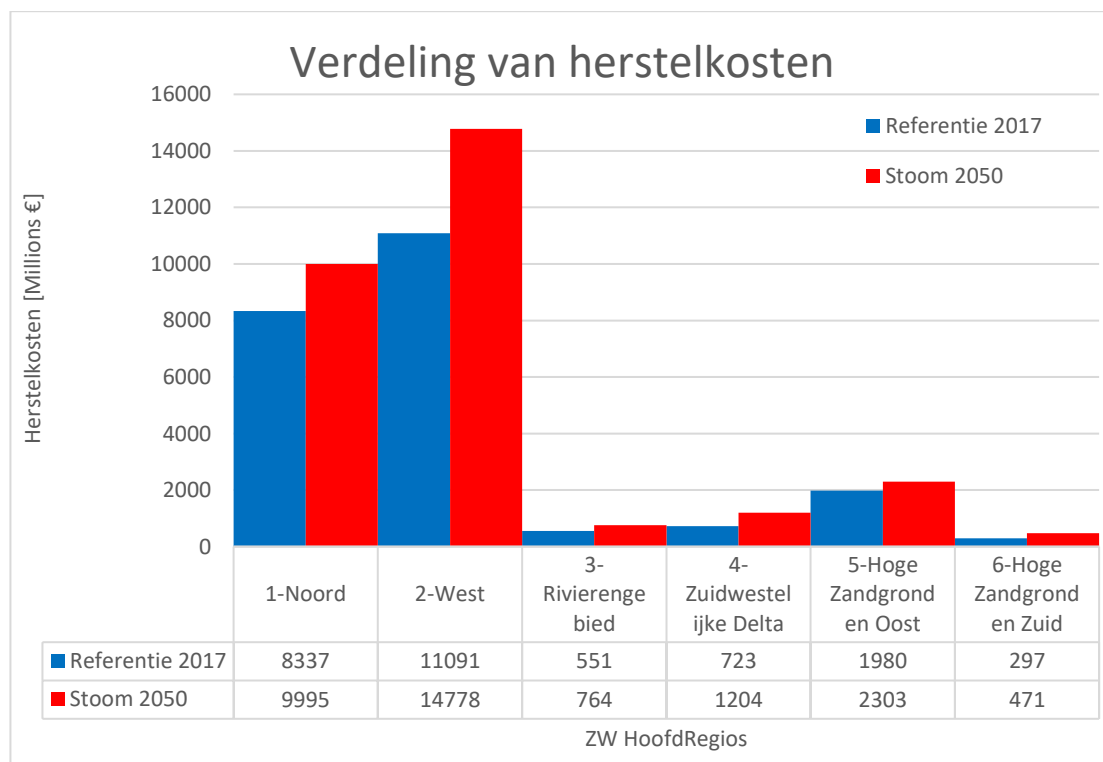
4.2.2 Kosten per zoetwater regio (Hoofdregio)

Figuur 4-4 en Figuur 4-5 tonen de verdeling van de herstelkosten per zoetwaterregio (hoofdregio) voor de Referentie 2017 en het Stoom2050 scenario. Hier laten de Noord en West regio's de hoogste herstelkosten zien, vooral vanwege het grote aantal gebouwen in deze regio's.

Details over de herstelkosten per funderingstype zijn te vinden in Bijlage C8.



Figuur 4-4 Toename van de schade per jaar, uitgedrukt in herstelkosten, tussen referentie en scenario Stoom2050 uitgesplitst naar de 6 zoetwaterregio's.



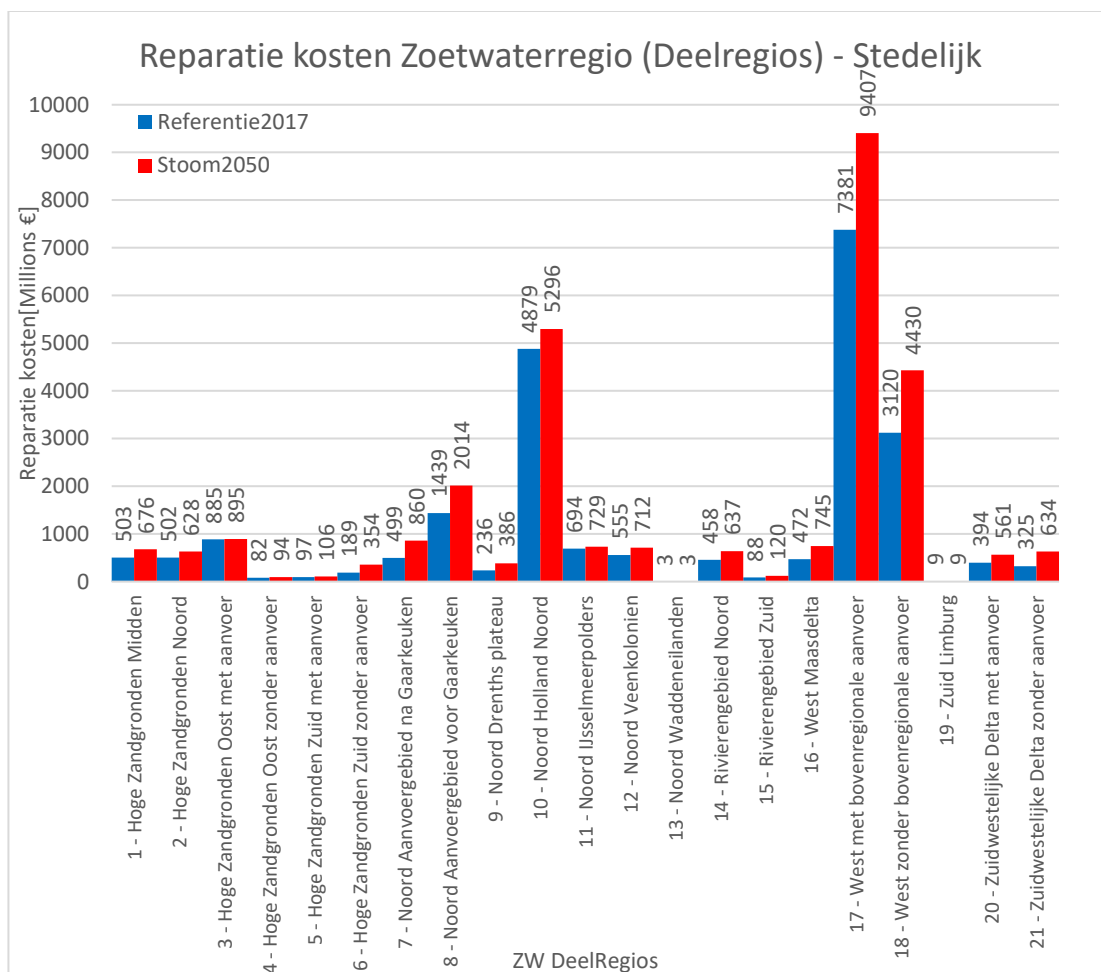
Figuur 4-5 Verdeling van herstelkosten in Referentie 2017 en Stoom2050 per zoetwaterregio (hoofdregio).

4.2.3

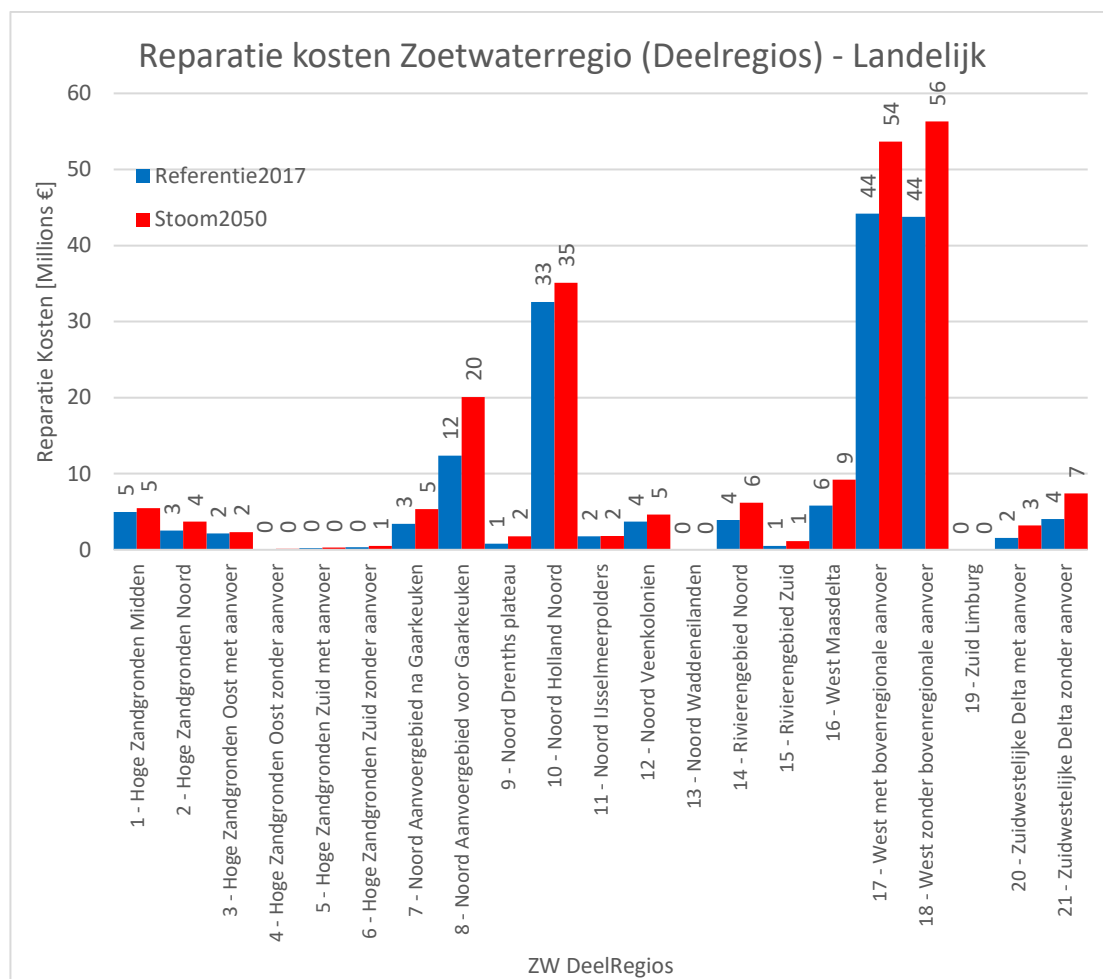
Kosten per stedelijk/landelijk gebied in de zoetwater regio (deelregio)

Om meer inzicht te krijgen in de bijdrage van stedelijke gebieden, zijn de resultaten uitgesplitst naar stedelijk en landelijk. Op basis van een Landelijk Grondgebruik Nederland (LGN) 2018.

Figuur 4-6 en Figuur 4-7 tonen de herstelkosten respectievelijk in stedelijke en landelijke gebieden per zoetwaterregio (deelregio) in de Referentie 2017 en Stoom2050 scenario's. Het is te zien dat de kosten in stedelijke gebieden hoger zijn (tot €9400 miljoen) dan in landelijke gebieden (tot € 56 miljoen) –twee orde van grootte verschil. Zoals voor de totale kosten werd benadrukt, zijn West met bovenregionale aanvoer, Noord-Holland en West zonder bovenregionale aanvoer de top drie regio's met de hoogste herstelkosten.



Figuur 4-6 Herstelkosten in alle deltascenario's voor stedelijke gebieden per zoetwaterregio.

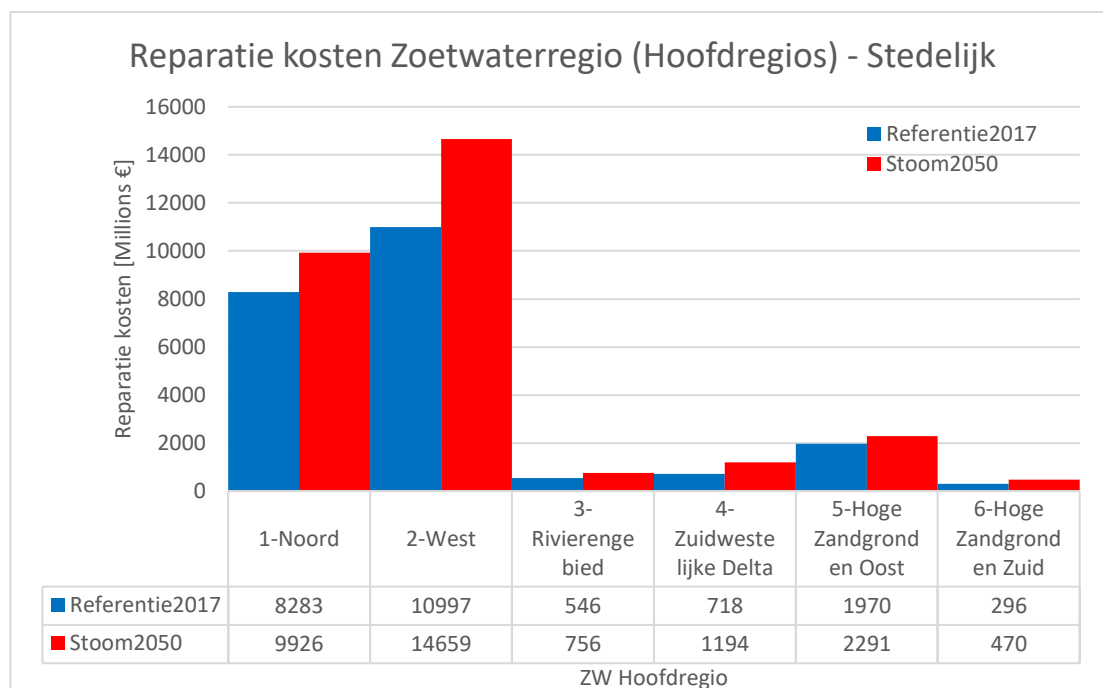


Figuur 4-7 Herstelkosten in alle deltascenario's voor landelijke gebieden per zoetwaterregio.

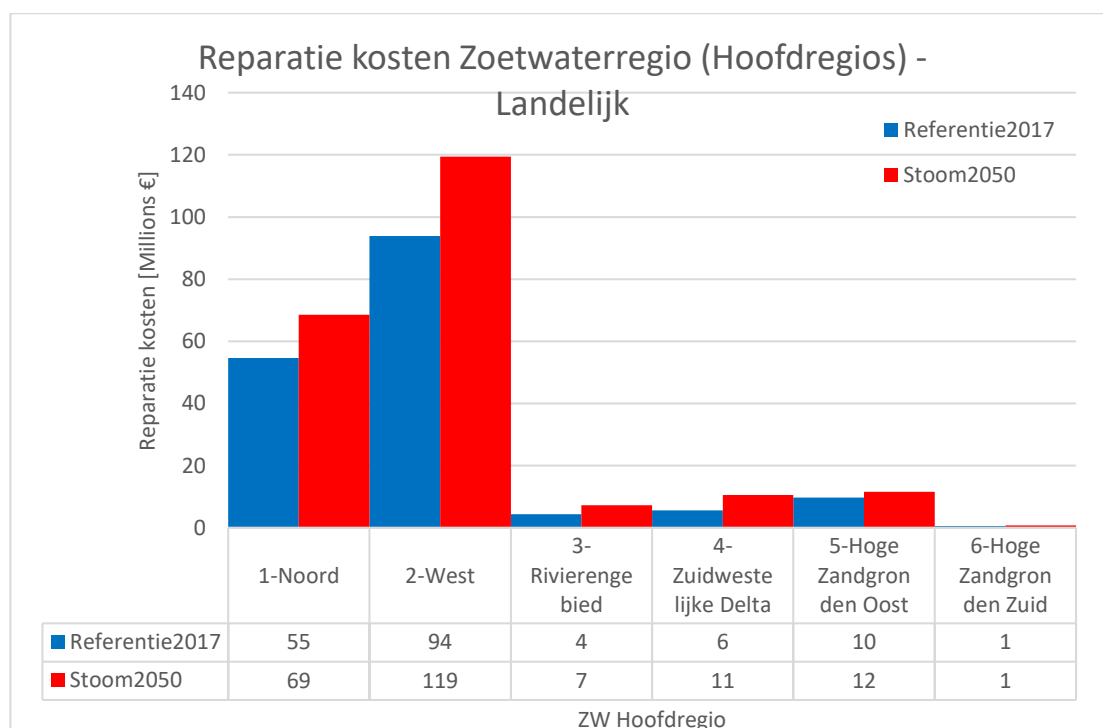
4.2.4

Kosten per stedelijk/landelijk gebied in de zoetwater regio (hoofdregio)

Figuur 4-8 en Figuur 4-9 tonen de herstelkosten respectievelijk in stedelijke en landelijke gebieden per zoetwaterregio (hoofdregio) in de Referentie 2017 en Stoom2050 scenario's. De resultaten benadrukken dezelfde conclusies die eerder zijn getrokken.



Figuur 4-8 Herstelkosten in alle deltasce­nario's voor stedelijke gebieden per zoetwaterregio (Hoofdregio).



Figuur 4-9 Herstelkosten in alle deltasce­nario's voor landelijke gebieden per zoetwaterregio (Hoofdregio).

4.3 Conclusies funderingsrisico

Er zijn kleine verschillen (gemiddeld over het hele land) in de GLG- en bodemdaling kaarten (uit de bodemdalingmodule, zie hoofdstuk 3) tussen de Referentie 2017 en Stoom2050 scenario's. Er zijn echter lokale variaties die veranderingen in de herstelkosten veroorzaken.

Omdat het funderingsrisico-model minder gevoelig is voor kleine veranderingen, wordt de verdeling van kosten voornamelijk beïnvloed door de grootte van de zoetwaterregio's en het aantal gebouwen per regio. De resultaten voor de hoofdregio's zijn minder indicatief dan die voor de deelregio's, omdat de resultaten over een groter aantal gebouwen worden berekend. Dit moet in overweging worden genomen bij de analyse van de resultaten.

De totale geschatte kosten voor het herstellen van funderingsschade bedraagt in de referentie 23 miljard euro. In Stoom2050 is dat 29,5 miljard euro, een toename van 6,5 miljard euro.

Deze toename is grotendeels toe te schrijven aan de veroudering van gebouwen (85%) en een kleiner deel door klimaatverandering (15%). Het deel van de toename in herstelkosten dat specifiek door klimaatverandering is veroorzaakt bedraagt 906 miljoen euro. Hiervan wordt het grootste gedeelte direct of indirect (via bodemdaling) veroorzaakt door een dalende grondwaterstand.

In stedelijke gebieden worden gemiddeld hogere risico's en (daarmee) herstelkosten verwacht dan in landelijke gebieden. Dit is logisch, aangezien er in de landelijke gebieden minder gebouwen met een woonfunctie aanwezig zijn.

De regio's met de hoogste totale schadelast zijn zoetwaterhoofdregio Noord en West, en specifiek de deelregio's '17 West met bovenregionale aanvoer', '10 Noord Holland Noord' en '18 West zonder bovenregionale aanvoer', veroorzaakt door de combinatie van hoge risicoscores en grote aantallen gebouwen. Alleen regio 12 Noord-Veenkoloniën heeft ook een hoge risicoscore maar relatief lage totale schadekosten door het kleinere aantal gebouwen.

4.4 Maatschappelijke kengetallen

De maatschappelijke kengetallen voor funderingsschade geven de marginale waarde van grondwater weer voor het voorkomen van funderingsschade, aangezien de funderingsschade afhankelijk is van de gemiddelde laagste grondwaterstand (de GLG). Het gaat in dit geval dus om de baten bij een grondwaterstandsverhoging van 1 cm. Er wordt hierbij onderscheid gemaakt in kengetallen in stedelijk en in landelijk gebied. Het type en de effectiviteit van maatregelen en de intensiteit van de funderingsproblematiek verschillen immers in landelijk en stedelijk gebied. De kengetallen worden per zoetwater-deelregio gerapporteerd voor de scenario's REF2017 en Stoom 2050 (S2050).

4.4.1 Methode

Om voor alle gebouwen en gebieden te beschouwen wat de baten (of kosten) zijn van 1 cm grondwaterstandsverhoging (of verlaging), zijn de GLG's in de referentiesituatie en S2050 met 5 cm verhoogd. De verandering in schade ten opzichte van de "originele" scenario's (berekend met het funderingsschade-risicomodel) geven dan de baten van de verhoging weer. In tegenstelling tot de andere zoetwatergebruiksfuncties, is voor funderingsrisico een directe afleiding van een kengetal op basis van een vergelijking van Referentie en S2050 niet toepasbaar. De verschillen in funderingsrisico zijn in de meeste zoetwaterregio's immers minimaal (zie paragraaf 4.2.1). Bovendien worden de verschillen grotendeels veroorzaakt door gebouwveroudering in plaats van een verandering in grondwaterstand. Tot slot kan met de gekozen aanpak ook een kengetal voor de referentie worden afgeleid.

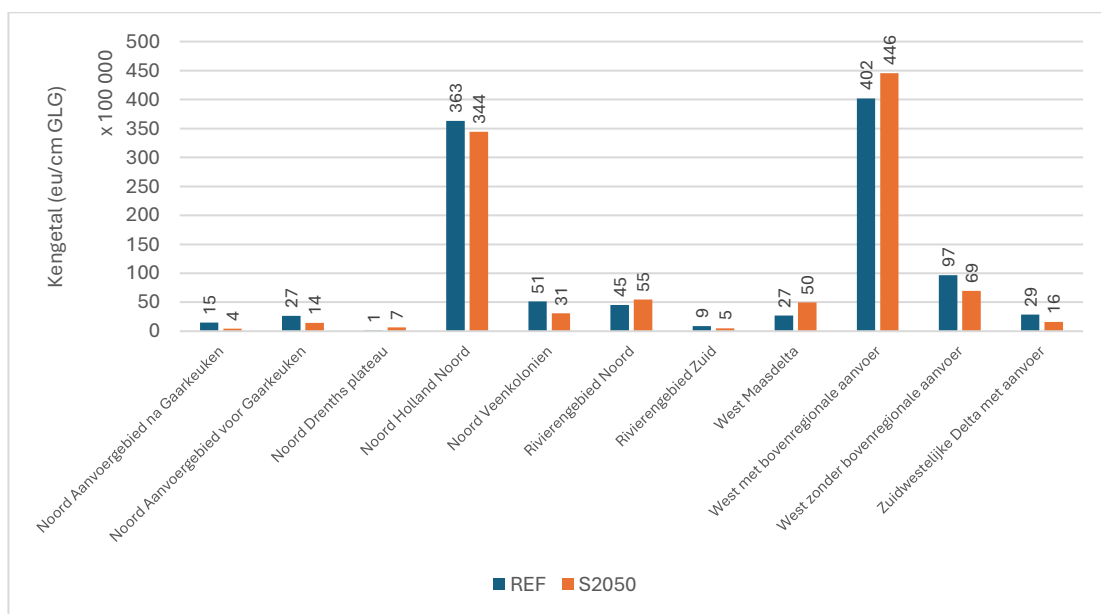
De volgende stappen zijn uitgevoerd om de kengetallen te berekenen:

- 1 GLG verhoging
Het funderingsschade-risicomodel wijst schade aan houten funderingen toe aan de hand van drie risicoklassen die gebaseerd zijn op de GLG ten opzichte van de paalkoppen: <5 cm, 5-20 cm, of >20 cm boven de paalkoppen (zie Bijlage B voor een uitgebreide beschrijving van de klassen). Soms is dus minstens een verandering van 15 cm nodig om te wisselen van schadeklasse. Om een verandering in schade te simuleren, maar ook een realistische (wat betreft uitvoerbaarheid) grondwaterstandsverhoging te behouden, is de GLG verhoogd met 5 cm. Dit is gebiedsdekkend (in elke gridcel) toegepast, waarbij de grondwaterstand niet boven maaiveld kan uitkomen.
- 2 Bodemdalingssnelheid
Met het Atlantis model zijn de bodemdalingssnelheidskaarten gemodelleerd behorende bij de verhoogde GLG's. De temperatuur is niet aangepast.
- 3 Verandering funderingsschade
Met het funderingsschade-risicomodel is de funderingsschade berekend voor de verhoogde GLG en bijbehorende bodemdalingssnelheid. Door deze te vergelijken met de originele Referentie en S2050 situatie, kan de verandering in schade bepaald worden. Kosten door gebouwveroudering spelen geen rol (want de zichtjaren zijn hetzelfde) en de verandering in berekende herstelkosten komt dus louter door de verandering in grondwaterstand.
- 4 Bepaling kengetal
De marginale waarde van grondwater (€ per cm grondwaterstandsverhoging) per regio en per scenario zijn bepaald door de verandering in funderingsschade te delen door de verandering in grondwaterstand. Funderingsschade speelt echter de grootste rol in stedelijke gebieden. De economische effecten van grondwaterstandsveranderingen (en dus de kengetallen) zijn daar dan ook het grootst. Om hier beter inzicht in te geven, zijn de kengetallen ook berekend per object, per hectare landelijk bebouwd gebied, en per hectare stedelijk bebouwd gebied. De bepaling van het aantal hectare stedelijk en landelijk bebouwd gebied is gedaan op basis van Landelijk Grondgebruik Nederland (LGN) 2018 conform het gebouwenbestand uit 2017 in het funderingsmodel.

