



## Rijn als regenrivier

### Samenvatting

Door veranderingen in klimaat zal het afvoerregime van de Rijn grilliger worden met een hogere afvoer in de winter en een lagere afvoer in de zomer. Hierdoor krijgt de Rijn meer karakteristieken van een regenrivier in plaats van een gemengde sneeuw/regenrivier. Met name de afname in lagere afvoeren kan gevolgen hebben voor de innamepunten voor drinkwater die afhankelijk zijn van de Rijn. Tijdens perioden met lage afvoeren gaat de waterkwaliteit achteruit en de watertemperatuur omhoog. Dit zal in de toekomst vaker voorkomen dan in de huidige situatie. Een verslechterde waterkwaliteit kan leiden tot meer innamestops en een hogere zuiveringsbehoefte.

### Consequenties voor u

	Laag	Middel	Hoog	Beknopte uitleg
Impact				Potentieel grote impact op drinkwatervoorziening uit oppervlaktewater
Zekerheid				Klimaatscenario's onzeker



De Lek (<https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat, Ruimte voor de Rivier/Herman Suiskind)



## Trendbeschrijving en achtergrond

### Huidige afvoerregime Rijn

De veranderingen in klimaat hebben consequenties voor de afvoer van de Rijn. Op dit moment is de Rijn in Nederland een gemengde sneeuw/regenrivier, wat resulteert in een relatief vlak afvoerregime (Klijn et al. 2015). Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld de Maas, wat een typische regenrivier is. In de afvoer van de Rijn zijn de effecten van de sneeuwsmelt te zien, net als de effecten van het smelten van de gletsjers. Met name tijdens perioden met een lage afvoer, normaal gesproken in het najaar, is de invloed van smeltende gletsjers relatief groot. Daarnaast spelen de grote meren (met name de Bodensee) in het stroomgebied van de Rijn een belangrijke rol voor buffering van de pieken. Dit draagt bij aan een vlakker afvoerregime.

### Effecten klimaatverandering

Er zijn veel studies uitgevoerd naar de effecten van klimaatverandering op de afvoer van de Rijn (e.g. de Wit et al. 2008, Van Vliet et al. 2008, Gørgen et al. 2010, Hurkmans et al. 2010, Klijn et al. 2015). Deze effecten hangen uiteraard af van de gebruikte scenario's (KNMI'06, KNMI'14 of IPCC scenario's). Over het algemeen is echter de verwachting dat de Rijn bij Lobith meer karakteristieken zal gaan vertonen van een regenrivier. Het afvoerregime wordt grilliger met grotere verschillen tussen de afvoer in de zomer en in de winter.