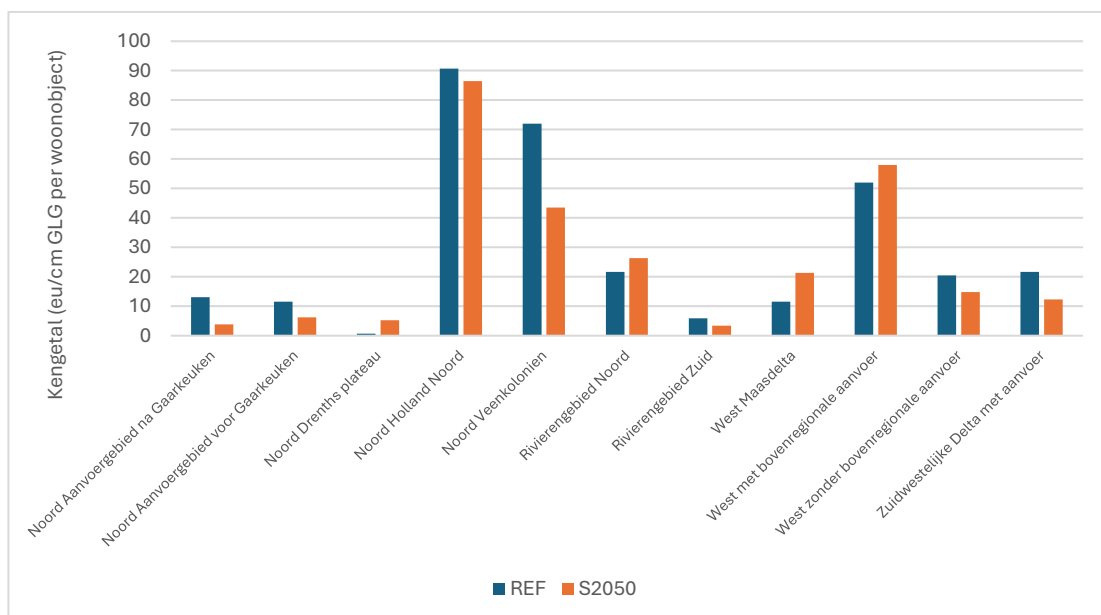
4.4.2 Resultaten

4.4.2.1 Resultaten per regio

De staafdiagrammen in Figuur 4-10 tonen de kengetallen in euro per centimeter GLG verandering (voor tabel met exacte kengetallen, zie Bijlage D). De getallen gelden voor de totale kosten en baten van alle woonobjecten in een deelregio. Deelregio's waar funderingsschade niet of nauwelijks een rol speelt, zijn niet weergegeven. De kengetallen in de regio's Noord-Holland (36.3 en 34.4 miljoen euro per centimeter GLG voor REF en S2050 respectievelijk) en West met bovenregionale aanvoer (40.2 en 44.6 miljoen euro per centimeter GLG voor REF en S2050 respectievelijk) springen ver boven de andere uit. Dit is in lijn met de resultaten van het funderingsrisico per deelregio (zie paragraaf 4.2.1): de hoogste kengetallen gelden daar waar de hoogste funderingsherstelkosten zijn berekend (Figuur 4-3). In die regio's staan immers het grootste aantal gebouwen (ondiep gefundeerd of op houten palen) en is de funderingsproblematiek door droogte en bodemdaling het grootst. In de vrij afwaterende gebieden zijn om die redenen de kengetallen juist zeer laag. Figuur 4-11 toont daarom ook de kengetallen per gebouw (object). De kengetallen van de regio's Noord-Holland Noord en West met bovenregionale aanvoer komen hierdoor dichterbij de kengetallen van de andere regio's. Regio Noord Veenkoloniën (en Rivierengebied Noord in mindere mate) krijgt juist een relatief hoog kengetal ten opzichte van de andere regio's. De onderlinge verhoudingen van de kengetallen verandert echter niet veel.



Figuur 4-10 Kengetallen funderingsschade voor de scenario's REF2017 en S2050 per centimeter GLG verandering. De kengetallen zijn per deelregio weergegeven in euro per centimeter GLG. De y-as is weergegeven in 100 000-tallen.

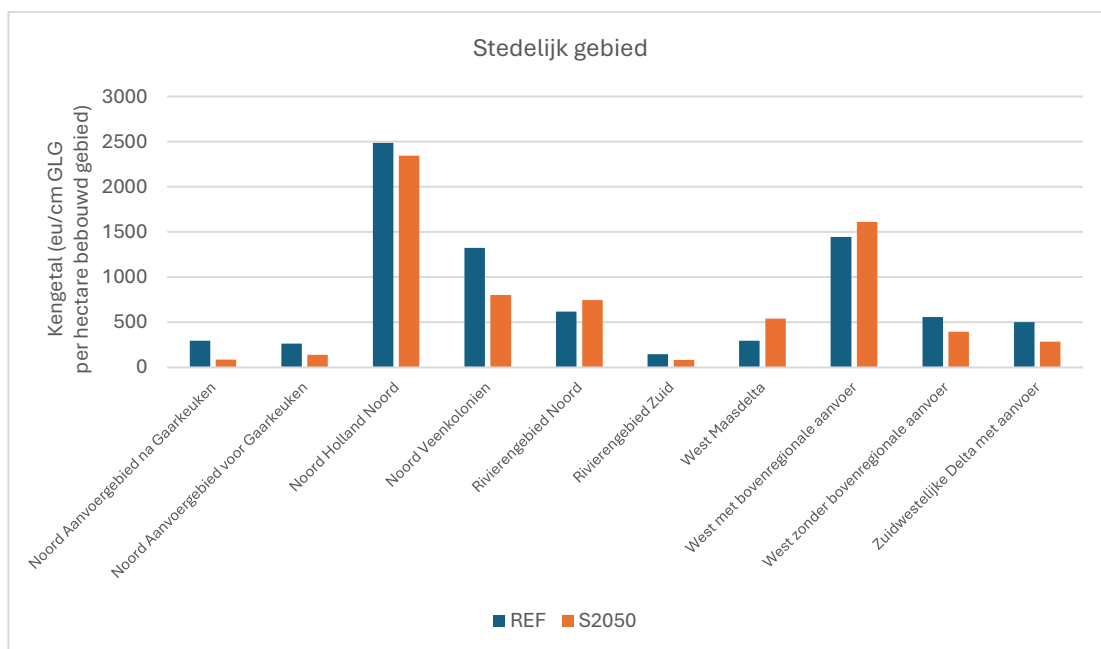


Figuur 4-11 Kengetallen funderingsschade voor de scenario's REF2017 en S2050 per centimeter GLG verandering per gebouw. De kengetallen zijn per deelregio weergegeven in euro per centimeter GLG per object.

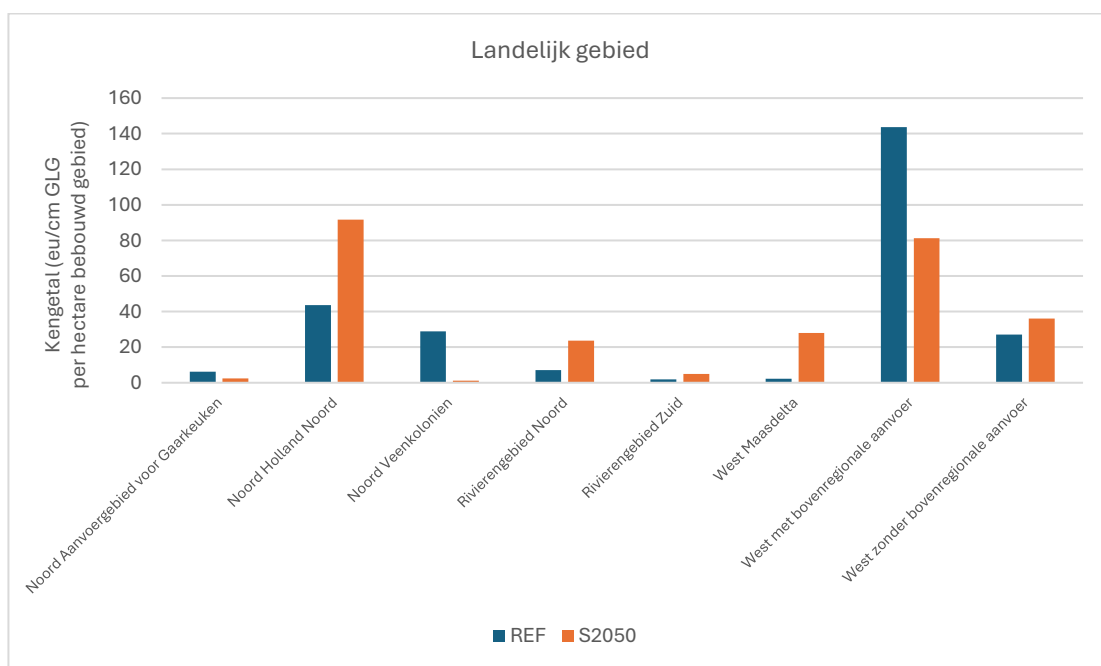
Figuur 4-10 en Figuur 4-11 laten verder zien dat het kengetal in S2050 in twee-derde van de regio's groter is dan in de referentie. Dat betekent dat een verandering in GLG meer effect heeft op de herstelkosten in 2050 dan in de huidige situatie. Dit kan verklaard worden doordat het risico in 2050 groter wordt (de gebouwen hebben al vaker droogstand gehad en de GLG ligt over het algemeen lager). Een extra verandering in GLG heeft daardoor meer effect. In de andere regio's gaat dit echter niet op. Dit zijn vooral de regio's met klei en veen (zoals Gaarkeuken, Noord-Holland Noord, West) waar het grondwater peil gestuurd wordt en relatief ondiep is. Een hypothese voor de daling in kengetal zou zijn dat in die regio's de GLG zo erg daalt richting 2050, dat de gebouwen in het model zo'n hoog risico toebedeeld krijgen dat een stijging van 5 centimeter nog nauwelijks effect heeft op de kosten. In de Veenkoloniën bijvoorbeeld, waar geen wateraanvoer is, is zowel de GLG als het kengetal in S2050 een stuk lager dan in REF2017. Merk op dat het effect van een grondwaterstandsverandering dan ook zeer afhankelijk is van de initiële diepte van het grondwater. Wanneer de GLG ten opzichte van de paalkoppen dichtbij de grens van een risicoklasse ligt, zal een verandering in GLG eerder zorgen voor een verandering in risicoklasse en dus zorgen voor een grotere verandering in herstelkosten.

4.4.2.2 Resultaten landelijk en stedelijk bebouwd gebied

Figuur 4-12 en Figuur 4-13 geven de kengetallen per deelregio weer per areaal stedelijk gebied en areaal landelijk gebied. De regio's waar funderingsproblematiek niet of nauwelijks een rol speelt in het landelijk gebied zijn niet meegenomen. De kengetallen in het stedelijk gebied zijn duidelijk groter dan in het landelijk gebied (merk op dat de y-assen verschillen). In stedelijk gebied staan immers meer gebouwen met funderingsrisico (zie paragraaf 4.2.3). Verder laten de figuren zien dat de verschillen in kengetallen tussen S2050 en REF2017 vaak groter zijn in het landelijk gebied dan in stedelijk gebied. Dit zou verklaard kunnen worden door het feit dat de grondwaterstand in het landelijk gebied meer fluctueert en dus ook gevoeliger is voor klimaatverandering.



Figuur 4-12 Kengetallen funderingsschade voor de scenario's REF2017 en S2050 per centimeter GLG verandering in het stedelijk bebouwd gebied. De kengetallen zijn per deelregio weergegeven in euro per centimeter GLG per hectare.



Figuur 4-13 Kengetallen funderingsschade voor de scenario's REF2017 en S2050 per centimeter GLG verandering in het landelijk bebouwd gebied. De kengetallen zijn per deelregio weergegeven in euro per centimeter GLG per hectare.

4.4.3 Aandachtspunten bij gebruik van de kengetallen

Bij het gebruik van de kengetallen zoals gepresenteerd in de vorige paragraaf moet men bewust zijn van de aannames die zijn gebruikt voor de totstandkoming. Deze zijn beschreven in de methodiek. Hieronder staan nog een aantal aandachtspunten:

- De kengetallen zijn gebaseerd op de totale funderingsschade in een regio. De funderingsproblematiek kan binnen een regio echter flink verschillen, afhankelijk van het type en dichtheid van (op hout gefundeerd) gebouwen, de diepte van de paalkoppen ten opzichte de grondwaterstand, de fluctuatie in grondwaterstand en de bodemdalingssnelheid.
- De kengetallen zijn gebaseerd op een GLG verhoging van 5 cm. Hierbij is geen rekening gehouden of deze verhoging ook daadwerkelijk te realiseren is. In de praktijk zal het op sommige plekken een flinke uitdaging zijn om de grondwaterstand te beïnvloeden middels grootschalige maatregelen (bijvoorbeeld in het midden van een perceel of in een historische binnenstad).
- Wanneer de GLG met meer dan 5 centimeter verhoogd wordt, kan het effect op het funderingsrisico groter worden dan is berekend met de kengetallen. De kans op een verandering in risicoklasse wordt dan immers groter. Het gebruik van de gepresenteerde kengetallen zou dan ook tot een onderschatting kunnen leiden.
- Andersom kan bij een verlaging van de GLG het effect overschat worden, als de GLG daalt in het bereik waar deze al zo laag is dat verdere daling geen effect meer heeft.
- Er wordt vanuit gegaan dat de baten bij een verhoging gelijk zijn aan de kosten bij eenzelfde verlaging. De getallen kunnen daarmee toegepast worden op de effectberekening van zowel maatregelen die de grondwaterstand éxtra verhogen als maatregelen die de uitzakking van grondwater tegengaan.
- De gepresenteerde kengetallen zijn, in tegenstelling tot de kengetallen voor de andere zoetwatergebruiksfuncties, niet uitgedrukt in jaarlijkse waarden. De funderingsherstelkosten waar deze kengetallen op gebaseerd zijn, moeten namelijk gezien worden als een investering. Wanneer herstel aan funderingen en gebouwen wordt uitgevoerd, wordt aangenomen dat deze kosten de jaren erop niet meer gemaakt hoeven te worden.

5 Scheepvaart

5.1 Inleiding

Droogte resulteert in lagere afvoeren op de grote rivieren (Rijntakken en Maas). Dit zorgt voor knelpunten in het vaarwegennet en reacties van de transportsector in het vervoer over water, die de vaarkosten en transportkosten beïnvloeden. In werkelijkheid kunnen die effecten en reacties heel complex zijn. Welke keuzes worden gemaakt in het watersysteem of hoe gereageerd wordt, hangt bijvoorbeeld af van het type lading, het type schip waarmee dit vervoerd wordt, het moment in het jaar, de duur van het laagwater, de beschikbaarheid van alternatief transport, de urgentie van het transport, of de herkomst en bestemming van de lading. De afgeleide kengetallen worden opgesteld op basis van de hieronder geschetste globale, veralgemeniseerde reacties met hun effect op kosten.

Door lagere afvoeren neemt de vaardiepte op de vrij afstromende rivieren af (Waal en IJssel) en kunnen schepen minder vracht meenemen. Om dezelfde hoeveelheid vracht te vervoeren zijn er meer schepen en reizen nodig en nemen de vaarkosten toe. Op een gegeven moment kan er vracht achterblijven en die vracht kan eventueel met andere modaliteiten (vooral over de weg) worden vervoerd. Hierdoor nemen de transportkosten toe. Met het uitvoeren van meer reizen of andere modaliteiten nemen ook de emissies toe, wat te vertalen is naar hogere transportkosten.

Voor gestuwde rivieren (Maas) resulteren lagere afvoeren in schutbeperkingen bij de sluizen. Sluizen verbruiken water wat in laagwatersituaties minder beschikbaar is. Door langere wachttijden en meer energieverbruik voor waterbesparend schutten door extra te pompen nemen de vaarkosten voor de scheepvaart toe.

Als laatste worden er voor andere functies (bijv. het tegengaan van zoutindringing) maatregelen genomen in de waterverdeling in het midden-rivierengebied. Dit heeft gevolgen voor de waterdiepte (benedenstrooms van Tiel op de Waal), de wachttijden (Irenesluizen) of kan resulteren in stremmingen (Bernhardsluizen).

Al deze effecten van lage afvoeren op de scheepvaart zijn voor verschillende klimaatscenario's op landelijke² schaal eerder gekwantificeerd in de effectmodule scheepvaart (Schasfoort et al., 2024; Janse et al., 2024). Uit de effectmodule (Janse et al., 2024) komt dat voor de meeste deltasceario's de kosten gemiddeld per jaar toenemen met 100 tot 175 miljoen euro. Voor Stoom 2100 nemen de gemiddelde kosten met 600 miljoen euro per jaar toe. De helft van deze toename in kosten zijn een direct gevolg van hogere vaarkosten, de andere helft is het gevolg van opslagkosten, modal shift en toename in emissies. De verandering in vaarkosten voor jaren met een specifieke herhalingstijd is te vinden in Schasfoort et al. (2024). In de tabel met absolute vaarkosten voor de verschillende zichtjaren per Deltascenario zat een fout. Het gehele hoofdstuk over scheepvaart is gekopieerd naar Appendix D en de desbetreffende tabel (5-4) is aangepast.

² Landelijke schaal betekent hier de totale kosten voor de Rijntakken. De Maas is in deze studie niet meegenomen.

In deze studie is gekeken naar de meer regionale³ schaal en zijn de effecten van lage afvoeren vertaald naar lokale kengetallen. Hierbij worden de vaar- en transportkosten vertaald naar euro's per m³/s of centimeter waterdiepte per dag. Voor het effect op de vaardiepte benedenstrooms van Tiel is er naast de rivierafvoer nog een extra variabele, namelijk de afvoer door het Betuwepand. Daarom zal hier niet alleen naar euro's per m³/s gekeken worden, maar naar een combinatie van de afvoer bij Lobith en de afvoer door het Betuwepand.

5.2 Maatschappelijke kengetallen

Voor de kengetallen wordt een onderscheid gemaakt tussen *vaarkosten* en *transportkosten*. Vaarkosten zijn direct gerelateerd aan het realiseren van meer reizen voor het vervoeren van dezelfde hoeveelheid vracht. Transportkosten nemen de kosten van *opslag* en *modal shift* mee en komen boven op de vaarkosten. Daarbovenop komen tot slot de kosten van de emissies. We benadrukken dat deze vaar- en transportkosten niet de volledige maatschappelijke impact van droogte op de scheepvaartsector beschrijven. Er kunnen bijvoorbeeld voor de industrie (deels buiten Nederland) extra kosten ontstaan door het verstoren van het productieproces (bijv. ErasmusUPT, 2020). Deze kosten worden niet meegenomen.

Bij het toepassen van de kengetallen dient er rekening gehouden te worden met het ontbreken van *maatschappelijke effecten* als gevolg van het niet of moeilijker vervoeren van goederen. Deze kunnen een veelvoud vormen van de *vaar-* of *transportkosten* die in de kengetallen worden gepresenteerd, al zal een groot deel van de lasten voor de industrie zich in het buitenland bevinden (Duitsland).

In de hier gepresenteerde kengetallen is nog geen economische groei meegenomen. Met economische groei neemt de potentiële blootstelling toe en kan het effect van maatregelen groter zijn. Op basis van de resultaten uit BP24 is af te leiden met hoeveel de vaarkosten toenemen als gevolg van economische groei onafhankelijk van het klimaatscenario (Tabel 5-1). De hierna gepresenteerde kengetallen kunnen met het getoonde percentage worden vergroot om het effect van economische groei mee te nemen. Per riviertak zal het effect mogelijk iets anders zijn doordat de economische groei afhankelijk is van het type vracht wat wordt vervoerd. Voor de eerste berekeningen is het toepassen van dit percentage naar verwachting voldoende nauwkeurig.

Tabel 5-1 Vaarkosten voor synthetisch mediaan jaar voor verschillende economische scenario's uit Basisprognoses 2024

Scenario	Vaarkosten (€)	Vaarkosten verandering t.o.v. Referentie (%)
REFERENTIE	€ 2.334.503.058	
LAAG	€ 3.194.499.472	27%
HOOG	€ 3.509.098.477	33%

³ Knelpunten op de Rijn, IJssel, Maas en Betuwepand.

5.2.1 Rijntakken

Om een relatie op te stellen tussen waterdiepte en vaarkosten op de Waal en de IJssel zijn de kostenkengetallen uit QINCoM (de Jong, 2021) gebruikt. Dit is een *Quick Inland Navigation Cost Model* bedoeld om verschillende hydrologische scenario's door te rekenen. Deze tool is ontwikkeld binnen het programma Klimaatbestendige Netwerken (KBN). Voor de berekeningen is dezelfde aanpak gebruikt als in Van der Wijk et al. (2024a; 2024b), maar dan per knelpunt in plaats van voor het gehele systeem. De kosten uit QINCoM beschrijven puur de vaarkosten van de scheepvaart.

De basiswaterbalans in QINCoM, die gebaseerd is op de studie naar de toestand van het watersysteem (De Jong & Van der Mark, 2020), is aangepast naar de situatie 2030 Ref, zoals ook beschreven in Van der Wijk et al. (2024a; 2024b). Dit houdt vooral in dat er bij afvoeren lager dan 1400 m³/s minder water naar de IJssel gaat en meer door het Betuwepand ten opzichte van de basiswaterbalans. Het wordt aanbevolen om de waterbalans opnieuw op te stellen zodra BP2024 is geaccepteerd.

De afvoerreeksen bij Lobith uit BP2024 vormen de invoer voor de QINCoM berekeningen. De afvoer bij Lobith wordt verdeeld over de verschillende riviertakken op basis van het huidige beheer van de objecten en een bodemligging uit 2018 (de Jong, 2021). De afvoer op de riviertakken zoals berekend door LSM3 is **niet** gebruikt in QINCoM binnen BP2024⁴. De lokale afvoer bij de knelpunten is daarmee afhankelijk van de afvoer bij Lobith, de afvoerverdeling over de takken en waterbalans zoals hierboven omschreven. Voor alle potentiële knelpunten is een afvoer – waterdiepte relatie bepaald met de bodemligging uit 2018 (De Jong, 2021). Omdat de afvoerreeks bij Lobith niet ter discussie staat en de enige invoer vormt uit de KNMI'23 scenario's zijn de resultaten uit de *effectmodule scheepvaart* **wel** geaccepteerd door Rijkswaterstaat.

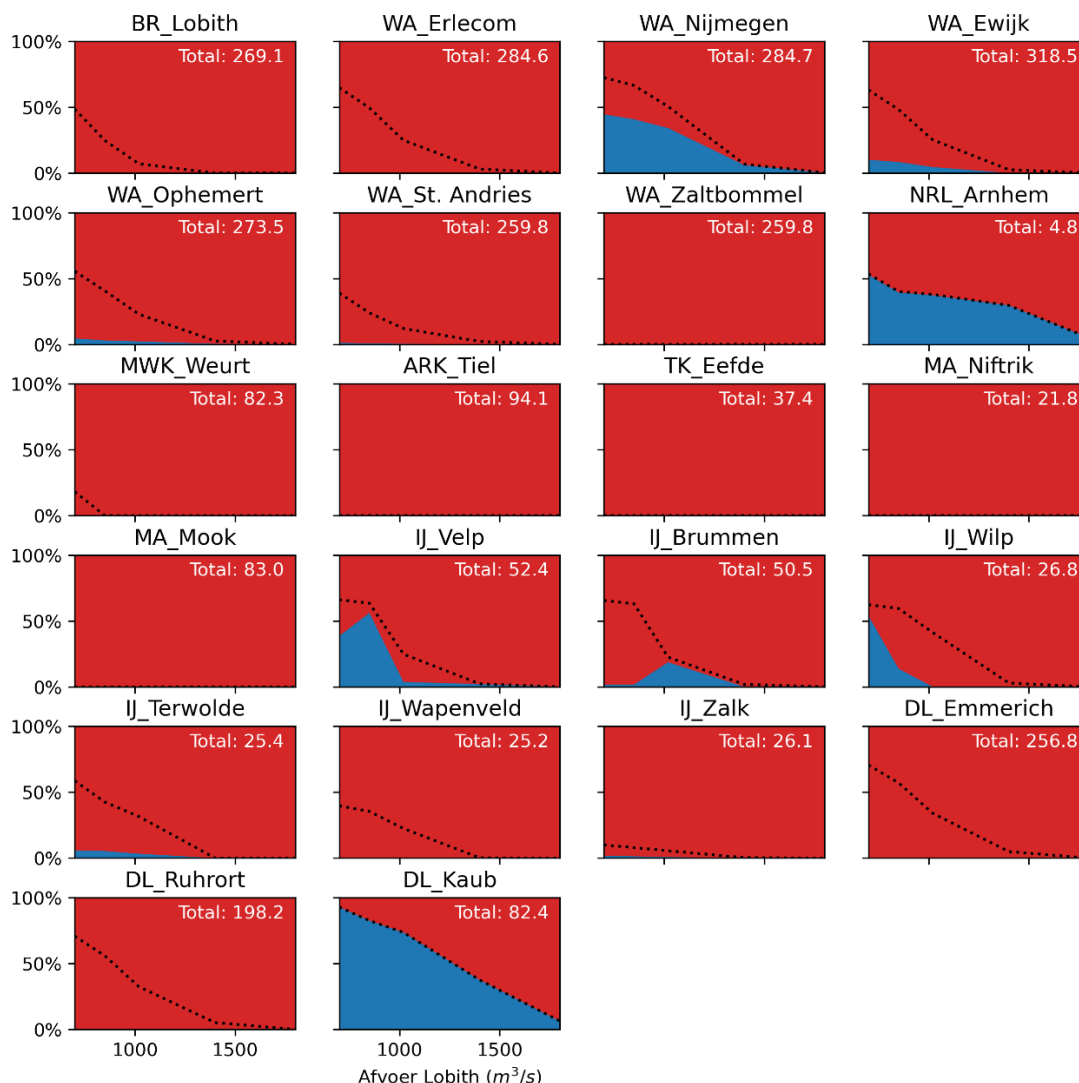
Voor dit project zijn eerst relaties tussen waterdiepte en vaarkosten per dag opgesteld voor alle knelpunten in QINCoM op de Waal (paragraaf 0) en op de IJssel (paragraaf 0). De vaarkosten per knelpunt zijn bepaald op basis van de afvoer–diepgangrelatie die in QINCoM zit. De diepgang is gelijk aan de waterdiepte minus 20 centimeter kielspeling. In het vervolg van het rapport is bij alle vaarkosten in plaats van de diepgang de corresponderende waterdiepte gegeven. Omdat de vaarkosten in QINCoM gebaseerd zijn op 2014, zijn alle kosten vermenigvuldigd met 1,262 om een conversie naar prijspeil 2024 uit te voeren (Janse et al., 2024).

Vervolgens zijn deze vaarkosten per dag voor prijspeil 2024 omgezet naar transportkosten, door toevoeging van de kosten voor opslag en *modal shift*. Als vracht te lang blijft liggen, kan ervoor worden gekozen om de lading over de weg of per spoor te vervoeren in plaats van via binnenvaart. Dit brengt extra transportkosten met zich mee. De vaarkosten per dag zijn vermenigvuldigd met een factor 1,5 (gebaseerd op Janse et al., 2024) om de totale transportkosten per dag te bepalen. Om de totale transportkosten per dag inclusief emissies⁵ te berekenen zijn de vaarkosten vermenigvuldigd met een factor 2,4 (gebaseerd op Janse et al., 2024).

⁴ Het is mogelijk om voor ieder knelpunt een lokale afvoer te definiëren en daarmee de uitvoer van LSM3 te koppelen aan QINCoM, binnen Klimaatbestendige Netwerken wordt dit in verscheidene projecten gedaan.

⁵ Voor emissies worden CO₂, NO_x, Fijnstof en SO₂ meegenomen; zie Janse et al., 2024

Uit de gepresenteerde kengetallen voor de Waal en de IJssel kan voor een knelpunt de potentiële verandering in *vaar-* of *transportkosten* per dag per m³ of per centimeter waterdiepte bepaald worden voor alle routes langs dat knelpunt. Het knelpunt zal niet voor alle routes maatgevend zijn (Figuur 5-1). Een verandering in waterdiepte bij een specifiek knelpunt resulteert niet altijd voor alle schepen in een verandering in meegenomen vracht, omdat het maatgevende knelpunt zich elders kan bevinden (waaronder in Duitsland). Voor het gebruik van de kengetallen is het noodzakelijk om per maatregel de tabel van het maatgevende knelpunt te gebruiken. De *vaar-* of *transportkosten* per dag zullen dan een overschatting zijn van het effect doordat het maatgevende knelpunt kan veranderen en zich ook elders (waaronder in Duitsland) kan bevinden voor een deel van de scheepvaart. Het precieze effect vraagt een meer gedetailleerde modellering van de scheepvaart.



Figuur 5-1 Maatgevende knelpunten binnen QINCoM als percentage van het totaal aantal reizen langs dat knelpunt. In blauw (afhankelijk van de afvoer bij Lobith) het percentage van de reizen die dat knelpunt als maatgevend ervaren. De stippellijn geeft aan voor welk deel van de passerende schepen het een maatgevend kan worden als de vaardiepte bij andere knelpunten enkele decimeters meer of minder wordt.

5.2.1.1 Waal

Vaarkosten

Deze paragraaf toont de relaties tussen lokale waterdiepte en vaarkosten voor alle knelpunten op de Waal (Tabel 5-2 t/m Tabel 5-7). Het gaat om de totale vaarkosten van alle routes die langs het specifieke knelpunt gaan. De kosten van verschillende knelpunten kunnen dus niet bij elkaar opgeteld worden, omdat sommige routes dan dubbel geteld worden.

Tabel 5-2 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Erlecom voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Erlecom (m³/s)	Waterdiepte Erlecom (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Erlecom (k€/dag)
700	575	2,08	12.252,28
850	693	2,40	9.660,43
1020	826	2,79	6.644,12
1400	1117	3,60	4.635,56
1800	1393	4,32	4.294,74

Tabel 5-3 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Nijmegen voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Nijmegen (m³/s)	Waterdiepte Nijmegen (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Nijmegen (k€/dag)
700	575	1,71	12.252,67
850	693	2,00	9.660,72
1020	826	2,38	6.644,41
1400	1117	3,21	4.635,75
1800	1393	3,95	4.294,94

Tabel 5-4 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Ewijk voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Ewijk (m³/s)	Waterdiepte Ewijk (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Ewijk (k€/dag)
700	573	2,05	12.274,94
850	691	2,41	9.737,71
1020	824	2,79	6.782,43
1400	1115	3,63	4.828,33
1800	1391	4,38	4.499,03

Tabel 5-5 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Ophemert voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Ophemert (m³/s)	Waterdiepte Ophemert (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Ophemert (k€/dag)
700	512	2,11	10.603,06
850	631	2,46	8.469,17
1020	770	2,78	5.938,18
1400	1084	3,63	4.249,36
1800	1388	4,41	3.969,29

Tabel 5-6 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor St. Andries voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer St. Andries (m³/s)	Waterdiepte St. Andries (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs St. Andries (k€/dag)
700	512	2,52	10.514,79
850	631	2,76	8.411,27
1020	770	3,03	5.899,17
1400	1084	3,71	4.221,85
1800	1388	4,38	3.943,30

Tabel 5-7 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Zaltbommel voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Zaltbommel (m³/s)	Waterdiepte Zaltbommel (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Zaltbommel (k€/dag)
700	512	2,65	10.514,78
850	631	2,82	8.411,27
1020	770	3,04	5.899,18
1400	1084	3,60	4.221,85
1800	1388	4,18	3.943,31

Transportkosten exclusief en inclusief emissies

Deze paragraaf toont de transportkosten per dag, zowel exclusief als inclusief emissies, voor alle knelpunten op de Waal (Tabel 5-8 t/m Tabel 5-13).

Tabel 5-8 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Erlecom voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Erlecom (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Erlecom (k€/dag)	Transportkosten routes langs Erlecom (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Erlecom (k€/dag)
2,08	12.252,28	18.378,42	29.405,48
2,40	9.660,43	14.490,65	23.185,03
2,79	6.644,12	9.966,18	15.945,89
3,60	4.635,56	6.953,34	11.125,34
4,32	4.294,74	6.442,12	10.307,39

Tabel 5-9 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Nijmegen voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Nijmegen (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Nijmegen (k€/dag)	Transportkosten routes langs Nijmegen (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Nijmegen (k€/dag)
1,71	12.252,67	18.379,01	29.406,41
2,00	9.660,72	14.491,08	23.185,73
2,38	6.644,41	9.966,61	15.946,57
3,21	4.635,75	6.953,63	11.125,81
3,95	4.294,94	6.442,41	10.307,87

Tabel 5-10 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Ewijk voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Ewijk (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Ewijk (k€/dag)	Transportkosten routes langs Ewijk (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Ewijk (k€/dag)
2,05	12.274,94	18.412,41	29.459,85
2,41	9.737,71	14.606,56	23.370,50
2,79	6.782,43	10.173,65	16.277,84
3,63	4.828,33	7.242,49	11.588,98
4,38	4.499,03	6.748,55	10.797,68

Tabel 5-11 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Ophemert voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Ophemert (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Ophemert (k€/dag)	Transportkosten routes langs Ophemert (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Ophemert (k€/dag)
2,11	10.603,06	15.904,59	25.447,34
2,46	8.469,17	12.703,76	20.326,01
2,78	5.938,18	8.907,28	14.251,64
3,63	4.249,36	6.374,05	10.198,47
4,41	3.969,29	5.953,93	9.526,30

Tabel 5-12 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs St. Andries voor prijspeil 2024.

Waterdiepte St. Andries (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs St. Andries (k€/dag)	Transportkosten routes langs St. Andries (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs St. Andries (k€/dag)
2,52	10.514,79	15.772,18	25.235,49
2,76	8.411,27	12.616,90	20.187,04
3,03	5.899,17	8.848,76	14.158,02
3,71	4.221,85	6.332,77	10.132,44
4,38	3.943,30	5.914,95	9.463,93

Tabel 5-13 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Zaltbommel voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Zaltbommel (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Zaltbommel (k€/dag)	Transportkosten routes langs Zaltbommel (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Zaltbommel (k€/dag)
2,65	10.514,78	15.772,16	25.235,46
2,82	8.411,27	12.616,90	20.187,04
3,04	5.899,18	8.848,77	14.158,03
3,60	4.221,85	6.332,78	10.132,45
4,18	3.943,31	5.914,96	9.463,94

5.2.1.2 IJssel

Vaarkosten

Deze paragraaf toont de relaties tussen lokale waterdiepte en vaarkosten voor alle knelpunten op de IJssel (Tabel 5-14 t/m Tabel 5-19). Het gaat wederom om de totale vaarkosten van alle routes die langs het specifieke knelpunt gaan. De kosten van verschillende knelpunten kunnen dus niet bij elkaar opgeteld worden, omdat sommige routes dan dubbel geteld worden.

Tabel 5-14 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Velp voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Velp (m³/s)	Waterdiepte Velp (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Velp (k€/dag)
700	104	1,65	909,44
850	132	1,93	602,86
1020	167	2,26	415,33
1400	251	3,10	331,59
1800	319	3,74	321,78

Tabel 5-15 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Brummen voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Brummen (m³/s)	Waterdiepte Brummen (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Brummen (k€/dag)
700	104	1,76	899,31
850	132	2,00	595,36
1020	167	2,26	409,26
1400	251	3,10	326,70
1800	319	3,77	317,05

Tabel 5-16 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Wilp voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Wilp (m³/s)	Waterdiepte Wilp (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Wilp (k€/dag)
700	88	1,49	542,18
850	116	1,84	358,28
1020	151	2,21	231,84
1400	257	3,12	160,14
1800	327	3,70	150,49

Tabel 5-17 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Terwolde voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Terwolde (m³/s)	Waterdiepte Terwolde (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Terwolde (k€/dag)
700	88	1,78	497,69
850	116	2,09	334,26
1020	151	2,45	216,14
1400	257	3,35	149,72
1800	327	3,90	140,37

Tabel 5-18 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Wapenveld voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Wapenveld (m³/s)	Waterdiepte Wapenveld (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Wapenveld (k€/dag)
700	88	2,27	497,41
850	116	2,42	334,01
1020	151	2,62	215,91
1400	257	3,21	149,52
1800	327	3,61	140,18

Tabel 5-19 Relatie afvoer-waterdiepte-vaarkosten voor Zalk voor prijspeil 2024.

Afvoer Lobith (m³/s)	Afvoer Zalk (m³/s)	Waterdiepte Zalk (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Zalk (k€/dag)
700	88	2,89	417,91
850	116	2,93	289,12
1020	151	3,00	193,76
1400	257	3,19	140,76
1800	327	3,35	133,00

Transportkosten exclusief en inclusief emissies

Deze paragraaf toont de transportkosten per dag, zowel exclusief als inclusief emissies, voor alle knelpunten op de IJssel (Tabel 5-20 t/m Tabel 5-25).

Tabel 5-20 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Velp voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Velp (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Velp (k€/dag)	Transportkosten routes langs Velp (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Velp (k€/dag)
1,65	909,44	1.364,16	2.182,65
1,93	602,86	904,29	1.446,87
2,26	415,33	623,00	996,80
3,10	331,59	497,38	795,81
3,74	321,78	482,68	772,28

Tabel 5-21 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Brummen voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Brummen (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Brummen (k€/dag)	Transportkosten routes langs Brummen (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Brummen (k€/dag)
1,76	899,31	1.348,98	2.158,36
2,00	595,36	893,04	1.428,86
2,26	409,26	613,88	982,21
3,10	326,70	490,05	784,08
3,77	317,05	475,58	760,92

Tabel 5-22 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Wilp voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Wilp (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Wilp (k€/dag)	Transportkosten routes langs Wilp (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Wilp (k€/dag)
1,49	542,18	813,27	1.301,24
1,84	358,28	537,42	859,87
2,21	231,84	347,76	556,42
3,12	160,14	240,21	384,33
3,70	150,49	225,73	361,18

Tabel 5-23 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Terwolde voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Terwolde (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Terwolde (k€/dag)	Transportkosten routes langs Terwolde (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Terwolde (k€/dag)
1,78	497,69	746,54	1.194,47
2,09	334,26	501,40	802,23
2,45	216,14	324,21	518,73
3,35	149,72	224,57	359,32
3,90	140,37	210,56	336,89

Tabel 5-24 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Wapenveld voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Wapenveld (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Wapenveld (k€/dag)	Transportkosten routes langs Wapenveld (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Wapenveld (k€/dag)
2,27	497,41	746,11	1.193,78
2,42	334,01	501,01	801,62
2,62	215,91	323,86	518,17
3,21	149,52	224,29	358,85
3,61	140,18	210,27	336,43

Tabel 5-25 Relatie waterdiepte-vaarkosten-transportkosten (exclusief en inclusief emissies) voor alle routes langs Zalk voor prijspeil 2024.

Waterdiepte Zalk (m +NAP)	Vaarkosten alle routes langs Zalk (k€/dag)	Transportkosten routes langs Zalk (k€/dag)	Transportkosten incl. emissies routes langs Zalk (k€/dag)
2,89	417,91	626,87	1002,99
2,93	289,12	433,68	693,89
3,00	193,76	290,64	465,02
3,19	140,76	211,14	337,83
3,35	133,00	199,49	319,19

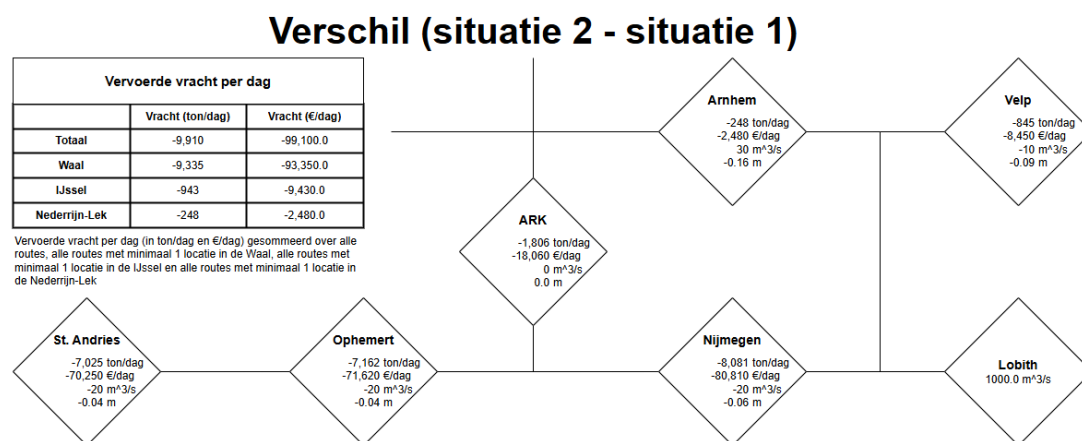
5.2.1.3 Rekenvoorbeeld

Om de inzet van de kengetallen te illustreren volgen in deze paragraaf twee rekenvoorbeelden. Het eerste rekenvoorbeeld is een eenvoudige maatregel waarbij de kengetallen relatief eenvoudig zijn te gebruiken. Het andere rekenvoorbeeld is een complexere ingreep waarbij er met meerdere aspecten rekening gehouden moet worden.

Voor het eerste rekenvoorbeeld wordt uitgegaan van een afvoer van 850 m³/s bij Lobith voor een nog niet aantal gedefinieerd aantal dagen per jaar. De ingreep is het vergroten van de waterdiepte bij Nijmegen met 38 centimeter. Uit Tabel 5-9 volgt dat de transportkosten inclusief emissies afnemen met 23.185,73 – 15.946,57 = 7.239,16 k€ per dag. Nu is dit niet het maatgevende knelpunt voor alle schepen die het knelpunt passeren (Figuur 5-1). Ongeveer 40% van alle schepen die Nijmegen passeren ervaren dat punt als maatgevend bij deze afvoer. De maximale baten zijn dus 2.895,66 k€ per dag. Een laatste noodzakelijke check is kijken of andere locaties op de Waal het nieuwe maatgevende knelpunt worden bij de nieuwe vaardiepte. Geen van de andere locaties hebben een vaardiepte kleiner dan 2,38 meter bij een afvoer van 850 m³/s. Nijmegen blijft dus het maatgevende knelpunt voor 40% van de schepen.

Het tweede rekenvoorbeeld is een wijziging in de afvoerverdeling tussen de Rijntakken. In dit rekenvoorbeeld wordt bij 1000 m³/s bij Lobith 60 m³/s in plaats van 30 m³/s naar de Nederrijn-Lek gestuurd via Driel. Er gaat 20 m³/s af van de Waal en 10 m³/s van de IJssel. Uit Figuur 5-1 volgt dat op de IJssel bij deze afvoer Velp, Brummen, Wip en Terwolde allen in meer of mindere mate het maatgevende knelpunt kunnen vormen. Op de Waal is vooral Nijmegen het maatgevende knelpunt en zijn Ewijk en Ophemert minder bepalend. Voor ieder knelpunt dient het verschil in transportkosten te worden genomen tussen de twee *lokale afvoerniveaus*. Vervolgens wordt per knelpunt dit bedrag vermenigvuldigd te worden met het percentage maatgevende reizen van dat knelpunt (Figuur 5-1). De som van deze kosten is het totale effect op de scheepvaart.

Een alternatief voor dit soort vragen is het direct gebruiken van QINCoM waarin de maatgevende knelpunten automatisch worden verwerkt. Voor het Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW) is met behulp van QINCoM een operationele tool opgezet om variaties in waterverdeling door te rekenen (Figuur 5-2). Een soortgelijke tool zou ook inzetbaar kunnen zijn voor dit soort vraagstukken.



Figuur 5-2 Voorbeeld van de operationele tool van de LCW om waterverdelingsvariaties door te rekenen op basis van QINCoM. Deze resultaten zijn voor het rekenvoorbeeld en gaan uit van een vrachtprijs van 10 euro per ton, deze kosten per ton zijn aan te passen door de gebruiker net als de debieten richting Driel of Tiel.

5.2.2 Maas

Bij het opstellen van een relatie tussen afvoer en vaarkosten op de Maas, wordt vooral gekeken naar de sluizen. Tijdens een periode van lage afvoer zal de beschikbare afvoer voor de sluizen minder zijn dan de benodigde afvoer voor het schutbedrijf. Om deze benodigde afvoer te reduceren zal een combinatie van schutregimes (meer schepen per schutting), hevelend schutten en pompen worden ingezet. Hierdoor nemen de wachttijd en de vaarkosten per sluis toe voor de binnenvaart bij afnemende afvoer. Op de Maas wordt dus niet naar de kosten per dag van alle routes langs een bepaald punt gekeken, maar naar de passeerkosten per dag per sluis voor specifieke afvoeren bij St. Pieter. Uit een *quick-scan* van Van der Mark & De Jong (2020) blijkt dat de sluizen Born, Maasbracht en in mindere mate Heel het meest kwetsbaar zijn voor beperkte waterbeschikbaarheid door droogte. In De Jong & Boschetti (2021) zijn voor deze drie sluizen de extra kosten per dag bepaald voor verschillende strategieën. Voor elke sluis is in de onderstaande paragrafen voor de meest aannemelijke strategie een relatie opgesteld tussen de afvoer bij St. Pieter, het beschikbare debiet bij de sluis (volgens het Maasafvoeroverdrag) en de kosten per dag. Belangrijk om te vermelden is dat deze vaarkosten niet alleen de extra kosten voor scheepvaart door langere wachttijden omvatten, maar ook de extra kosten voor Rijkswaterstaat door een toename in het energieverbruik door extra te pompen. Ook voor de Maas zijn de vaarkosten vermenigvuldigd met een factor 1,262 (Janse et al., 2024) om een prijspeilcorrectie naar 2024 door te voeren. De vertaling naar transporten inclusief en exclusief emissies is niet uitgevoerd omdat hiervoor geen pasklare methodiek beschikbaar is voor de wachttijden. De factoren uit de effectmodule zijn naar verwachting niet 1-op-1 toepasbaar.

De kengetallen voor de Maas kunnen in tegenstelling tot de Rijntakken wel worden gesommeerd. De toename in *vaarkosten inclusief operationele kosten* voor Rijkswaterstaat zullen oplopen per sluis voor de scheepvaart en is in dit geval niet afhankelijk van een maatgevend knelpunt. Mogelijk dat er ook sprake is van extra kosten bij de andere sluizen op de Maas, maar omdat deze minder kwetsbaar zijn zullen de gevolgen beperkt zijn.

5.2.2.1 Sluis Born

Tabel 5-26 toont de afvoer-kosten relatie voor de laagwaterstrategie ‘gelijke kosten’ voor sluis Born. Bij deze strategie wordt bij iedere waterbesparing een gelijke verdeling van de kosten tussen extra pompinzet en passeerkosten gemaakt. Opgemerkt moet wel worden dat de kosten niet exact gelijk verdeeld worden, omdat de eerste winst altijd gehaald wordt door het instellen van een eerste schutregime en nog niet door extra pompen. Een gedetailleerde beschrijving is te vinden in Jong & Boschetti (2021).

Tabel 5-26 Afvoer-kosten relatie voor de laagwaterstrategie ‘gelijke kosten’ bij sluis Born voor prijspeil 2024.

Afvoer bij St. Pieter (m³/s)	Beschikbaar debiet bij sluis Born (m³/s)	Kosten per dag voor sluis Born (k€/dag)
10	0,00	7,74
15	1,08	6,88
20	1,40	6,63
25	2,38	5,85
44	12,40	0,27

5.2.2.2 Sluis Maasbracht

Tabel 5-27 toont de afvoer-kosten relatie voor de laagwaterstrategie 'gelijke kosten' voor sluis Maasbracht. Net als bij sluis Born, wordt bij deze strategie bij iedere waterbesparing een gelijke verdeling van de kosten tussen extra pompinzet en passeerkosten gemaakt. Opgemerkt wordt nogmaals dat de kosten niet exact gelijk verdeeld worden, omdat de eerste winst altijd gehaald wordt door het instellen van een eerste schutregime en nog niet door extra pompen. Een gedetailleerde beschrijving is te vinden in Jong & Boschetti (2021).

Tabel 5-27 Afvoer-kosten relatie voor de laagwaterstrategie 'gelijke kosten' bij sluis Maasbracht voor prijspeil 2024.

Afvoer bij St. Pieter (m³/s)	Beschikbaar debiet bij sluis Maasbracht (m³/s)	Kosten per dag voor sluis Maasbracht (k€/dag)
10	0,00	7,75
15	1,08	6,84
20	1,40	6,57
25	2,38	5,74
44	12,40	0,74

5.2.2.3 Sluis Heel

Tabel 5-28 toont de afvoer-kosten relatie voor de laagwaterstrategie 'schutregimes' voor sluis Heel. In dit scenario worden enkel schutregimes ingezet en pas als daar geen besparing meer mee kan worden verkregen, worden pompen ingezet. Een gedetailleerde beschrijving is te vinden in Jong & Boschetti (2021).

Tabel 5-28 Afvoer-kosten relatie voor de laagwaterstrategie 'schutregimes' bij sluis Heel voor prijspeil 2024.

Afvoer bij St. Pieter (m³/s)	Beschikbaar debiet bij sluis Heel (m³/s)	Kosten per dag voor sluis Heel (k€/dag)
10	0,00	20,57
15	0,25	19,65
20	2,45	11,50
25	5,34	1,47
44	15,40	0,00

5.2.2.4 Rekenvoorbeeld

Om de werking van de gepresenteerde kengetallen te illustreren volgt een rekenvoorbeeld. In dit fictieve voorbeeld wordt uitgegaan van een debiet van 25 m³/s bij St. Pieter voor een nog niet nader gespecificeerd aantal dagen per jaar. Bij dit debiet op de Maas wordt al het beschikbare water gebruikt voor het bij Born en Heel terecht komt. Er is bij Heel wel de normale hoeveelheid afvoer beschikbaar.

De toename in vaarkosten is het verschil tussen de normale situatie en nieuwe situatie. Voor Born (Tabel 5-26) is dat $7,74 - 5,85 = 1,89$ k€ per dag. Additioneel komen er bij Maasbracht (Tabel 5-27) $7,75 - 5,74 = 2,01$ k€ per dag. Omdat er bij Heel geen verminderingen in debiet zijn volgen hier geen additionele vaarkosten. De totale toename in vaarkosten per dag zijn 3,90 k€.

5.2.3 Betuwepand

Voor het Betuwepand wordt gekeken naar vaarkosten door laagwater bij de Bernhardsluizen (paragraaf 5.2.3.1), de Irenesluizen (paragraaf 5.2.3.2) en de Waal benedenstrooms van het Amsterdam Rijn-kanaal (ARK) (paragraaf 0). Voor dit onderdeel is geen factor toegepast om *vaarkosten* om te zetten naar *transportkosten* (inclusief en exclusief emissies).

Voor het bepalen van het effect op scheepvaart van maatregelen in het Midden-Rivierengebied dienen de vaarkosten van alle onderdelen te worden gesommeerd. Hierbij is er voor de Bernhard- en Irenesluizen sprake van een voorwaardelijke kostenpost afhankelijk van het debiet. Hierbij wordt altijd uitgegaan van additionele vaarkosten ten opzichte van een situatie zonder beperkingen voor de scheepvaart.

5.2.3.1 Bernhardsluizen

Bij een afvoer van 1250 m³/s of lager bij Lobith worden de Prins Bernhardsluizen op het Betuwepand geopend (Lieveense Milieu B.V., 2019), omdat de waterstand op het stuwpand dan hoger is dan op de Waal. Hierdoor komt het pand Amerongen-Hagestein in open verbinding te staan met de Waal. In deze situatie kan water via het Betuwepand naar de Lek (via Hagestein) of naar het Amsterdam-Rijnkanaal (via de Irenesluizen) worden gestuurd.

Met het verhogen van de afvoer door het Betuwepand neemt de stroomsnelheid bij de Bernhardsluizen toe. Bij hogere stroomsnelheden is het op een gegeven moment niet meer mogelijk om veilig één of beide kolken te passeren. De grootste scheepsklassen ondervinden als eerste hinder. Op basis van metingen in 2022 zijn de volgende drempelwaarden⁶ bepaald voor de scheepvaart:

- 1 Als de afvoer door het Betuwepand (gemiddeld) hoger is dan 85 m³/s is er een stremming voor schepen groter dan CEMT-klasse VIa.
- 2 Bij een afvoer groter dan 115 m³/s gemiddeld door het Betuwepand is er een stremming voor schepen groter dan CEMT-klasse Vb.

In Tabel 5-29 worden de additionele vaarkosten voor de twee drempelwaarden getoond voor drie verschillende afvoeren bij Lobith. De afvoeren van 1.400 m³/s en 1.800 m³/s vallen af, omdat de Bernhardsluizen nog gesloten zijn en als normale schutsluizen functioneren. Stremmingen als gevolg van hoge stroomsnelheden zijn dan niet aan de orde. De additionele vaarkosten per dag omvatten de vaarkosten voor de scheepsklassen die dan niet meer kunnen varen. Er wordt dus aangenomen dat het maatschappelijke effect gelijk is aan de niet uitgevoerde scheepsbewegingen. In werkelijkheid zal het daadwerkelijk effect een stuk complexer zijn door inzet van andere schepen (die nog wel mogen varen) of door inzet van andere modaliteiten. Het maatschappelijke effect kan zowel groter als kleiner zijn dan hier bepaald. De gegevens zijn afkomstig uit Van der Wijk et al. (2024a; 2024b) gecorrigeerd naar het prijspeil van 2024.