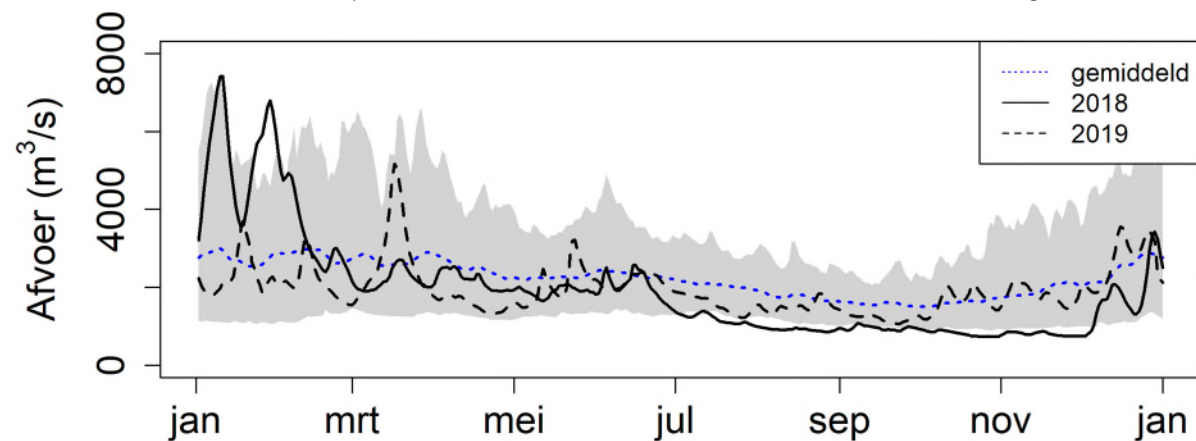
### Hoge afvoeren

Modelresultaten met de KNMI'14 scenario's geven een toename in de gemiddelde afvoer voor alle scenario's, behalve  $W_{\text{dry}}$  (Sperna Weiland et al. 2015). Deze toename vindt vooral plaats in de winter door een toename in neerslag en verandering in type neerslag van sneeuw naar regen. De afvoer in de winter neemt in 2050 toe met 10-20%, maar voor 2085 voorspellen modelsimulaties met de warmere klimaatscenario's ( $W$ -scenario's) toenames tot bijna 40% (Klijn et al. 2015). Daarnaast komen de hoogste maandgemiddelde afvoeren eerder voor (in december of januari in plaats van februari) door minder sneeuwval bovenstrooms (Sperna Weiland et al. 2015). Door de toename in neerslag nemen ook de maximum afvoeren toe in alle scenario's en hiermee de kans op extreme afvoeren en

hoge waterstanden. Hoe groot deze extremen zijn, hangt sterk af van de demping van hoogwaterpieken in gebieden bovenstrooms en overstromingen in Duitsland. Over de extreme afvoeren bestaat nog veel onzekerheid, maar de kans op vaker voorkomen van extreme afvoeren neemt in alle scenario's toe (Klijn et al. 2015).

### Lage afvoeren

Over de gevolgen voor de lage afvoeren van de Rijn bestaat meer onzekerheid. In de nabije toekomst (2050) blijven de afvoeren gelijk of nemen iets af afhankelijk van het scenario. September is de maand met de laagste afvoer, in deze maand worden door modelsimulaties met de KNMI'14 scenario's verschillen voorspeld tussen de +4% en -27% voor 2050 (Sperna Weiland et al. 2015). Wanneer er verder in de toekomst gekeken wordt naar



Gemiddelde afvoer van de Rijn (blauwe stippellijn) voor de periode 1970-2017 met het 5<sup>de</sup> en 95<sup>ste</sup> percentiel in grijs. Het extreem droge jaar 2018 is los weergegeven, net als 2019 (Data: Rijkswaterstaat).



2085, is er een grotere afname in lage afvoeren zichtbaar. Voor september geven de KNMI'14 scenario's veranderingen in afvoer, variërend van +1% voor het  $G_L$  scenario en -40% voor  $W_{Hdry}$  (Sperna Weiland et al. 2015). Dagen met een afvoer onder de  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  komen volgens deze studie minder vaak voor in de toekomst in de klimaatscenario's  $G_L$ ,  $G_H$ , en  $W_L$  en vaker in de scenario's  $W_H$  en  $W_{Hdry}$  (Sperna Weiland et al. 2015). Vergeleken met studies met andere klimaatscenario's (KNMI'06, CMIP5 en RheinBlick2050) nemen de afvoeren in de maanden met lage afvoeren minder af voor de KNMI'14 scenario's. Uit het RheinBlick2050 project volgden voor 2085 afnames in lage afvoeren van 5 tot 25% bij Lobith (Görgen et al. 2010). De gevolgen van klimaatverandering voor lage afvoeren zijn dus afhankelijk van het gekozen scenario, waarbij over het algemeen de lage afvoeren lager worden in de verdere toekomst.

### Invloed gletsjers

Een extra onzeker punt in de toekomstvoorspellingen is de afname van gletsjers in het bovenstroomse deel van de Rijn. Gemiddeld genomen is de bijdrage van ijssmelt aan de totale afvoer klein, deze wordt geschat op 0.8% bij Lobith (Stahl et al. 2016). Deze bijdrage vindt vooral plaats in augustus (schattingen hiervoor lopen uiteen van 2.6% van de totale afvoer in een gemiddelde afvoersituatie (Stahl et al. 2016) tot 6.6% (Huss 2011)) en in september (4.2%). Tijdens een periode met extreem

lage afvoer is ijssmelt een belangrijkere component van de totale afvoer. Voor de 2003-droogte wordt door Stahl et al. (2017) de ijssmelt-component geschat op 11.4% in augustus en 12.9% in september. Tijdens eerdere droge periode in 1921 en 1947 werden zelfs nog grotere bijdrages geschat (Stahl et al. 2017). Dit geeft aan dat het verdwijnen van de gletsjers al gevolgen heeft voor de lage afvoeren. De verwachting is dat gletsjers in de toekomst minder bijdragen aan de afvoer (Huss 2011). Over de gevolgen voor de afvoer van de Rijn is echter nog relatief weinig bekend en dit effect wordt niet altijd meegenomen in hydrologische modellen. De afname in lage afvoeren zou dus nog groter kunnen zijn dan tot nu toe berekend.

### Verder onderzoek

Op dit moment worden door het KNMI nieuwe klimaatscenario's voor Nederland ontwikkeld. Er wordt eerst een duiding gegeven van de resultaten van het zesde IPCC rapport voor Nederland (eind 2021) en de scenario's zelf worden uitgebracht in 2023 (<https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/op-weg-naar-nieuwe-knmi-klimaatscenario-s>). Deze scenario's zullen ook een beschrijving van de verandering in neerslag in de stroomgebieden van de Rijn en Maas bevatten.



## Relevantie

In Nederland zijn er verschillende innamepunten voor drinkwater die afhankelijk zijn van de afvoer van de Rijn. Veranderingen in die afvoer hebben dus rechtstreeks gevolgen voor de drinkwatervoorziening, met name voor de waterkwaliteit. Door de relatief kleine hoeveelheden die ingenomen worden voor drinkwater ten opzichte van de totale afvoer is er geen groot effect op de direct in te nemen hoeveelheden te verwachten, aangenomen dat de waterverdeling gelijk blijft. De lagere waterstand en waterbeschikbaarheid kan wel problemen geven voor andere sectoren, maar voor de drinkwatersector zijn de gevolgen voor de waterkwaliteit het meest relevant.

### Opgeloste stoffen

Tijdens perioden van lage afvoer neemt de waterkwaliteit af. Doordat tijdens lage afvoeren minder verdunning optreedt, lopen concentraties van opgeloste stoffen op. Tijdens de droogte van 2018 werden niet-significante toenames van de concentraties van geneesmiddelen gevonden en werden streefwaarden uit het Europees riviermemorandum (ERM) voor enkele stoffen overschreden (Wolff en Van Vliet 2021). In 2018 werden verhoogde 1,4-dioxaan concentraties gemeten in de Rijn bij Lobith, wat leidde tot meerdere Rijnalarmmeldingen (Stroomberg et al. 2019). Uiteindelijk was er geen innamestop nodig door deze verhoogde concentratie, omdat de concentraties het

innamepunt niet bereikte vanwege een lange verblijftijd door de lage afvoeren. Dit heeft wel de kwetsbaarheid van de waterkwaliteit aangetoond tijdens lage afvoeren. Sjerps et al. (2017) hebben gekeken naar de effecten van klimaatverandering op de concentraties van een aantal organische microverontreinigingen in de Rijn. Hierbij werden voor meerdere geneesmiddelen en röntgencontrastmiddelen de ERM-streefwaarden overschreden. De voorspellingen toonden aan dat het aantal overschrijdingen toe zal nemen, met name in droge jaren. Op dit moment kunnen de meeste van de onderzochte stoffen nog voldoende verwijderd worden, maar het is mogelijk dat in de toekomst meer stoffen ook in het drinkwater aangetroffen worden (Sjerps et al. 2017).

Niet alleen tijdens perioden met lage afvoeren verslechtert de waterkwaliteit, ook tijdens hogere afvoeren dan normaal gaat de waterkwaliteit achteruit. Overstromingen en intensieve buien kunnen onder andere leiden tot meer oppervlakkige afstroming, meer uitspoeling en overstorten (Van Bokhoven 2006, Van Vliet en Zwolsman 2008). Daarnaast bevat het water bij hoge afvoeren meer zwevende stof, waaraan stoffen kunnen hechten. De concentraties van zware metalen die adsorberen aan zwevende stof nemen toe tijdens hoge afvoeren (Van Bokhoven 2006). Voor de drinkwaterproductie is dit echter minder van belang, omdat zwevend stof makkelijk verwijderd kan worden.