⁶ Het verschil tussen het gemeten daggemiddelde debiet en het tijdelijke maximale debiet kan 10 – 50% en in uitzonderlijke gevallen 80% zijn. Indien er een veiligheidsmarge wordt gehanteerd voor de nautische veiligheid zou de drempelwaarde voor het daggemiddelde debiet een stuk lager kunnen zijn.

Tabel 5-29 Additionele vaarkosten per dag voor de Bernhardsluizen voor vijf afvoerscenario's bij Lobith als gevolg van gedeeltelijke stremming Bernhardsluizen voor twee afvoerniveaus door het Betuwepand

Afvoer Lobith (m3/s)	Additionele vaarkosten Bernhardsluizen 85 – 115 m³/s Betuwepand (k€/dag)	Additionele vaarkosten Bernhardsluizen >115 m³/s Betuwepand (k€/dag)
700	120	145
850	83	111
1020	56	87
1400	n.v.t.	n.v.t.
1800	n.v.t.	n.v.t.

5.2.3.2 Irenesluizen

In Van der Wijk et al. (2024b) is de volgende relatie tussen kosten en wachttijden voor één schip door de Irenesluizen opgesteld:

$$\text{Totale kosten wachttijd [€]} = 1,4517 \text{ [€/min]} * \text{Wachttijd bij Irenesluizen [min]}$$

Afhankelijk van het debiet door de oude kolk zijn er drie scenario's voor de Irenesluizen. De eerste kolom in Tabel 5-30 toont deze drie verschillende scenario's. Op basis van IVS-gegevens uit 2022 zijn in Van der Wijk et al. (2024b) de mediane wachttijden per scenario bepaald (kolom 2, Tabel 5-30). Om de totale mediane kosten per dag (i.p.v. per schip) door wachttijd bij de Irenesluizen voor prijspeil 2024 te bepalen, wordt de bovenstaande relatie herschreven tot:

$$\begin{aligned} \text{Totale kosten wachttijd [€]} &= 1,4517 \left[\frac{\text{€}}{\text{min}} \right] * \text{Wachttijd bij Irenesluizen [min]} * \\ &\text{Prijspeilcorrectiefactor [-]} * \text{Gemiddeld aantal schepen per dag [-]} \end{aligned}$$

Waarin voor de prijspeilcorrectie wederom de factor van 1,262 (Janse et al., 2024) is gebruikt en het gemiddeld aantal schepen per dag 78,4 is (Van der Wijk et al., 2024b). Opgemerkt moet worden dat wanneer naar gemiddeld aantal schepen per dag wordt gekeken, de wekelijkse variatie wordt uitgemiddeld. De laatste kolom van Tabel 5-30 toont de totale mediane kosten per dag door wachttijd bij de Irenesluizen.

Tabel 5-30 Mediane wachttijd en totale mediane kosten per dag door wachttijd voor elk scenario bij de Irenesluizen.

Debiet door de Irenesluizen m³/s	Mediane wachttijd per schip (min)	Totale mediane kosten per dag door wachttijd bij Irenesluizen (k€/dag)
< 30 m³/s (geen schutbeperkingen)	10,0	1,44
30 – 60 m³/s (stremming oude kolk 's nachts)	11,0	1,58
> 60 m³/s (volledige stremming oude kolk)	29,0	4,17

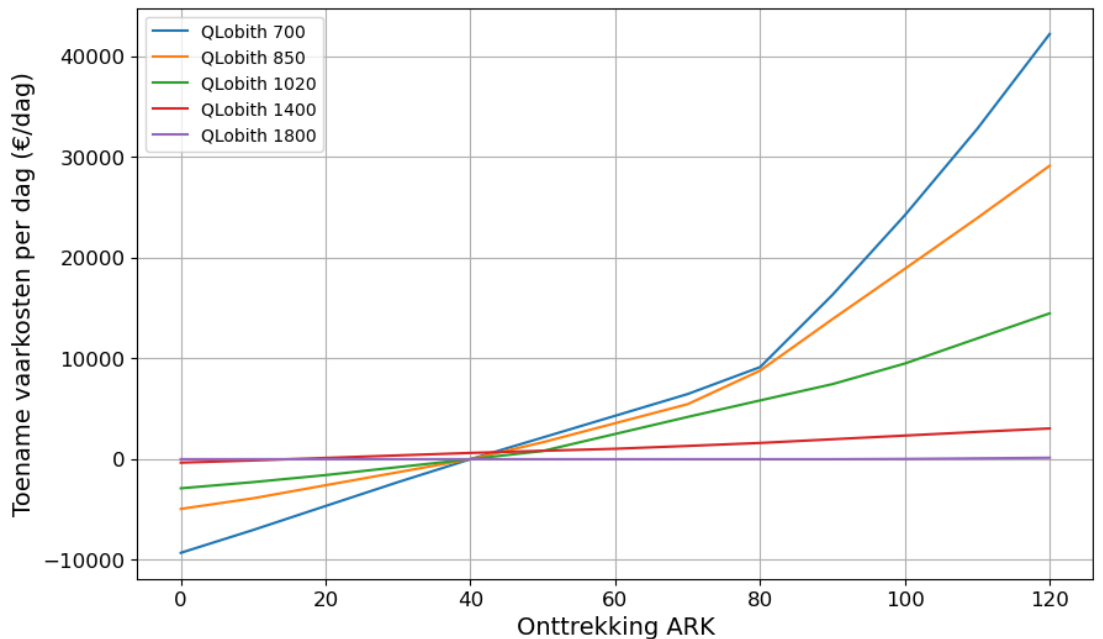
5.2.3.3 Waal benedenstrooms

Deze paragraaf gaat in op de totale extra vaarkosten door onttrekkingen uit het ARK ten opzichte van een referentiesituatie. Hiervoor wordt dezelfde aanpak gebruikt als bij de *Webapplicatie Rapid Assessment Scheepvaart: ARK en Driel maatregelen* (Zagonjoli & Van Hemert, 2024) is gebruikt. Als er meer wordt onttrokken dan in de referentiesituatie, zorgt de lagere waterstand op de Waal benedenstrooms voor extra vaarkosten. Tabel 5-31 toont de referentie-onttrekkingen van het ARK voor verschillende afvoeren bij Lobith. Deze verdeling wijkt iets af van die is gebruikt bij het bepalen van de vaarkosten op de Waal en de IJssel. Voor de extra kosten wordt de onttrekking gevarieerd tussen 0 en 120 m³/s.

Figuur 5-3 toont voor vijf afvoeren bij Lobith de toename in vaarkosten per dag voor alle scheepvaartroutes over de Waal en de IJssel voor verschillende onttrekkingen uit het ARK ten opzichte van de referentiesituatie. Deze kosten zijn ook weergegeven in Tabel 5-32. Omdat er per afvoer bij Lobith een referentiesituatie is voor de afvoer door het ARK, is de toename in kosten per dag bepaald ten opzichte van de kosten per dag bij deze referentie-afvoer. Wanneer er een lagere afvoer door het ARK wordt opgelegd dan in de referentiesituatie, zal de waterstand benedenstrooms op de Waal hoger zijn en zal er dus een afname in vaarkosten zijn (negatieve toename) ten opzichte van de referentiesituatie. Een lager debiet naar het ARK levert dus baten op voor de scheepvaart.

Tabel 5-31. Onttrekkingen ARK voor de referentiesituatie en de range van onttrekkingen waarvoor de extra vaarkosten berekend zijn voor verschillende afvoeren bij Lobith.

Q Lobith (m³/s)	700	850	1020	1400	1800
Q ARK (m³/s): Referentie	40	40	40	15	1
Q ARK (m³/s)	0-120	0-120	0-120	0-120	0-120



Figuur 5-3 Totale toename in vaarkosten per dag voor het gehele systeem ten opzichte van de referentiesituatie bij onttrekkingen van het ARK van 0 – 120 m³/s voor vijf afvoeren bij Lobith.

Tabel 5-32 Totale toename in vaarkosten per dag (k€/dag) ten opzichte van de referentiesituatie bij onttrekkingen van het ARK van 0 – 120 m³/s voor vijf afvoeren bij Lobith.

Q ARK (m ³ /s)	Totale toename in vaarkosten (k€/dag) voor verschillende Q Lobith (m ³ /s)				
	700	850	1020	1400	1800
0	-9,29	-4,94	-2,89	-0,34	0,00
10	-7,02	-3,88	-2,28	-0,13	0,00
20	-4,64	-2,59	-1,58	0,13	0,00
30	-2,27	-1,29	-0,79	0,38	0,00
40	0,00	0,00	0,00	0,62	0,00
50	2,15	1,68	0,82	0,83	0,00
60	4,31	3,57	2,51	1,03	0,00
70	6,46	5,46	4,19	1,31	0,00
80	9,14	8,79	5,83	1,61	0,00
90	16,31	13,90	7,45	1,98	0,00
100	24,22	18,90	9,49	2,34	0,03
110	32,79	23,93	11,98	2,71	0,08
120	42,20	29,13	14,47	3,05	0,14

5.2.3.4 Rekenvoorbeeld

Om de werking van de kengetallen uit voorgaande paragrafen te illustreren volgt een rekenvoorbeeld van een hypothetische maatregel. De maatregel is dat vanaf een afvoer lager dan 1020 m³/s bij Lobith standaard 50 m³/s aanvullend wordt aangevoerd naar het Amsterdam-Rijnkanaal voor een totaal debiet naar het Noordpand van 70 m³/s. Voor het gemak gaan we er nu van uit dat de afvoer bij Lobith in dit scenario altijd tussen de 850 en 1020 m³/s is, voor lagere afvoeren geldt hetzelfde principe voor de berekening maar moeten de andere getallen uit de tabellen worden gehaald.

Stap 1 – Invloed onttrekking op waterstand Waal

De eerste stap is de kosten per dag op de Waal door de lagere afvoer benedenstrooms van Tiel. In Tabel 5-32 is in kolom 1020 m³/s de toename in vaarkosten (in k€ per dag) te vinden. 50 m³/s additioneel resulteert in 90 m³/s (referentie is 40 m³/s). De toename in vaarkosten is dus 7,45 k€ per dag waarin de maatregel actief is.

Stap 2 – Check op potentiële stremming Bernhardsluizen

De volgende stap is kijken of de drempelwaarde bij de Bernhardsluizen wordt overschreden in Tabel 5-29. 90 m³/s resulteert inderdaad in een overschrijding van de drempelwaarde. Met een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith zijn de additionele vaarkosten 56 k€ per dag waarin de maatregel actief is.

Stap 3 – Check op potentiële extra wachttijden bij Irenesluizen

Vervolgens wordt gekeken of de drempelwaarden bij de Irenesluizen worden overschreden. In de referentie zou minder dan 30 m³/s door de Irenesluizen gaan terwijl er nu meer dan 60 m³/s wordt aangevoerd. Het resultaat is een toename in vaarkosten van 4,17 – 1,44 = 2,73 k€ per dag (Tabel 5-30).

Stap 4 – Sommatie

Het eindresultaat is een sommatie van de drie componenten. In dit geval komt dat neer op een toename in vaarkosten van 66,18 k€ per dag waarin de maatregel actief is.

6 Conclusie en aanbevelingen

In dit rapport zijn de maatschappelijke effecten van veranderende waterbeschikbaarheid voor vier zoetwatergebruiksfuncties beschreven: landbouw, scheepvaart, CO₂ uitstoot door veenoxidatie en funderingsschade. Voor deze vier sectoren zijn effectmodules toegepast om het maatschappelijk effect te kwantificeren.

Dit rapport levert twee typen resultaten: maatschappelijke effecten en kengetallen.

Maatschappelijke effecten

Voor de gebruiksfuncties landbouw, CO₂ uitstoot door veenoxidatie en scheepvaart zijn de maatschappelijke effecten uitgedrukt in de gemiddelde welvaartsverandering en de welvaartsverandering in een T20 droogtesituatie, voor Stoom2050 en indien mogelijk ook voor Stoom2100. Waar mogelijk is de welvaartsverandering uitgesplitst in de welvaartsverandering veroorzaakt door droogte en de welvaartsverandering door andere oorzaken, zoals prijsstijgingen en temperatuurontoemen.

Tabel 6-1 toont de welvaartsverandering per zoetwatergebruiksfunctie. De gemiddelde welvaartsverandering door veenoxidatie is het grootst (-910 Meuro/jaar). Als enkel naar het effect van droogte wordt gekeken is de welvaartsverandering door veenoxidatie juist relatief klein. Een groot deel van de welvaartsverandering wordt namelijk veroorzaakt door de verwachte prijsstijging van CO₂-waarden. De welvaartsverandering door droogte is bij landbouw en scheepvaart in dezelfde orde van grootte (ongeveer -110 miljoen euro/jaar in Stoom2050 en -310 miljoen euro per jaar in Stoom2100).

Tabel 6-1 Samenvatting van de welvaartsverandering gemiddeld en in een T20 droog jaar (beiden in miljoenen euro's per jaar) voor de verschillende sectoren. De effecten voor scheepvaart komen uit Schasfoort et al., 2024. Een aantal onderdelen zijn leeggelaten, deze waren niet mogelijk om te bepalen met de huidige effectmodules. De uitsplitsingen zijn globaal uitgevoerd.

Sector	Onderdeel	Gemiddelde welvaartsverandering [M euro/jaar]		Welvaartsverandering T20 jaar [M euro/jaar]	
		Stoom 2050	Stoom 2100	Stoom 2050	Stoom 2100
Landbouw	Droogte en berekening	-126	-315	-315	-779
	Klimaat (temperatuur en CO ₂)	+66	+282		
	Landgebruik	-490	-490		
	Totaal	-549	-523		
CO ₂ door veenoxidatie	Droogte	-18			
	Klimaat (temperatuur)	-115			
	Prijsstijging	-780			
	Totaal	-910		-1030	
Scheepvaart	Droogte	-102	-309	-326	-765

Sector	Onderdeel	Gemiddelde welvaartsverandering [M euro/jaar]	Welvaartsverandering T20 jaar [M euro/jaar]
Totaal	Droogte	-246	
	Totaal	-1705	

De herstelkosten van funderingsschade nemen met 6.4 miljard euro toe in Stoom 2050, daarvan wordt 906 miljoen euro veroorzaakt door klimaatverandering. Dit is echter niet direct uit te drukken in de welvaartsverandering in euro per jaar omdat dit toename in totale kosten zijn. Vandaar dat deze kosten niet zijn opgenomen in Tabel 6-1.

Kengetallen

Dit rapport presenteert de kengetallen behorend bij de zoetwatergebruiksfuncties landbouw, scheepvaart, CO2 door veenoxidatie en funderingsschade. Deze kengetallen tonen het maatschappelijk effect dat bereikt kan worden bij een toename in de waterbeschikbaarheid door maatregelen. Deze kengetallen worden in vervolgtrajecten gebruikt om de maatschappelijke baten van zoetwatermaatregelen in te schatten. Het gaat hierbij dus alleen om vermindering van droogte. Andere zaken zoals verandering in temperatuur en sociaaleconomische ontwikkelingen

De volgende kengetallen zijn bepaald:

- De baten in de landbouw als gevolg van extra beregeningswater uit oppervlaktewater;
- De baten in de landbouwsector (zowel voor consumenten als voor producenten) als gevolg van een hogere grondwaterstand in gebieden zonder wateraanvoer;
- De reductie in CO2 kosten als gevolg van grondwaterstand-verhoging;
- De vertaling van oppervlaktewaterstanden naar grondwaterstanden (nodig voor de reductie in CO2 kosten als gevolg van vermindering peilbeheer-tekorten);
- De baten van de reductie van funderingsschade als gevolg van een hogere grondwaterstand, uitgedrukt in €/cm GLG stijging per hectare en per object;
- De baten voor scheepvaart (zowel vaarkosten als transportkosten) als gevolg van veranderde debieten en waterdiepten.

Het toepassen van deze kengetallen vergt kennis van de zoetwatergebruiksfunctie en het watersysteem. Het was niet altijd mogelijk om eenvoudige relaties op te stellen. In dit rapport staat daarom ook beschreven hoe het kengetal gebruikt kan worden, of is in een kaart aangegeven op welke regio's het kengetal betrekking heeft. Toepassing van de kengetallen moet uitwijzen in hoeverre beleidsconclusies aan de resultaten kunnen worden verbonden.

Aanbevelingen

We doen de volgende aanbevelingen voor vervolg:

- De effectmodulen zitten nu niet in beheer en onderhoud. Het is aan te raden om dit wel te doen. Er zijn een aantal technische fouten in de effectmodulen ontdekt en hersteld tijdens deze studie. De kans op dit soort fouten is kleiner bij software dat in regulier beheer en onderhoud wordt meegenomen.
- Het is aan te raden om de effectmodules zo in te richten dat de welvaartsverandering van droogte, klimaat en socio-economie is uit te splitsen. In dit rapport is een nieuwe methodiek ontwikkeld voor het afleiden van kengetallen. Dit lijkt voor alle zoetwatergebruiksfuncties behalve voor funderingsrisico goed te werken. Het wordt aangeraden om de bruikbaarheid van de kengetallen te blijven monitoren in de vervolgprojecten.

- De funderingsrisico module bepaalt het risico op funderingsschade aan de hand van allerlei factoren. Deze factoren (zoals grondwaterstand en leeftijd gebouw) zijn ingedeeld in klassen. Aan de hand van al deze klassen wordt het risico berekend. Deze methodiek zorgt ervoor dat een kleine verandering in module-invoer bij het ene gebouw niet tot extra schade leidt (als het gebouw in dezelfde klasse blijft vallen) en bij de andere module wel. Aangeraden wordt om de mogelijkheden te onderzoeken om meer met relaties te werken in plaats van klassen, zodat interpretatie van de resultaten eenduidiger is.
- Het is relevant om de verhouding in welvaartsverandering tussen de sectoren te kunnen valideren. Voor zover bekend is hiervoor geen data beschikbaar. Aanbevolen wordt om te onderzoeken of er data beschikbaar is om deze validatie mee uit te voeren.

- Aben, R. C., Van De Craats, D., Boonman, J., Peeters, S. H., Vriend, B., Boonman, C. C., Van der Velde, Y., Erkens, G. & Van Den Berg, M. (2024). CO₂ emissions of drained coastal peatlands in the Netherlands and potential emission reduction by water infiltration systems. *Biogeosciences*, 21(18), 4099-4118.
- Arets, E.J.M.M., S.A. van Baren, C.M.J. Hendriks, H. Kramer, J.P. Lesschen & M.J. Schelhaas (2023). Greenhouse gas reporting of the LULUCF sector in the Netherlands. Methodological background, update 2023. Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment (WOT Natuur & Milieu), Wageningen. WOT-technical report 238.
- Bootsma, H., Kooi, H., & Erkens, G. (2020). Atlantis, a tool for producing national predictive land subsidence maps of the Netherlands. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 415-420.
- CE Delft (2023). *Handboek Milieuprijzen 2023*. CE Delft: Delft, The Netherlands.
- Costa et al (2020). Systematic assessment of damage to buildings due to ground water lowering-induced subsidence: methodology for large scale application in the Netherlands. *Proc. IAHS*, 97, 1–6, 2020: <https://doi.org/10.5194/piahs-97-1-2020>.
- Deltares, Stratelligence en LEI (2015). Doorontwikkeling van de economische analyse van de zoetwatervoorziening in Nederland. Ontwikkeling van een economisch instrumentarium om de risico's van watertekorten te bepalen. Deltares rapport 1220104-004 in opdracht van RWS-WVL.
- Diermanse, F., 2019. Keuze 30 jaar periode Parijs en zichtjaar 2100. Deltares memo 11202240-009-ZWS-0005
- Erasmus UPT; Martijn Streng, Niels van Saase, Bart Kuipers (2020). Economische impact laagwater - Een analyse van de effecten van laagwater op de binnenvaartsector en de Nederlandse en Duitse economie. Erasmus UPT rapport.
- Erkens, G. & Melman, R. (2020). Quickscan omvang Nederlands veenweidegebied. NOBV-memo, 37 pp.
- Erkens, G., Kooi, H., & Melman, R. (2021). Actualisatie bodemdalingsvoorspellingskaarten. Utrecht: Deltares.
- Erkens, G., Melman, R., Jansen, S., Boonman, J., Hefting, M., Keuskamp, J., & Kooi, H. (2022). Subsurface Organic Matter Emission Registration System (SOMERS): Beschrijving SOMERS, 1.0.
- Hunink, J., J. Deisman, G. Prinsen, L. Bos - Burgering, N. Mulder, M. Visser (2018) Vertaling van Deltascenario's 2017 naar modelinvoer voor het Nationaal Water Model. Deltares rapport 11202240-009-ZWS. Utrecht, oktober 2018.
- Informatiepunt voor de Leefomgeving IPLO (2018). *Basisprognoses 2018*. Geraadpleegd van <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/watermanagementmodellen/nationaal-water-model/basisprognoses/basisprognoses-2018/>
- Informatiepunt voor de Leefomgeving IPLO (2024). *Basisprognoses 2024*. Geraadpleegd van <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/watermanagementmodellen/nationaal-water-model/basisprognoses/basisprognoses-2024/>

- Janse R., Bozuwa, J. & de Smet, S. (2024). Scheepvaarteffecten in Deltaprogramma Zoetwater – Actualisatie deltascenario's (eindrapportage). Rotterdam, 12 december 2024.
- De Jong, J.S. & Van der Mark, R. (2020). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken: Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0022 v1.1.
- De Jong, J.S. (2021) Quick Inland Navigation Cost Model (QINCoM) voor een snelle berekening van het effect van laagwater en maatregelen op kosten van de binnenvaartsector. Deltares memo: 11205272-005-ZWS-0003, d.d. december 2021 v1.0
- De Jong, J. & Boschetti, T. (2021). Kwetsbaarheid sluizen Maas voor klimaatverandering – Onderzoek naar de sluizen Born, Maasbracht en Heel in klimaatbestendige netwerken. Deltares rapport: 11205274-004-BGS-0017.
- KlimaatEffectAtlas (2021). Technische toelichting risicokaarten funderingen <https://www.klimaateffectatlas.nl/>
- KNMI (2014): KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective; by Bart van den Hurk, Peter Siegmund, Albert Klein Tank (Eds), Jisk Attema, Alexander Bakker, Jules Beersma, Janette Bessembinder, Reinout Boers, Theo Brandsma, Henk van den Brink, Sybren Drijfhout, Henk Eskes, Rein Haarsma, Wilco Hazeleger, Rudmer Jilderda, Caroline Katsman, Geert Lenderink, Jessica Loriaux, Erik van Meijgaard, Twan van Noije, Geert Jan van Oldenborgh, Frank Selten, Pier Siebesma, Andreas Sterl, Hylke de Vries, Michiel van Weele, Renske de Winter and Gerd-Jan van Zadelhoff. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. www.climate-scenarios.nl
- Kok et al (2020). Methodology for Systematic Assessment of Damage to Buildings due to Groundwater Lowering-Induced Subsidence in the Netherlands. GEOTECHNIEK TISOLS 2020 SPECIAL.
- Lievens Milieu B.V. (2019). Stuwbeheer Nederrijn – Lek: Optimalisatie vanuit de KRW-functie. WAB005880-R001, d.d. 28 juni 2019
- Van der Mark, R. & De Jong, J. (2020). Stresstest Droogte Maas – Blootstelling en kwetsbaarheid bij de sluiscomplexen. Deltares memo: 11205274-004-BGS-0020, d.d. december 2020.
- Melman, R., Knaake, B., Schasfoort, F. (2023), Aanpak effectmodule bodemdaling. Utrecht: Deltares
- Melman, R., Jansen, S.W., Reusen, J., & Erkens, G. (2024). SOMERS 2.0 – technische beschrijving.
- Mens, M., Hunink, J. C., Delsman, J. R., Pouwels, J. and Schasfoort, F. (2020): Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares rapport 11203734-003, Delft.
- Minnema, B. et al., 2025. Verklaring verschillen tussen uitkomsten Basisprognoses 2024 en uitkomsten Basisprognoses 2018. Bevindingen op basis van een beperkte set van geprioriteerde analyses. Deltares rapport: 1211164-000-ZWS-0004
- Schasfoort, F., de Jong, J., Meijers, E. (2019) Effectmodules in het Deltaprogramma Zoetwater – Van hydrologisch effect naar economisch effect van droogte. Deltares rapport 11203734-000-ZWS-0010
- Schasfoort, F., Van Woerkom, T., Melman, R., Knaake, B., Korff, M., Nappo, N., Meijers, E., Pijcke, G., Geerling G., Boerlijst, S., America - van den Heuvel, I., Van der Wijk, R., Woning, M. & Van Marle, M. (2024). Maatschappelijke effecten van veranderende zoetwaterbeschikbaarheid en watervraag - Methode-ontwikkeling en proeftoepassing voor het Deltaprogramma Zoetwater. Deltares rapport: 11210039-000-ZWS-0001.

- Van der Wijk, R., Van den Hoek, A. & Van der Mark, R. (2024a). Vervolg Stresstest Indirecte Bedreigingen – Systeembeschrijving Hoofdwatersysteem. Deltares rapport: 11209214-003-ZWS-0001
- Van der Wijk, R., Van den Hoek, A. & Van Hemert, G. (2024b). Vervolg Indirecte Bedreigingen – Nadere kwantificatie impact op scheepvaart. Deltares rapport: 11210314-002-ZWS-0002
- Wolters, H.A., G.J. van den Born, E. Dammers, S. Reinhard, 2018, Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017.
- Wageningen Environmental Research. (2023). BRO Bodemkaart, 2023-01.
<https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen/kaart>
- Zagonjoli, M. & Van Hemert, G. 2024. Webapplicatie Rapid Assessment Scheepvaart: ARK en Driel maatregelen. Deltares 2024.

A Kengetallen CO₂ emissie

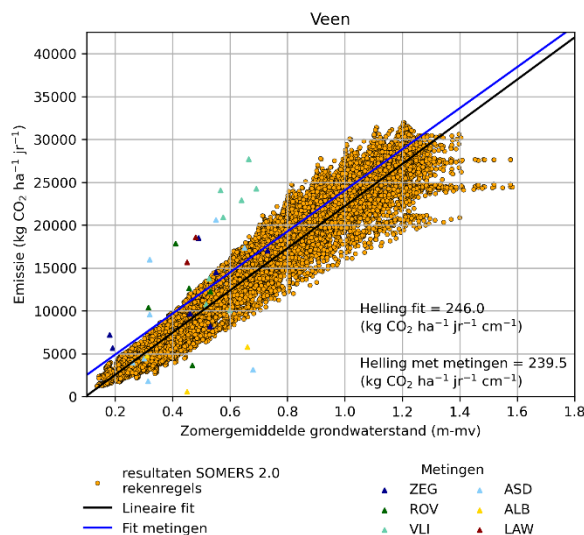
A.1 Validatie relatie grondwaterstand – CO₂ emissie met metingen

Voor het bepalen van de relatie tussen de grondwaterstand en de CO₂-uitstoot is gebruik gemaakt van gemodelleerde waarden. Omdat een modelresultaat een versimpelde weergave is van de werkelijke situatie, moeten de modelresultaten eerst gevalideerd worden met metingen. De validatie van de modelresultaten is uitgevoerd met de zomergemiddelde grondwaterstand en de bijbehorende CO₂ emissie. Met deze twee variabelen kan er namelijk vergeleken worden met metingen in Aben et al. (2024). De zomergemiddelde grondwaterstand is hierin gedefinieerd als de gemiddelde grondwaterstand over de maanden april tot en met september.

In Figuur A-1 is voor veenbodems de zomergemiddelde grondwaterstand uitgezet tegen de CO₂-emissie. De zomergemiddelde grondwaterstand is hierin geplot op de x-as in meter ten opzichte van het maaiveld, en de uitstoot staat op de y-as in kg CO₂ per hectare per jaar. De gemeten waarden voor de zomergemiddelde grondwaterstand en uitstoot uit Aben et al. (2024) zijn in Figuur A-1 aangegeven met driehoeksymbolen, en de gemodelleerde waarden met cirkels.

De zomergemiddelde grondwaterstand is in de metingen veelal tussen de 0.2 en 0.8 meter onder maaiveld, terwijl de zomergemiddelde grondwaterstand voor de modelresultaten van SOMERS ook waarden heeft dieper dan 1.0 meter onder maaiveld. Verder is de spreiding in de uitstoot van de metingen groot in vergelijking met de spreiding in de modelresultaten. Het verschil in spreiding komt grotendeels doordat voor de resultaten van SOMERS gebruik is gemaakt van de rekenregels. Deze rekenregels zijn 'standaard' situaties en hierdoor is de spreiding in de resultaten kleiner dan bijvoorbeeld in de metingen.

Zowel door de modelresultaten als door de metingen is een lineaire lijn gefit. De helling van deze lijn laat zien dat voor de modelresultaten een daling van de grondwaterstand met 10 cm gelijk staat aan een toename van 2428 kg CO₂ per hectare per jaar. Voor metingen is de helling van de fit erg vergelijkbaar en gelijk aan 2395 kg CO₂ per hectare per jaar.



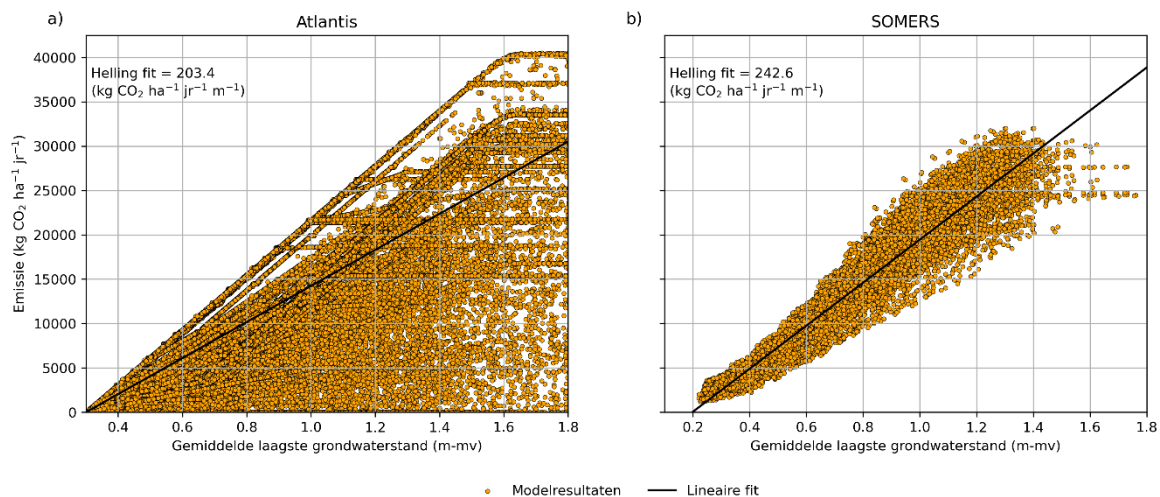
Figuur A-1 De grondwaterstanden uitgezet tegen de bijbehorende CO₂ uitstoot voor veenbodems. Met oranje bolletjes zijn SOMERS 2.0 rekenregel resultaten weergegeven. De zwarte lijn is een lineaire fit door deze gemodelleerde resultaten. De gemeten grondwaterstanden en emissies zijn weergegeven met driehoekige symbolen, waarbij de blauwe lijn een lineaire fit is door alle metingen.

A.2 Vergelijking resultaten Atlantis en SOMERS

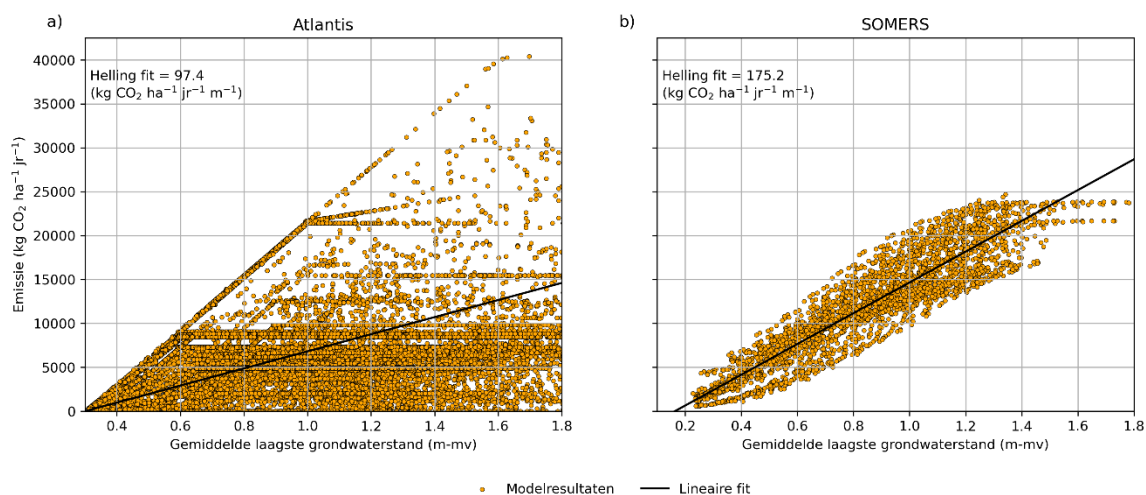
In deze sectie zijn de resultaten van SOMERS en Atlantis met elkaar vergeleken. Bij beide modellen is de Gemiddelde Laagste Grondwaterstand (GLG) gebruikt als grondwater karakteristiek. In Figuur A-2a zijn resultaten van het Atlantis model te zien voor veengronden. Elk cirkelvormig symbool staat hier gelijk aan de GLG en bijbehorende emissie van één enkele gridcel. Hiermee wordt de spreiding van alle organische gronden in Nederland meegepakt. Resultaten van SOMERS (Figuur A-2b) zijn voor de rekenregels, welke het effect laten zien van een aantal maatregelen op de uitstoot van CO₂ voor klassen van kenmerkende eigenschappen van veenweidepercelen in Nederland. Dit zijn 'standaard' situaties en dus is de spreiding in de resultaten van SOMERS kleiner dan bij Atlantis.

Voor veengronden zijn de kengetallen voor beide modellen heel erg vergelijkbaar. In Atlantis wordt 2034 kg CO₂ reductie per 10 cm grondwaterstand verhoging berekend, tegenover 2249 kg CO₂ met SOMERS. Het kengetal uit Atlantis voor veengronden is dus iets lager dan het kengetal dat is verkregen met SOMERS.

Voor moerige gronden is het verschil tussen de kengetallen uit beide modellen een stuk groter (Figuur A.2-2). In Atlantis is de reductie namelijk maar 974 kg CO₂ per hectare per jaar voor een verhoging van de grondwaterstand met 10 cm. In SOMERS is deze reductie met 1727 kg CO₂ per hectare per jaar voor een grondwaterstand verhoging aannemelijk groter.



Figuur A-2 De gemiddelde laagste grondwaterstand voor veengronden uitgezet tegen de CO₂ uitstoot in a) Atlantis en b) SOMERS. Elk oranje bolletje in a) is de waarde in een enkele gridcel. De oranje bolletjes in b) zijn resultaten van de SOMERS rekenregels. In beide figuren is met een zwarte lijn de lineaire fit door de resultaten weergegeven.



Figuur A-3 De gemiddelde laagste grondwaterstand voor moerige gronden uitgezet tegen de CO₂ uitstoot in a) Atlantis en b) SOMERS. Elk oranje bolletje in a) is de waarde in een enkele gridcel. De oranje bolletjes in b) zijn resultaten van de SOMERS rekenregels. In beide figuren is met een zwarte lijn de lineaire fit door de resultaten weergegeven.

B Foundation damage model

B.1 Introduction to the model

The foundation risk model is a nationwide tool to assess the (risk of) damage to buildings due to timber pile degradation caused by low groundwater level and differential settlements of shallow foundations caused by land subsidence.

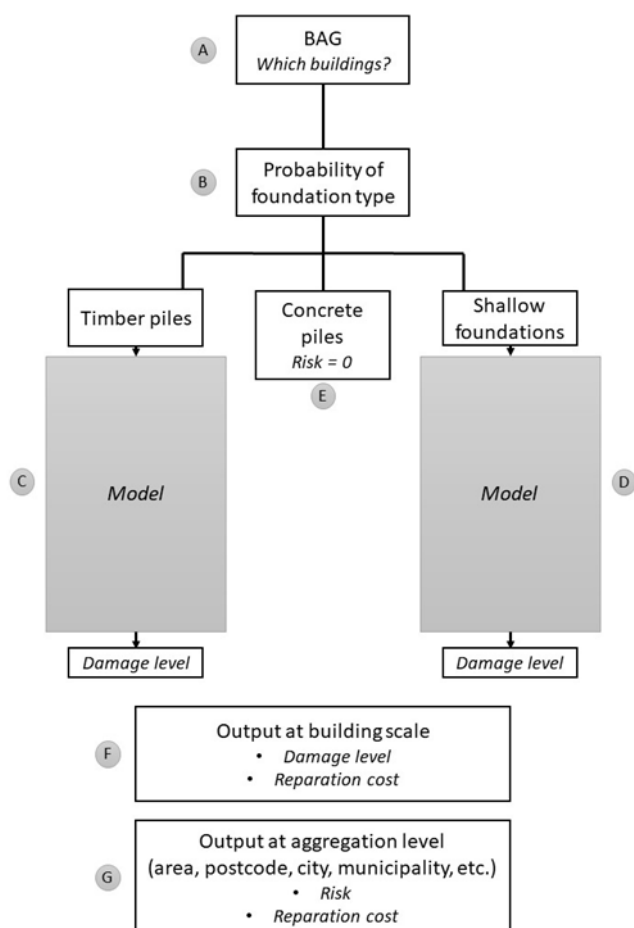
The model is built to take soil characteristics, groundwater level (i.e., GLG), subsidence rate and building characteristics as input parameters to estimate the expected damage or risk level per building or per area (e.g., neighborhood, postcode, municipality, freshwater region) in different climate scenarios (i.e., with or without climate change effects). Examples of the outputs obtainable from this model at postcode scale can be found at www.klimaatschadeschatter.nl.

It is important to remark that the foundation damage risk model is not suitable for long-term predictions. An important factor of uncertainty is the type of building foundation, which is estimated based on expert judgment in the model. Another assumption taken is the response of building foundations over time. The historic foundation damage of the buildings is not taken into account.

In 2024 the model structure and functionalities have been updated and improved to be able to run the model as part of the Dutch Delta Program. The updates and changes made are described in the following sections.

B.2 Model structure and updates in 2024

Figure B1 provides an overview of the structure of the foundation risk module. The changes made per modelling block are outlined in Table B1 and described in further detail below. The updates and changes resulted in an increase in model speed, improved methodology and tailor-made output of the results that connect with the wishes of the Delta Program Fresh Water.



Figuur B-1 Functioning schema of the foundation damage risk model.

Tabel B-1 Summary of the changes applied to the foundation damage risk model in 2024.

Model block	Detailed activity	Novelty
Preliminary steps	Sampling of raster values per building centroid	- Introduction of cells ids to fasten the data sampling - Soil type as combination of dominant lithologies at 5m and 12 m
A) BAG	Selection of buildings	Selection of buildings with single address and living function
B) Probability of foundation type	Updates in the probability distribution	- Introduction of year class 8 (>2000) - If soil is clay/peat, then the probability of timber piles and shallow foundations = 0 when year class = 8 - If soil is sand at both 5m and 12m then the probability of shallow foundations = 100%

Model block	Detailed activity	Novelty
C) Timber piles model	Updates of model workflow	- Correction of computations of cumulative years of drought - Damage classes based on soil type at 5m
D) Shallow foundations model	Updates of model workflow	- Changes in the CF used for correction of settlements rate - Changes of CF used to correct for building characteristics (due to new year class)
G) Outputs at aggregation level	Results aggregated per freshwater regions and urban/rural areas	- Redefinition of risk equation to take into account the probabilities of foundation types - Updated reparation costs - Aggregation per freshwater region - Aggregation per urban/rural area within freshwater regions
Adjustments in the model workflow	Definition of preliminary steps, model blocks C, D and G	Scripting: definition of functions and code blocks

Model block: Preliminary steps

- Sampling of raster values per building centroid. For the functioning of the foundation damage risk model, information from raster maps needs to be read per each building polygon. For simplicity, the model works with the centroids of the building polygons. In the updated version of the model, each building centroid is assigned with an identified raster cell in which the building lays. In this way, raster values are stacked per cell id and then assigned to each building. This increases the speed of the model significantly.
- Soil type combinations. The current version of the model takes as input the dominant lithology in the first 5 m and 12 m from the topographic surface. The combinations reported in Table 2 are considered. This approach allows to be more conservative on assigning the 'sand' soil type.

Tabel B-2 Selection of the soil type based on the dominant lithologies at 5 and 12 m.

		Dominant lithology at 12 m		
Dominant lithology at 5 m		1 = Peat	2 = Clay	3 = Sand
	1 = Peat	Peat	Peat	Peat
	2 = Clay	Clay	Clay	Clay
	3 = Sand	Peat	Clay	Sand

Model block: A. BAG

- Selection of buildings. The foundation damage risk model takes the BAG (Basisregistratie Adressen en Gebouwen) as first input to derive the location and spatial distribution of buildings. The updated foundation damage risk model uses the BAG 2024 – version of February 2024. The current version of the model takes into account only the buildings with living function (woonfunctie) which is selected based on the current use (gebruiksdoel) of the constructions. Combined functions including living (e.g., commercial and living) are included in the model. This selection is necessary because the model assumptions (e.g., probabilities of foundation types and damage classes) are established based on experience with housing and might be less true for industrial buildings.

Model block: B. Probability of foundation type.

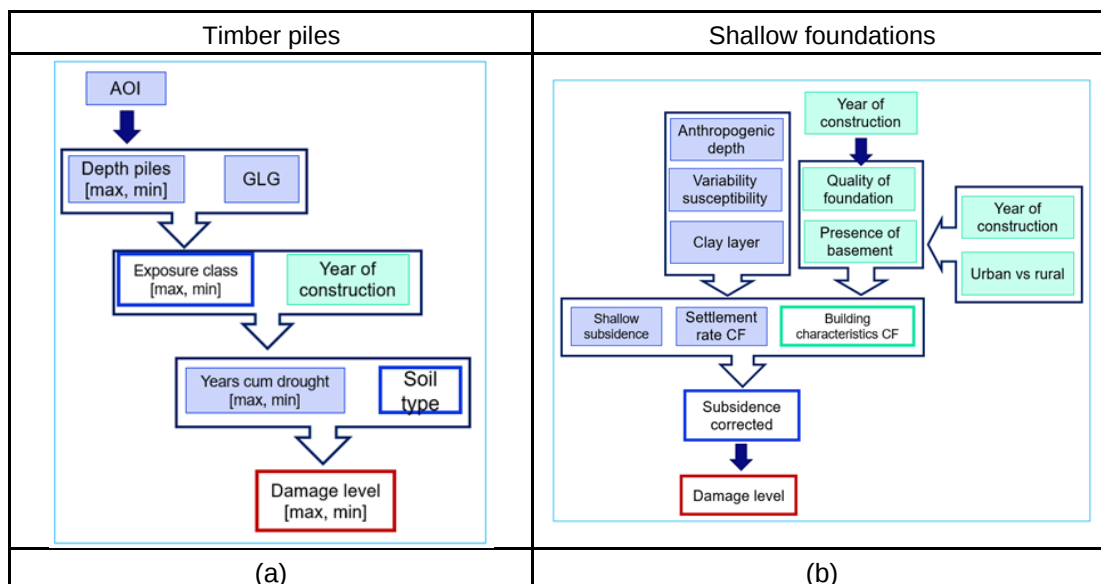
- The probabilities of having timber piles, shallow foundations or concrete piles are assigned to each building based on their location and age according to expert judgment (see Reports 2019-2021). In the current version of the model, an additional year class has been introduced: all buildings built after 2000 are now in year class nr. 8. This determined a change in the foundation type probability: if buildings are built after 2000, it is assumed that they are built on concrete piles – meaning that probabilities of shallow foundation and timber piles equal zero. Further adjustments to the probability distribution consider also the soil type at 12 m, rather than only 5 m as in the previous model version. This is relevant particularly for shallow foundations, which are assigned more conservatively: only when sand is the dominant lithology at both 5m and 12 m, the buildings have 100% probability of being on shallow foundations. Another novelty is that all buildings built after 2000 are assigned with 100% probability of being on concrete piles.

Model block: C. Timber pile model

- The workflow has been updated to be able to run different Deltascenarios. Major changes in this model block regard the depth of timber piles that is now determined based on the dominant lithology in the first 5 m (at the top of the pile), rather than the first 2m as in the previous model version. See Figure B2.

Model block: D. Shallow foundation model

- The model workflow has been updated to run different Deltascenarios. Having introduced a new year class for constructions built after 2000, the correction factors for building characteristics were modified. Additionally, the correction factors for soil characteristics have been modified by introducing the clay layer thickness to account for shrink and swell. See Figure B2.



Figuur B-2 Model workflow for a) timber piles model and b) shallow foundations model.

Model block: G. Output at aggregation level

- Redefinition of the risk equation and costs.

B.2.1 Risk equation

$$\text{Risk} = (\text{risk timber} \cdot \% \text{timber} + \text{risk shallow} \cdot \% \text{shallow} + \text{risk beton} \cdot \% \text{beton}) / 100$$

$$\text{Risk timber or shallow} = \frac{\sum (\text{probability foundation} \cdot \text{number buildings}_{\text{per DL}}^{\text{per prob found}} \cdot \text{weights per DL})}{\sum (\text{probability foundation} \cdot \text{number buildings per foundation type})}$$

$\text{number buildings}_{\text{per DL}}^{\text{per prob found}}$ is the number of buildings having a certain probability of foundation type (from 0 to 1) and a certain damage level (from D0 to D5)

weights per DL: 1: D0; 1:D1; 2.2:D2; 7.4:D3; 27.4:D4; 100:D5

$\% \text{foundation timber or shallow}$

$$= \frac{\sum (\text{probability foundation} \cdot \text{number buildings per foundation type})}{\text{total number buildings per region}} \cdot 100$$

B.2.2 Cost equation

Total cost = equivalent cost timber + equivalent cost shallow

$\text{equivalent cost timber or shallow}$

$$= \sum (\text{probability foundation} \cdot \text{cost for average building})$$

This new formulation considers the probability of a certain foundation type when accounting for the number of properties with expected damage level. In the previous version of the model, only the total number of buildings per damage class was considered.

Model block: Adjustments in the model workflow.

The structure of the model has been modified to accommodate the changes described above. New functions and code blocks have been introduced. The model is written in Python.

Additional changes in the execution of the foundation damage risk model include:

- Updated input maps, such as the GLG and land subsidence map estimation in the different scenarios.
- Risk classification. The thresholds for the risk classes (from very low to very high) are determined based on the cost weights for timber piles and shallow foundations. Table B3 reports the risk ranges associated with the risk classes.

Tabel B-3 Risk classes and associated ranges per foundation type. The ranges are chosen according to the distribution of values in each class.

	Risk class	Risk
1	Very low	< 1
2	Low	1 – 2.2
3	Moderate	2.2 – 7.4
4	High	7.4 – 27.4
5	Very high	> 27.4

- Reparation costs updated according to the current rates (year 2024).
 - Inflation rate between 2017 and 2023 25.7% in total
 - No indirect costs (loss of living space or productivity) or benefits (upgrade of living space after renewal) taken into account
 - Including inspection costs of 6k€ for damage classes 2-4 (already included in damage class 5)
 - Additional cost factor of 1,7 for monuments

Tabel B-4 Reparation costs for buildings' foundation damage – rates for 2024.

Schadeklasse	Herstelwerkzaamheden	Gemiddelde herstelkosten in €/ m3 (inhoud pand)	Herstelkosten gemiddeld pand NL (~200 m3)
Very low	Schilderwerk binnen	€ 4,08	€ 816,94
Low	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers	€ 18,85	€ 3.770,49
Moderate	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers, herstel pleisterwerk	€ 66,61	€ 12.568,29
High	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers, herstel pleisterwerk, herstel kozijnen, vloeren	€ 231,26	€ 46.502,67
Very high	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers, herstel pleisterwerk, herstel kozijnen, vloeren, herstel fundering	€ 842,08	€ 169.671,92

B.3 Resultaten Funderingsrisico-effectenmodule: risico op schade

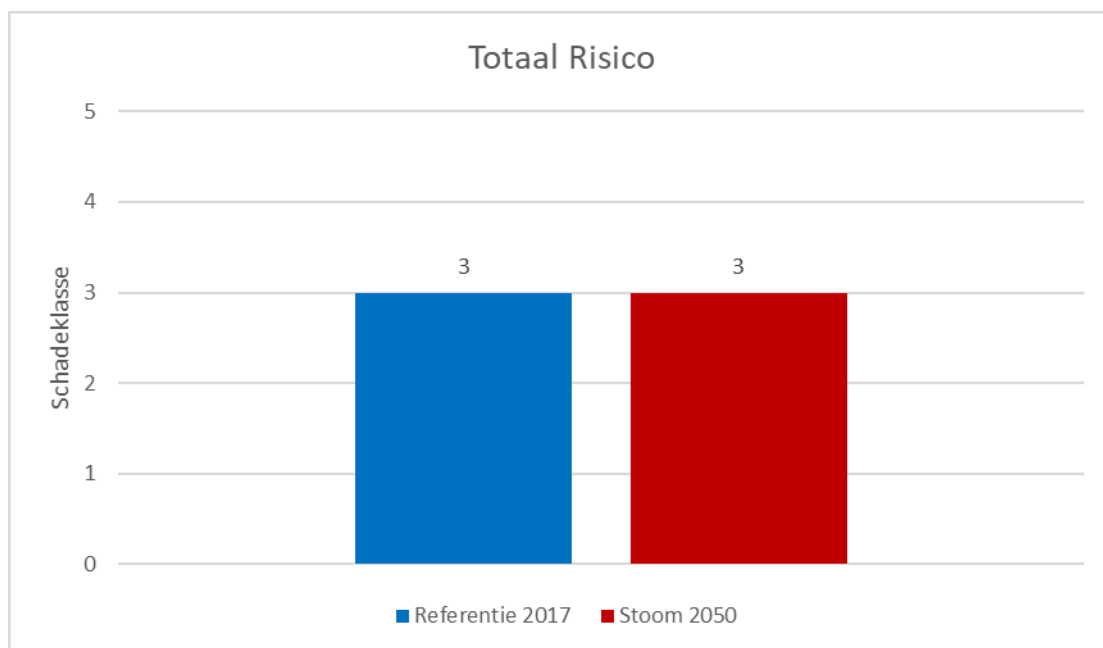
B.3.1 Risico per zoetwater regio (Deelregio)

Zoals weergegeven in Figuur B3 valt het totale funderingsrisico (uitgedrukt in de schadeklasse) in Nederland in de klasse 'matig' voor zowel de referentie 2017 als het scenario Stoom 2050. Dit risico is een combinatie van aantasting aan de houten paalfunderingen en verschilzettingen van ondiepe funderingen (zie Schasfoort et al., 2024 en Bijlage B).