### Watertemperatuur

Wanneer een periode met lage afvoer samenvalt met hoge luchttemperaturen stijgt de watertemperatuur. De gemiddelde watertemperatuur tijdens de zomer van 2018 steeg met 1.8°C (Lobith) en 1.4°C (Nieuwegein) vergeleken met 2014-2017 (Wolff en Van Vliet 2021). Tevens werd de wettelijke temperatuurnorm voor drinkwater van 25°C bij meetpunt Lobith éénmaal overschreden met een maximum gemeten temperatuur van 25.5°C (Wolff en Van Vliet 2021). Tijdens de hittegolf van 2006 werd deze temperatuurnorm zelfs bijna de hele maand juli overschreden (Zwolsman en Van Vliet, 2007). Veranderingen in klimaat leiden tot een toename van het aantal overschrijdingen met name voor de extremere klimaatscenario's (Zwolsman et al., 2011). De toename in temperatuur leidt niet direct tot problemen voor de drinkwatervoorziening, omdat menging in voorraadbekken en bodempassage zorgen voor een daling in de temperatuur. Wanneer bekkens echter zelf ook opwarmen of langere, hetere zomerperiodes voorkomen, kunnen wel problemen ontstaan. Daarnaast kan een hogere watertemperatuur leiden tot algenbloei en zuurstoftekorten (Zwolsman en Van Vliet, 2007).

### Chloridegehalte

Een andere zeer belangrijke factor voor de drinkwaterproductie is het chloridegehalte. Ten opzichte van de jaren 1970-80 is het chloridegehalte in de Rijn afgenomen door het Rijnzoutverdrag (Bonte en



Zwolsman 2009), maar tijdens lage afvoeren neemt dit gehalte toe, met name stroomafwaarts. Enerzijds komt dit door verminderde verdunning, anderzijds door verdere indringing van het zeewater door de lagere afvoer van zoet water. Tijdens de droogte van 2018 werden significant hogere chloridegehalten gemeten op verschillende locaties langs de Rijn: bij Lobith was deze toename 18% (Wolff en Van Vliet 2021). Het chloridegehalte in het IJsselmeer liep op tot 300 mg/l, boven de innamegrens van 150 mg/l. Hierdoor was een innamestop bij Andijk noodzakelijk. In het Amsterdam-Rijnkanaal werd een bellenscherm geplaatst om het zoute water tegen te houden. Om verzilting van de Lek tegen te gaan, werd extra water ingelaten bij stuw Hagestein (Stroomberg et al. 2019). De situatie zoals 2018 zal in de toekomst vaker gaan voorkomen, waardoor deze maatregelen meer toegepast moeten worden.

Voor de innamepunten langs de Lek bij Kinderdijk, Streefkerk en Bergambacht worden door Van den Brink et al. (2019) voor het  $W_{\text{dry}}$  scenario toenames verwacht van het aantal overschrijdingen van de norm van 150 mg/l, zowel door de concentratie in het rivierwater zelf als door indringing van zeewater bij de huidige waterverdeling. In een eerdere studie door Zwolsman et al. (2011) worden meer overschrijdingen voorspeld in de toekomst voor meerdere innamepunten en ook voor het IJsselmeer, waarvoor in droge jaren zeer lange perioden,

3.5 tot 5 maanden, met een te hoog chloridegehalte voorspeld worden.

### Regenrivier

Door de lagere afvoeren in de Rijn in de toekomst neemt de kans op het optreden van de beschreven problemen toe. Verschillende studies hebben ook aangetoond dat de effecten op de waterkwaliteit groter zijn voor een regenrivier als de Maas dan voor een gemengde rivier (Sjerps et al. 2017, Wolff en Van Vliet 2021). Wanneer de Rijn zich meer gaat gedragen als een regenrivier en de afvoeren lager worden in de zomer, neemt de kans op waterkwaliteitsproblemen dus ook toe.

Er zijn enkele maatregelen die genomen kunnen worden of inmiddels tijdens en na de droogte van 2018 al genomen zijn tegen de gevolgen van de lage afvoeren:

- Om de waterkwaliteit te verbeteren moeten lozingsvergunningen aangepast worden op de toekomstige lagere afvoeren.
- Er moeten goede monitorings- en meetprogramma's beschikbaar zijn. Tijdens periodes met lage afvoeren zijn gegevens over de actuele situatie cruciaal. Daarmee kunnen verhoogde concentraties van verontreinigingen beter gevolgd worden. Na de droogte van 2018 is besloten een uitgebreider meetprogramma voor chloridegehalten in het IJsselmeer te ontwikkelen (Stroomberg et al. 2019).