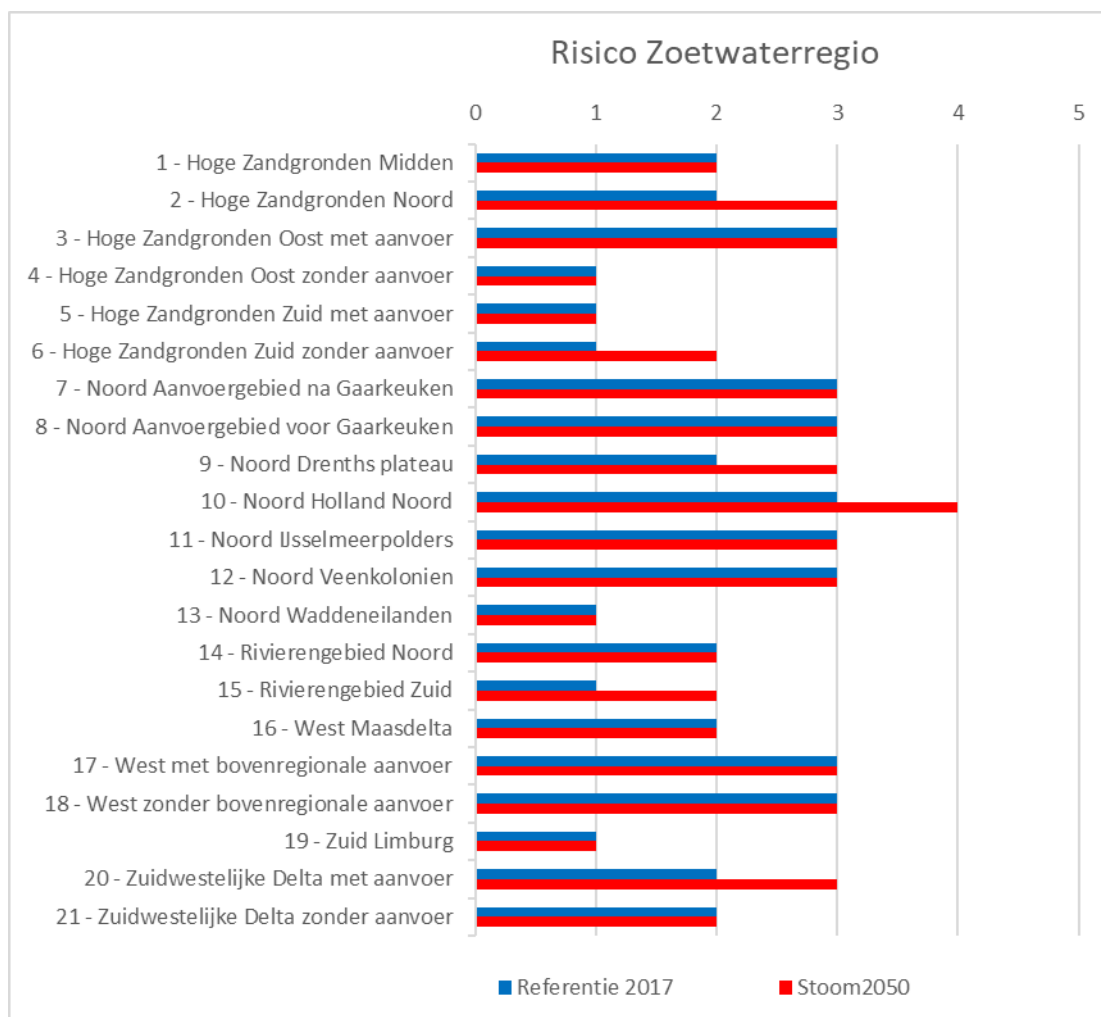
De ruimtelijke verdeling van het funderingsrisico is weergegeven in Figuur B-4 op basis van een gemiddelde per zoetwaterregio (21 deelregio's). In 15 van de 21 regio's verandert de risicoklasse tussen de referentie en het Stoom2050 niet (de risicoscore binnen de klasse kan wel hoger zijn). In 6 van de 21 regio's neemt de risicoklasse toe in Stoom2050.

Figuur B-5 toont de verdeling van de onderliggende risicowaarden per zoetwaterregio en scenario. Dit figuur benadrukt dat de verschillen in risicowaarden tussen Referentie 2017 en Stoom2050 beperkt zijn (gemiddeld circa van 20 procent verandering) en leiden daardoor niet altijd tot een toename in risicoklasse in Figuur B-5.

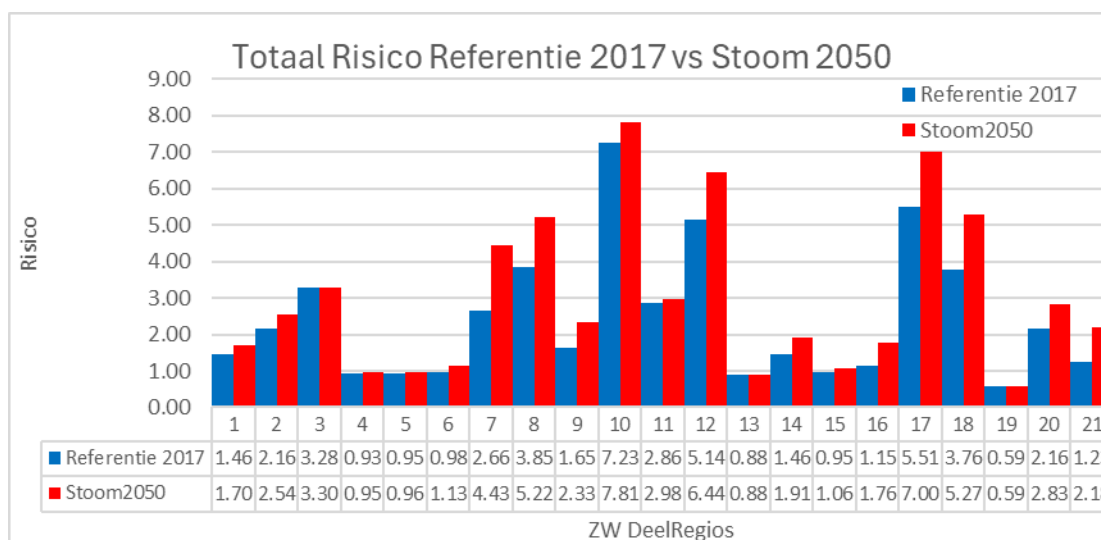
Bijlage C1 geeft een overzicht van de verdeling van gebouwen per zoetwaterregio, zowel het totaal aantal gebouwen als het percentage gebouwen met houten paalfunderingen, ondiepe funderingen en betonnen palen. In Bijlagen C2 en C3 worden de specifieke risico's van aantasting van houten paalfunderingen en verschilzettingen van ondiepe funderingen per regio en scenario weergegeven.



Figuur B-3 Totaal funderingsrisico in Nederland in de referentie 2017 en in scenario Stoom2050. De weergegeven risicoklassen zijn: Zeer Laag (1), Laag (2), Matig (3), Hoog (4), Zeer Hoog (5) – zie Tabel 4-2 voor referentie.



Figuur B-4 Funderingsrisico (schadeklasse) per zoetwaterregio in de referentie in scenario Stoom2050. De weergegeven risicoklassen zijn: Zeer Laag (1), Laag (2), Matig (3), Hoog (4), Zeer Hoog (5) – zie Tabel 4-2.

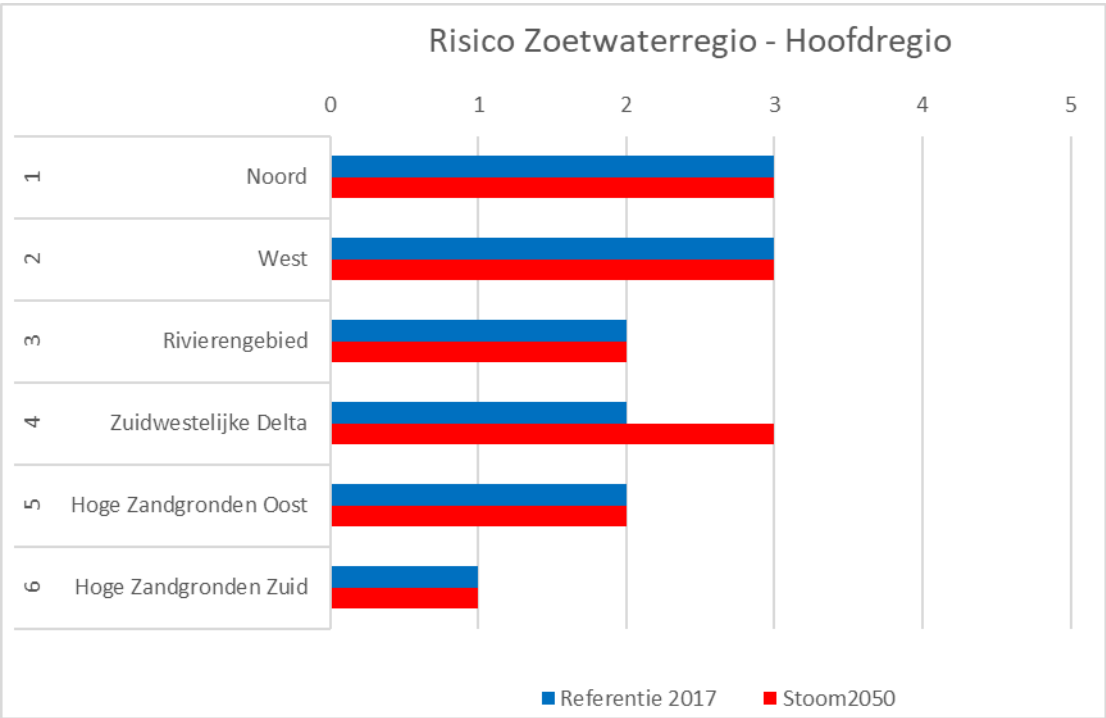


Figuur B-5 Verdeling van risicowaarden per zoetwaterregio in de Referentie 2017 en in Stoom2050.

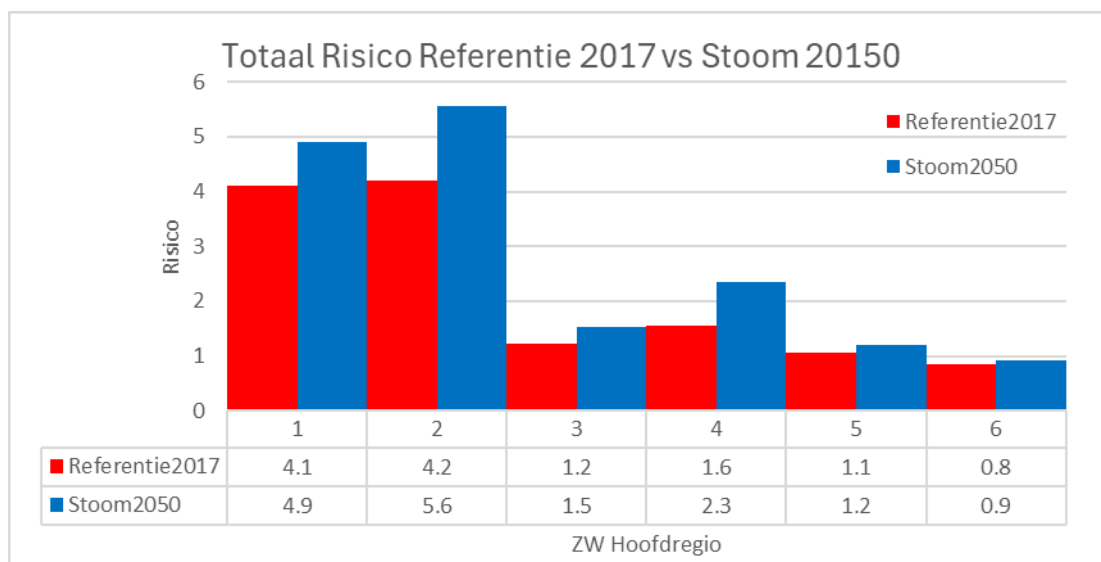
B.3.2 Risico per zoetwater regio (Deelregio)

Figuur B-6 toont het risico op schade per zoetwaterregio (Hoofdregio) in de scenario's Referentie 2017 en Stoom2050. Dit risico is een combinatie van aantasting van houten paalfunderingen en verschilzettingen van ondiepe funderingen (zie Schasfoort et al., 2024 of Bijlage B). In slechts één van de zes regio's neemt de risicoklasse toe in Stoom2050, terwijl in de overige vijf regio's de risicoklassen onveranderd blijven in de onderzochte scenario's (de achterliggende scores nemen wel licht toe, zie Figuur B-7). Figuur B-7 toont de verdeling van risicowaarden per zoetwaterregio en scenario. Deze figuur benadrukt de variaties in risicowaarden tussen Referentie 2017 en Stoom2050 beter dan Figuur B-6, waar risicoklassen worden gebruikt. Door de sterk niet lineaire relatie tussen risicowaarden en de risicoklasse (zie Tabel 4-2) zijn alle waarden boven 1 relevant.

Bijlage C4 geeft een overzicht van de verdeling van gebouwen per zoetwaterregio, zowel het totaal aantal gebouwen als het percentage gebouwen met houten paalfunderingen, ondiepe funderingen en betonnen palen. In Bijlage C5 en C6 worden de specifieke risico's van aantasting van houten paalfunderingen en verschilzettingen van ondiepe funderingen per regio en scenario weergegeven.



Figuur B-6 Totaal risico op schade per zoetwaterregio in de scenario's Referentie 2017 en Stoom2050. De weergegeven risicoklassen zijn: Zeer Laag (1), Laag (2), Matig (3), Hoog (4), Zeer Hoog (5) – zie Tabel 4.1 voor referentie.



Figuur B-7 Verdeling van risicowaarden per zoetwaterregio (6 hoofdreio's) in de referentie 2017 en scenario Stoom2050.

B.3.3

Risico per stedelijk/landelijk gebied in de zoetwater regio's (Deelregio en Hoofdreio)

Om meer inzicht te krijgen in de bijdrage van stedelijke gebieden, zijn de resultaten uitgesplitst naar stedelijk en landelijk. Op basis van een Landelijk Grondgebruik Nederland (LGN) 2018.

Figuur B8toont het risico op schade in stedelijke (links) en landelijke gebieden (rechts) per zoetwaterregio en scenario. Tabel B-5 geeft het gemiddelde risico op schade per stedelijk en landelijk gebied in Nederland voor elk scenario weer.

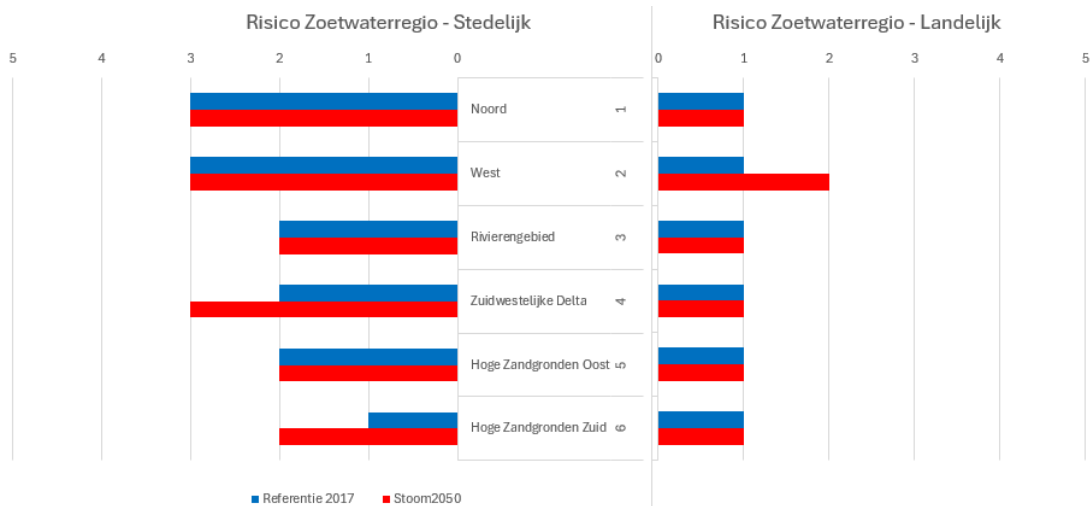


Figuur B-8 Gecombineerd risico van aantasting van houten paalfunderingen en vershilzettingen van ondiepe funderingen in de Referentie 2017 en Stoom 2050 voor stedelijke gebied (links) en landelijk gebied (rechts) per zoetwaterregio. De weergegeven schadeklassen zijn: Zeer Laag (1), Laag (2), Matig (3), Hoog (4), Zeer Hoog (5).

Tabel B-5 Gemiddeld risico op schade in Nederland voor stedelijke en landelijke gebieden in Referentie 2017 en Stoom2050.

Scenario	Risico	
	Stedelijk	Landelijk
Referentie 2017	Matig	Zeer laag
Stoom2050	Matig	Zeer laag

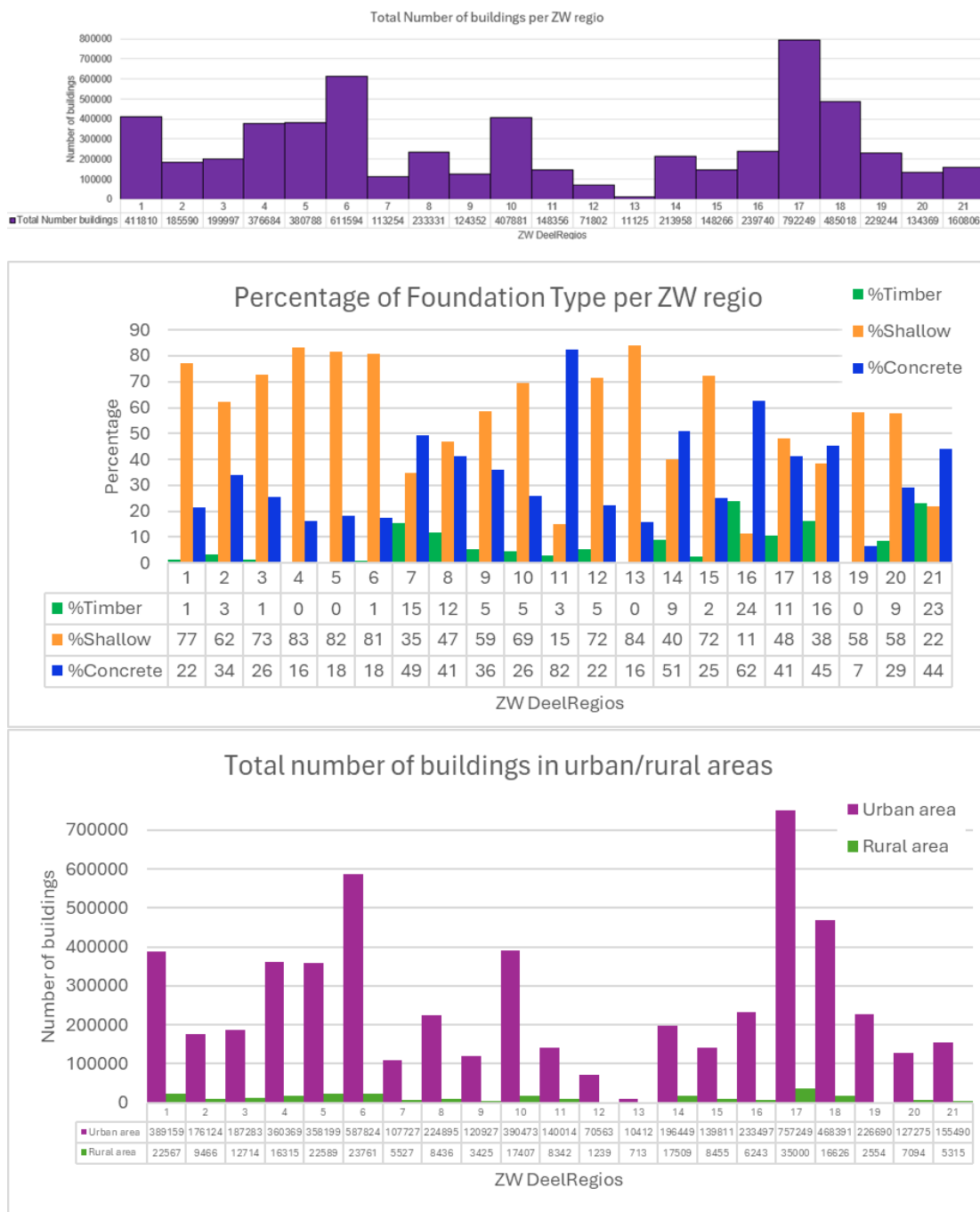
Figuur B-9 toont het risico op schade in stedelijke (links) en landelijke gebieden (rechts) per zoetwaterregio (Hoofdregio) en scenario.



Figuur B-9 Totaal risico van aantasting van houten paalfunderingen en verschilzettingen van ondiepe funderingen in de 'Referentie 2017 en Stoom 2050 per stedelijk (links) en landelijk gebied (rechts) per zoetwaterregio. De weergegeven schadeklassen zijn: Zeer Laag (1), Laag (2), Matig (3), Hoog (4), Zeer Hoog (5).

C Additional figures foundation damage

C.1 Buildings' distribution per freshwater region (deelregio)

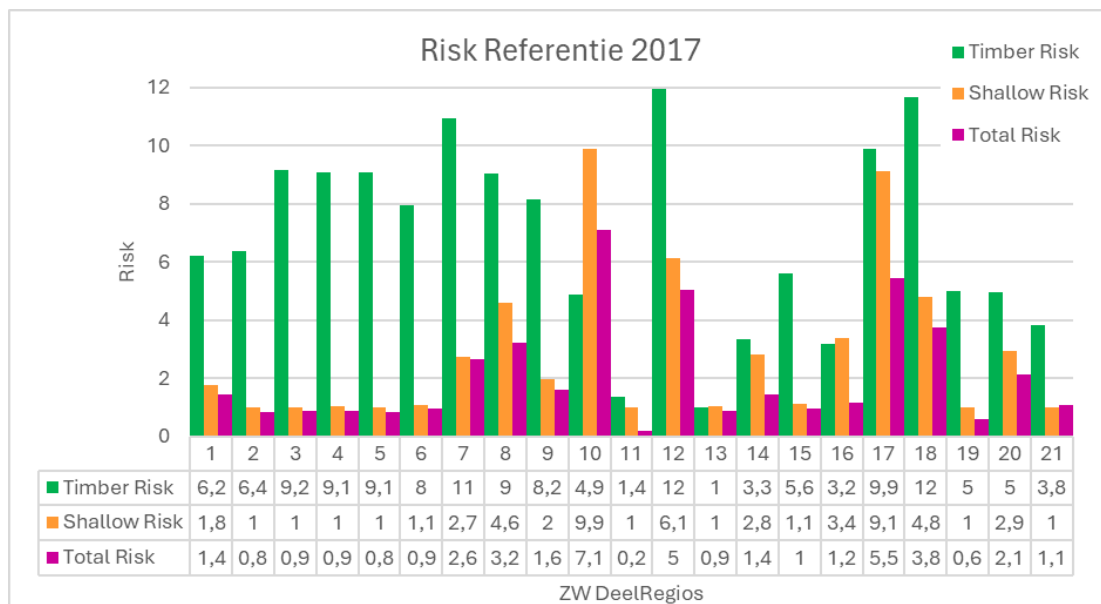


C.2 Distribution of risk per freshwater region (Deelregio) in Referentie 2017



This figure illustrates the distribution of i) the number of buildings per region (i.e., the size of the pie chart), ii) the percentage of foundation type (i.e., the size of the slices), and iii) the specific risks of timber piles degradation and differential settlement of shallow foundations (i.e., the color of the pie). The risk of damage for concrete piles is assumed to be always zero.

Histograms of the risk composition are reported hereafter. The percentage of buildings having timber piles, shallow foundations or concrete piles is reported in Appendix C.1. For the risk equation, see Appendix B.2.1.



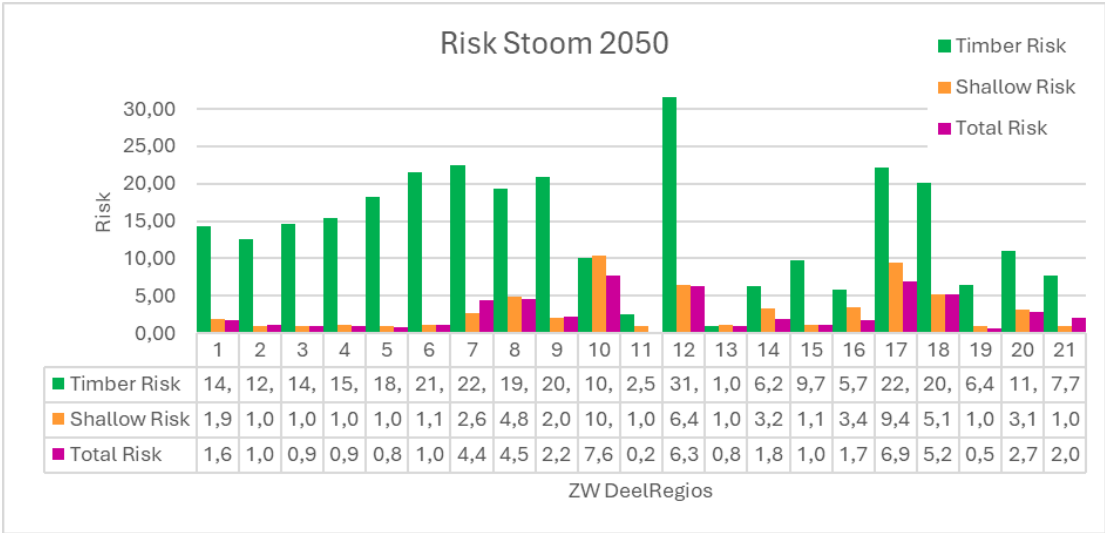
C.3 Distribution of risk per freshwater region (Deelregio) in Stoom 2050

Risico Stoom2050

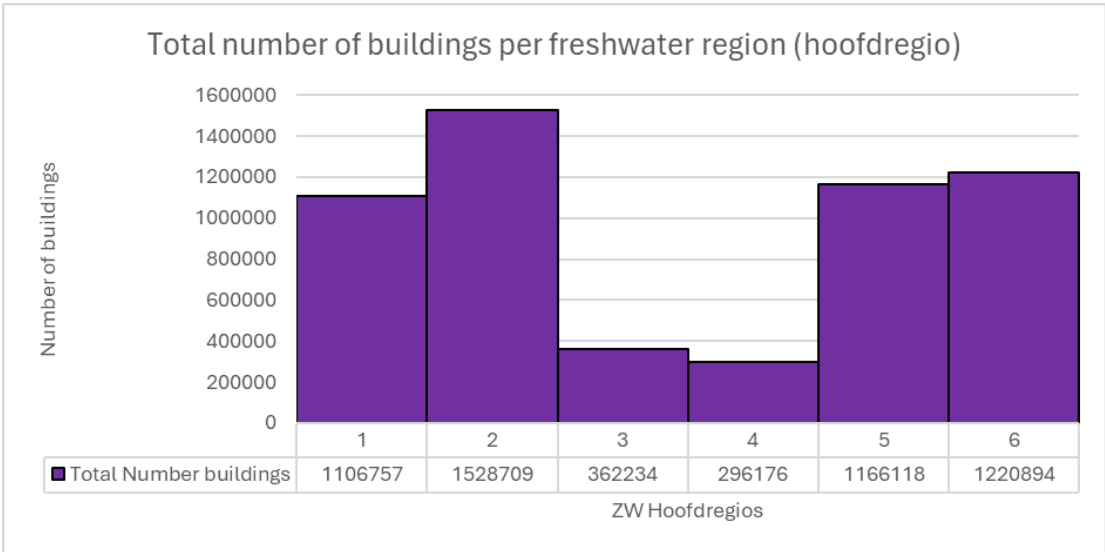


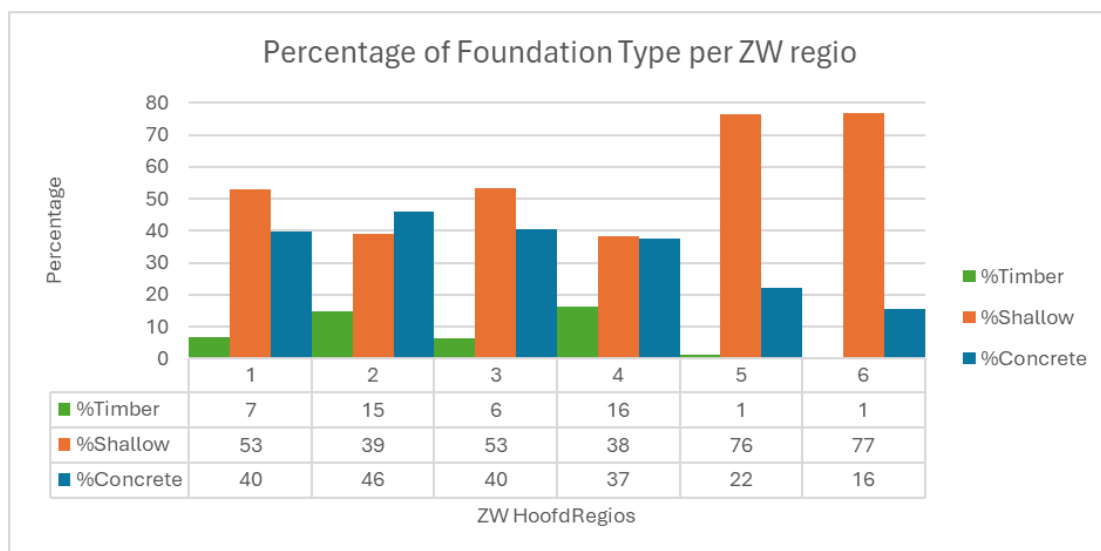
This figure illustrates the distribution of i) the number of buildings per region (i.e., the size of the pie chart), ii) the percentage of foundation type (i.e., the size of the slices), and iii) the specific risks of timber piles degradation and differential settlement of shallow foundations (i.e., the color of the pie). The risk of damage for concrete piles is assumed to be always zero.

Histograms of the risk composition are reported hereafter. The percentage of buildings having timber piles, shallow foundations or concrete piles is reported in Appendix C.1. For the risk equation, see Appendix B.2.1.

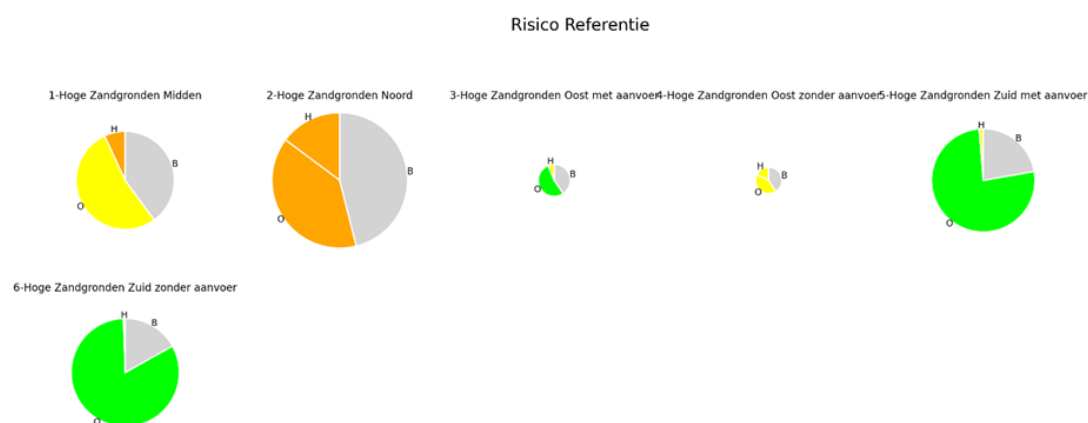


C.4 Buildings' distribution per freshwater region (hoofdregio)



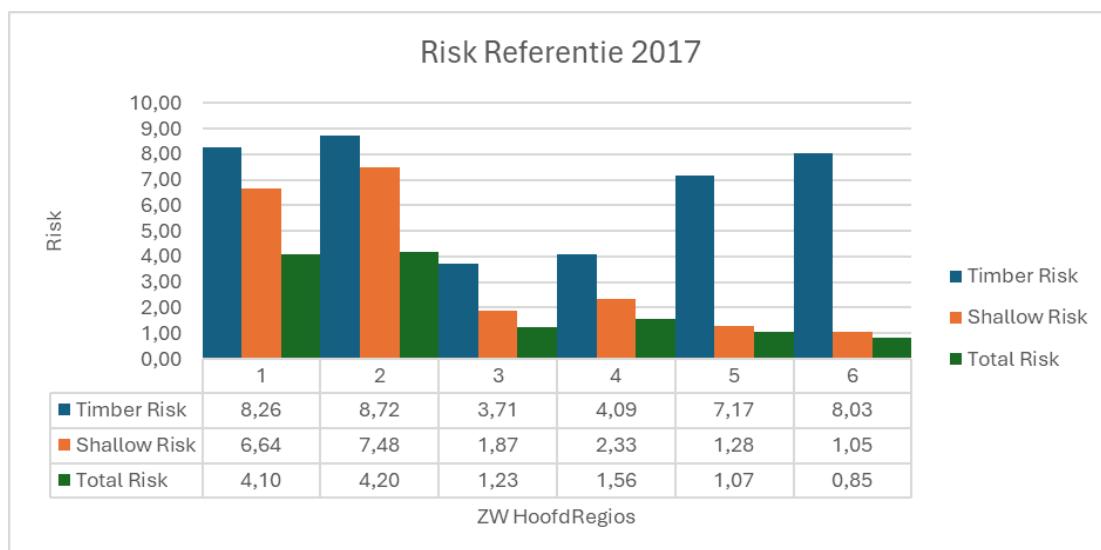


C.5 Distribution of risk per freshwater region (hoofdregio) in Referentie 2017



This figure illustrates the distribution of i) the number of buildings per region (i.e., the size of the pie chart), ii) the percentage of foundation type (i.e., the size of the slices), and iii) the specific risks of timber piles degradation and differential settlement of shallow foundations (i.e., the color of the pie). The risk of damage for concrete piles is assumed to be always zero.

Histograms of the risk composition are reported hereafter. The percentage of buildings having timber piles, shallow foundations or concrete piles is reported in Appendix C.1. For the risk equation, see Appendix B.2.1.



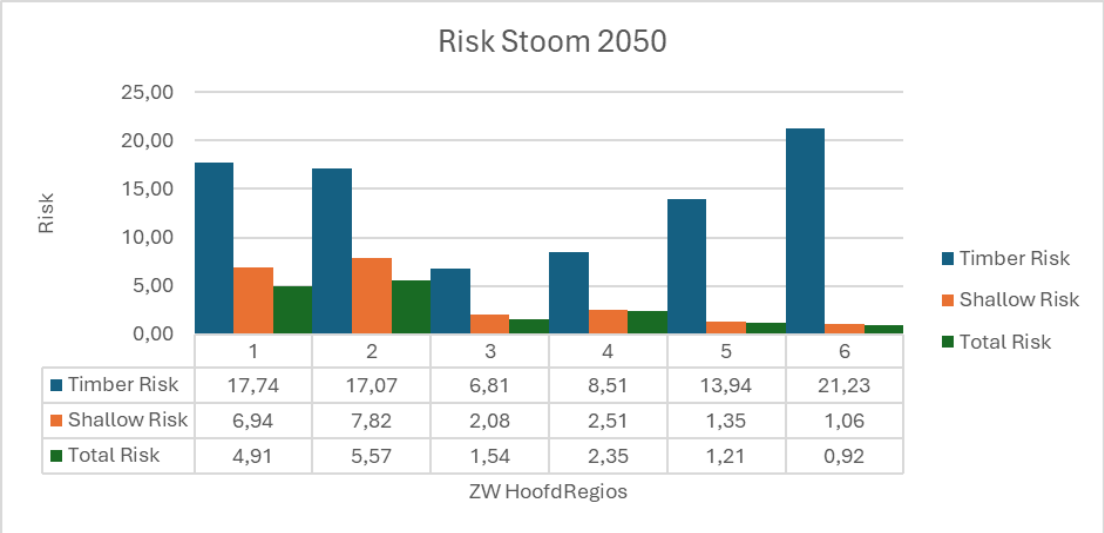
C.6 Distribution of risk per freshwater region (hoofdregio) in Stoom 2050

Risico Stoom2050

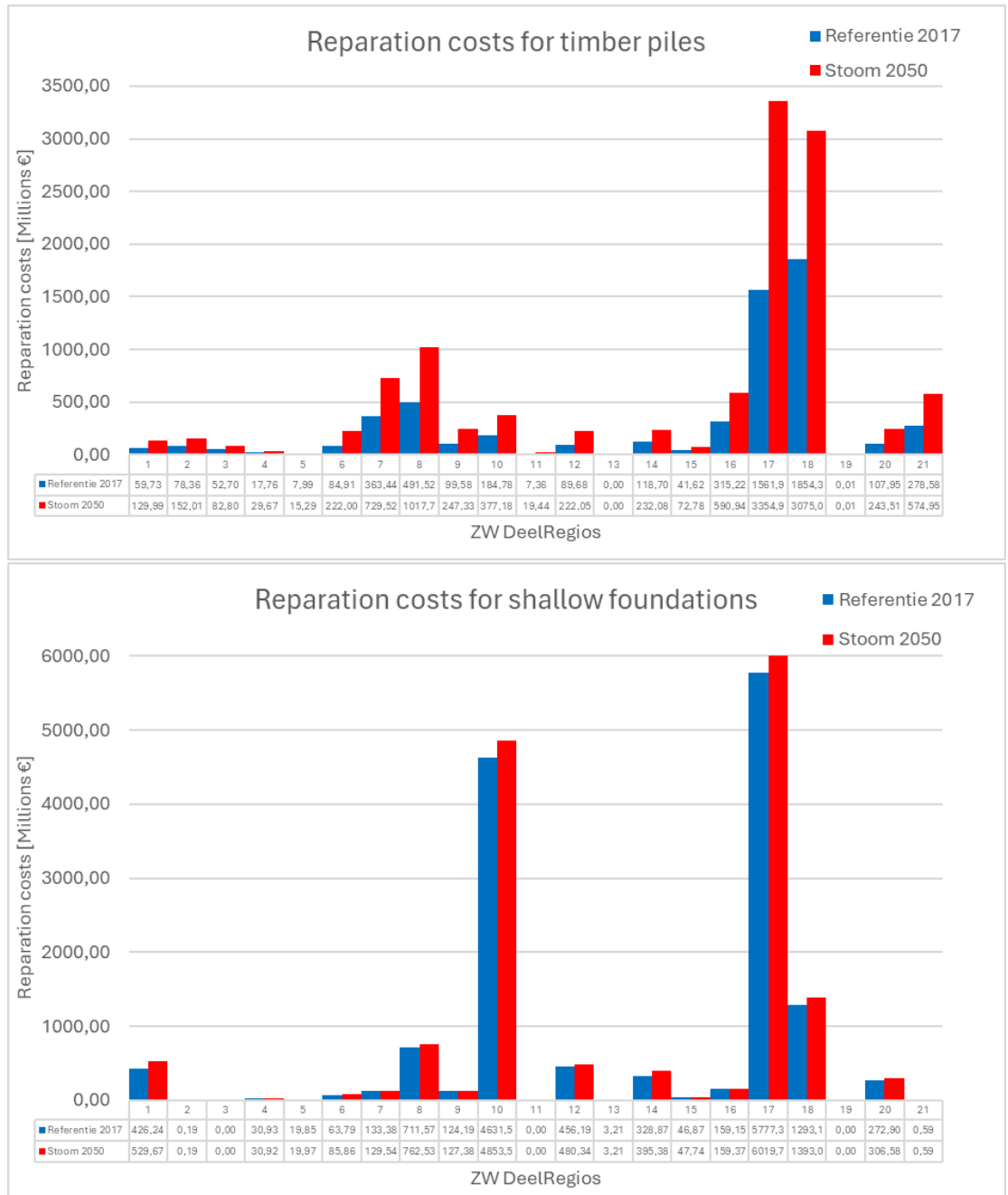


This figure illustrates the distribution of i) the number of buildings per region (i.e., the size of the pie chart), ii) the percentage of foundation type (i.e., the size of the slices), and iii) the specific risks of timber piles degradation and differential settlement of shallow foundations (i.e., the color of the pie). The risk of damage for concrete piles is assumed to be always zero.

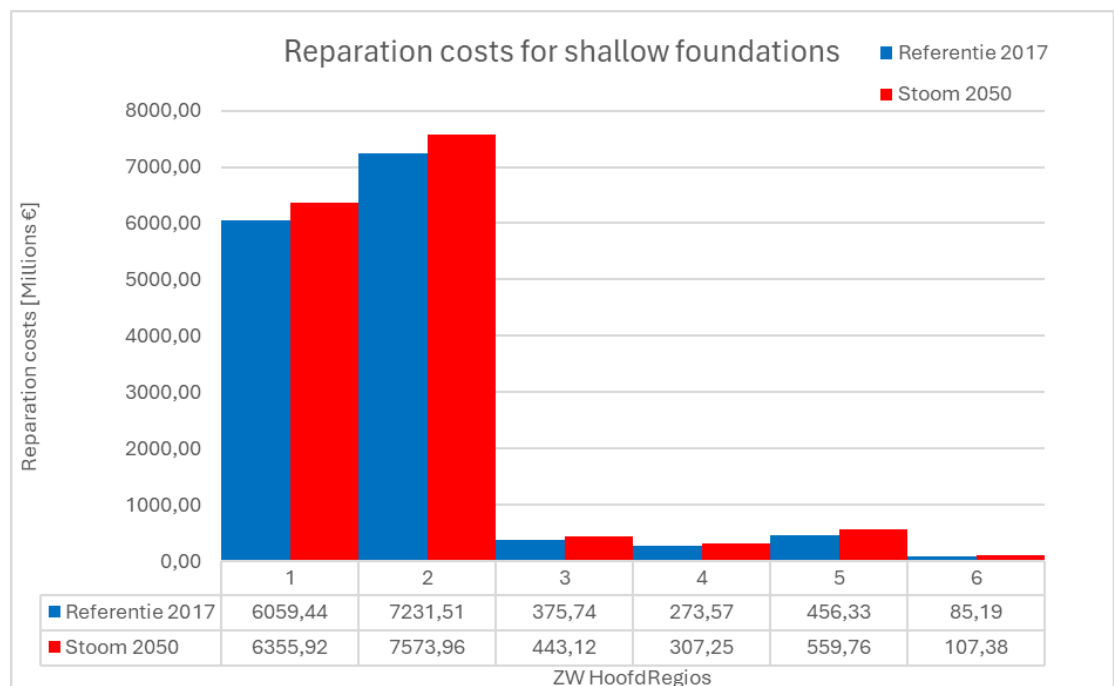
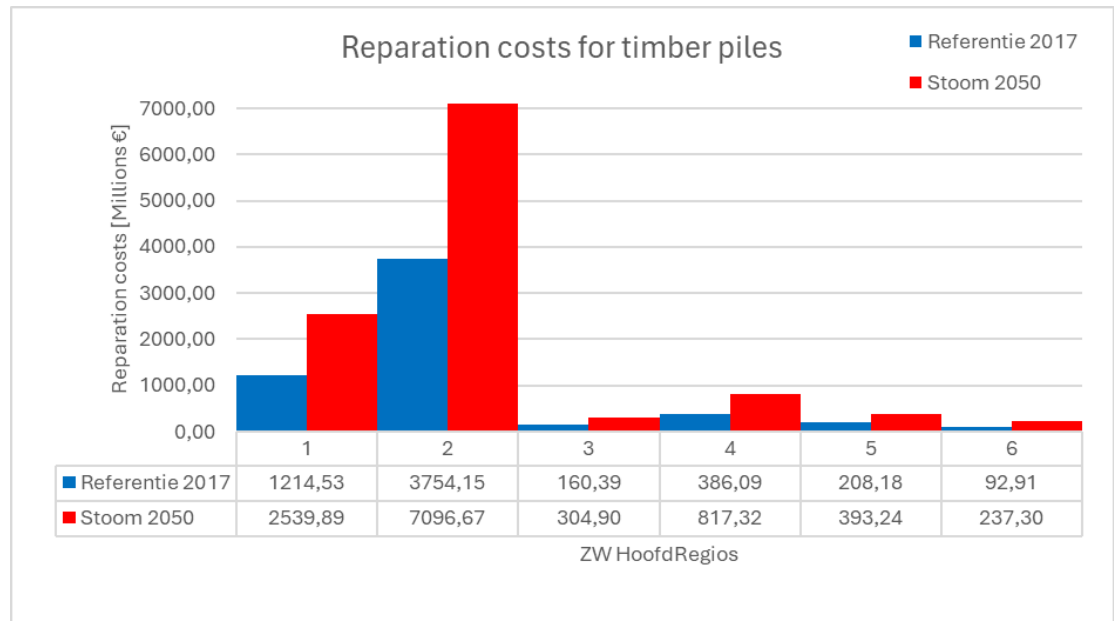
Histograms of the risk composition are reported hereafter. The percentage of buildings having timber piles, shallow foundations or concrete piles is reported in Appendix C.1. For the risk equation, see Appendix B.2.1.



C.7 Distribution of reparation costs per freshwater region (deelregio) in Referentie 2017 and Stoom 2050



C.8 Distribution of reparation costs per freshwater region (hoofdregio) in Referentie 2017 and Stoom 2050



D Resultaten BP24 Scheepvaart

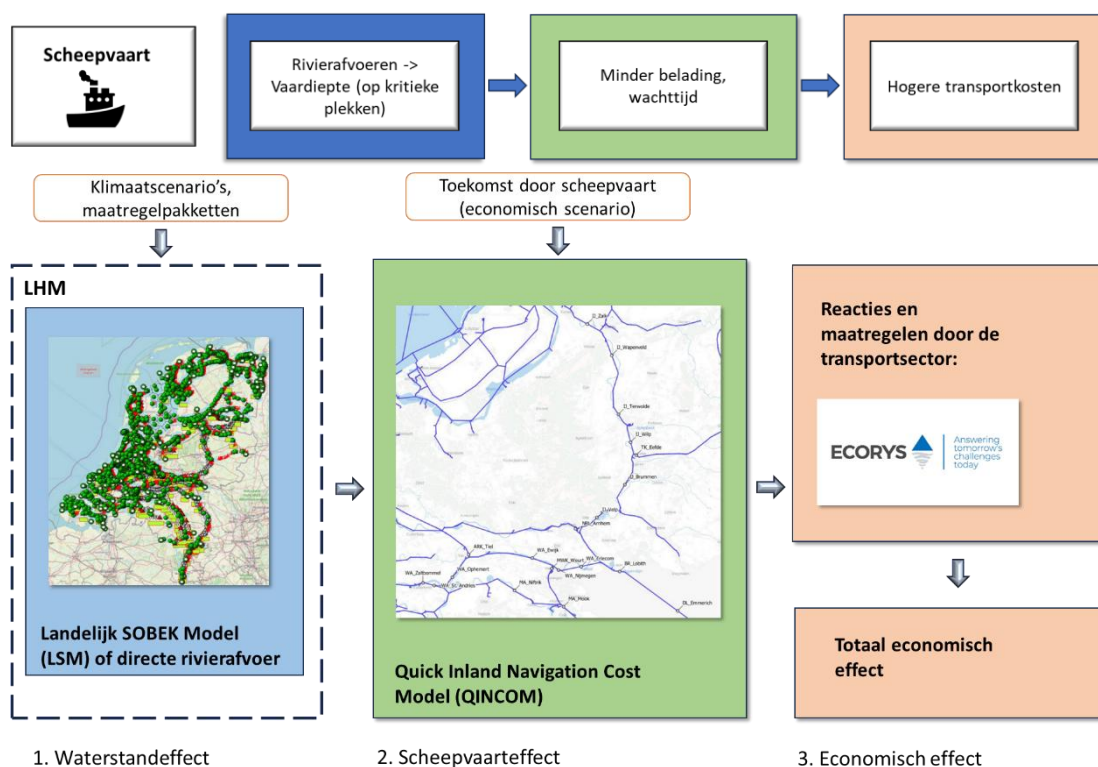
Dit is een directe kopie van hoofdstuk 5 uit Schasfoort et al., 2024 met een aanpassing van tabel 5-4.

D.1 Scheepvaarteffect

Auteur: Remi van der Wijk

D.2 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar het effect van een veranderend klimaat op de scheepvaart. Specifieker wordt er gekeken naar het effect van lagere afvoeren, en daarmee vaardiepte, op de vervoerde vracht en vaarkosten (Figuur D-1). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het Quick Inland Navigation Cost Model (QINCoM; De Jong, 2021). Deze module is voor de programma's Integraal Riviermanagement (IRM) en Klimaatbestendige Netwerken (KBN) toegepast. De methodiek wordt in sectie 5.1.1. kort toegelicht, de specifieke aanpassingen voor DPZW van de effectmodule zijn uitgebreider beschreven in Van der Wijk (2024).



Figuur D-1 Conceptuele weergave van de effectmodule voor scheepvaart waarbij scheepvaarteffect wordt uitgedrukt in vaarkosten en het economisch effect in transportkosten.

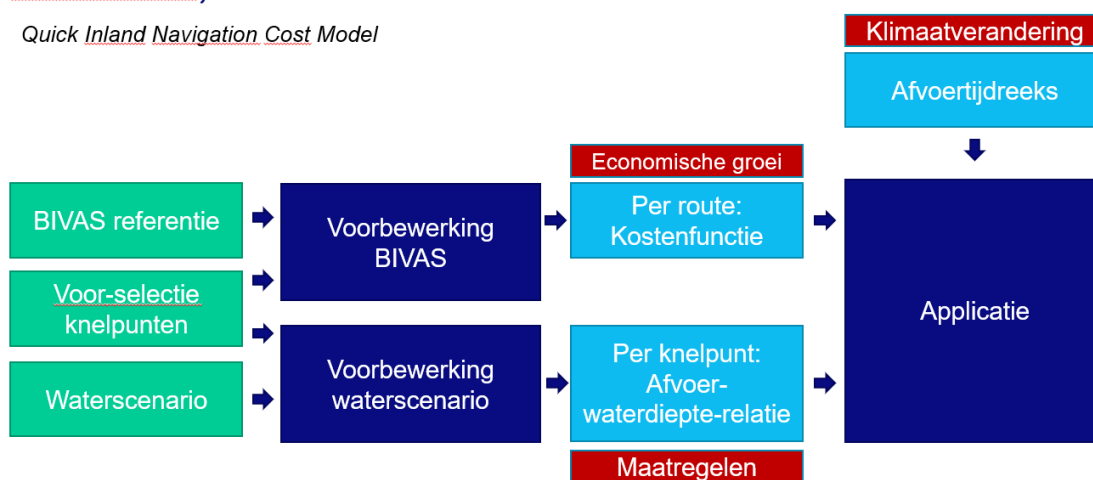
D.2.1 Methode

Voor QINCoM is gebruik gemaakt van de basisdata uit BIVAS, waaronder een rittenbestand uit 2014. BIVAS is een zogeheten netwerkmodel wat voor elke reis kijkt wat de optimale route en aflaaddiepte is voor de scheepvaart gegeven de hydrodynamische condities en een vaste basisdata set. Het belangrijkste uitgangspunt in QINCoM is dat elke route is te vertalen naar een set aan potentiële knelpunten. Hierdoor hoeft niet het hele netwerk meegenomen te worden, maar alleen een set aan knelpunten. Een gevolg van dit uitgangspunt is dat omvaren niet mogelijk is als reactie vanuit de scheepvaart. De praktijk leert dat omvaren in praktijk zelden een reactie op laagwater is en dat een (groot) deel van de omvaarroutes⁷ in BIVAS niet haalbaar zijn.

Met het uitgangspunt dat de routes niet veranderen bij lagere vaardieptes is een groot deel van de scheepvaartmodellering van tevoren uit te voeren in zogeheten preprocessing (Figuur D-2). Per knelpunt wordt vervolgens een afvoer-waterdiepte relatie opgesteld op basis van een set aan basissommen. Het resultaat is een model dat snel het effect van lage afvoeren op scheepvaart berekent waarbij de resultaten eenvoudiger zijn te doorgronden.

QINCoM, de methodiek

Quick Inland Navigation Cost Model



Figuur D-2 Methode van QINCoM op hoofdlijnen.

Voor toepassing op de Deltascenario's zijn de afvoer-waterdiepterelaties die binnen KBN zijn afgeleid niet aangepast. De bijbehorende rivierbodem voor deze relaties is afkomstig uit 2018 (de Jong, 2019). Het uitgangspunt is hiermee de rivierbodemligging en bijbehorende afvoerdeling uit 2018, het referentiejaar voor QINCoM. De afvoertijdreeksen zijn afhankelijk van het klimaatscenario. Voor QINCoM is de afvoertijdreeks per deltasceario bij Lobith opgelegd. Voor ieder Deltascenario is een set van 3 ensembles van 30 jaar aan afvoerreeksen beschikbaar (Buitink et al., 2023). De ensembles representeren de variabiliteit binnen een Deltascenario. Voor de hier gepresenteerde resultaten worden de 3 ensembles samen genomen tot een reeks van 90 jaar per Deltascenario. De 90-jarige reeks is representatief voor het klimaat in de referentie of het desbetreffende deltasceario.

Zoals in Figuur D-1 is te zien is er na QINCoM nog een stap nodig om te komen tot het economische effect voor de transportsector. QINCoM bepaalt op basis van de afvoeren de *vaarkosten*. Als vracht niet, of later, vervoerd kan worden zijn er verschillende reacties mogelijk vanuit de transportsector. Met de nabewerking op basis van de QINCoM resultaten worden de *transportkosten* bepaald, dit wordt door Ecorys in een ander project uitgevoerd.