- Om verzilting tegen te gaan is een bellenscherm geïnstalleerd in het Amsterdam-Rijnkanaal. Daarnaast werd tijdens de droogte van 2018 extra water ingelaten bij stuw Hagestein. Deze laatste maatregel gaat echter ten koste van het beschikbare water voor andere sectoren, met name scheepvaart op de Waal. Een goede afweging van alle verschillende belangen is daarom cruciaal. Verzilting helemaal tegengaan is waarschijnlijk niet mogelijk, met name in de monding van de Lek. Daarom zijn al membraantechnieken geïmplementeerd door Oasen (Stroomberg et al. 2019).
- Voor het verbeteren van de waterkwaliteit kunnen extra zuiveringsstappen ingezet worden voor het water geloosd mag worden in de rivier. Dit vergt internationale afstemming met de landen bovenstrooms.
- Om te voorkomen dat verontreinigingen in het drinkwater terecht komen, zullen voor sommige stoffen de zuiveringsrendementen van drinkwaterbedrijven verbeterd moeten worden.



## Referenties en meer informatie

- Bonte, M. en Zwolsman, J.J.G. (2009). "Klimaatverandering en verzoeting van de Rijn." *H2O* **20**: 29-31.
- de Wit, M., Buiteveld, H., van Deursen, W., Keller, F. en Bessembinder, J. (2008). "Klimaatverandering en de afvoer van Rijn en Maas." *Stromingen* **14**(1).
- Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. en Volken, D. (2010). *Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 project*, International Commission for the Hydrology of the Rhine basin.
- Hurkmans, R., Terink, W., Uijlenhoet, R., Torfs, P., Jacob, D. en Troch, P.A. (2010). "Changes in Streamflow Dynamics in the Rhine Basin under Three High-Resolution Regional Climate Scenarios." *Journal of Climate* **23**(3): 679-699.
- Huss, M. (2011). "Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe." *Water Resources Research* **47**(7).
- Klijn, F., Hegnauer, M., Beersma, J. en Sperna-Weiland, F. (2015). Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas? Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren. Deltares en KNMI, Delft
- Sjerps, R.M.A., ter Laak, T.L. en Zwolsman, G.J.J.G. (2017). "Projected impact of climate change and chemical emissions on the water quality of the European rivers Rhine and Meuse: A drinking water perspective." *Science of The Total Environment* **601-602**: 1682-1694.
- Sperna Weiland, F., Hegnauer, M., Bouaziz, L. en Beersma, J. (2015). Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse. Comparison with earlier scenario studies. Deltares, Delft
- Stahl, K., Weiler, M., Freudiger, D., Kohn, I., Seibert, J., Vis, M., Gerlinger, K. en Böhm, M. (2017). The snow and glacier melt components of the streamflow of the River Rhine and its tributaries considering the influence of climate change. Final report to the International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR)
- Stahl, K., Weiler, M., Kohn, I., Freudiger, D., Seibert, J., Vis, M., Gerlinger, K. en Böhm, M. (2016). The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change. Synthesis Report I-25, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, Lelystad, Netherlands
- Stroomberg, G.J., Neefjes, R.E.M., Bannink, A., de Jonge, J.A. en Zwamborn, C.C. (2019). Jaarrapport 2018 De Rijn. RIWA-Rijn
- Van Bokhoven, A. (2006). The impact of climate change on the water quality of the Rhine river. BTO 2006.056(s) KIWA Water Research, Nieuwegein
- Van den Brink, M., Huismans, Y., Blaas, M. en Zwolsman, G. (2019). "Climate Change Induced Salinization of Drinking Water Inlets along a Tidal Branch of the Rhine River: Impact Assessment and an Adaptive Strategy for Water Resources Management." *Climate* **7**(4): 49.
- Van Vliet, M., Zwolsman, G. en Joziasse, J. (2008). Effecten van klimaatverandering op de Waterkwaliteit in de Rijn en Maas. Deltares, Delft
- Van Vliet, M.T.H. en Zwolsman, J.J.G. (2008). "Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river." *Journal of Hydrology* **353**(1): 1-17.
- Wolff, E. en Van Vliet, M.T.H. (2021). "Impact of the 2018 drought on pharmaceutical concentrations and general water quality of the Rhine and Meuse rivers." *Science of The Total Environment* **778**: 146182.
- Zwolsman, J.J.G., G.A. van den Berg en D.G. Cirkel (2011). Knelpuntenanalyse drinkwater en industriewater. KWR Water Research, Nieuwegein. Rapportnummer KWR2011.033
- Zwolsman, J.J.G. & M.T.H. van Vliet (2007). Effect van een hittegolf op de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas. *H2O* (2007), nr. 22, p. 41-44.

## Keywords

Klimaatverandering, Rijn, waterbeschikbaarheid, waterkwaliteit, verzilting, droogte