⁷ In werkelijkheid is omvaren om de bovenloop van de IJssel te vermijden gangbaar bij lage afvoeren

Om dit mogelijk te maken was het noodzakelijk om de kostenfuncties opnieuw af te leiden op basis van de al beschikbare BIVAS resultaten. Onder andere zijn nieuwe kostenfuncties per NSTR⁸ en CEMT⁹ klasse afgeleid om te kunnen variëren in de reactie van de scheepvaartsector op niet vervoerde vracht.

Daarnaast zijn enkele aanvullende parameters zoals het aantal TEU en TonKM afgeleid om een zo compleet mogelijk beeld te kunnen schetsen van de verandering in *transportkosten*, deze aanpassingen zijn beschreven in van der Wijk (2024). Verder worden enkele prijscorrecties doorgevoerd zodat er wordt gewerkt met het prijspeil uit het jaar 2023.

Belangrijk om te noemen is dat de impact voor de industrie (en andere bedrijven) door de toegenomen transportkosten (en het niet kunnen vervoeren van vracht) groter kan (en zal) zijn. Een eerdere studie (Streng et al., 2020) naar het effect van de droogte van 2018 heeft laten zien dat de toename in transportkosten door laagwater mogelijk veel kleiner is dan de impact op het productieproces. Sterker nog, voor de binnenvaart zelf kan het economische effect netto positief zijn door de hogere kostprijzen. Deze reactie wordt niet meegenomen in Qincom en daarmee de hier gepresenteerde resultaten en wordt verder behandeld in het rapport van Ecorys.

De deltasценario's vormen een combinatie van klimaatverandering en sociaaleconomische veranderingen. Voor scheepvaart komt dit neer op een verandering in de te vervoeren vracht (en daarmee vaarkosten) per NSTR-klasse. Hiervoor is eerst een vertaling van de in BIVAS gebruikte klassen naar NSTR-klassen nodig (Tabel D-1). Daarna is een vast percentage voor kosten en tonnage gehanteerd gelijk over alle afvoeren (Tabel D-2). In werkelijkheid zal het percentage niet geheel constant zijn per afvoer of potentiële route, maar is het landelijk wel te middelen.

Tabel D-1 Kruistabel tussen NSTR klasse uit BIVAS (links) en NSTR klasse voor economische groei.

NSTR	Omschrijving	NSTR-Klasse BIVAS	NSTR-Klasse economische groei
-1	Leeg		
0	Landbouwproducten	1. Landbouw-, bosbouw- en visserijproducten	
1	Andere voedingsproducten en veevoeder	11. Voedings- en genotsmiddelen	
2	Vaste minerale brandstoffen	2. Steenkool, bruinkool en cokes	
3	Aardolieproducten	6. Aardolieproducten	3. Ruwe aardolie en aardgas
4	Ertsen, metaalafval	4. Ertsen	
5	IJzer, staal en non-ferrometalen	9. Basismetalen en metaalproducten	
6	Ruwe mineralen en fabricaten, bouwmaterialen	5. Zout, zand, grind, klei	10. Overige minerale producten
7	Meststoffen	1. Landbouw-, bosbouw- en visserijproducten	
8	Chemische producten	7. Chemische producten	8. Kunststoffen en rubber
9	Voertuigen, machines en overige goederen	12. Machines, elektronica en transportmiddelen	
	Overige	13. Overige goederen	

⁸ Nomenclature uniforme des merchandise pour les Statistique de Transport, Révisée (NSTR); ofwel, goederenclassificatie

⁹ Conférence Européenne des Ministres de Transport (CEMT); ofwel, scheepsklasse

Tabel D-2 Gehanteerde economische groei (LAAG of HOOG, corresponderend met de Deltascenario's) per NSTR klasse.

NSTR	Beschrijving	LAAG	HOOG
-1	Leeg	18%	34%
0	Landbouwproducten	54%	91%
1	Andere voedingsproducten en veevoeder	32%	51%
2	Vaste minerale brandstoffen	-60%	-58%
3	Aardolieproducten	25%	22%
4	Ertsen, metaalafval	-2%	5%
5	IJzer, staal en non-ferrometalen	47%	63%
6	Ruwe mineralen en fabricaten, bouwmaterialen	0	16%
7	Meststoffen	54%	91%
8	Chemische producten	49%	90%
9	Voertuigen, machines en overige goederen	82%	90%
	Overige	57%	62%

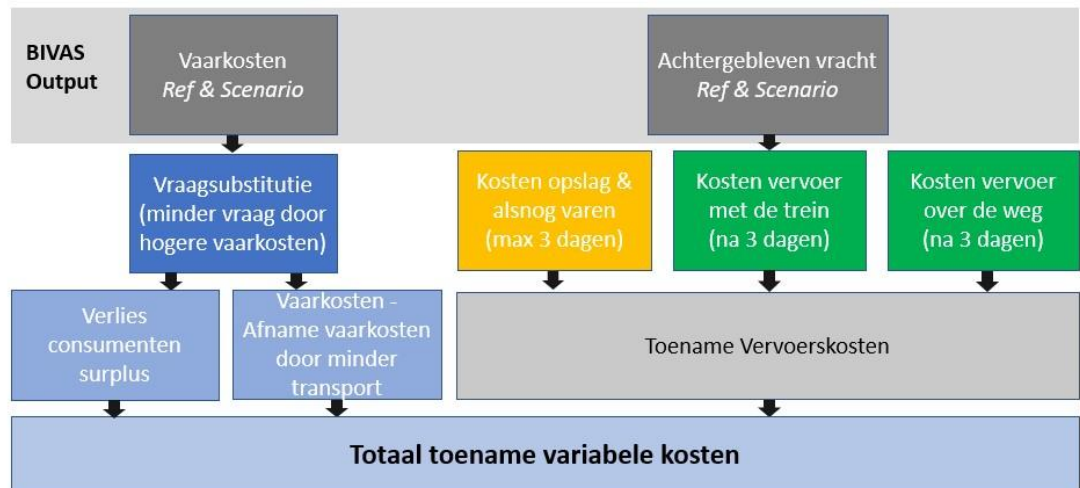
In de onderstaande opsomming worden de werkzaamheden voor het bepalen het scheepvaarteffect stap voor stap toegelicht.

- 1 Aanvullend op de deltasenario's is een mediaan jaar op basis van de afvoertijdreeks gemaakt, vergelijkbaar met de KBN methodiek (de Jong, 2021). Per dag zijn er 90 waarden aan mogelijke afvoeren beschikbaar en is van deze waarden de mediaan genomen. Het resultaat van deze aanpak is een *synthetisch mediaan jaar*.
- 2 Met deze mediane afvoerreeks van het huidige klimaat zijn de drie economische scenario's (huidig, laag & hoog) gedraaid.
- 3 Vervolgens zijn de afvoerreeksen uit de deltasenario's voor 2050 en 2100 gedraaid met de drie economische scenario's (huidig, laag en hoog). Het economische scenario Hoog past bij de deltasenario's Vlug en Stoom, en het scenario Laag bij de deltasenario's Ruim en Warm.
- 4 Om de additionele vaarkosten door lage afvoeren te bepalen worden de synthetische mediane vaarkosten vergeleken met de vaarkosten van elk individueel jaar uit de scenario's. Wanneer de vaarkosten in het betreffende jaar hoger zijn dan vaarkosten in de synthetische mediane referentie zien we dit als extra vaarkosten door droogte. De jaren met vaarkosten lager dan dit mediane jaar worden niet meegenomen. Alle hogere vaarkosten ten opzichte van de referentie worden vervolgens gemiddeld om het droogterisico te bepalen op basis van vaarkosten. Deze methode is vergelijkbaar met de schadebepaling in de landbouweffectmodule.
- 5 Om het effect van het veranderende klimaat te isoleren rekening houdend met de extra vervoersvraag wordt een extra stap toegepast. De toename in vaarkosten als gevolg van economische groei is namelijk vele malen groter dan het effect van het klimaat (). Als deze stap niet wordt genomen zouden we al deze extra vaarkosten toeschrijven aan de lagere afvoeren. In andere woorden, alle individuele jaren uit de Deltascenario's (inclusief de referentie) worden vergeleken met het *synthetische mediane jaar* op basis van het corresponderende economische scenario (huidig, laag of hoog).

- 6 Naast het droogterisico wordt uit de 90-jarige reeks het T=20 jaar geselecteerd om inzicht te krijgen in de potentiële zoetwateropgave.

Zoals eerder beschreven is voor het *economische effect* op de transportsector nog een nabewerking nodig. Hiervoor wordt door QINCoM bepaald hoeveel vracht er achterblijft als er niet genoeg transportcapaciteit is door lagere afvoeren.

De eerste reactie vanuit transportsector is dat vracht later, als de capaciteit toeneemt, wordt vervoerd per schip. Deze reactie leidt tot opslagkosten die verschillend is per type vracht. Maar als de hoeveelheid achtergebleven vracht 3 dagen achtereen toeneemt zal de transportsector over kunnen gaan op andere modaliteiten. Deze *modal shift* brengt aanvullende kosten met zich mee. De achtergebleven vracht en *vaarkosten* (met enkele andere parameters) vormen de input voor het economische deel van de effectmodule (Figuur D-3), de resultaten hiervan worden beschreven door Ecorys in een ander rapport.



Figuur D-3 Analysestappen voor de effectmodule scheepvaart van vorige DPZW ronde (Schasfoort et al., 2019), in het bepalen van het scheepvaarteffect is nu gebruik gemaakt van QINCoM in plaats van BIVAS.

D.2.2 Discussie Methode

Met het gebruik van QINCoM wordt aangenomen dat de routekeuze gelijk blijft. In praktijk zijn er situaties denkbaar dat omvaren een reële optie is, waardoor de vaarkosten iets lager kunnen worden. De ervaring leert dat in BIVAS het omvaren niet goed wordt meegenomen. Als reactie op afnemende afvoeren werd gekozen voor onrealistische routes omdat bepaalde overwegingen niet zijn mee te nemen in de simulatie. Een recente analyse toonde verder aan dat in BIVAS de scheepvaart op de Nederrijn wordt onderschat en dat meer schepen over de Waal varen dan in werkelijkheid. Het gevolg is dat voor een effectbepaling op nationaal niveau goed gebruik gemaakt kan worden van BIVAS, en daarmee QINCoM, maar dat regionale variaties minder goed worden meegenomen.

In de scheepvaarteffectmodule in het Deltaprogramma Zoetwater wordt het effect van lagere afvoeren op de Rijn meegenomen, maar zijn andere klimaateffecten op de binnenvaart niet berekend. Hieronder worden de verschillende andere bedreigingen kort opgenomen en verwezen naar studies waar naar het economische effect is gekeken.

Zeespiegelstijging zorgt voor meer vaardiepte in het Benedenriviereengebied en verminderde doorvaarthoogte. Het effect op de vaardiepte is verwaarloosbaar omdat maatgevende knelpunten verder bovenstrooms liggen. Het effect op doorvaarthoogte is beschreven in van der Wijk & de Jong (2021).

Hogere afvoeren zorgen voor minder doorvaarthoogte op de rivieren en kunnen leiden tot stremmingen ten behoeve van de hoogwaterveiligheid. In dit rapport wordt alleen gekeken naar droogte. Het effect op doorvaarthoogte op de rivieren is beschreven in van der Wijk & de Jong (2021).

Schutbeperkingen door lagere afvoeren zorgen voor langere wachttijden bij sluizen om water te besparen. Dit vraagt om maatwerksommen welke voor de stresstest van het hoofdvaarwegennetwerk zijn uitgevoerd (de Jong, 2022).

D.3 Resultaten Deltascenario's

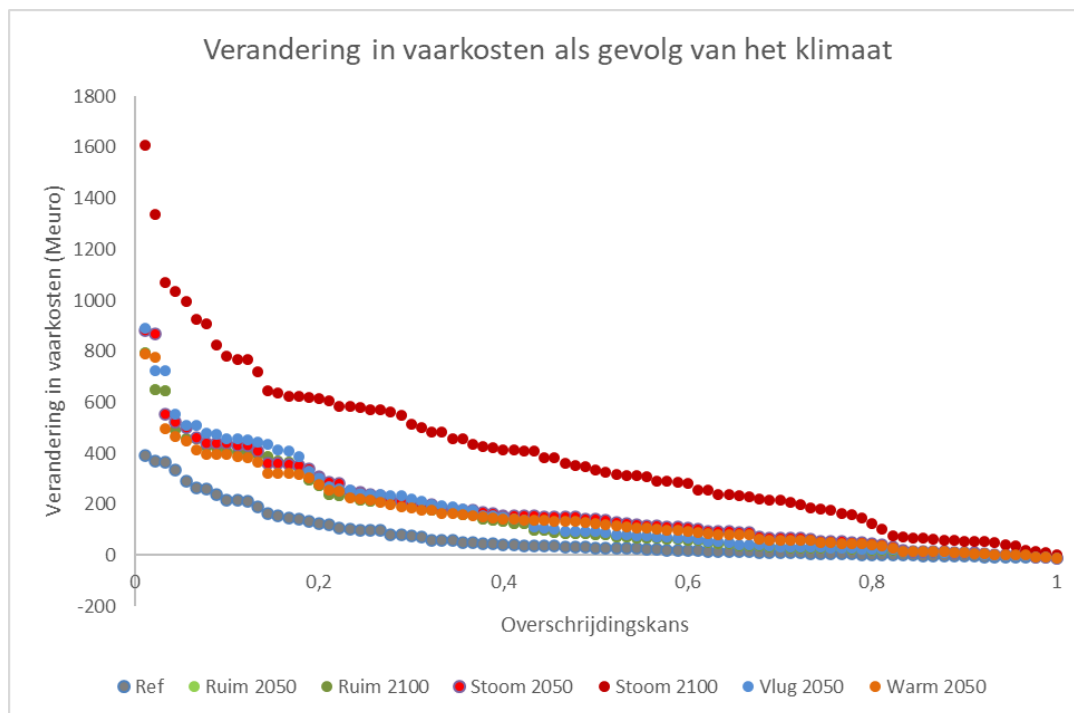
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de effectmodule scheepvaart gepresenteerd. Als eerste wordt het droogterisico getoond, wat gedefinieerd is al het gemiddelde van alle jaren met een toename in vaarkosten ten opzichte van de referentie. Daarna wordt gekeken naar de verandering in vaarkosten voor jaren met een specifieke herhalingstijd, waarbij het T=20 jaar centraal staat. Het T=20 jaar is bepaald door een distributiekromme te maken van de resultaten. Vervolgens is het 95e percentiel bepaald wat gelijk staat aan een T=20 herhalingstijd.

D.3.1 Droogterisico

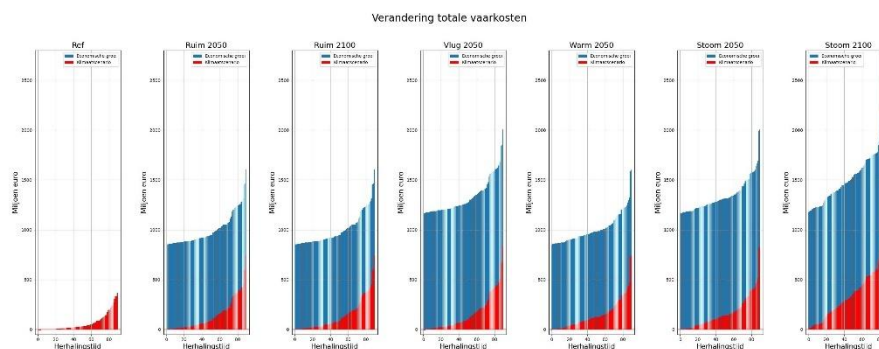
In Figuur D-4 staat voor alle jaren van de Deltascenario's de verandering in vaarkosten als gevolg van lage rivierafvoeren. In Figuur D-5 staat naast de verandering in vaarkosten door klimaat ook de verandering door economische groei. Het gemiddelde van de jaren met een toename in vaarkosten is te zien in Figuur D-6 en Tabel D-3. Hierbij zijn een aantal observaties te plaatsen:

- Het droogterisico *verdubbelt* voor vrijwel alle Deltascenario's, van 80 miljoen euro per jaar naar 160-185 miljoen euro per jaar;
- Alleen voor Stoom 2100 is er sprake van een *vervijfvoudiging* van het droogterisico naar bijna 400 miljoen euro per jaar.

Verder valt op dat het grootste deel van de jaren, ook in de referentie, hogere vaarkosten heeft dan het referentiejaar. Dit is een gevolg van het gebruiken van een *synthetisch mediaan jaar*. Hierbij wordt voor elke dag de mediane afvoer gebruikt. De minimale afvoer komt hierdoor niet onder de 1400 m³/s. De vaarkosten nemen exponentieel toe vanaf ongeveer deze afvoer. Omdat vrijwel elk jaar ergens in de reeks lagere afvoeren heeft dan in de referentie kan dat resulteren in een (beperkte) toename in vaarkosten ten opzichte van de referentie.



Figuur D-4 Verandering in vaarkosten ten opzichte van het synthetische mediane jaar door klimaatverandering in de 6 Deltascenario's en de referentie gesorteerd van minimale verandering (links) naar maximale verandering in vaarkosten (rechts).

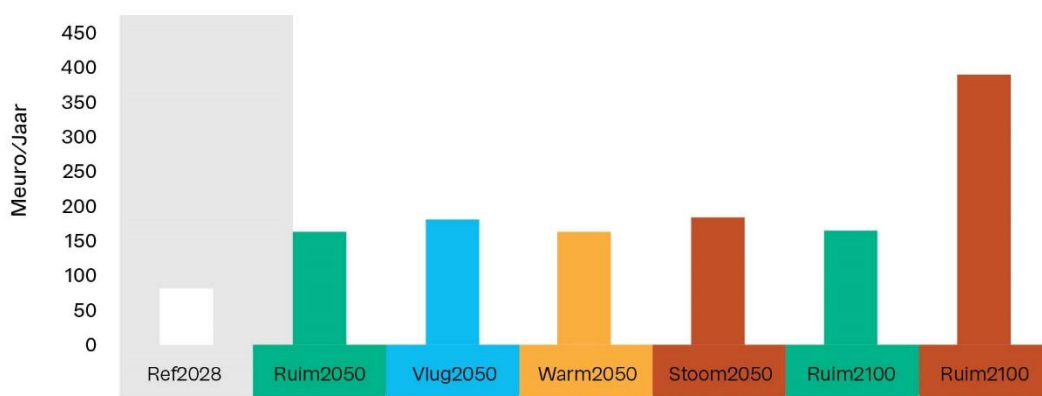


Figuur D-5 Verandering in vaarkosten ten opzichte van het synthetisch mediaan jaar uit de referentie in de verschillende Deltascenario's, het effect van economische groei is weergegeven in blauw en het klimaat effect in rood.

Tabel D-3 Droogterisico [Meur], gedefinieerd als de gemiddelde vaarkosten over de jaren met een toename in vaarkosten ten opzichte van het synthetische mediane jaar. Per scenario is tevens het aantal jaren geteld waarin de vaarkostentoename groter is dan 0 euro. Het effect van droogte is geïsoleerd door de corresponderende economische scenario's te vergelijken.

Deltascenario	Droogterisico [Meur]	Aantal jaren > 0
Ref	83	75
Ruim 2050	164	83
Vlug 2050	183	83
Warm 2050	166	87
Stoom 2050	186	87
Ruim 2100	164	83
Stoom 2100	393	90

Droogterisico Scheepvaart (vaarkosten)



Figuur D-6 Grafiek van het droogterisico voor de referentie en de verschillende Deltascenario's, Voor het droogterisico wordt het corresponderende economische scenario genomen om het effect van droogte te isoleren.

D.3.2 Zoetwateropgave T=20

In Tabel D-4 zijn de vaarkosten (incl. economische groei) te vinden voor verschillende herhalingstijden. In Tabel D-5 staat het verschil in vaarkosten ten opzichte van de referentie, waarbij alleen wordt gekeken naar het effect van droogte. Voor het T=20 jaar waarbij het effect van droogte is geïsoleerd zijn de volgende observaties te plaatsen:

- Voor vrijwel alle Deltascenario's is er sprake van iets meer dan een *verdubbeling* van vaarkosten, van 255 Meur naar ~575 Meur per jaar;
- Alleen voor Stoom 2100 is er sprake van een *verviervoudiging* van vaarkosten, van 255 Meur naar 1020 Meur per jaar.

Dit is vrijwel geheel in lijn met de toename in het droogterisico onder de verschillende scenario's. Alleen in Stoom 2100 neemt het extremere jaar T=20 minder hard toe dan het droogterisico.

Tabel D-4 Vaarkosten per jaar voor de referentie en de Deltascenario's bij verschillende herhalingstijden (in miljoenen euro's), let op: in de deltasenario's zit ook economische groei waardoor de vaarkosten toenemen.

Scenario	Mediaan	1:1	1:2	1:10	1:20	1:90
Totale vaarkosten inclusief Economische Groei [Meur]						
Ref	2335	2322	2367	2534	2590	2680
Ruim 2050	3229	3180	3315	3708	3765	4034
Vlug 2050	3229	3180	3315	3708	3765	4034
Warm 2050	3546	3493	3637	4052	4113	4396
Stoom 2050	3249	3182	3374	3684	3743	4100
Ruim 2100	3568	3495	3700	4027	4090	4464
Stoom 2100	3755	3513	3897	4388	4529	4956

Tabel D-5 Verschil in vaarkosten tussen het synthetische mediane jaar uit de referentie en het desbetreffende deltasenario voor verschillende herhalingstijden (in miljoenen euro's), dit is alleen het effect van klimaat.

Scenario	Verschil in vaarkosten ten opzichte van het synthetische mediane jaar			
	1:2	1:10	1:20	1:90
Ref	32	200	255	346
Ruim 2050	120	514	570	840
Vlug 2050	128	543	604	887
Warm 2050	179	489	549	905
Stoom 2050	191	518	581	955
Ruim 2100	120	514	570	840
Stoom 2100	388	878	1020	1447

D.4 Conclusie scheepvaarteffect

Het droogterisico neemt voor de meeste Deltascenario's toe met 80 miljoen euro. Dit is een verdubbeling van het droogterisico. Alleen voor Stoom2100 is er sprake van een significant hogere toename van het droogterisico, namelijk een toename van 300 miljoen euro. Dit is een verviervoudiging van het droogterisico.

Voor een droog jaar met een herhalingstijd van 1:20 nemen de vaarkosten per jaar toe met 300 miljoen euro voor alle Deltascenario's behalve Stoom2100. Dit is meer dan een verdubbeling van de vaarkosten per jaar. Voor Stoom2100 nemen de vaarkosten per jaar met 750 miljoen euro toe. Dat komt neer op een verviervoudiging van de vaarkosten per jaar.

De toename in vaarkosten is direct te relateren aan de verandering in afvoer, aangezien dat de enige inputvariabele is in QINCoM. Met oog op het exponentiële karakter van de kostenfuncties nemen de vaarkosten sterk toe met verder afnemende afvoeren. De toename in transportkosten is vergelijkbaar met de resultaten uit Integraal Riviermanagement (Asselman et al., 2022), waar een vergelijkbare methodiek is gehanteerd maar met andere klimaatscenario's (KNMI '14) is gerekend.

Het effect van verminderde vaardiepte op de vaarkosten zal in de praktijk waarschijnlijk anders zijn. Afhankelijk van de economische situatie kunnen de vrachtprijzen ten tijde van droogte vele malen hoger zijn dan nu in de kostenrelaties zijn opgenomen. Daarnaast is niet altijd voldoende vlootcapaciteit beschikbaar om specifieke vracht te vervoeren. Met name voor natte bulk is er slechts een beperkt aantal schepen beschikbaar voor het vervoeren van de vracht, die ook nog eens dieper in het water liggen (Vinke et al., 2022).

Ecorys gaat deze resultaten gebruiken om een doorvertaling te maken naar de *transportkosten* en het *welvaartseffect*.

E Kengetallen Funderingsrisico

Tabel E-1 Kengetallen funderingsschade voor de scenario's REF2017 en S2050 per centimeter verandering van de GLG. De kengetallen zijn weergegeven in euro per centimeter GLG voor de totale deelregio, per object (woongebouw) en per hectare bebouwd gebied.

	REF2017 (€/cm GLG)			S2050 (€/cm GLG)		
	Totale regio	Per object	Per hectare bebouwd gebied	Totale regio	Per object	Per hectare bebouwd gebied
Noord Aanvoergebied na Gaarkeuken	1465415	13.1	1465415	211.6	425792	3.8
Noord Aanvoergebied voor Gaarkeuken	2668564	11.6	2668564	176.3	1433919	6.3
Noord Drents plateau	90097	0.7	90097	10.0	651591	5.3
Noord Holland Noord	36328804	90.7	36328804	1971.8	34422676	86.4
Noord Veenkoloniën	5133592	72.0	5133592	891.5	3078357	43.5
Rivierengebied Noord	4522641	21.6	4522641	428.1	5489826	26.3
Rivierengebied Zuid	856910	5.9	856910	104.3	501055	3.4
West Maasdelta	2697798	11.6	2697798	259.7	4957384	21.4
West met bovenregionale aanvoer	40181670	52.0	40181670	1276.2	44560931	58.0
West zonder bovenregionale aanvoer	9675118	20.5	9675118	461.4	6938820	14.8
Zuidwestelijke Delta met aanvoer	2875902	21.7	2875902	365.4	1625673	12.3

Tabel E-2 Kengetallen funderingsschade voor de scenario's REF2017 en S2050 per centimeter verandering van de GLG. De kengetallen zijn uitgesplitst voor het landelijk en stedelijk bebouwd gebied en weergegeven in euro per centimeter GLG per hectare.

	REF2017 (€/cm GLG)		S2050 (€/cm GLG)	
	Per hectare bebouwd stedelijk gebied	Per hectare bebouwd landelijk gebied	Per hectare bebouwd stedelijk gebied	Per hectare bebouwd landelijk gebied
Noord Aanvoergebied na Gaarkeuken	296	-	86	-
Noord Aanvoergebied voor Gaarkeuken	262	6	141	2
Noord Drents plateau	16	-	115	-
Noord Holland Noord	2487	44	2343	92
Noord Veenkoloniën	1323	29	802	1
Rivierengebied Noord	619	7	745	24
Rivierengebied Zuid	145	2	83	5
West Maasdelta	297	2	541	28
West met bovenregionale aanvoer	1443	144	1611	81
West zonder bovenregionale aanvoer	558	27	397	36
Zuidwestelijke Delta met aanvoer	502	-	284	-

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl