

Document Version

Final published version

Citation (APA)

Verschuur, J., Hall, I. R., Sher, G., & Taebi, B. (2025). *Huidige en toekomstige klimaatrisico's voor het Nederlandse energiesysteem*. TU Delft.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

In case the licence states "Dutch Copyright Act (Article 25fa)", this publication was made available Green Open Access via the TU Delft Institutional Repository pursuant to Dutch Copyright Act (Article 25fa, the Taverne amendment). This provision does not affect copyright ownership.
Unless copyright is transferred by contract or statute, it remains with the copyright holder.

Sharing and reuse

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Huidige en toekomstige klimaatrisico's voor het Nederlandse energiesysteem

Auteurs: Jasper Verschuur, Isaac Hall, Gabriel Sher en Behnam Taebi
Datum: 01-12-2025

***Huidige en toekomstige klimaatrisico's voor het
Nederlandse energiesysteem***

Inhoud

1	Het Nederlandse energiesysteem	7
1.1	Overzicht energiesysteem	7
1.2	Energie productie	7
1.2.1	Aardgas	8
1.2.2	Andere fossiele brandstoffen	9
1.2.3	Hernieuwbare energiebronnen	9
1.2.4	Andere koolstofarme bronnen	11
1.3	Elektriciteitstransmissie en -distributie	11
1.4	Gas transport	12
1.5	Energievraag en -opslag	13
1.6	Toekomstige ontwikkelingen energiesysteem	14
2	Klimaatdreigingen & blootstellingen	16
2.1	Rivieroverstromingen	16
2.2	Extreme regenval	20
2.3	Zeespiegelstijging	22
2.4	Droogte	24
2.5	Windstormen	27
2.6	Duisterluwte	29
3	Waarschijnlijkheid op impacts	32
3.1	Rivieroverstromingen	32
3.2	Extreme regenval	33
3.3	Zeespiegelstijging	34
3.4	Droogte	36
3.5	Windstormen	39
3.6	Duisterluwte	41
4	Impact van klimaatdreigingen	44
4.1	Sociaaleconomische gevolgen van klimaatdreigingen	44
4.2	Rivieroverstromingen	45
4.3	Extreme regenval	46
4.4	Zeespiegelstijging	47
4.5	Droogte	48
4.6	Windstormen	49
4.7	Duisterluwte	50
4.8	Samenvatting waarschijnlijkheden en impacts	52
5	Wildcards	53
5.1	Extreme zeespiegelstijging vanwege versnelde afsmelten Antarctische ijskappen	53
5.2	Extreme droogte en ruige winters vanwege stilvallen AMOC	54
6	Cascade-effecten	56

6.1	Cascade-effecten vanwege uitvallen elektriciteit	56
6.1.1	Doorwerkingen op ICT	56
6.1.2	Doorwerkingen op veehouderij	57
6.1.3	Doorwerkingen op openbaarvervoer	57
6.1.4	Doorwerkingen op essentiële voorzieningen	58
6.1.5	Doorwerkingen op bedrijfsleven	58
6.2	Doorwerkingen op bosbranden	59
7	Adaptatiemaatregelen	60
7.1	Huidige adaptatiemaatregelen	60
7.1.1	Rivieroverstromingen & extreme regenval	61
7.1.2	Zeespiegelstijging	61
7.1.3	Droogte	62
7.1.4	Windstormen	62
7.1.5	Duisterluwte	63
7.2	Toekomstige adaptatiemaatregelen	65
7.2.1	Rivieroverstromingen	66
7.2.2	Extreme regenval	67
7.2.3	Zeespiegelstijging	69
7.2.4	Droogte	70
7.2.5	Windstormen	71
7.2.6	Duisterluwte	73
7.3	Samenvatting effecten van toekomstige adaptatiemaatregelen	74
8	Limitaties	75
8.1	Algemeen	75
8.2	Rivieroverstromingen en extreme regenval	75
8.3	Zeespiegelstijging	75
8.4	Droogte	76
8.5	Winstormen	76
8.6	Duisterluwte	76
9	Vervolgonderzoek	77
9.1	Integreren klimaatdreigingen met energiesysteemmodel	77
9.2	Verdieping op combinaties van klimaatdreigingen	77
9.3	Verdieping op ontwikkelingen van assets en kwetsbaarheden	77
9.4	Verkenning van internationale dimensie	77
10	Conclusie	79
	Referenties	80

Figuren

Figuur 1: Schema van het Nederlandse energiesysteem	7
Figuur 2: Elektriciteitscentrales in Nederland naar primaire energie (Global Energy Monitor, n.d.)	8
Figuur 3: Routekaart 2030, windenergie op zee in Nederland (RVO, 2025)	10
Figuur 4: Kaart van de extra- en hoogspanningstransportlijnen (TenneT TSO. B.V., 2019)	11
Figuur 5: Toekomstig energieverbruik in Nederland (Pj)(PBL, 2025)	15
Figuur 6: Ontwerpnormen voor rivierdijken tegen overstromingen (Rijkswaterstaat, n.d.)	17
Figuur 7: Onderstations en blootstellingniveaus bij >200cm inundatie 2050 en 2100	18
Figuur 8: Onderstations en blootstellingniveaus bij >50cm inundatie 2050 en 2100	18
Figuur 9: Onderstations en blootstellingniveaus aan extreme regenval in huidige situatie	21
Figuur 10: Onderstations en blootstellingniveaus aan extreem regenval (1:100 jaar en 1:1000 jaar)	21
Figuur 11: Aantal blootgesteld onderstations aan extreme regenval van 1:100 en 1:1000 jaar	22
Figuur 12: Toekomstige scenario's zeespiegelstijging tot 2100 (Bars & Drijfhout, 2025)	22
Figuur 13: Locatie energiecentrales in het buitendijkse gebied	23
Figuur 14: Uitdagingen voor de beschikbaarheid van oppervlaktewater (Klimaat-effectatlas, n.d.)	24
Figuur 15: Waterbeschikbaarheid in 2050 voor waterstofcentrales (HaskoningDHV, Royal, 2024)	25
Figuur 16: Weergaven van scenario's van blootstellingsduur van droogte aan centrales in 2050	26
Figuur 17: Seizoensgebondenheid van windstoten in een beperkt contextscenario 2050	27
Figuur 18: Vergelijking beperkt en sterk contextscenario voor windstormen	28
Figuur 19: 99e percentiel windstoten in Nederland in verschillende contexten	28
Figuur 20: Storingspercentage van transmissielijnen in het VK (Jamieson, Strbac, & Bell, 2020)	29
Figuur 21: Kans op gelijktijdige duisterluwtes tussen twee landen in Europa (van Duinen, 2025)	30
Figuur 22: Rivierdijken en voldoening aan beschermingsniveaus Waterwet (Rijkswaterstaat, n.d.)	32
Figuur 23: Scenario voor toename neerslagvolume 2100H (STOWA, 2024)	33
Figuur 24: Scenario's voor mondiale opwarming (STOWA, 2024)	33
Figuur 25: Verandergetallen klimaatscenario's regenval	33
Figuur 26: Blootstelling aan kustoverstroming, huidige situatie (Port of Rotterdam Authority, n.d.)	35
Figuur 27: Blootstelling aan kustoverstroming 2050 (a) 2100 (b) (Port of Rotterdam Authority, n.d.)	35
Figuur 28: De Quarleshaven bij Vlissingen (Klimaat-effectatlas, n.d.)	36
Figuur 29: Mogelijke beperkingen van productie bij lozingsnormen van 25/28°C 2025 en 2050	37
Figuur 30: Verwachte watertekorten in 2050 bij een sterk contextscenario (Klimaat-effectatlas, n.d.)	38
Figuur 31: 1:50 jaar windstoot op 100m hoogte (van den Brink, Wijnant, Bosveld, & Stepek, 2017)	39
Figuur 32: Vergelijking van extreme windstoten tussen het huidige, beperkte en sterke scenario	40
Figuur 33: Terugkeertijden extreme windstoten in het huidige situatie, 2050 en 2100	40
Figuur 34: Weergaven van de waarschijnlijkheden van een 30 dagen Duisterluwte	42
Figuur 35: Weergaven van de waarschijnlijkheden van 7 dagen Duisterluwtes	42
Figuur 36: Duurcurves van uurlijkse elektriciteitsprijzen in 2015, 2030 en 2050 (Sijm, et al., 2017)	43
Figuur 37: Klimaatdreigingen risicoboom	44
Figuur 38: Visualisatie meerjarige Duisterluwte model (Hawkins, van den Broek, & Bruninx, 2025)	50
Figuur 39: Nadruk op de hoogst verwachte zeespiegelstijging in Nederland (Bars & Drijfhout, 2025)	53
Figuur 40: Weergave van de vereiste interconnectorcapaciteit in Nederland 2015, 2030 en 2050	64
Figuur 41: Geprioritiseerde centrales voor verplaatsing binnen adaptatiemaatregel 'transformeren'	71
Figuur 42: Notities droogtegrafiek van afname waterstress bij adaptatiemaatregel 'transformeren'	71
Figuur 43: Huidige hoogspanningsnet (L), met >380kV ondergronds (R) (TenneT TSO B.V., 2025)	72

Tabellen

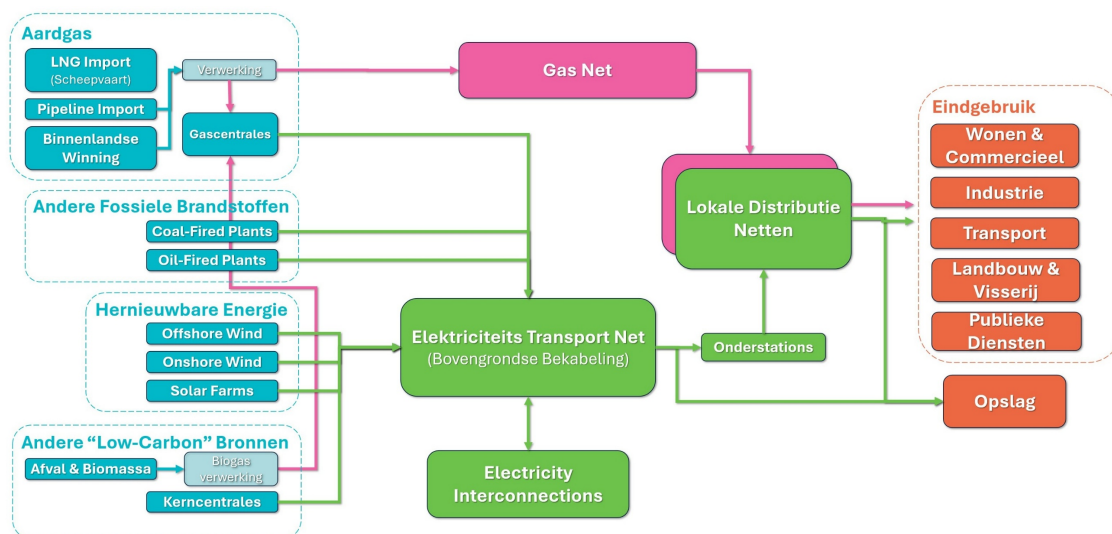
Tabel 1: Opbouw van twee contextscenario's	14
Tabel 2: Energiemix (aanbod) 2050 voor de twee contextscenario's	14
Tabel 3: Kritieke uitvalhoogten van verschillende type onderstations (Honingh, et al., 2024).....	17
Tabel 4: Blootstellingniveaus en Overstromingskansen (Klimaat-effectatlas, n.d.)	19
Tabel 5: Percentage onderstations blootgesteld per type en inundatiediepte	19
Tabel 6: Blootstellingniveaus extreme regenval	20
Tabel 7: Percentage onderstations blootgesteld aan extreme regenval.....	22
Tabel 8: Waarschijnlijkheden 99/148mm neerslag per 24uur in 2050 en 2100 per contextscenario's	34
Tabel 9: Waarschijnlijkheden van historische koelwater tekorten bij 2050/2085 context	38
Tabel 10: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging rivieroverstroming	45
Tabel 11: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging extreme regenval	46
Tabel 12: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging zeespiegelstijging	47
Tabel 13: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging droogte	48
Tabel 14: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging windstormen	49
Tabel 15: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging Duisterluwte	51
Tabel 16: Samenvatting van de waarschijnlijkheden en de impact van de zes klimaatdreigingen.....	52
Tabel 17: Samenvatting huidige adaptatiemaatregelen	60
Tabel 18: Samenvatting toekomstige adaptatiemaatregelen.....	65
Tabel 19: Effecten van adaptatiemaatregel 'intensiveren' op blootstelling aan rivieroverstroming	66
Tabel 20: Effecten van adaptatiemaatregel 'transformeren' op blootstelling aan rivieroverstroming...	67
Tabel 21: Effecten van adaptatiemaatregel 'intensiveren' op blootstelling aan extreme regenval	68
Tabel 22: Effecten van adaptatiemaatregel 'transformeren' op blootstelling aan extreme regenval ...	68
Tabel 23: Samenvatting effecten van toekomstige adaptatiemaatregelen op de eindimpacts	74

1 Het Nederlandse energiesysteem

1.1 Overzicht energiesysteem

Volgens het vijfde evaluatierapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) kan het energiesysteem worden gedefinieerd als de verzameling van alle componenten die te maken hebben met de productie, omzetting, levering en het gebruik van energie (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Energie komt in elke fase van het energiesysteem voor, en in meerdere vormen. Energie is niet altijd direct bruikbaar voor mensen, daarom is een groot onderdeel van het systeem erop gericht om energie om te zetten naar een bruikbare vorm.

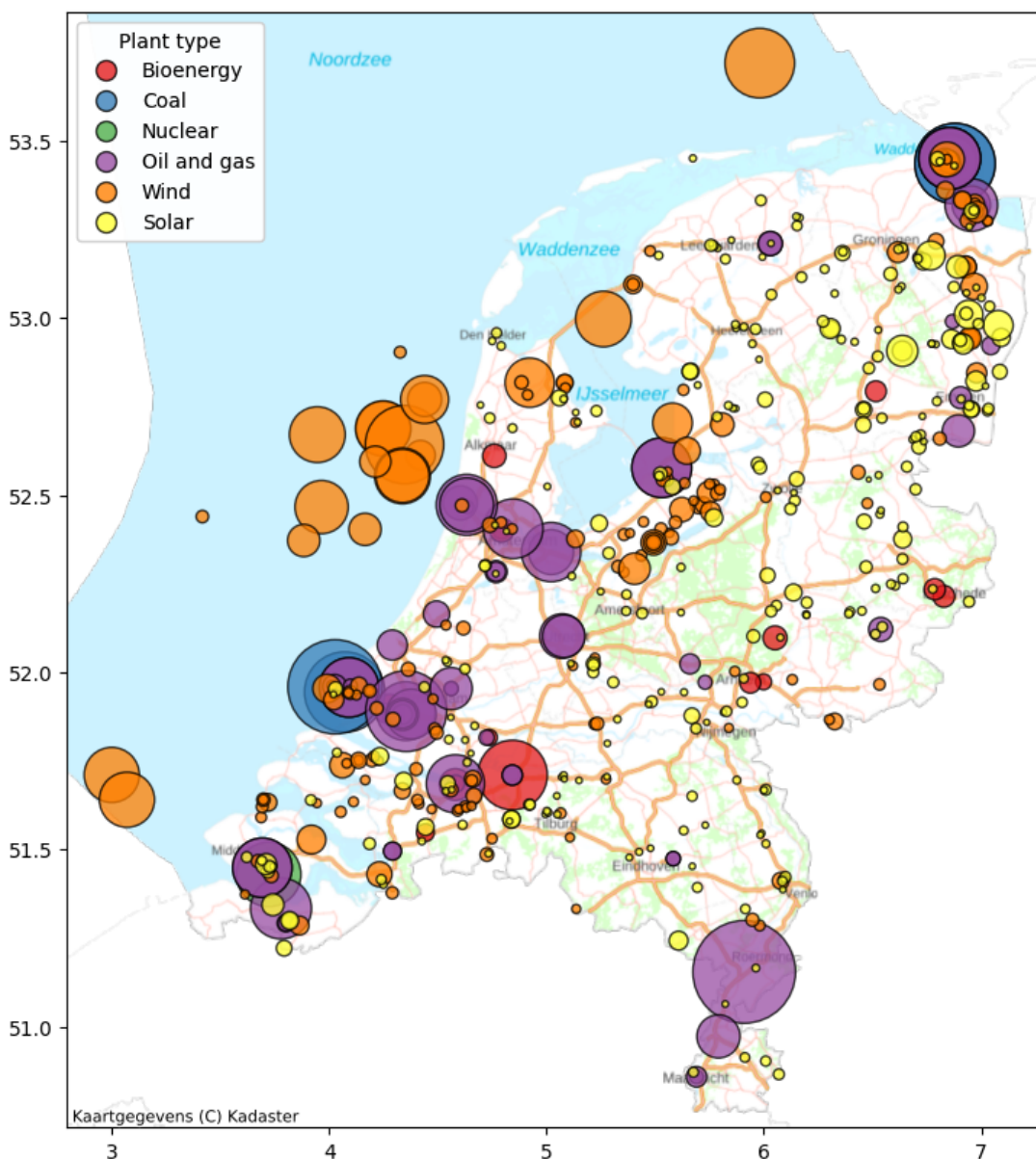
Het energiesysteem kan daarom worden gezien als een gekoppeld systeem van infrastructuur (bijv. voor productie of conversie), eindgebruikers en de energiestromen tussen hen (bijv. in de vorm van elektriciteit of verwarming). Het schema, te zien is in Figuur 1, presenteert een overzicht van de infrastructuur- en eindgebruikscategorieën van het energiesysteem in Nederland. Dit schema is gericht op infrastructuurelementen en eindgebruikscategorieën; enkele factoren zoals benzine voor transport zijn buiten beschouwing gelaten.



Figuur 1: Schema van het Nederlandse energiesysteem

1.2 Energie productie

Energieproductie verwijst naar het winnen van bruikbare energie uit natuurlijke bronnen. Omdat zowel primaire energie (vóór conversie) als secundaire energie (die gebruikt kan worden voor menselijke activiteiten) in vele vormen voorkomt, zijn er verschillende soorten infrastructuur nodig voor de productie van energie. Energiecentrales produceren over het algemeen energie in een van de volgende drie vormen: elektriciteit, warmte (bijv. verwarmd water) of brandstof (bijv. gas). Figuur 2 hieronder toont een kaart met energiecentrales in Nederland per primaire energievorm.



Figuur 2: Elektriciteitscentrales in Nederland naar primaire energie (Global Energy Monitor, n.d.)

1.2.1 Aardgas

Een aanzienlijk deel van de in Nederland geproduceerde en gebruikte energie is afkomstig van aardgas. Het *International Energy Agency* (IEA) schat dat 37,9% van de opgewekte elektriciteit en 35,9% van de totale energievoorziening (de som van energieproductie en netto geïmporteerde energiedragers) in Nederland afkomstig is uit aardgas (IEA, 2024). Aardgas is ook goed voor 42,2% van de binnenlandse energieproductie. Er zijn veel aardgasproductievelden in het land, maar verreweg de grootste (het Groningen-gasveld) is eind 2023 gesloten vanwege de bijdrage aan bodemdaling en kleine aardbevingen. Veel van de meest productieve overgebleven gasvelden liggen nu offshore in de Noordzee. Ondanks dat de productie in 2023 slechts 13,6% van het niveau in 2013 bedroeg, blijft aardgas een belangrijk onderdeel van het Nederlandse energiesysteem.

Het Nederlandse Klimaatakkoord streeft naar een uitfasering van aardgasgebruik in de gebouwde omgeving in 2050, met als tussentijds doel dat in 2030 1,5 miljoen (van de ruwweg 8 miljoen totale) woningen in Nederland zonder aardgas worden verwarmd (bijv. volledig verwarmd door stadsverwarming of elektrische warmtepompen). In 2022 gebruikte meer dan 90% van de woningen en commerciële gebouwen fossiele brandstoffen voor verwarming en koken. In 2018 verhinderde een wijziging van de *Gaswet* dat nieuwe gebouwen (bijv. huizen, kantoren, enz.) op het gasnet werden aangesloten, hoewel er enkele ontheffingen worden verleend (~20-30% in 2019, 13% in 2020) (CE Delft, 2022). 2018 was ook het eerste jaar dat Nederland een netto-importeur van aardgas werd, grotendeels als gevolg van de afnemende winning in het Groningenveld (CBS, 2019).

1.2.2 Andere fossiele brandstoffen

Steenkool is goed voor 6,2% van de totale energievoorziening in Nederland. Er zijn nog vier kolencentrales in Nederland die samen 8,8% van de elektriciteit van het land produceren. Deze centrales staan in de Eemshaven (Groningen), Geertruidenberg (Noord-Brabant) en twee in de haven van Rotterdam (Zuid-Holland) (IEA, 2024). Er is wetgeving aangenomen die zal leiden tot de sluiting of herbesteding van deze centrales in 2030.

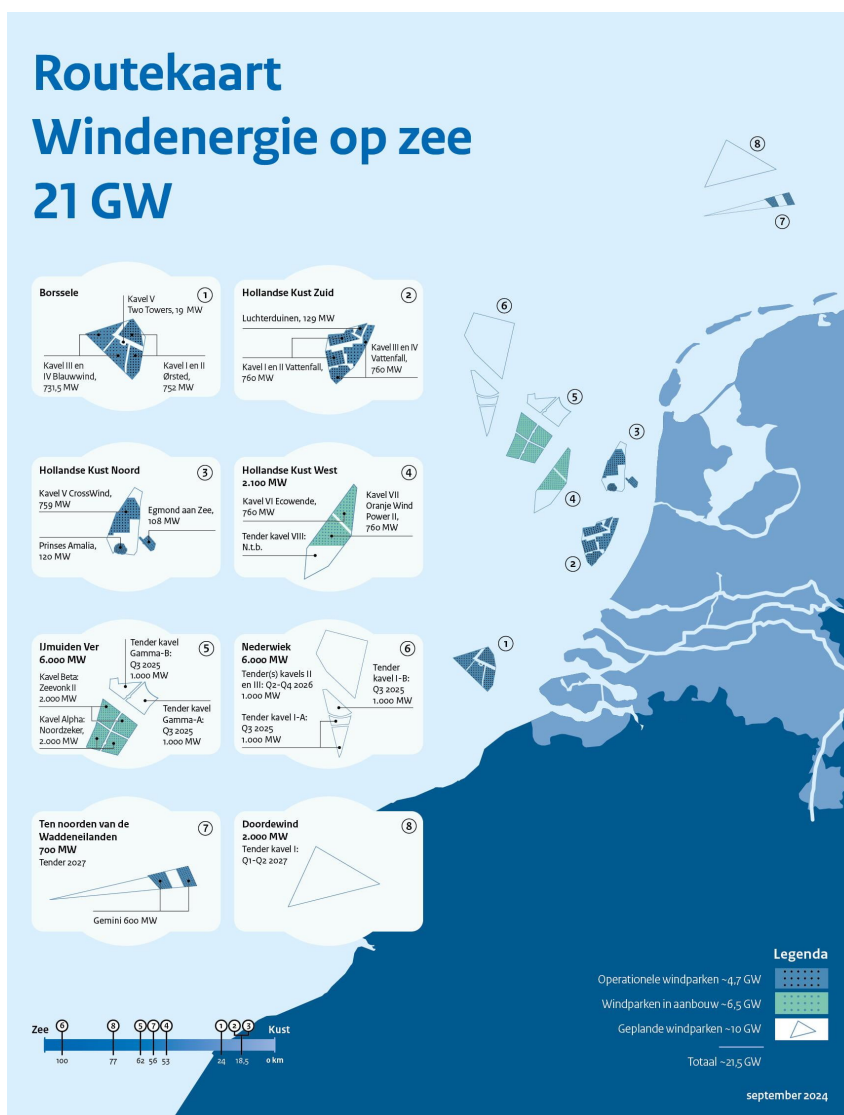
Olie is goed voor 41,0% van de energie in het land, waarvan het grootste deel wordt geïmporteerd. Een groot deel van de olievoorraad van het land wordt opnieuw geëxporteerd, bijna volledig in de vorm van geraffineerde producten zoals brandstoffen in plaats van ruwe olie: Nederland staat 4e in Europa wat betreft de import van ruwe olie, 4e wat betreft geraffineerde olieproducten en 1e wat betreft geëxporteerde olieproducten. Het grootste deel van de olieproducten (42,3%) wordt gebruikt als energie in de transportsector, terwijl 16,7% wordt gebruikt in de industriële sector en 36,8% wordt gebruikt voor niet-energetische doeleinden (bijv. olie die wordt verwerkt tot plastic voor consumptiegoederen). Slechts een klein deel van de Nederlandse olie wordt gebruikt voor het opwekken van elektriciteit, namelijk 1,3% van de totale productie (IEA, 2024).

1.2.3 Hernieuwbare energiebronnen

Zonne- en windenergie (zowel onshore als offshore) vormen samen 7,3% van de totale energievoorziening van het land in 2023 en 40,5% van de elektriciteitsopwekking. In tegenstelling tot aardgas en steenkool is het gebruik ervan de afgelopen tien jaar aanzienlijk toegenomen: wind- en zonne-energie zijn in 2023 verantwoordelijk voor respectievelijk 5 keer en 48 keer zoveel elektriciteitsopwekking als in 2013 (IEA, 2024).

Er zijn veel zonneparken verspreid over het land. Zes daarvan hebben een capaciteit van meer dan 100 MW, waarvan vier in de provincie Groningen. Ter verduidelijking: een zonnepark met een capaciteit van 100 MW dat op volle capaciteit draait – volle zon 24 uur per dag – zou het equivalent produceren van 0,72% van de totale Nederlandse elektriciteitsproductie in een jaar. Zonnepanelen voor woningen, bijvoorbeeld op het dak van een huis, maken ook een groot deel uit van de opwekking van zonne-energie in Nederland. Eind 2023 had ongeveer 31,5% van de huishoudens zonnepanelen geïnstalleerd (CBS, 2024). Deze huishoudelijke installaties zijn goed voor 43,4% van de binnenlands opgewekte zonnestroom.

Windenergie is een belangrijke component in het huidige en toekomstige energiesysteem van Nederland en was 59,2% van de hernieuwbare elektriciteitsopwekking in 2023. De totale geïnstalleerde capaciteit voor elektriciteitsopwekking uit wind bedraagt vanaf 2024 11,7 GW, waarvan 25% (2,9 GW) nieuw is geïnstalleerd in 2023. 40,6% (4,75 GW) van de windopwekkingscapaciteit is momenteel offshore; eerdere overeenkomsten bevatten een toezegging om windenergie op zee te laten groeien, met als doel 21 GW aan capaciteit in 2030 (nu 2032-2033) (Rijksoverheid, n.d.), wat het de grootste bron van elektriciteitsopwekking zou maken. Deze doelstellingen zullen groeien naar 50 GW in 2040 en 70 GW in 2050 (RVO, 2025). Er zijn verschillende huidige, aanbestede en geplande locaties voor offshore wind in de Noordzee, gelegen 18,5 tot 100 km uit de kust, zoals te zien is in Figuur 3.



Figuur 3: Routekaart 2030, windenergie op zee in Nederland (RVO, 2025)

1.2.4 Andere koolstofarme bronnen

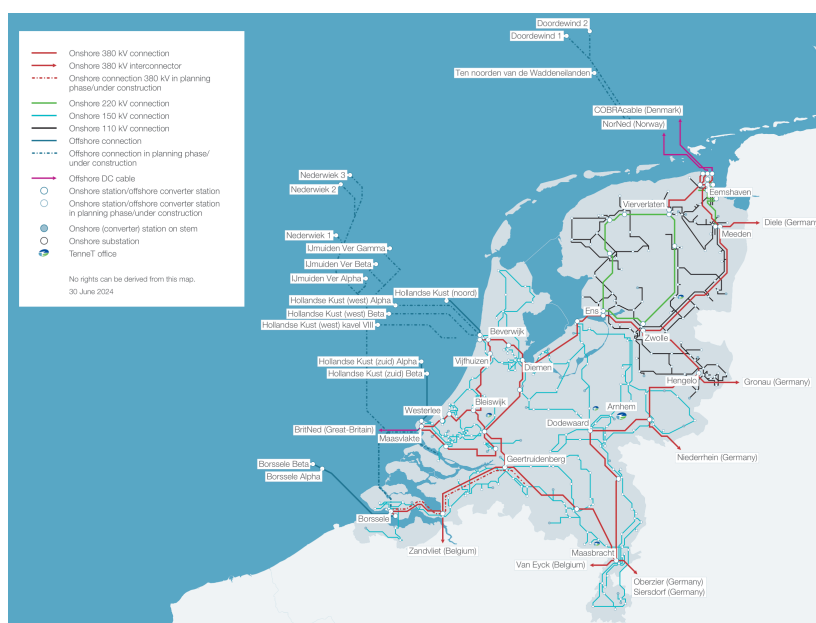
Biomassa, afval en kernenergie vormen de resterende 9,6% van de totale Nederlandse energievoorziening (IEA, 2024). Hoewel deze bronnen niet strikt hernieuwbaar zijn, worden ze beschouwd als netto - of bijna - nul in termen van koolstofuitstoot.

Er zijn verschillende biomassa- en afvalverbrandingscentrales in het land van verschillende omvang. De biomassacentrale Amercentrale in Geertruidenberg (Noord-Brabant), voorheen een kolencentrale, produceert ongeveer 600 MW elektrische energie en 350 MW warmte-energie die via stadsverwarming wordt gedistribueerd naar Breda en Tilburg.

Ondertussen is er slechts één kerncentrale in Nederland, in Borssele, met een capaciteit van ongeveer 450 MW. In december 2021 kondigde de regering het voornemen aan om twee nieuwe kernreactoren in gebruik te nemen. Voorlopige plannen verwachten dat ze in 2035 in bedrijf zullen zijn en een capaciteit zullen hebben van meer dan 1000 MW, mogelijk zelfs 1650 MW. Deze worden waarschijnlijk geplaatst in Borssele, naast de huidige reactor.

1.3 Elektriciteitstransmissie en -distributie

TenneT beheert het transportnet in Nederland op verschillende niveaus van 110 kV tot 380 kV. Internationale interconnectoren faciliteren de import van elektriciteit op 380 kV, terwijl conventioneel opgewekte elektriciteit op 380 of 220 kV op het net wordt gezet (de laatste meestal in het noorden van het land). TenneT beheert duizenden kilometers aan hoogspanningstransmissielijnen met 38 onderstations (in 2019) die 220 en 380 kV transport verzorgen (TenneT TSO. B.V., 2019). Veel van deze stations zetten de transmissiespanning vervolgens om naar 110 of 150 kV voor provinciale subnetten, waarlangs andere onderstations zijn aangesloten op de regionale midden- en laagspanningsdistributienetten. Deze regionale distributienetten worden beheerd door distributienetbeheerders (DSO's), zoals Liander, Enexis en Stedin, en brengen de elektriciteit naar huishoudens en andere kleinverbruikers.



Figuur 4: Kaart van de extra- en hoogspanningstransportlijnen (TenneT TSO. B.V., 2019)

Volgens een position paper van TenneT uit 2016 wordt nieuwbouw in hun 220- en 380 kV-“extra-hoogspanningsnet” altijd bovengronds geïnstalleerd, vaak naast bestaande infrastructuur zoals andere hoogspanningslijnen, snelwegen of spoorlijnen, terwijl de 110 kV- en 150 kV-lijnen waar mogelijk ondergronds worden aangelegd (TenneT TSO B.V., 2013). Reparaties aan ondergrondse extra-hoogspanningskabels kunnen tot 48 uur duren en worden daarom beschouwd als een belemmering voor de leveringszekerheid. Het compensatieprincipe van het *Structuurschema Elektriciteitsvoorziening III* stelt echter dat de totale lengte van bovengrondse bekabeling in Nederland niet mag toenemen, dus elke nieuwe aanleg van extra-hoogspanningslijnen vereist ook de aanleg van een equivalente lengte van 110- of 150 kV-lijnen onder de grond (Rijksoverheid, 2009). Recente technologie maakt het inmiddels mogelijk om hoogspanningslijnen met hogere voltages ondergronds te brengen, al is dit nog duur (Bilfinger, n.d.). De EU beschouwt het ondergronds leggen van het merendeel van de transmissiekabels in Finland als klimaatadaptatie, omdat het net hierdoor wordt beschermd tegen veranderingen in de frequentie en intensiteit van windstormen en extreme hitte (EEA, 2019).

Nederland heeft verschillende interconnecties met buurlanden. Figuur 4 toont aan de landsgrenzen ook de bestaande verbindingen met België, Duitsland, Denemarken, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk. Via België is de Nederlandse energiemarkt ook indirect verbonden met Frankrijk. TenneT blijft werken aan uitbreiding van de interconnectiecapaciteit met internationale partners. Het EU-beleid is gericht op het maximaliseren van de interconnecties op het continent om de veerkracht van het netwerk te verbeteren en prijsvolatiliteit te verminderen. Een elektriciteitsnetwerk met meer verbindingen is minder kwetsbaar voor plotselinge veranderingen in het aanbod van of de vraag naar elektriciteit.

1.4 Gas transport

Gasunie is verantwoordelijk voor het transport van gas in Nederland en tussen de buurlanden, tot het punt waar lokale distributienetbeheerders het naar huishoudens en bedrijven brengen. Voor import en export exploiteert Gasunie verschillende pijpleidingen, zowel in de Noordzee als over land. Ze zijn ook eigenaar en exploitant van de Gate terminal in de haven van Rotterdam, waar geïmporteerd vloeibaar aardgas (LNG) wordt opgeslagen en later opnieuw kan worden gebruikt in het nationale gasnet.

Net als elektriciteit is het gastransportnet onderverdeeld in meerdere niveaus: een hogedruknet (HTL) dat het hoofdtransportnet vormt en een regionaal middendruknet (RTL) waarop lokale gasdistributiebedrijven zijn aangesloten. Gas komt het HTL-netwerk binnen vanuit binnenlandse productie, overzeese import, LNG-terminals zoals Gate terminal en opslagfaciliteiten. Het HTL-netwerk is gescheiden in twee subnetwerken voor respectievelijk hoog- en laagcalorisch gas, die met elkaar verbonden zijn via mengstations. Het RTL vervoert bijna uitsluitend gas dat wordt aangevoerd vanuit het laagcalorische HTL-netwerk.

Naast de verantwoordelijkheid voor de veilige en betrouwbare levering van gas, schrijft de *Gaswet* voor dat Gasunie moet zorgen voor een continue landelijke levering van gas tot een temperatuur van -17 °C. Echter zijn de eisen tijdens aanhoudende koudegolven nabij dat niveau minder concreet.

1.5 Energievraag en -opslag

De energievraag in Nederland is over het algemeen relatief statisch van jaar tot jaar, hoewel maatregelen voor energie-efficiëntie kunnen bijdragen aan een lichte daling. De meeste energievraag is niet afhankelijk van klimatologische omstandigheden, met uitzondering van de residentiële en commerciële dienstensector, waar verwarming en koeling grote energievreters zijn. Het huishoudelijk gebruik, dat 16,8% van het totale eindverbruik van energie in Nederland uitmaakt, bestaat voor 68,4% uit aardgas en voor 23,2% uit elektriciteit (IEA, 2024). Commerciële en openbare diensten (12,2% van het verbruik) zijn meer afhankelijk van elektriciteit, met 52,6% van hun energie afkomstig van elektriciteit en 37,9% van aardgas. Veranderingen in de vraag naar verwarming en koeling kunnen dus een reële impact hebben op de totale vraag naar elektriciteit en gas. Andere veranderingen in het industriële landschap in Nederland kunnen ook invloed hebben op het gebruik van energie en elektriciteit.

Zowel de elektriciteits- als gasnetten moeten kunnen voldoen aan pieken in vraag, dus zijn netten ontworpen op capaciteit redundantie: een onbalans in het aanbod kan namelijk leiden tot uitval van het hele systeem. Als elk huis zijn (gas)verwarming tegelijkertijd aan zet, moet Gasunie ervoor zorgen dat het netwerk de juiste hoeveelheid gas kan leveren. Hoewel Nederland op peil is met de gasopslag, heeft Gasunie in het verleden zelf gepleit voor verdere aanvullingen, vanwege toenemend gasverbruik (NOS, 2025). Opslag is dus een belangrijk onderdeel van het energienet, waarmee overtollige productie of import kan worden opgeslagen voor later gebruik. Een systeem met voldoende opslag kan er voor zorgen dat verschijnselen zoals Duisterluwtes, zie paragraaf **Error! Reference source not found.**, overbrugt kunnen worden. Regelbaar vermogen, d.w.z. vermogen op aanvraag dat wordt ingezet om ervoor te zorgen dat het systeem in balans blijft, is duur; het gebruik ervan leidt tot hogere energieprijzen.

Naast gasopslag is er ook steeds meer belangstelling naar waterstofopslag. De eerste zoutcaverne voor de opslag van waterstof zal in 2028 klaar zijn voor gebruik op een bestaande gasopslaglocatie (Gasunie, n.d.). Als deze volledig in gebruik is genomen kan er 20 kiloton waterstof in worden opgeslagen. Dat is ongeveer genoeg om het hele land 8 uur lang van energie te voorzien.

Elektriciteitsopslag op netwerkniveau gebeurt daarentegen in grote batterijfaciliteiten. In 2023 bedroeg de operationele capaciteit van Nederlandse elektriciteitsopslag 135 MWh, vergeleken met 3,1 GWh in het Verenigd Koninkrijk (Deloitte, 2023). TenneT heeft vastgesteld dat het 9 GW aan flexibele batterijcapaciteit nodig heeft in 2030 (TenneT TSO B.V., 2023). De 9 GW verwijst naar het vermogen dat batterijen op een bepaald moment aan het netwerk kunnen leveren, niet naar hun volledige opslagcapaciteit (wat MWh en GWh wel naar verwijzen). Dit heeft vooral betrekking op batterijen die worden gebruikt voor netflexibiliteit, i.e., opslag die wordt ingezet om het net stabiel te houden, vooral als hernieuwbare energiebronnen (wind en zon) variabele energie leveren in de loop van een dag.

1.6 Toekomstige ontwikkelingen energiesysteem

De energiemix in Nederland kan zich in de toekomst op verschillende manieren ontwikkelen. Dit hangt onder meer af van demografische groei, economische ontwikkelingen, ontwikkelingen van de energietransitie en de mate waarin klimaatdreigingen toenemen. In dit onderzoek richten wij ons op de twee uitersten, te zien in Tabel 1. Aan de ene kant kijken wij naar een scenario met lage economische en demografische groei, een beperkt toenemende temperatuurstijging en toename van de elektrificatie in de energie mix. Aan de andere kant een situatie met sterk toenemende temperatuurstijging, hoge economische én demografische groei en daardoor per saldo minder elektrificatie in de mix.

Tabel 1: Opbouw van twee contextscenario's

Contextscenario	Temperatuur Stijging	Economische Groei	Demografische Groei	Elektrificatie in Energiemix
Beperkt toenemend	+2C	Laag	Laag	Meer
Sterk toenemend	+3C	Hoog	Hoog	Minder

In het beperkt risicoverhogend contextscenario nemen de klimaatdreigingen minder sterk toe. Daardoor ontstaat meer ruimte voor verduurzaming van het energiesysteem en dus voor elektrificatie. De toename van elektrificatie komt vooral door de inzet van elektriciteit voor de productie van groene waterstof, de groei van elektrische mobiliteit en grootschalige industriële elektrificatie. De blootstelling van het energiesysteem neemt daarmee toe, terwijl de klimaatdreigingen relatief minder snel groeien.

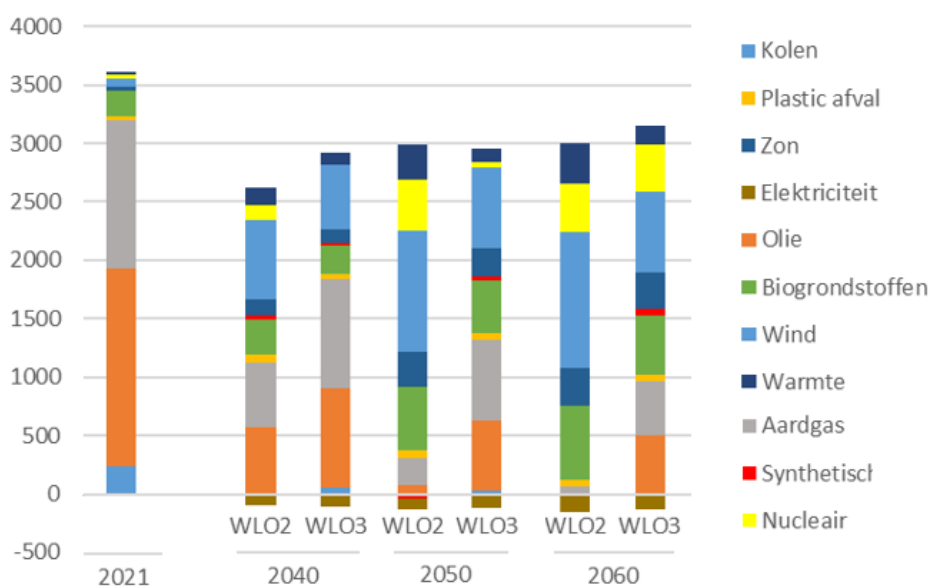
In het sterk risicoverhogend contextscenario ontwikkelen de klimaatdreigingen zich nadrukkelijker en is er meer demografische en economische groei. Dit gaat gepaard met een grotere afhankelijkheid van fossiele brandstoffen, minder verduurzaming en elektrificatie. Omdat het om verhoudingen gaat, kan de feitelijke blootstelling vergelijkbaar zijn met de beperkt risicoverhogend scenario's, maar gaat het om andere deelelementen (bijvoorbeeld meer onderstations maar minder waterstof).

Tabel 2 toont het aanbod van de energiemix in 2050, voor de twee contextscenario's. De waarden zijn ontleend aan een analyse van opdrachtgever PBL (WLO energie scenario's). De contextscenario's worden in onze analyse gebruikt om de uiteenlopende toekomstperspectieven van het energiesysteem ten gevolge van de klimaatdreigingen te onderscheiden.

Tabel 2: Energiemix (aanbod) 2050 voor de twee contextscenario's

		Beperkte Contextscenario	Sterke Contextscenario
Elektriciteit	Wind op zee (GW)	50	35
	Wind op land (GW)	9,9	7,8
	Zon-PV (GW)	135	135
	Kernenergie (GW)	7	7
Biogrondstoffen	Nederland (petajoule)	155	155
	Import (petajoule)	550	360
Plastic afval	Nederland (petajoule)	13	24
	Totaal (petajoule)	55	35
Waterstof	Elektrolyzers (GWe)	24	17
	Import groene waterstof (draggers) (petajoule)	50	50
Warmte	Geothermie (petajoule)	200	200
CCS	Opslagcapaciteit (megaton per jaar)	30	30

Figuur 5 toont het verwachte energiegebruik, afkomstig uit hetzelfde werk van het PBL. Er is onder andere te zien dat in 2050 er in het beperkte scenario (WLO2) in het kader van meer elektrificatie wordt ingezet op nucleaire energie, en er al veel minder olie wordt verbruikt. Er is te zien dat in het sterk toenemende scenario (WLO3) Nederland in 2060 minder hernieuwbare energie gebruikt en nog steeds afhankelijk is van olie en aardgas.



Figuur 5: Toekomstig energieverbruik in Nederland (Pj)(PBL, 2025)

2 Klimaatdreigingen & blootstellingen

Klimaatdreigingen kunnen worden gedefinieerd als gevaren die zowel worden veroorzaakt door geleidelijke veranderingen in het klimaat (bijv. stijgende zeespiegels) als door veranderingen in de frequentie of ernst van extreme klimaatverschijnselen (bijv. overstromingen). In dit verslag richten we ons op zes extremen en de bedreigingen die zij vormen voor infrastructuur betrokken bij de productie, omzetting en levering van energie.

Het is belangrijk om in deze kwestie naar het hele energiesysteem te kijken, in plaats van naar afzonderlijke componenten. Als bijvoorbeeld een onderstation van het distributienet uitvalt, schakelt dat niet het gehele elektriciteitsnet uit, omdat het is ontworpen met voldoende redundantie. De impact (op mens en cultuur, natuur en milieu, en de economie) van extreem weer kan daarom nihil zijn, of beperkt blijven tot een lokaal of regionaal niveau. Het is ook belangrijk om de kans op falen in vitale infrastructuren mee te nemen. Stel het vereist een overstroming die zich eens in de duizend jaar voordoet om een onderstation uit te schakelen, dan kan het risico dat overstromingen vormen voor het energiesysteem laag worden geacht.

Dit onderdeel definieert de belangrijkste klimaatdreigingen die wij in dit verslag hebben behandeld. Deze geselecteerde dreigingen worden als meest kritisch beschouwd vanwege de impact die zij kunnen hebben op het energiesysteem.

2.1 Rivieroverstromingen

Rivieroverstromingen vormen een bedreiging voor de energiesector in Nederland. Het doorbreken van een rivierdijk vanwege hoge waterstanden heeft impact op verschillende infrastructuur, maar vooral onderstations: de knooppunten in het elektriciteitsdistributienetwerk. Terwijl overstromingen bij een *elektriciteitscentrale* mogelijk slechts leiden tot een vermindering van de energieopwekking, haalt een overstroming bij een *onderstation* een onderdeel uit het netwerk, wat kan leiden tot stroomuitval voor huishoudens.

Rivierdijken in Nederland zijn over het algemeen ontworpen met een hoog veiligheidsniveau, maar falen blijft mogelijk. Dijken zijn in Nederland aan de hand van nationale normen ontworpen, zoals weergegeven in Figuur 6. Voor de doeleinden van dit verslag gebruiken we deze ontwerpnormen om de blootstelling aan rivieroverstromingen in het binnenland af te leiden: infrastructuur in een gebied dat wordt beschermd door dijken die zijn ontworpen voor een overstroming eens in de 300 jaar hebben een overstromingskans van 1/300 jaar. Het rivierdijkensysteem wordt momenteel in het hele land versterkt: de kwetsbaarheid voor rivieroverstromingen zal daarom naar verwachting afnemen richting 2050. De vereiste ontwerpnormen zullen in de toekomst opnieuw worden geëvalueerd, om het systeem te beschermen tegen overstromingen in 2100.



Figuur 6: Ontwerpnormen voor rivierdijken tegen overstromingen (Rijkswaterstaat, n.d.)

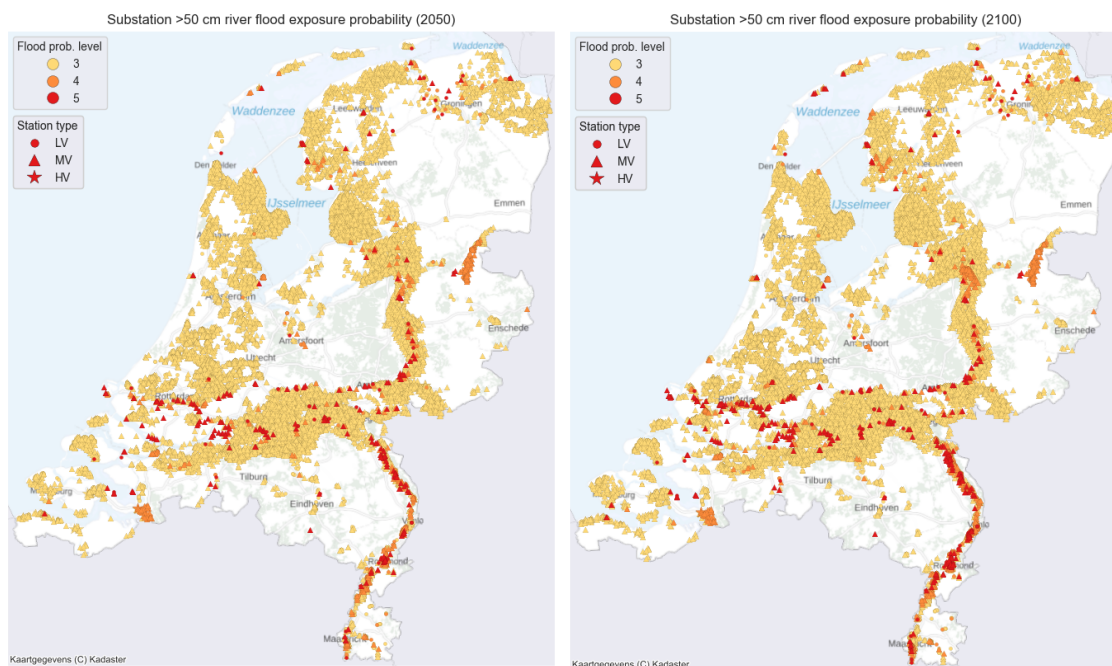
Onderstations zijn kwetsbaar omdat kritieke onderdelen kunnen uitvallen wanneer zij worden blootgesteld aan water. De meest cruciale apparatuur bevindt zich meestal niet op het laagste niveau van een station, maar een inundatie van 50 tot 100 cm zorgt wel al bijvoorbeeld voor grote problemen bij onderstations (Kolen, 2024). Distributiestations met een lagere spanning, zoals distributiekasten langs wegen en kanalen, lopen het grootste risico op uitval, al is hun impact op het gehele netwerk het kleinst. Voorgaand onderzoek heeft laten zien wat de kritieke uitvalhoogten zijn van de verschillende type stations, te vinden in het *werkpakket wateroverlast en overstroming 2023-2024 NKWK*, waarvan Tabel 3 de relevante uitvalhoogten weergeeft voor onze analyses (Honingh, et al., 2024).

Tabel 3: Kritieke uitvalhoogten van verschillende type onderstations (Honingh, et al., 2024)

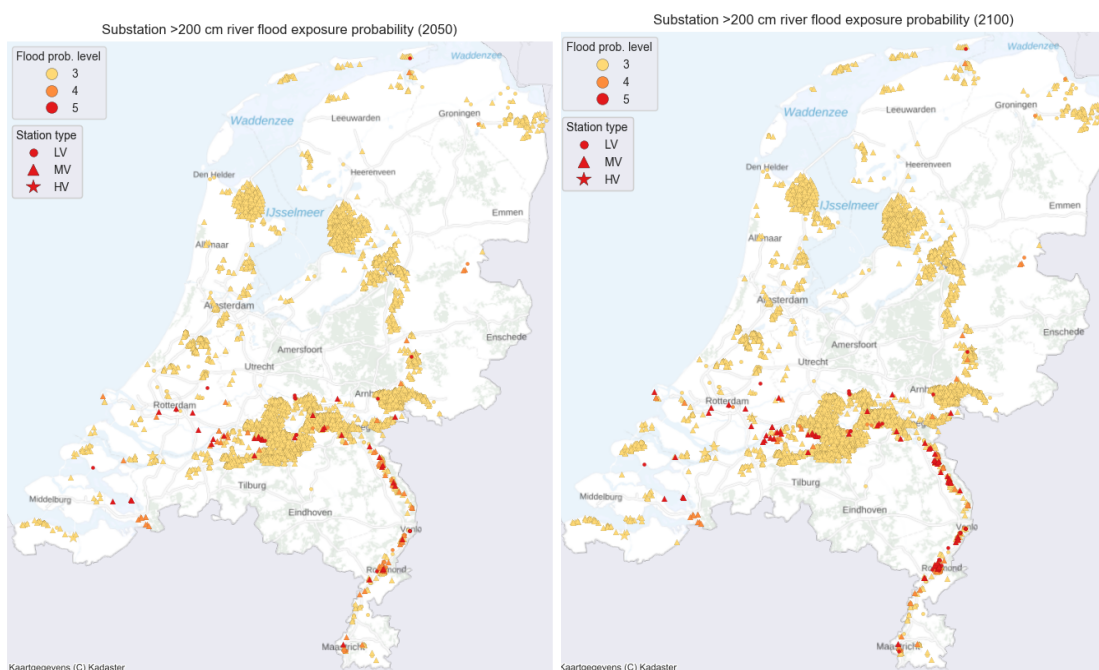
Type	Kritieke uitvalhoogten	Effect
Hoogspanningsstations (HS)	100 – 300cm	20.000 – 40.000 gebruikers
Middenspanningsstations (MS)	45 – 80cm	Wijk zonder stroom
Laagspanningsstations (LS)	20 – 30cm	Straat zonder stroom

Een rivieroverstroming kan leiden tot een inundatie van een groot poldergebied met meerdere onderstations. Dit kan zorgen voor langdurig operationele uitval, aangezien gelijktijdige storingen bij meerdere onderstations tijd vergt om elk onderstation te repareren. Op dit moment menen deskundigen, gezien de bestaande redundantie op component- en netwerkniveau, dat de gevolgen van overstromingen voor het elektriciteitsnet waarschijnlijk beperkt blijven tot het gebied waar de inundatie plaats vindt (Kolen, 2024). Dit is echter nog niet gevalideerd met modelstudies op systeemniveau, en het is onduidelijk of dit ook standhoudt bij uiterst zeldzame maar zware overstromingen. Naast inundaties van impactvolle hoogspanningsstations, heeft inundatie van middenspannings- en laagspanningsstation eveneens een groot impact: als een lokaal onderstation onder water komt te staan, kan een straat of zelfs een hele wijk worden losgekoppeld van het elektriciteitsnet.

Blootstelling van het energie systeem aan rivieroverstromingen kan worden gemeten door inzicht te krijgen in het aantal onderstations dat is gelegen in gebieden met een hoog overstromingsrisico. De *Klimaat Effect Atlas* (KEA) publiceert nationale blootstellingskaarten voor verschillende overstromingsniveaus en verschillende tijdsperioden (Klimaat-effectatlas, n.d.). Ze geven de blootstelling aan overstromingen weer op vijf niveaus, beschreven in Tabel 4. Uitleg betreffende de onderstaande figuren bevindt zich op de volgende pagina.



Figuur 8: Onderstations en blootstellingsniveaus bij >50cm inundatie 2050 en 2100



Figuur 7: Onderstations en blootstellingsniveaus bij >200cm inundatie 2050 en 2100

Tabel 4: Blootstellingniveaus en Overstromingskansen (Klimaat-effectatlas, n.d.)

Blootstellingniveau	Overstromingskans
1	Extreem Kleine: 1/30.000 yr
2	Zeer Kleine: 1/3.000 – 1/30.000 yr
3	Kleine: 1/300 – 1/3.000 yr
4	Middelgrote: 1/30 – 1/300 yr
5	Grote: > 1/30 yr

Distributienetbeheerders van elektriciteit, zoals Stedin en Eneco, publiceren locatiegegevens van al hun laag-, midden- en hoogspanningsstations. Deze gegevens hebben wij gecombineerd met de gegevens van de KEA om Figuur 8 en Figuur 7 te produceren. Deze figuren laten alle onderstations zien die worden blootgesteld aan rivieroverstromingen van niveau 3, 4 of 5 in een 2050-scenario en een 2100-scenario. In deze scenario's gaan wij ervan uit dat de dijken worden versterkt om aan de wettelijke normen te voldoen.

De stations met het hoogste risico liggen direct langs grote rivieren zoals de Maas. De meeste risicostations hebben echter nog steeds een overstromingsblootstelling van minder dan 1:300 jaar. Tabel 5 toont de proporties van onderstations met elk overstromingsniveau. Aan de hand van de beschikbare waterhoogten in de KEA-gegevens kunnen we onderscheid maken tussen twee overstromingsgraden: een kleine overstroming van 50 cm en een grote overstroming van 200 cm. Tabel 5 laat zien een overstroming van >50cm bij een Hoogspanningsstation geen kritieke waarde raakt, daarbij is de percentage bij HS 0% op alle niveaus.

Tabel 5: Percentage onderstations blootgesteld per type en inundatiediepte

Blootstelling-niveau	2050, >50 cm overstroming			2050, >200 cm overstroming		
	HS	MS	LS	HS	MS	LS
0	0%	60.82%	65.78%	80.55%	84.88%	88.91%
1	0%	6.83%	8.55%	4.49%	3.74%	2.87%
2	0%	18.72%	17.0%	10.22%	7.61%	6.19%
3	0%	13.06%	8.45%	4.74%	3.67%	2.0%
4	0%	0.37%	0.18%	0.0%	0.07%	0.02%
5	0%	0.2%	0.04%	0.0%	0.03%	0.01%

Er is een opmerkelijke afname van het aantal stations dat wordt blootgesteld aan overstromingen van meer dan 200 cm in vergelijking met 50 cm, en veel van deze stations bevinden zich in duidelijke regionale clusters. Het is wel cruciaal om het verschil tussen de twee inundaties te onderzoeken, aangezien de verachte schade sterk toeneemt bij 200cm. De cluster duiding kan helpen bij een regionale aanpak betreffende adaptatie, waarbij de componenten in die regio's hoger zijn dan elders.

2.2 Extreme regenval

Extreme regenval vormt een vergelijkbare dreiging voor het elektriciteitssysteem als rivieroverstromingen. Dezelfde kritieke uitvalwaarden van onderstations tellen dus wederom, zie Tabel 6. Echter zijn er wel verschillen in de kern van de klimaatdreiging: regen komt van boven, en kan dus in tegenstelling tot rivieroverstromingen voor lekkage van bovenaf zorgen. Maar belangrijker, in tegenstelling tot rivieroverstromingen, die meestal het gevolg zijn van één zeer groot evenement, kan door regenval veroorzaakte inundatie variëren van klein en lokaal tot veel groter en verspreid. In andere woorden: een rivieroverstroming kan een grote regio aantasten, met diepere inundatiedieptes, terwijl een inundatie door regen vaker voor kan komen, maar meer plaatselijk is.

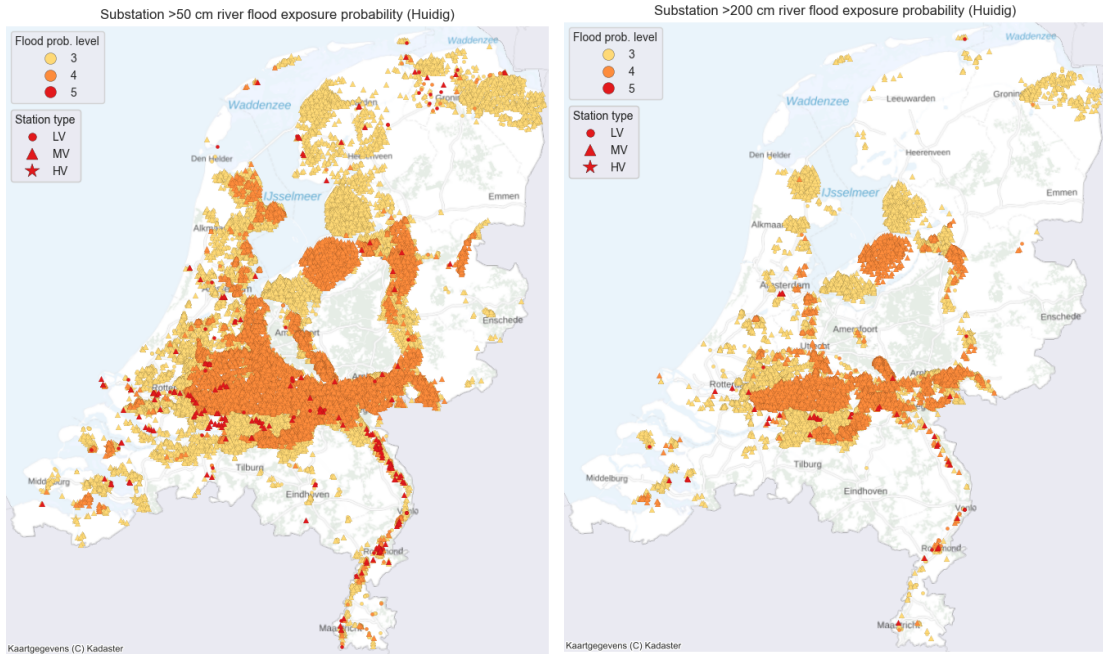
De blootstelling van het energiesysteem aan regenval wordt in deze analyse gemeten door locaties van onderstations te vergelijken met de locaties waar regenwater accumuleert tijdens een regenbui. De *Klimaat Effect Atlas* (KEA) publiceert nationale “waterdiepte”-kaarten voor twee regenintensiteiten: 1:100 jaar en 1:1000 jaar (Klimaat-effectatlas, n.d.). De beschrijving (“eens in de 100 jaar”) heeft betrekking op elke locatie: d.w.z. op elke locatie op de kaart leidt een regenbui van 1:100 tot het inundatieniveau dat daar wordt aangetroffen. Dergelijke gebeurtenissen kunnen echter bijna elk jaar ergens in het land voorkomen.

Tabel 6: Blootstellingsniveaus extreme regenval

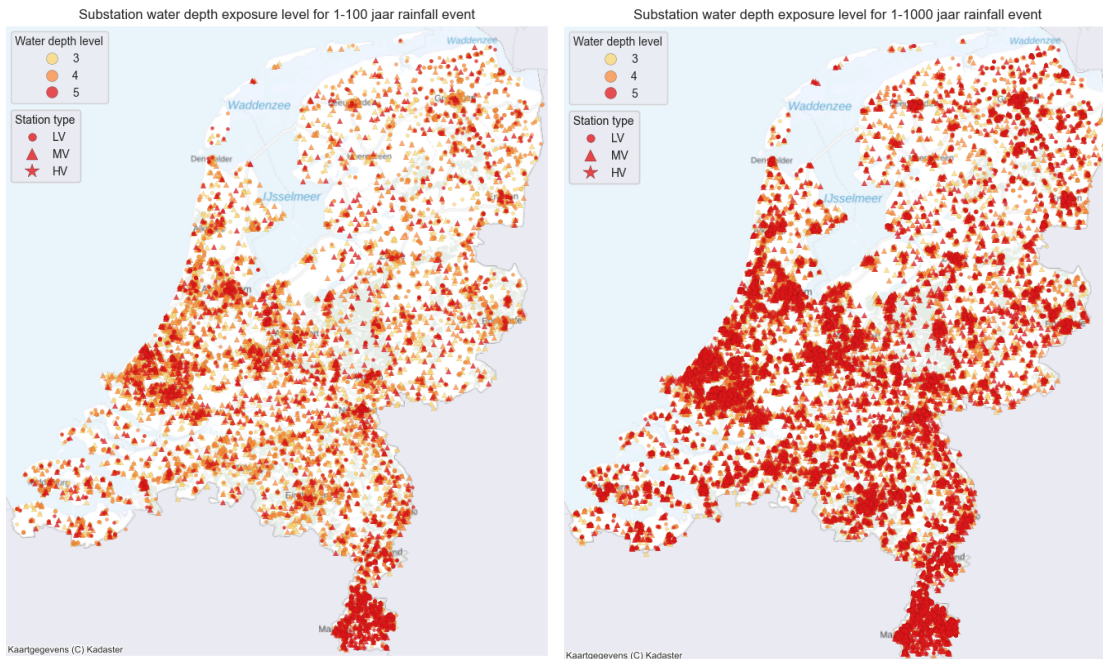
Blootstellingsniveau	Waterdiepte
1	5-10 cm
2	10-15 cm
3	15-20 cm
4	20-30 cm
5	> 30 cm

Dezelfde onderstation data als bij rivieroverstromingen wordt gecombineerd met regenval specifieke KEA-gegevens om Figuur 9 en Figuur 10 te produceren. Deze figuren weergeven de onderstations die zijn blootgesteld aan waterdiepte niveau 3, 4 of 5 van 1:100 en 1:1000 jaarlijkse regenval. KEA specificeert niet voor welk klimaatscenario (huidig, 2050 of 2100) deze gegevens relevant zijn, maar omdat de geografie van de bebouwde omgeving een belangrijke rol speelt bij de accumulatie van regenwater, gaan we ervan uit dat deze kaarten voor alle scenario's gelden en dat we de waarschijnlijkheden (1:100 en 1:1000) kunnen schalen om klimaatscenario's te accommoderen.

Tabel 7 geeft het aandeel distributiestationen dat te maken heeft met een bepaald waterdiepteniveau. Waterdiepte 5 is het belangrijkste om te bestuderen, omdat dit de hoogte is waarop kritieke onderdelen van elektrische stations mogelijk aangetast worden: in rood is te zien welke stations daadwerkelijk dus gevolgen kunnen ondervinden. Dit is een relatief klein deel.



Figuur 9: Onderstations en blootstellingsniveaus aan extreme regenval in huidige situatie

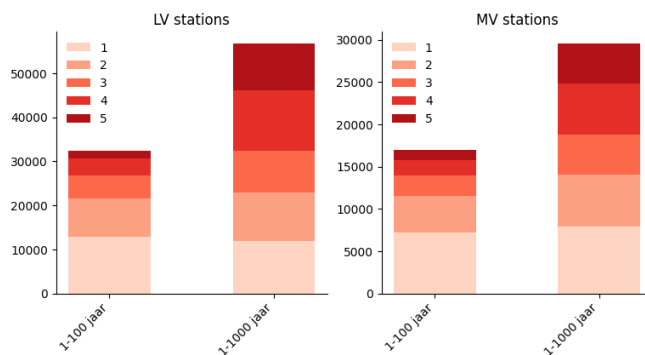


Figuur 10: Onderstations en blootstellingsniveaus aan extreem regenval (1:100 jaar en 1:1000 jaar)

Tabel 7: Percentage onderstations blootgesteld aan extreme regenval

Waterdiepte-niveau	1:100 jaar gebeurtenis			1:1000 jaar gebeurtenis		
	HS	MS	LS	HS	MS	LS
0 (geen risico)	0.0%	83.35%	79.29%	78.55%	71.03%	63.86%
1	0.0%	7.07%	8.19%	6.73%	7.73%	7.59%
2	0.0%	4.25%	5.62%	4.74%	6.07%	6.99%
3	0.0%	2.40%	3.33%	3.49%	4.66%	6.14%
4	0.0%	1.79%	2.36%	4.49%	5.91%	8.69%
5	0.0%	1.14%	1.21%	2.0%	4.6%	6.75%

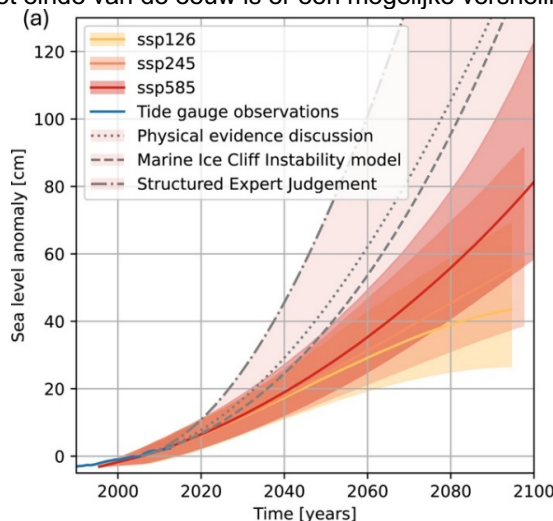
Zoals te zien in Tabel 7 staat een deel van de onderstations (MS niveau 5, LS niveau 4 en 5) bloot aan kritieke inundatieniveaus bij regenval. Figuur 11 geeft deze informatie visueel weer, HS stations worden buiten beschouwing gelaten omdat regenval niet de kritieke drempelwaarden zullen bereiken voor HS stations.



Figuur 11: Aantal blootgesteld onderstations aan extreme regenval van 1:100 en 1:1000 jaar

2.3 Zeespiegelstijging

Het zeeniveau stijgt door klimaatverandering en kan nog decennia doorzetten, ook met toegewijde klimaatadaptatie. Naarmate de zeespiegel stijgt, neemt ook de dreiging van kustoverstromingen toe, zowel wat betreft de frequentie als de ernst van de gebeurtenissen. In 2050 is de voorspelde stijging relatief laag, maar aan het einde van de eeuw is er een mogelijke versnelling (Bars & Drijfhout, 2025).



Figuur 12: Toekomstige scenario's zeespiegelstijging tot 2100 (Bars & Drijfhout, 2025)

Zeespiegelstijging leidt tot een toenemend risico op kustoverstromingen in Nederland. Het overgrote deel van Nederland is goed beschermd tegen huidige en toekomstige kustoverstromingen, waarbij de Nederlandse Waterwet overstromingsbeschermingsnormen van >10.000 jaar vastlegt in de meeste kustgebieden. Vier procent van het Nederlandse oppervlak ligt buiten het primaire beschermingssysteem, waaronder een groot deel van de haven van Rotterdam en Vlissingen, de Waddeneilanden en de kustgebieden in de noordelijke provincies (Friesland en Groningen). Deze gebieden vallen niet onder de Waterwet, en actoren (bijv. industrie, inwoners) in die gebieden zijn in principe zelf verantwoordelijk voor hun bescherming. Kustoverstromingen worden daarom alleen verwacht bij infrastructuur buiten het primaire systeem, waaronder enkele energiecentrales, gasopslag en geplande waterstoffabrieken. Zeespiegelstijging brengt ook een toename van verzilting met zich mee, wat een probleem kan vormen voor koeling bij elektriciteitscentrales en voor waterstofproductie. In Figuur 13 zijn de centrales weergegeven die zich in het buitendijkse gebied bevinden: Sloe, Eemshaven en de haven van Rotterdam.



Figuur 13: Locatie energiecentrales in het buitendijkse gebied

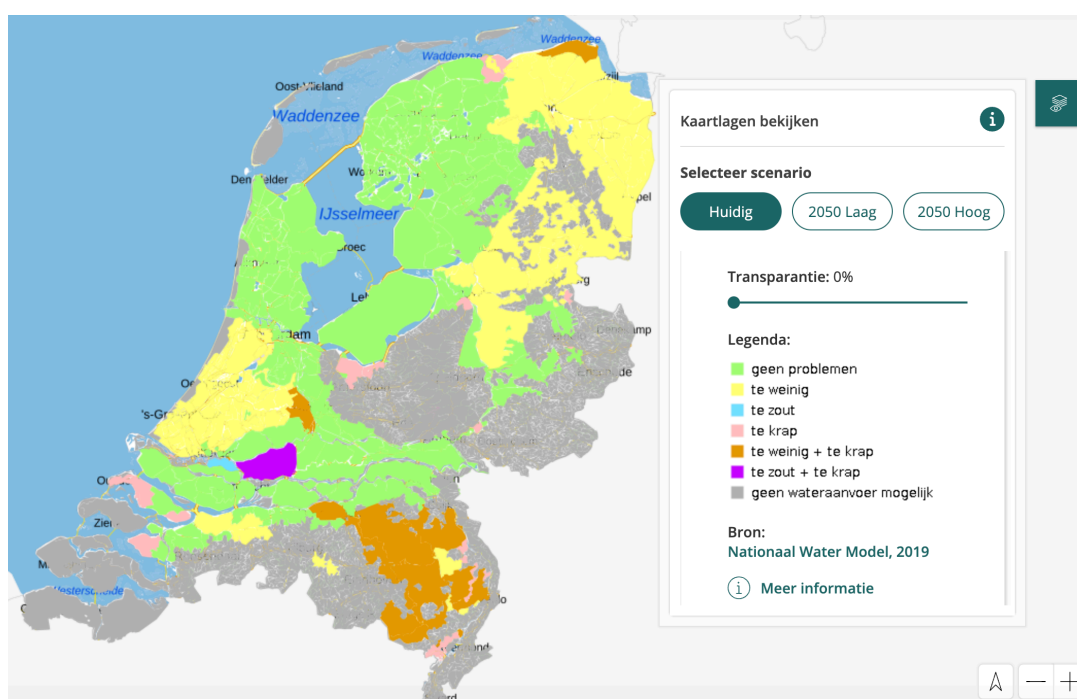
Energiecentrales hebben een functionele drempel, de hoogte waarop vaak de elektrische schakelapparatuur is geplaatst. Inundatie boven deze drempel kan schade veroorzaken en tijdelijk de energieopwekking verstoren. De belangrijkste energiebron voor 2050 die aan deze bedreiging is blootgesteld is waterstof en (mogelijk) de nieuwe kerncentrales. Eerder onderzoek, uitgevoerd namens Het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) heeft gesuggereerd dat de buitendijkse gebieden een goede locatie zijn voor kritieke delen van de toekomstige waterstofelektrolyse-infrastructuur van het land, omdat deze locaties minder risico lopen op droogte in vergelijking met locaties langs rivieren, zoals die langs de Maas (HaskoningDHV, Royal, 2024). Hoewel de exacte locaties dus nog niet bekend zijn, kunnen we aannemen dat ze verspreid zullen zijn over industriële gebieden zoals de haven van Rotterdam en de Eemshaven. Hoewel verschillende thermische centrales ook buitendijks liggen (en dus blootgesteld zijn), is het de bedoeling dat sommige van deze centrales (zoals de kolencentrales) voor 2050 worden ontmanteld en gascentrales zoals de Sloe centrale mogelijk ook worden uitgefaseerd.

2.4 Droogte

Droogte betreft lange perioden met weinig regenval, wat kan leiden tot tekorten in bodemvocht en rivierwaterstanden. In 2022 kende Europa een droogte die werd beschouwd als de ergste in 500 jaar. Een gebrek aan regenval kan leiden tot lagere waterstanden in de grote Nederlandse rivieren. Deze relatie hangt af van verschillende factoren: bestaande waterstanden (bijvoorbeeld op basis van neerslagpatronen in de maanden voorafgaand aan een droogte), het jaargetijde en smeltwatercondities beïnvloeden allemaal de rivierstanden, en kunnen per rivier verschillen. Zo wordt de Rijn meer gevoed door smeltwater en heeft zij een groter stroomgebied. Het stroomgebied van de Maas is veel kleiner en sterker afhankelijk van neerslagpatronen. Door dit verschil kunnen perioden van lage (of hoge) neerslag sneller invloed hebben op de waterstanden in de Maas dan in de Rijn.

Toegang tot zoetwater (of zeewater, afhankelijk van de regio en het type koelinstallatie) is belangrijk voor de productie van energie in thermische (bijv. kolen- en gasgestookte) en kerncentrales. In beide gevallen wordt het gebruikt om stoom die uit turbines komt te koelen, zodat het water opnieuw kan worden gebruikt. In 2021 werd 9 miljard m³ oppervlaktewater (zoet, brak en zout) gebruikt voor de energieproductie, van een totaal gebruik van 13,5 miljard m³ oppervlaktewater voor alle economische activiteiten (CBS, 2024). Een droogte kan dus de beschikbaarheid van water voor de opwekking van elektriciteit of warmte beperken. In Nederland gebeurt dit meestal vanwege regelgeving gestuurde interventies die bedoeld zijn om het waterverbruik te beperken.

De beschikbaarheid van oppervlaktewater is gebaseerd op gegevens uit het Basisprognose 2018, zoals gepresenteerd in de Klimateffectatlas. Figuur 14 toont de beschikbaarheid tijdens wat wordt aangeduid als een "extreem droog jaar". Er zijn twee hotspots zichtbaar: langs de Maas en in het noorden van Nederland, nabij de Eemshaven. Hier is de beschikbaarheid van oppervlaktewater zowel te gering en de capaciteit van het regionale waterbeheersysteem beperkt.



Figuur 14: Uitdagingen voor de beschikbaarheid van oppervlaktewater (Klimateffectatlas, n.d.)

Droogte valt vaak samen met een hogere vraag naar water voor koeling en irrigatie, wat leidt tot een dubbel effect op het energiesysteem: hogere vraag en lager aanbod. Nederland hanteert een prioriteitensysteem met vier categorieën voor watergebruik tijdens perioden van waterschaarste, waarbij Categorie 1 is gereserveerd voor de meest kritieke en beschermde toepassingen en Categorie 4 voor de minst belangrijke. Energievoorziening komt zowel in Categorie 2 als in Categorie 4 voor: het gebruik van water voor energie “anders dan het belang van leveringszekerheid” valt onder Categorie 4, maar het waarborgen van de kritieke levering valt onder Categorie 2. Het is aan Rijkswaterstaat en de regionale waterschappen om te beoordelen wanneer er sprake is van een watertekort en hoe waterbeheerders daarop moeten inspelen (IPLO, 2020).

Het effect van hitte en droogte op het elektriciteitssysteem kan merkbaar zijn, zelfs wanneer de waterschappen niet expliciet te maken hebben met een watertekort. Veel elektriciteitscentrales in Nederland liggen langs de rivieren en worden daardoor beïnvloed door tekorten aan koelwater. Over het algemeen wordt water geloosd dat tot 7 °C warmer is dan het lokaal ingenomen water wat schadelijk kan zijn voor de rivierecosystemen (CIW, 2004). Daarom gelden er beperkingen voor het lozen van gebruikt koelwater. Deze beperkingen zijn opgenomen in de vergunningen die aan de centrales worden verstrekt op basis van de *Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren*, en omvatten de volgende criteria: Het oppervlaktewater mag niet warmer zijn dan 28 °C, de oppervlaktetemperatuur van het ontvangende waterlichaam mag niet met meer dan 3 °C stijgen, en de mengzone mag niet meer dan 25% van de rivierdoorsnede in beslag nemen. Vanuit Europese wetgeving is er een voorstel dan 25 °C als norm gebruikt moeten worden. Hier is op het moment veel discussie over en nog geen besluit over genomen. Het lozen van koelwater in strijd met deze criteria kan gevolgen hebben voor de exploitanten van de centrales. Daarom kunnen exploitanten tijdens langdurige hitte- en/of droogteperiodes, wanneer het rivierdebiet lager is en de rivierwatertemperatuur hoger, gedwongen worden om de bedrijfsvoering te beperken.

Daarnaast is water ook een cruciaal ingrediënt voor waterstofelektrolyse, het proces dat waterstofgas produceert. In een toekomstig energiesysteem dat sterker afhankelijk is van waterstofgas, kan droogte leiden tot beperkingen in de binnenlandse of regionale productie. Een sterk ‘waterstofrijk’ energiesysteem zal daardoor meer onder druk kunnen komen te staan door droogte dan het huidige aardgassysteem. In Figuur 15 is te zien welke mogelijke waterstofcentrales welke water beschikbaarheid hebben in 2050. Uit deze informatie is het, evenals bij elektriciteitscentrales, af te leiden dat het niet ideaal is om toekomstige waterstoffabrieken langs rivieren te situeren (HaskoningDHV, Royal, 2024).

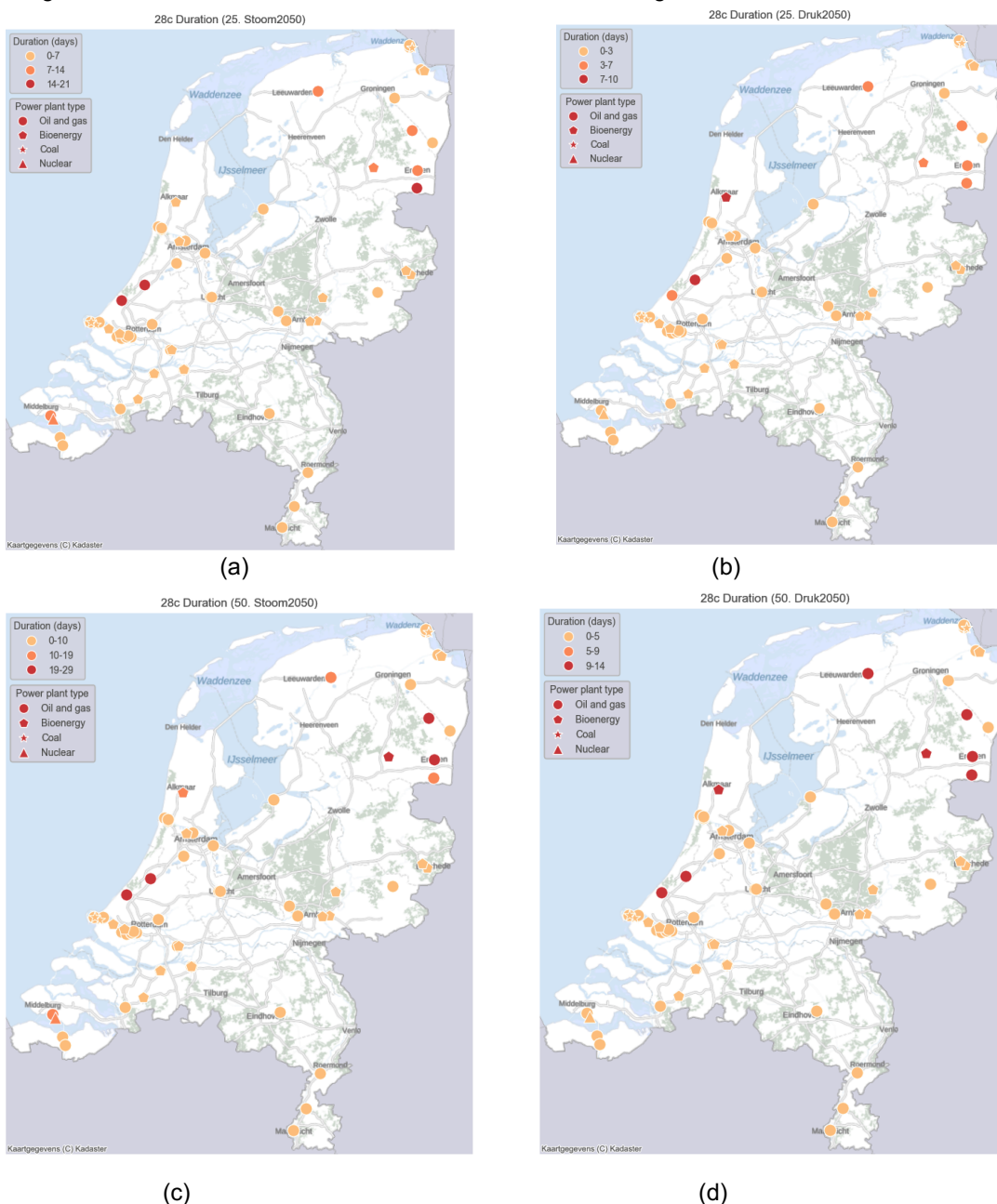
Bronnen / Locaties	Zeewater	Brak oppervlaktewater	Zoet oppervlaktewater	Grondwater	Effluent rwzi	Drinkwater	Industriewater (proces & demi)
Borsele	1a	2c	1b	1c	2b	1b	?
Terneuzen	1a	2c	1b	1c	1b	1b	?
Rotterdam	2c/1a	2c	1c/2a?	1c	2a	1b	2a
Noordzeekanaal	2c	2c	1b	1c	2b	1b	?
Kop van NH	1a	1a	2a	1c	2a	1b	1a
Den Helder	2c	1a	2a	1c	2a	1b	1a
Eemshaven	2c	2c	1b	1c	1b	1b	1b
Moerdijk	1a	1a	2b	1c	2b	1b	2a
Geertruidenberg	1a	1a	2b	1c	2b	1b	1a
Tilburg	1a	1a	2a	1c	2b	1b	1a
Chemelot	1a	1a	2a/2b	1c	2a	1b	?

Legenda

- 1a Afstand tot bron >10 km
- 1b Bron levert onvoldoende voor elektrolyse vraag
- 1c Bron wel aanwezig, maar niet logisch
- 2a Bron voldoende voor elektrolyse vraag
- 2b Bron voldoende voor gesloten koelsysteem
- 2c Bron voldoende voor doorstroomkoelsysteem

Figuur 15: Waterbeschikbaarheid in 2050 voor waterstofcentrales (HaskoningDHV, Royal, 2024)

Figuur 16 toont vier kaarten met de belangrijkste thermische centrales in Nederland. De kleur geeft een indicatie van de duur van de langste overschrijding van de riviertemperatuur voor een terugkeerperiode van 25 jaar (a en b) en 50 jaar (c en d). Kaarten (a) en (c) geven het “Stoom” klimaatsscenario weer (beperkt risicoverhogend) en kaarten (b) en (d) het “Druk” scenario (sterk risicoverhogend). De data achter deze kaarten komt uit het Instrument waterbeschikbaarheid hoofdwatersysteem, gepubliceerd in overeenstemming met het Deltaprogramma Zoetwater (Rijksoverheid, n.d.). In deze kaarten is er onder andere te zien dat er aan de Maas veel centrales zijn, maar dat zij in de alle toekomst scenario's niet erg kwetsbaar zijn voor droogte, ze vallen in de laagste categorie (0-7 dagen). Daarentegen zijn de vier centrales rond Emmen juist kwetsbaarder voor droogte, en zo ook de centrales bij Den Haag en Leiden. Deze centrales zullen, zeker in het 2050 scenario van zowel Druk als Stoom, te maken hebben met overschrijdingsperiodes van meerdere weken. A.d.h.v. onze analyse, is er te zien dat over het algemeen centrales aan de kust minder kwetsbaar voor droogte, behalve de centrales in Borssele.

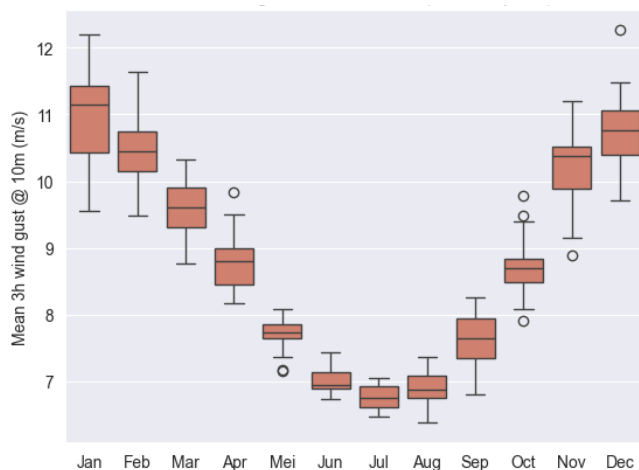


Figuur 16: Weergaven van scenario's van blootstellingsduur van droogte aan centrales in 2050

2.5 Windstormen

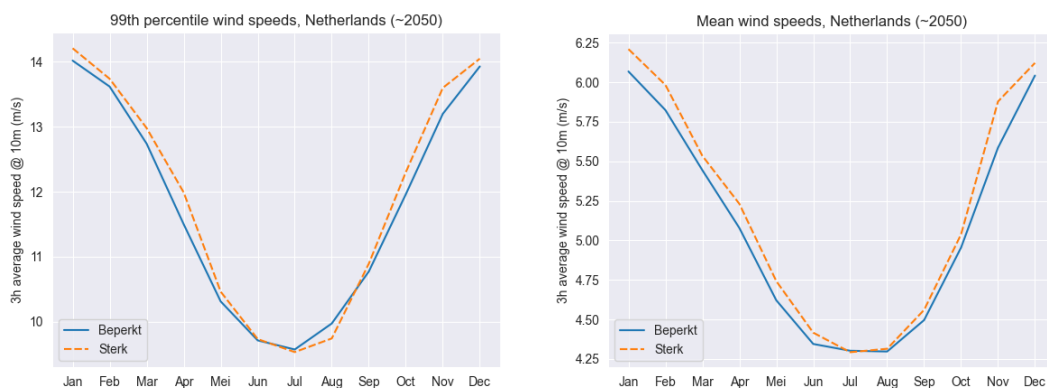
Windstormen beperken zich niet alleen tot catastrofale gebeurtenissen zoals orkanen, die zeldzaam zijn in Nederland, maar ook zware stormen die geen orkaansterkte bereiken. De index van het Europees Milieuagentschap definieert een “dag met extreme windsnelheid” als een dag waarop de maximale windsnelheid boven het 98e percentiel uitkomt ten opzichte van een referentieperiode, al kunnen ook andere percentiële drempels worden gebruikt.

Hoge windsnelheden zijn een normaal onderdeel van de weerscyclus en kunnen in extreme gevallen gevolgen hebben voor het energiesysteem. In Nederland zijn de windsnelheden langs de kust doorgaans hoger. In de wintermaanden zijn de windsnelheden meestal hoger dan de zomer en ook is dit seizoenseffect sterker langs de kust: in kustgebieden zijn de verschillen tussen de windsnelheden in de winter en de zomer groter dan landinwaarts. Figuur 17 laat zien hoe de gemiddelde maandelijkse windsnelheden in de loop van een jaar variëren.

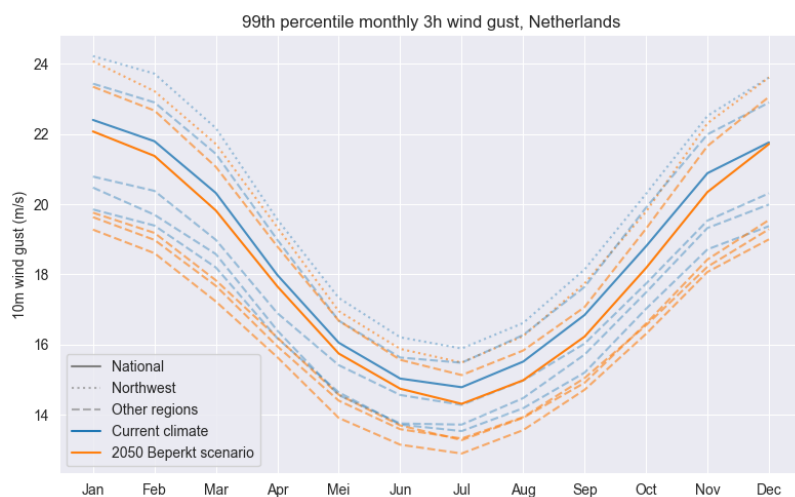


Figuur 17: Seizoensgebondenheid van windstoten in een beperkt contextscenario 2050

Over het geheel genomen laat KNMI modellen (RACMO model for Nederland) zien dat de gebruikelijke windsnelheden naar verwachting niet aanzienlijk zullen veranderen onder invloed van klimaatverandering. De meeste scenario's blijven vlak, al is er in sommige gevallen sprake van een lichte toename in de winter, vooral boven de Noordzee. Ruwe gegevens van het KNMI, te zien in Figuur 18 en Figuur 19, illustreren dit.

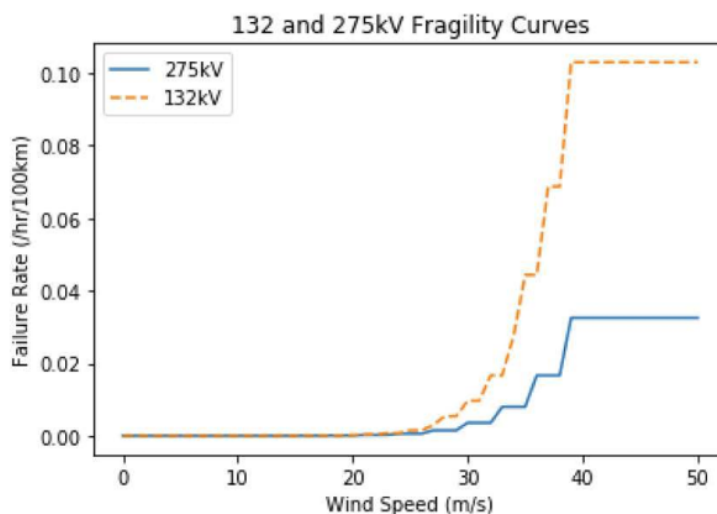


Figuur 18: Vergelijking beperkt en sterk contextscenario voor windstormen



Figuur 19: 99e percentiel windstoten in Nederland in verschillende contexten

Harde wind vormt een bedreiging voor het elektriciteitsnet, met name voor transmissielijnen. Kabels en verbindingen in het transmissiesysteem kunnen bij harde wind mechanisch bezwijken, en tevens kunnen bij extreem harde wind bomen op transmissielijnen terechtkomen. Wanneer dit op meerdere plaatsen langs een lijn gebeurt kan een deel van het net worden losgekoppeld. Onderzoekers modelleerden de relatie tussen extreme windsnelheid en storingen in het transmissienetwerk van het Verenigd Koninkrijk, en stelden vast dat uitval begon op te treden bij windsnelheden rond 25 m/s, waarbij de kans op storingen grofweg exponentieel toenam naarmate de windsnelheid richting de 40 m/s groeide, zie Figuur 20 (Jamieson, Strbac, & Bell, 2020).



Figuur 20: Storingspercentage van transmissielijnen in het VK (Jamieson, Strbac, & Bell, 2020)

In dit onderzoek faalden reguliere hoogspanningslijnen (132 kV) ongeveer twee- tot driemaal vaker dan extra-hoogspanningslijnen (275 kV). Dit kan door verschillende factoren worden veroorzaakt, maar is waarschijnlijk het gevolg van het specifieke kabel- en netontwerp in het Verenigd Koninkrijk. Hoewel deze modellering dus nuttig kan zijn om een drempel vast te stellen voor het falen van transmissielijnen door harde wind, is het niet direct overdraagbaar op de Nederlandse context. Bovendien liggen in Nederland veel elektriciteitslijnen ondergronds, waardoor vooral de hoogspanningslijnen bovengronds zijn. Wel loopt een deel van dit netwerk door het kustgebied met de hoogste windsnelheden. We kunnen deze Britse studie gebruiken voor een grove benadering: een aanhoudende periode (enkele uren of langer) met windstoten op 10 meter hoogte van 35 m/s of meer is voldoende om een storing in het Nederlandse elektriciteitssysteem te veroorzaken.

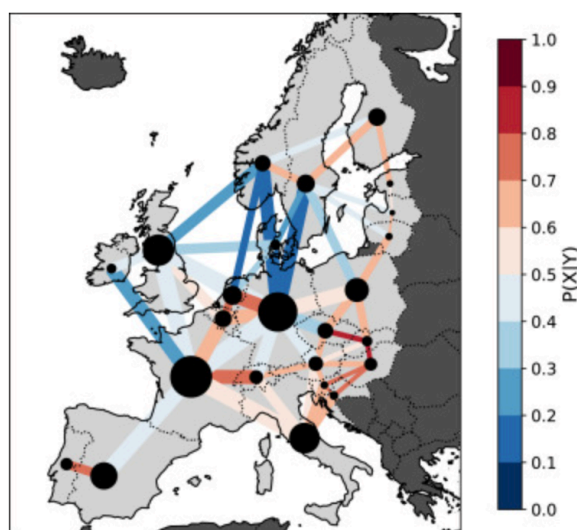
Harde wind beperkt ook de opwekking van elektriciteit met windturbines. Bij zeer hoge windsnelheden kunnen draaiende windturbines namelijk veiligheidsrisico's opleveren. Daarom hebben de meeste windturbines een afschakelsnelheid: een windsnelheid waarboven zij automatisch worden uitgeschakeld. Dit ligt vaak tussen 22 en 30 m/s, al hebben sommige kleinere turbines een lagere afschakelsnelheid. Turbines hebben doorgaans ook een nominaal vermogen bij een bepaalde windsnelheid: dit is de windsnelheid waarbij zij maximaal vermogen leveren, meestal rond 10 m/s. Omdat er geschat wordt dat dit een minder impactvol gevolg is van de klimaatdreiging winstormen gaan wij hier niet verder op in.

2.6 Duisterluwte

Duisterluwte (ook wel *Dunkelflaute*) is een term die verwijst naar een periode waarin er nauwelijks energie wordt geproduceerd uit wind- en zonne-energie: een periode waarin het bewolkt is en het nauwelijks waait. De meteorologische term hiervoor is "*anticyclonic gloom*". Aangezien hernieuwbare energie in 2023 goed was voor 40% van de Nederlandse elektriciteitsopwekking, kon een dergelijk Duisterluwte-gebeurtenis geleid hebben tot een impactvol productietekort. In de toekomst zal de Nederlandse energiemix naar verwachting nog meer hernieuwbare energie bevatten, waardoor deze dreiging ernstiger wordt. Wij zien Duisterluwte dus als een opkomende klimaatdreiging.

Er bestaat geen strikte definitie van een 'Duisterluwte', hoewel één studie een definitie voorstelde waarbij zowel wind- als zonne-energie minder dan 20% van hun capaciteit produceren gedurende een periode langer dan 60 minuten (Li, Basu, Watson, & Russchenberg, Mesoscale modeling of a "Dunkelflaute" event, 2020). Drempelwaarden kunnen ook direct worden gedefinieerd in termen van meteorologische omstandigheden, zoals bewolgingsgraad en windsnelheden. Voor zonne-energieopwekking vonden de onderzoekers dat lage bewolking onder 2km gemiddeld 70–90% bedroeg tijdens Duisterluwte-perioden (Li, Basu, Watson, & Russchenberg, A Brief Climatology of Dunkelflaute Events over and Surrounding the North and Baltic Sea Areas, 2021). Voor windopwekking kan men ook de *cut-in*-snelheid (de windsnelheid waarbij turbines beginnen te draaien) gebruiken als bovengrens, die rond de 3 m/s ligt.

Doorgaans kan duurdere (regelbare) elektriciteitsopwekking worden ingezet om aan de vraag te voldoen, zoals aardgas- of thermische centrales. Tijdens een grootschalig Duisterluwte evenement (d.w.z. langdurig), is dit echter mogelijk onvoldoende. Dit probleem zal in de toekomst groter worden als de overgang naar hernieuwbare energie gepaard gaat met het buiten gebruik stellen van thermische centrales. Andere manieren om tijdens een Duisterluwte aan de vraag te voldoen zijn bijvoorbeeld opslag (zoals het gebruik van waterstof en grootschalige batterijen voor elektriciteitsopslag) en het importeren van elektriciteit van verbonden buurlanden. Dat laatste werkt echter niet als die buurlanden met dezelfde weersomstandigheden te maken hebben. Er is enig onderzoek gedaan naar het gelijktijdig optreden van Duisterluwttes in Europese landen. Het is mogelijk dat de omstandigheden die in Nederland een Duisterluwte veroorzaken, gelijktijdig ook in België en Duitsland een Duisterluwte veroorzaken. De kans op overlap is kleiner bij buuren verder weg, zoals het Verenigd Koninkrijk en Denemarken, en nog kleiner in Noorwegen, zie Figuur 21 (van Duinen, 2025).



Figuur 21: Kans op gelijktijdige duisterluwttes tussen twee landen in Europa (van Duinen, 2025)

Het risico van Duisterluwttes wordt enigszins beperkt door de tegengestelde seizoenspatronen van wind en zon: Nederland heeft in de winter hogere gemiddelde windsnelheden, terwijl zonne-energie in die periode minder oplevert. In de zomer is er juist meer zon, maar minder wind. Duisterluwttes zijn dus het meest relevant in Nederland als er een donkere periode in de zomer of een windluwe periode in de

winter voorkomt. Wij gaan ervan uit dat het laatste waarschijnlijker is, en richten ons daarom voornamelijk op windluwe perioden in de winter.

In dit rapport kijken wij niet naar het voorkomen van Duisterluwte zelf, omdat wij dit als operationeel onderdeel van het energiesysteem zien. In plaats daarvan kijken wij naar veranderingen in het mogelijk optreden van Duisterluwte, vooral langdurige periodes (7, 14, 30 dagen) met weinig wind op zee. Deze veranderingen moeten worden meegenomen in het ontwerp van het toekomstige energiesysteem en zien wij daarom als de “klimaatdreiging” hier.

3 Waarschijnlijkheid op impacts

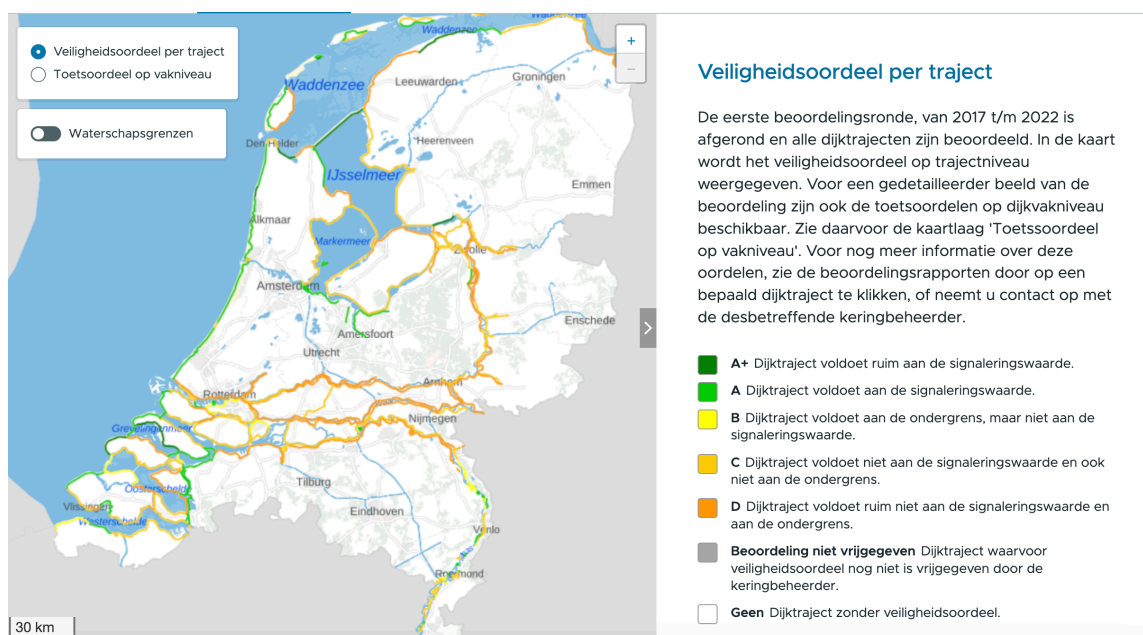
In dit hoofdstuk bespreken we kritieke indicatoren om de waarschijnlijkheid te bepalen dat de zes bedreigingen voor het energiesysteem die in Hoofdstuk 2 zijn besproken zich voordoen.

3.1 Rivieroverstromingen

Voor rivieroverstromingen overwegen we twee indicatoren: Het beschermingsniveau van rivierdijken die overstroming van onderstations en distributie-infrastructuur binnen de poldergebieden voorkomen, en het optreden van oppervlaktewateroverstromingen van >50 cm als gevolg van een overstroming van deze rivierdijken.

Zoals gezegd zijn de beschermingsniveaus van rivierdijken vastgelegd in de Waterwet. Op dit moment voldoen de meeste dijken echter nog niet aan deze criteria, zoals blijkt uit de resultaten van de beoordelingsronde 2017-2022, zie Figuur 22. Deze trajecten worden momenteel verbeterd als onderdeel van het *Hoogwaterbeschermingsprogramma*. Hierdoor zal de faalkans in de loop van de tijd afnemen. Met andere woorden, de kans op een regionale rivieroverstroming op bepaalde kritieke punten ligt momenteel tussen de 1:300-1:1000 jaar.

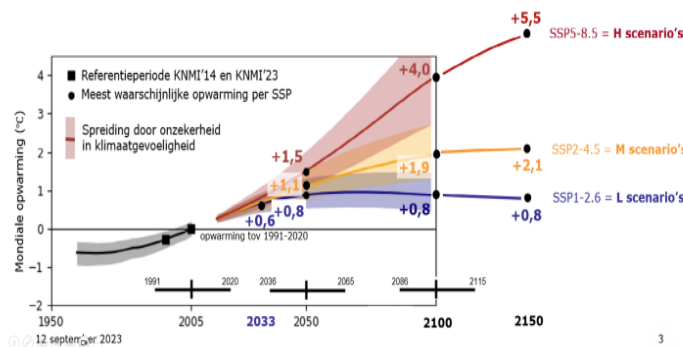
De waarschijnlijkheid van een rivieroverstroming is eerder in dit rapport benoemd wat betreft de blootstelling (paragraaf 2.1) en wordt hier dus niet herhaald.



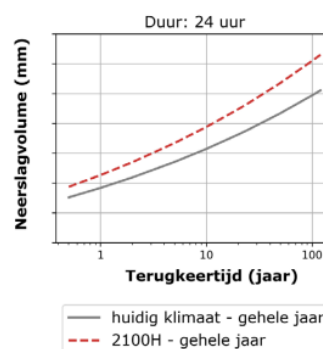
Figuur 22: Rivierdijken en voldoening aan berscherimingsniveaus Waterwet (Rijkswaterstaat, n.d.)

3.2 Extreme regenval

Wat betreft extreme neerslag beschikken we uitsluitend over huidige ruimtelijke neerslagkaarten. We beschikken dus niet over gedetailleerde kaarten voor 24-uurs neerslag in de toekomst. Daardoor kunnen we niet direct aflezen hoe vaak bepaalde kritieke grenzen in de toekomst zullen worden overschreden. Om toch een onderbouwde inschatting te maken van de veranderende waarschijnlijkheid van extreme neerslag sluiten we ons aan bij het KNMI/STOWA-kader voor verandergetallen (STOWA, 2024). Dit kader biedt schalingsfactoren waarmee hedendaagse neerslagintensiteiten kunnen worden vertaald naar toekomstige terugkeertijden onder verschillende klimaatscenario's. Vervolgens kunnen we via interpolatie uit de STOWA-tabellen de bijbehorende terugkeertijden afleiden. Deze methode maakt het mogelijk om, ondanks het ontbreken van volledige toekomstkaarten, toch kwantitatieve schattingen te geven van de verschuiving van de terugkeertijden van extreme neerslag in 2050 en 2100, bij beperkte (M) als sterke (H) klimaatverandering.



Figuur 24: Scenario's voor mondiale opwarming (STOWA, 2024)



Figuur 23: Scenario voor toename neerslagvolume 2100H (STOWA, 2024)

De focus ligt op twee referentiedrempels uit de huidige situatie: 99 mm/24u (1:100 jaar gebeurtenis) en 148 mm/24u (1:1000 jaar gebeurtenis). We geven resultaten voor 2050H en 2100H (sterke toenemend contextscenario) en 2050M en 2100M (beperkte toenemend contextscenario) weer. De bovenstaande figuren geven algemeen de toekomstperspectieven weer: Figuur 23 laat een toename zien van neerslagvolume, en Figuur 24 laat zien hoe verschillende toekomstige scenario's voor regenval afhankelijk zijn van mondiale opwarming.

A.d.h.v. veranderingsgetallen uit het STOWA-rapport, te zien in Figuur 25, worden omrekeningen gedaan om de waarschijnlijkheden van de verschillende klimaatscenario's te schatten (STOWA, 2024).

Klimaatscenario	Factor
2033 L	1.013
2100 Ln, 2100 Ld (idem voor 2050 en 2150)	1.026
2050 Mn, 2050 Md	1.046
2050 Hn, 2050 Hd	1.071
2100 Mn, 2100 Md	1.097
2150 Mn, 2150 Md	1.111
2100 Hn, 2100 Hd	1.234
2150 Hn, 2150 Hd	1.331

Figuur 25: Verandergetallen klimaatscenarios regenval

In 2100H verschuiven de referentiedrempels drastisch. Uit de STOWA-tabellen te zien op pagina 26 van het STOWA-rapport volgt dat een 24-uurs som van 94 mm in circa 1:25 jaar voorkomt; waar in de huidige situatie waar 99mm eens in de 100 jaar voorkomt. Door deze waarden te interpoleren, is de schatting dat 99 mm regen in 2100H voorkomt 1:35 jaar. Aan de bovenzijde van de verdeling schuift 148 mm (nu 1:1000) naar circa 1:303 jaar (geïnterpoleerd t.o.v. ~ 144 mm \approx 1:250). Per saldo betekent dit grofweg een verviervoudiging van de kans op het halen van deze drempels in 2100H. Voor 2050H passen we dezelfde systematiek toe, maar met de relatieve factor van 2050H t.o.v. 2100H ($1,071/1,234 \approx 0,868$). Terugrekenen van de 2100H-schaal naar 2050H levert voor 99 mm een toekomstige intensiteit van ~ 114 mm en een geïnterpoleerde terugkeertijd \approx 1:70 jaar. Voor 148 mm volgt $\sim 170,5$ mm met een geïnterpoleerde terugkeertijd \approx 1:649 jaar. Deze omrekeningen leiden tot de waarden in Tabel 8. Tabel 8 laat duidelijk zien dat extreme regenval steeds vaker gaat voorkomen in de toekomst.

Tabel 8: Waarschijnlijkheden 99/148mm neerslag per 24uur in 2050 en 2100 per contextscenario's

Contextscenario	99mm neerslag per 24uur	148mm neerslag per 24uur
Huidig	1:100 jaar	1:1000 jaar
2050M (beperkte risicoverhogend)	1:78 jaar	1:746 jaar
2050H (sterk risicoverhogend)	1:70 jaar	1:649 jaar
2100M (beperkt risicoverhogend)	1:65 jaar	1:588 jaar
2100H (sterk risicoverhogend)	1:35 jaar	1:303 jaar

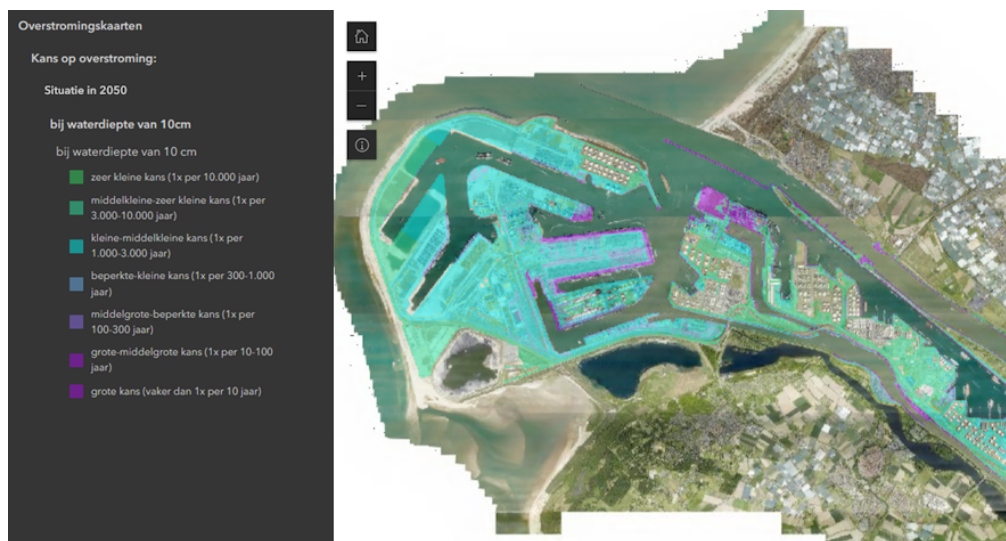
3.3 Zeespiegelstijging

Voor kustoverstromingen door zeespiegelstijging richten we ons op drie gebieden: *Vlissingen*, *de Eemshaven* en *de Haven van Rotterdam*. In Vlissingen bedraagt de kans op kustoverstroming onder huidige omstandigheden ongeveer eens in de 100 jaar. In de Eemshaven ligt deze kans voor de onbeschermde delen tussen eens in de 10 en eens in de 1000 jaar. Voor de energiecentrale bedraagt de kans eens in de 100.000 jaar, gezien de ligging achter de hoofdwaterkering. In de haven van Rotterdam, met name in de regio Maasvlakte I en II, ligt de kans tussen eens in de 1.000 en eens in de 10.000 jaar, afhankelijk van de exacte locatie, zie Figuur 26. Er zijn ook projecties gemaakt voor de overstromingskansen in de haven van Rotterdam voor 2050 en 2100, weergegeven in Figuur 27. Zoals zichtbaar worden er tegen 2050 geen extreme veranderingen verwacht, maar kan tegen 2100 een veel groter deel van het havengebied te maken krijgen met een reëel risico op overstromingen boven de 10 cm grens. De beschermingsniveaus voor het gebied rond de Sloe centrale nabij Vlissingen zijn eveneens weergegeven in Figuur 28.

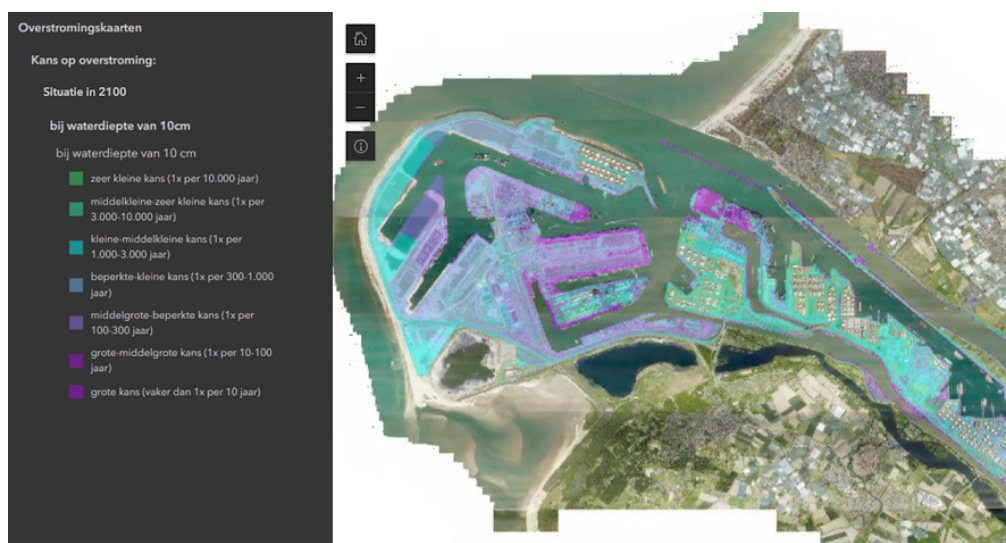
De exacte locaties van de meeste waterstofelektrolysefabrieken in de (nabije) toekomst zijn niet bekend. Toekomstige infrastructuur kan echter worden gesitueerd op basis van de verwachte blootstelling, of installaties kunnen worden geïnstalleerd met adequate extra beschermingen om hun blootstelling te verminderen.



Figuur 26: Blootstelling aan kustoverstroming, huidige situatie (Port of Rotterdam Authority, n.d.)

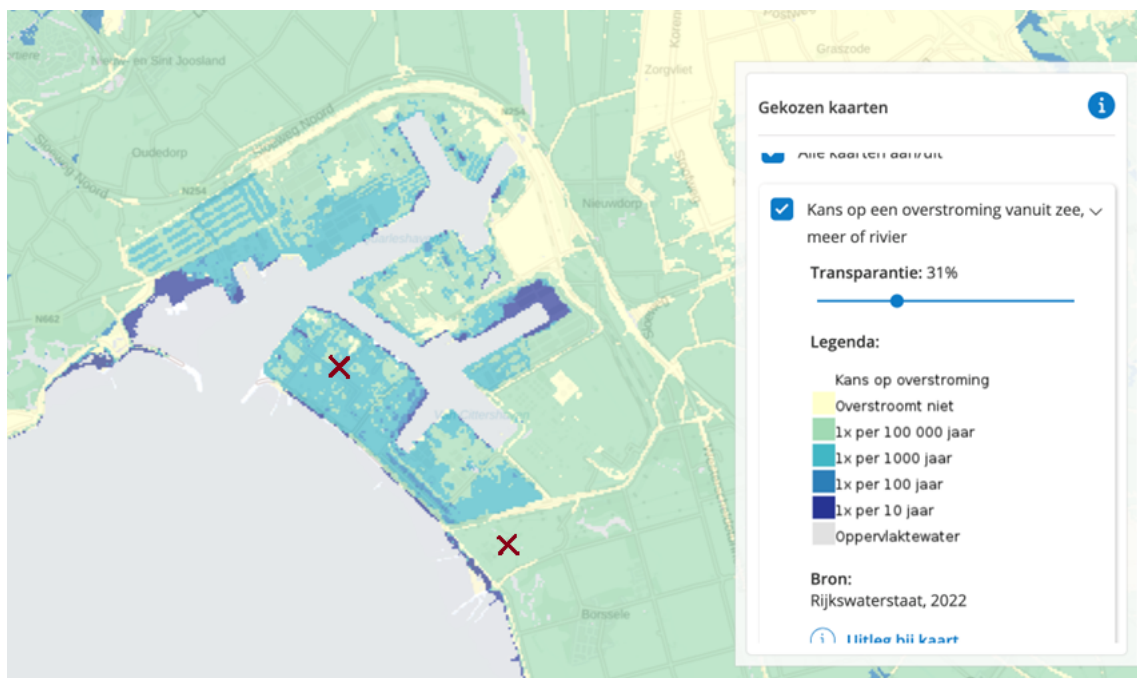


(a)



(b)

Figuur 27: Blootstelling aan kustoverstroming 2050 (a) 2100 (b) (Port of Rotterdam Authority, n.d.)

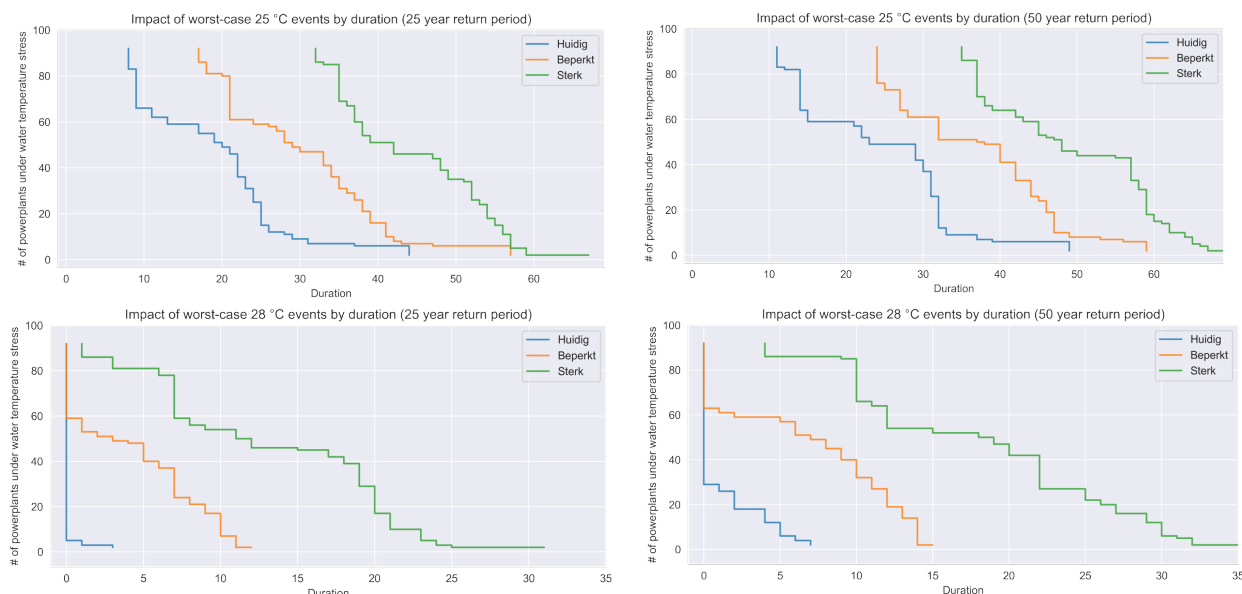


Figuur 28: De Quarleshaven bij Vlissingen (Klimaat-effectatlas, n.d.)

Figuur 28 laat zien dat de Sloe centrale aardgascentrale, aangegeven met de bovenste kruis, buiten het dijkstelsel valt, in een gebied met een overstromingskans van 1-in-1000 jaar. De kerncentrale van Borssele, aangegeven met de onderste kruis, ligt binnen het dijkstelsel en heeft daardoor te maken een overstromingskans van 1-in-100.000 jaar. Op basis van de waarden die weergegeven worden in Figuur 26, Figuur 27 en Figuur 28 is er aan te nemen dat de kans dat kustoverstromingen grote energie-infrastructuur buiten het dijkenstelsel treffen vrij laag is, ongeveer 1:1000 jaar tot 2050.

3.4 Droogte

In onze analyse hanteren we twee droogte-indicatoren: Het aantal keren dat een oppervlaktetemperatuur van >25 en 28 °C wordt bereikt nabij een van de (thermische of nucleaire) centrales, en de beschikbaarheid van oppervlaktewater op de locaties van elektriciteitscentrales. Wij kijken dus naar het effect onder het huidige beleid (28 graden) en het mogelijke toekomstige beleid (25 graden). Niet alle centrales liggen aan rivieren, en niet alle centrales aan rivieren zijn afhankelijk van het innemen en lozen van rivierwater voor koeling (sommige gebruiken koeltorens).



Figuur 29: Mogelijke beperkingen van productie bij lozingsnormen van 25/28 °C 2025 en 2050

Figuur 29 laat zien hoeveel opwekkingscapaciteit het risico loopt om te worden beperkt tijdens een 1:50 jaar worstcasesituatie van droogte. De blauwe lijnen geven het huidige klimaat weer, de oranje en groene lijnen tonen respectievelijk de Beperkt- en Sterk-2050-klimaatscenario's. Deze analyse gaat uit van de huidige elektriciteitscentrales; een toekomst waarin thermische opwekking wordt beperkt of waarin thermische en nucleaire centrales naar buiten de rivieren worden verplaatst, zijn minder blootgesteld aan droogte.

De linkerzijden van de grafieken zijn minder interessant, omdat kortdurende periodes van beperkte opwekking kunnen worden opgevangen met batterijopslag, gasopslag en door elektriciteit in te kopen uit buurlanden. Onder de huidige (28 °C) regelgeving geldt dat zelfs in het meest extreme klimaatscenario slechts een relatief klein deel van de thermische elektriciteitsopwekking gedurende langer dan drie weken met droogteomstandigheden te maken krijgt. Onder strengere regelgeving en klimaatomstandigheden in 2050 geldt echter dat vrijwel alle blootgestelde centrales tijdens een 1:50 jaar-gebeurtenis langer dan drie weken door droogte worden getroffen. Als deze gebeurtenissen gelijktijdig optreden, kan dit betekenen dat een aanzienlijk deel van de Nederlandse elektriciteitsopwekking gedurende die periode buiten werking is, wat kan leiden tot zeer hoge prijzen.

Daarnaast kunnen toekomstige omstandigheden, zoals een scenario met sterke klimaatverandering in 2050, leiden tot sterke toename van gebieden zonder beschikbaarheid van oppervlaktewater tijdens een droge zomer. Gebaseerd op tijdreeksen uit de BasisPrognose 2018 van Informatiepunt Leefomgeving (NWP-BP2018), blijkt dat slechts op één enkele locatie, de Clauscentrale, een koelwatertekort vanwege watertekorten (dus niet temperatuur) voorkwam over de afgelopen 100 jaar.

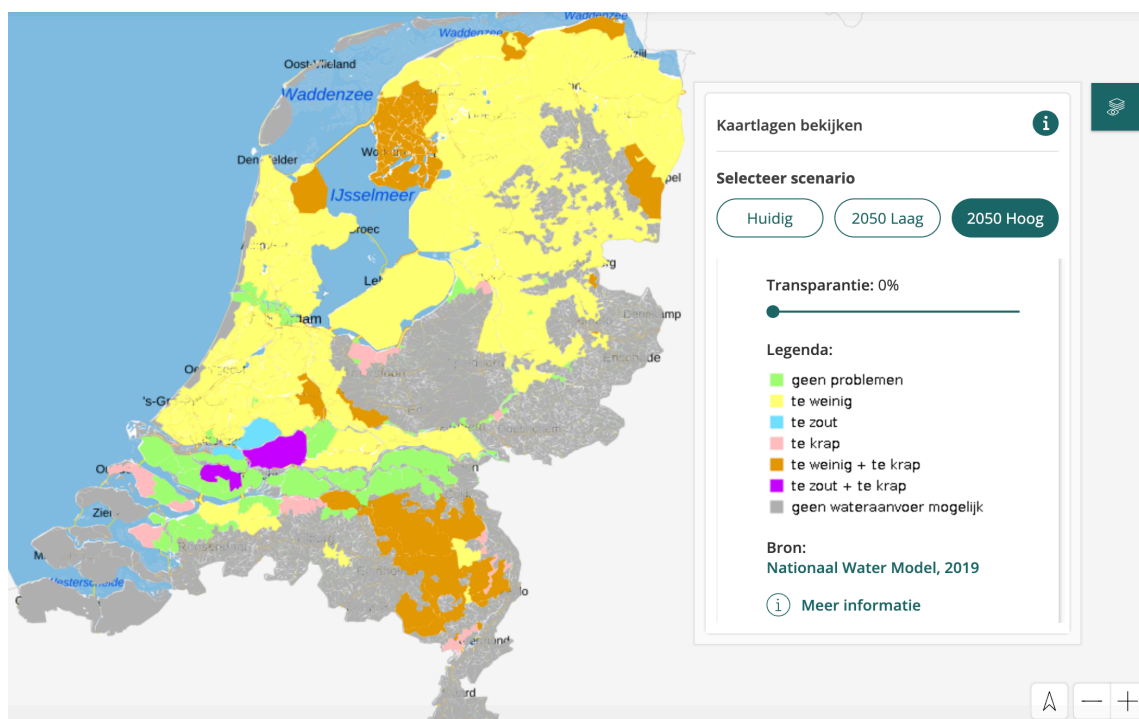
Echter uit deze prognose, weergegeven in Tabel 9, is te zien dat dit voorkomen onder verschillende toekomstige klimaatscenario's toeneemt, uitgedrukt in waarschijnlijkheden, ofwel het aantal gesignaleerde jaren over de referentie periode. De prognose laat zien hoe de vraag van de historische referentie periode is afgestemd tegen het klimaat van 2050 en 2085 in zowel het beperkt als het sterk toenemende contextscenario. Vooral de centrale en noordelijke delen van het land zullen met tekorten

aan oppervlaktewater te maken krijgen. Dit vergroot het risico voor thermische, nucleaire en waterstofopwekking. De omvang hiervan en de herhalingstijd van droge zomer moeten nader worden onderzocht. Deze bevindingen zijn dus indicatief maar laten zien dat vooral in Harlingen en Dokkum er vaak tekorten kunnen optreden. De centrales in Petten en de Clauscentrale zien ook een sterke toename in tekorten.

Tabel 9: Waarschijnlijkheden van historische koelwatertekorten bij 2050/2085 context

Centrale	Referentie Werkelijke tekorten, 100j	Tekort 2050		Tekort 2085	
		Beperkt risicoverhogend contextscenario, 100 jaar	Sterk risicoverhogend contextscenario, 100 jaar	Beperkt risicoverhogend contextscenario, 30 jaar	Sterk risicoverhogend contextscenario, 30 jaar
Petten	0	0	12/100	0	7/30
Clauscentrale	1/100	0	10/100	2/30	4/30
Dokkum	0	1/100	31/100	0	10/30
Harlingen	0	1/100	51/100	0	18/30
Utrecht	0	0	0	0	0
Weesp	0	0	1	0	0

Enkele onderzoeken die de gevolgen van de droogte van 2003 samenvatten, vergeleken deze met andere recordjaren zoals 1976 en 1947 (Boogert & Dupont, 2005). Voor nu gaan we er op basis hiervan vanuit dat de herhalingstijd van een extreme droogte ongeveer eens in de 30 tot 50 jaar is. Strengere beperkingen, in combinatie met gegevens van Figuur 30, betekenen echter dat deze gebeurtenissen tegen 2050 vaker kunnen voorkomen. In het NWP-BP2018 zijn nieuwe infrastructuurontwikkelingen in de energiesector echter niet meegenomen. Met name de aanleg van nieuwe waterstofcentrales langs de Maas (die proceswater nodig hebben) kan het risico op droogte aanzienlijk verhogen.

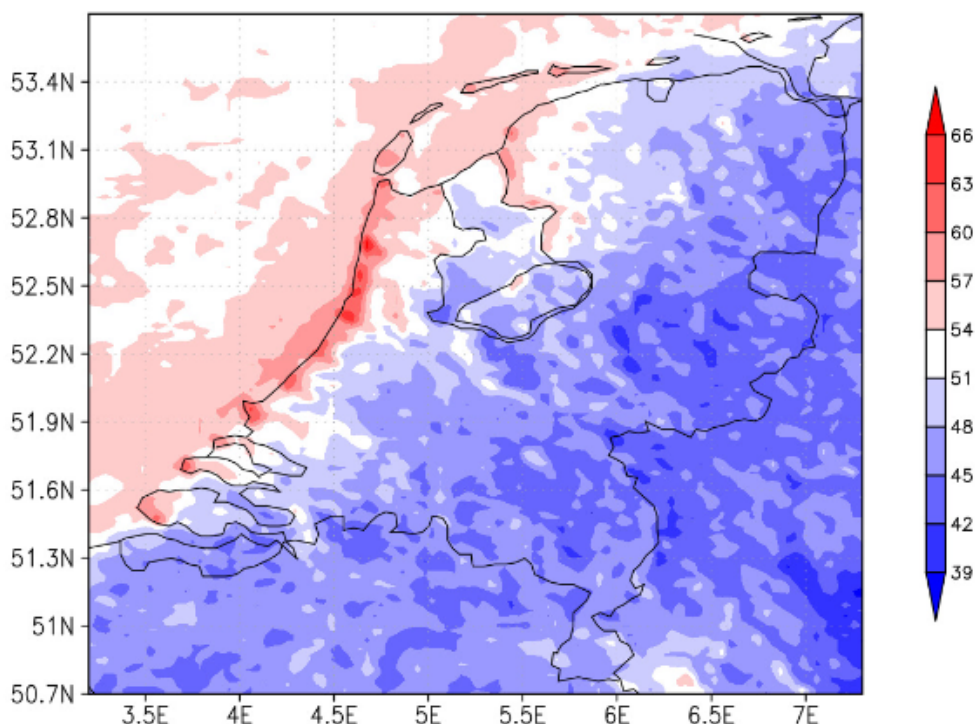


Figuur 30: Verwachte watertekorten in 2050 bij een sterk contextscenario (Klimaat-effectatlas, n.d.)

3.5 Windstormen

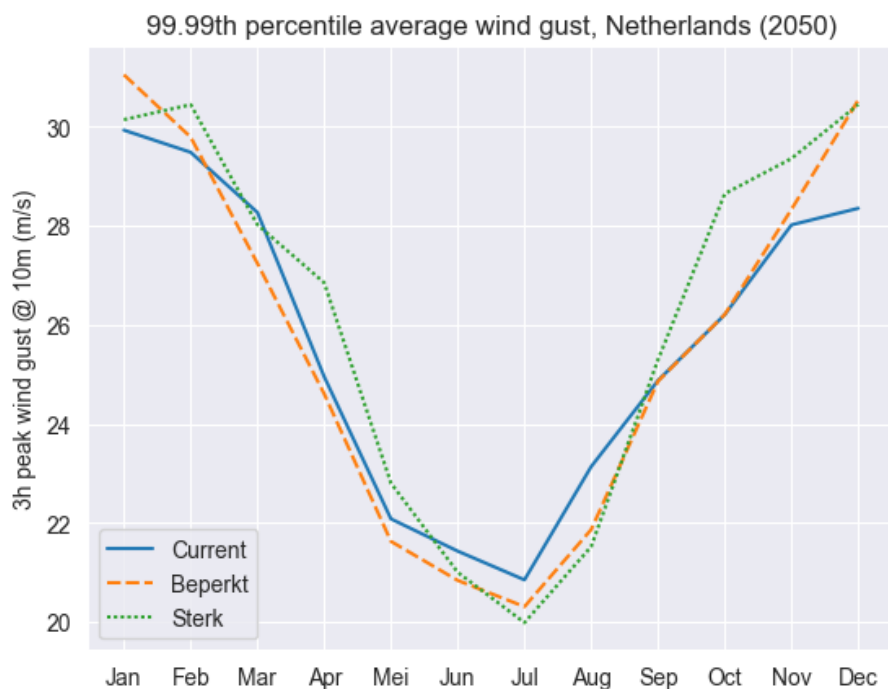
Wat betreft windstormen hanteren we een windstoot van >35 m/s als de relevante drempelwaarde, gebaseerd op het werk van (Jamieson, Strbac, & Bell, 2020) beschreven in Sectie 2.4.1. Bij 35 m/s heeft het Britse extra-hoogspanningsnet (275 en 400 kV) een faalratio van ongeveer 0,04 storingen per uur per 100 km lijn, terwijl reguliere hoogspanningsnetwerken (132 kV) een faalratio hadden van 0,10 storingen per uur per 100 km lijn. Het is belangrijk om aan te merken dat aanhoudende windsnelheden boven een bepaalde drempel schadelijker zijn voor transmissielijnen dan kortdurende windstoten. In Nederland is de relatie tussen windstoten (m/s over een periode van 3 s) en maximale windsnelheid ongeveer 1:0,8 op 100 m hoogte, dus de maximale windsnelheidsdrempel van 35 m/s komt overeen met een windstootdrempel van circa 42 m/s. Door het KNMI gepubliceerde gegevens laten zien dat een windstoot van 35 m/s op 100 m hoogte ongeveer eens in de 50 jaar bijna overal in het land kan voorkomen, weergegeven in Figuur 31.

Echter bevinden transmissielijnen zich niet op 100 m boven het maaiveld. Bovengrondse transmissielijnen variëren in hoogte, en snelheden op 30–50 m zijn een betere maatstaf; Jamieson et al. (2020) gebruikten 30 m voor hun reguliere hoogspanningslijnen en 50 m voor hun extra-hoogspanningslijnen. Vanwege de gegevens waartoe wij toegang hebben, hebben wij onze analyse uitgevoerd op 10 m hoogte, al is dit niet volledig nauwkeurig.



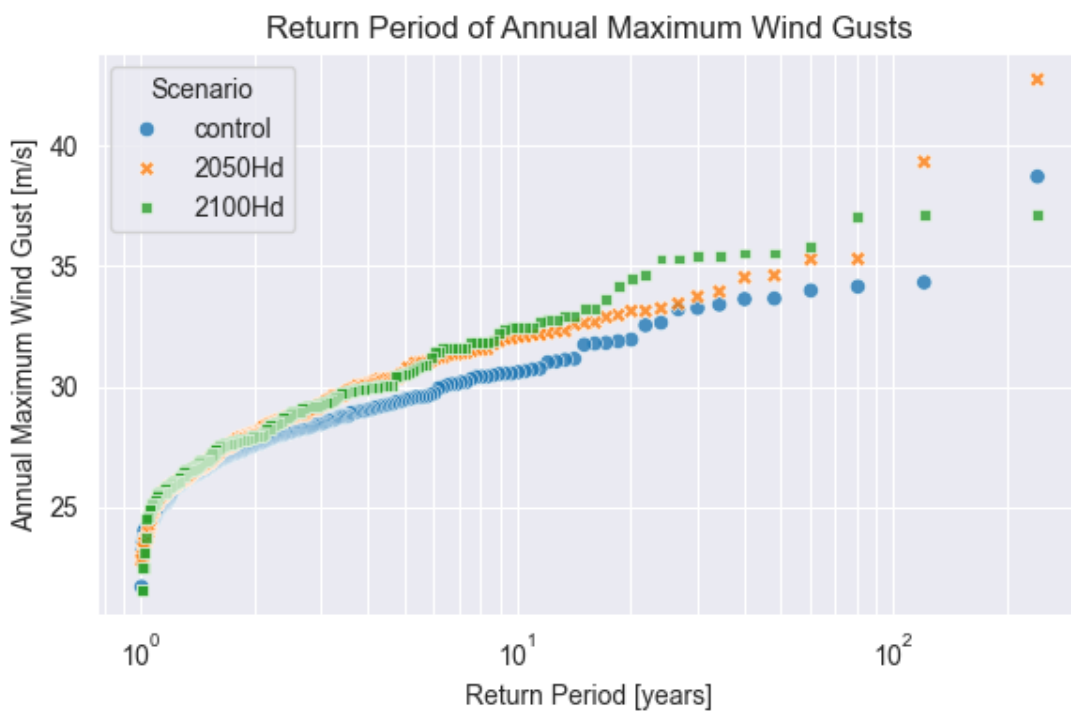
Figuur 31: 1:50 jaar windstoot op 100m hoogte (van den Brink, Wijnant, Bosveld, & Stepek, 2017)

Veranderingen in de herhalingsperiode van extreme windsnelheden en windstoten zijn matig. Figuur 32 laat zien dat de windsnelheden hoger kunnen worden in de wintermaanden, maar lager in de zomer.



Figuur 32: Vergelijking van extreme windstoten tussen het huidige, beperkte en sterke scenario

Op basis van onze drempelwaarde stellen we vast dat een dergelijke storing in het Nederlandse elektriciteitssysteem een herhalingsperiode heeft van ongeveer eens in de 200 jaar nu, eens in de 100 jaar in 2050 en mogelijk eens in de 50 jaar in 2100, zoals weergegeven in Figuur 33.



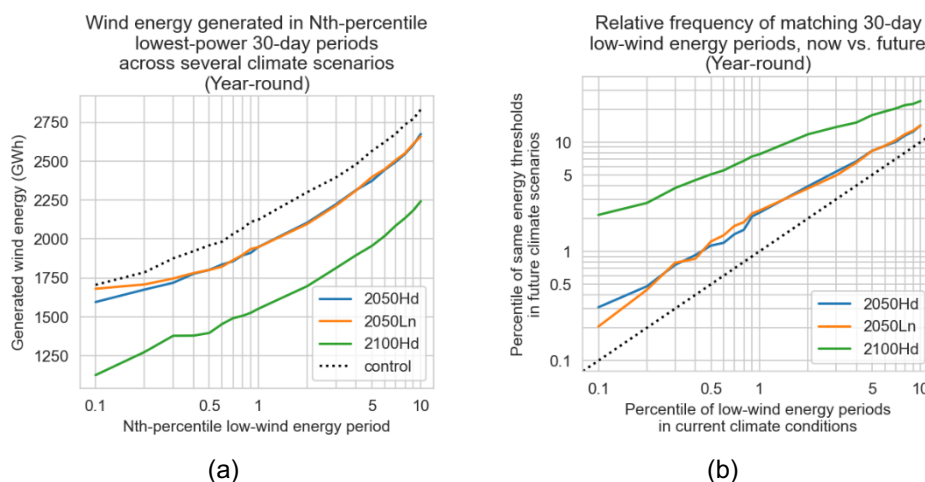
Figuur 33: Terugkeertijden extreme windstoten in het huidige situatie, 2050 en 2100

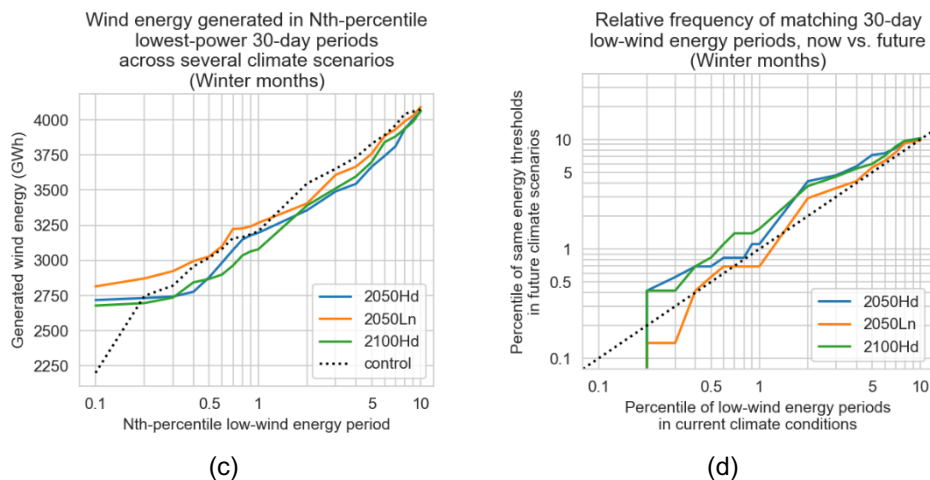
3.6 Duisterluwte

In onze analyse hebben wij gekeken naar de veranderingen van windluwe perioden in de toekomst. Van het KNMI hebben wij 8 ensembles van 30 jaar huidig (1991-2010) en toekomstig klimaat ontvangen (2050 en 2100), afkomstig van het RACMO model. Hier we hebben gekeken naar de wind op zee ter plaatse van de offshore windvelden. Deze windsnelheden (3-uur) hebben wij omgezet naar dagelijkse energieproductie met behulp van een wind productie curve. Wij definiëren Duisterluwte als momenten met weinig productie gedurende een periode van 7, 14 en 30 dagen. Hierna hebben wij gekeken naar de veranderingen in deze Duisterluwtes, per seizoen en over het jaar heen.

Grafieken a t/m d van Figuur 34 laten de veranderingen zien in maandlange windluwe perioden in de toekomst, ten opzichte van de huidige klimaatomstandigheden. De twee figuren links tonen het relatieve niveau van de meest extreme windluwe maanden: hoe verder naar links op de x-as, hoe extremer het evenement (een 0,1-percentielgebeurtenis staat voor een 1:1000 worstcasesituatie); hoe verder naar beneden op de y-as, hoe minder totale energie wordt geproduceerd. De twee figuren rechts tonen de relatieve frequentie van windluwe gebeurtenissen: zo impliceert het meest linkse punt op de groene lijn in subfiguur (b) dat een 1:1000 windluwe periode van 30 jaar onder de huidige omstandigheden dezelfde hoeveelheid windenergie oplevert als een 1:50 windluwe periode in het 2100 Hd-scenario. Wat we nu nog beschouwen als een zeer extreme worstcasesituatie zal dus veel vaker voorkomen, en we mogen aannemen dat worstcase (bijv. 1:1000) energiemaanden in de toekomst slechter zullen zijn dan nu.

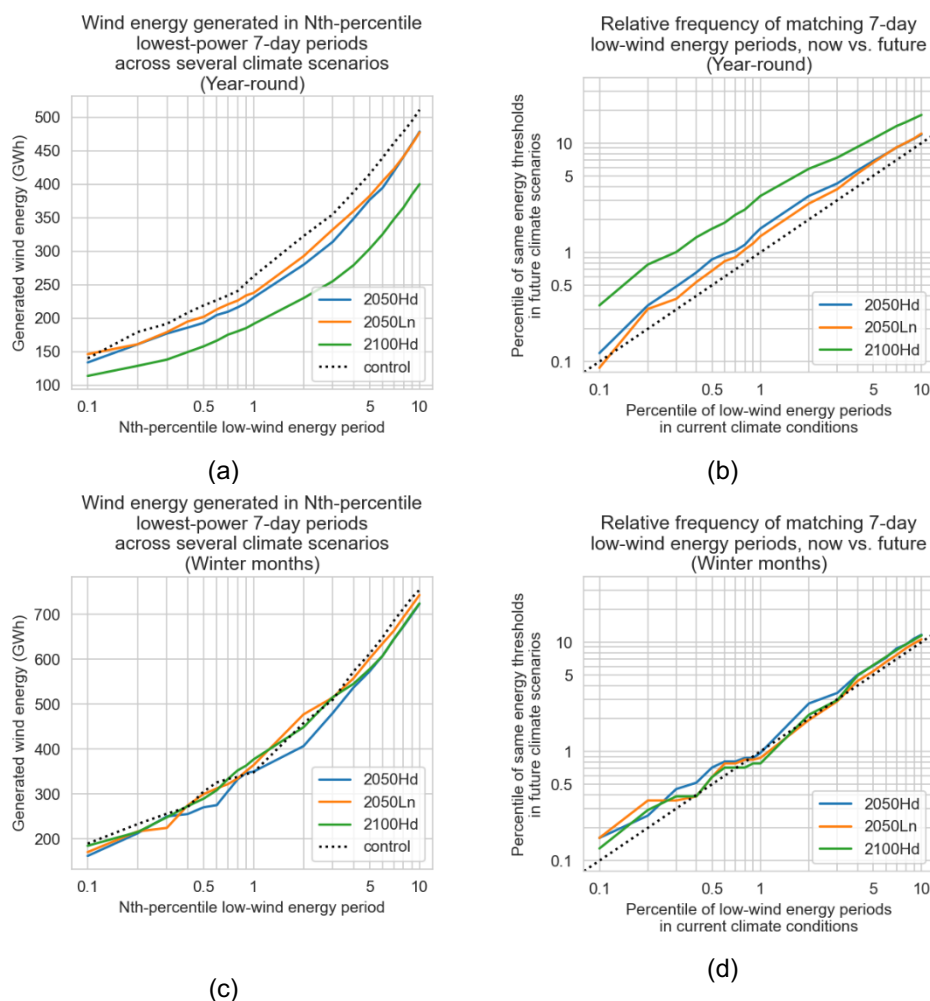
De onderste twee grafieken laten echter zien dat het effect van deze veranderingen in de wintermaanden aanzienlijk gedempt is. De meeste veranderingen in extreme windarme maanden doen zich voor in de zomer, d.w.z. die maanden worden extremer. Extreme windluwe energiegebeurtenissen in de winter nemen daarentegen slechts in beperkte mate toe. Met het oog op het hernieuwbare energiesysteem in 2050 en 2100, met een grote afhankelijkheid van windenergie, is dit een enigszins geruststellende conclusie. Dit omdat er in de zomer meer zonne-energie beschikbaar is.





Figuur 34: Weergaven van de waarschijnlijkheden van een 30 dagen Duisterluwte

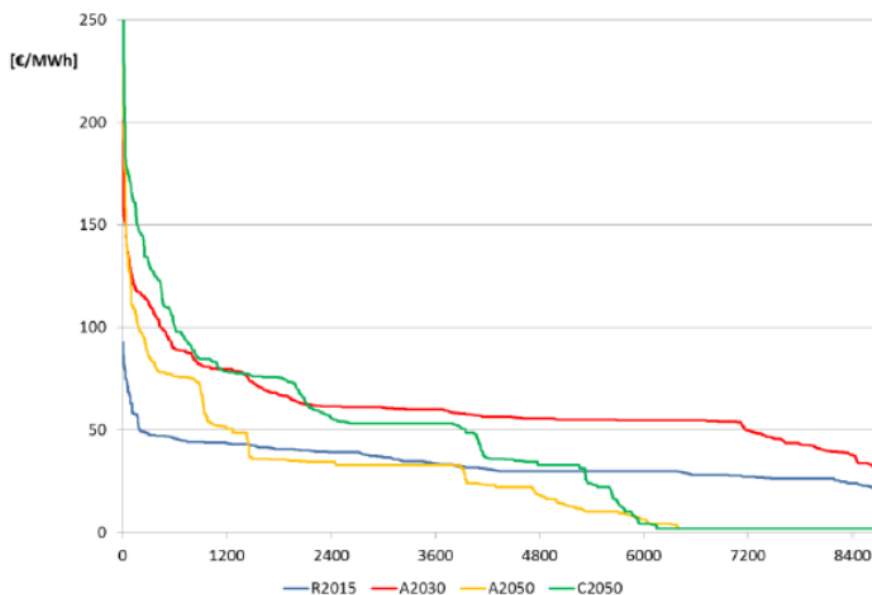
We kunnen naar dezelfde resultaten kijken voor een periode van 7 dagen, zie Figuur 35. Hier zien we ook weinig veranderingen als het gaat over de kans van optreden.



Figuur 35: Weergaven van de waarschijnlijkheden van 7 dagen Duisterluwttes

TenneT houdt in het systeemontwerp al rekening met mogelijke Duisterluwtes. Echter zal het bedrijf het risico niet volledig afdekken, deels vanwege de kosten die hiermee gepaard gaan. Bescherming tegen zeldzamere gebeurtenissen, zoals Duisterluwtes die zich eens in de 50 jaar voordoen, is echter behoorlijk kostbaar. We kunnen daarom aannemen dat een Duisterluwte die problemen veroorzaakt voor het Nederlandse energiesysteem zich ongeveer eens in de 10 tot eens in de 100 jaar zal voordoen.

Figuur 36 toont de verwachte duurcurves van elektriciteitsprijzen, met uren per jaar op de x-as (Sijm, et al., 2017). Hieruit blijkt dat aan de rechterkant van de grafiek de toekomstige prijzen kunnen dalen, aangezien de marginale kosten van hernieuwbare energie lager zullen liggen dan de huidige marginale kosten van niet-hernieuwbare bronnen. Aan de linkerkant van de grafiek kunnen de prijzen echter stijgen, met pieken van 150–250 euro per MWh onder de meest extreme scenario's. Dit laat zien dat het toekomstige energiesysteem kwetsbaarder wordt voor prijsstijgingen die worden veroorzaakt door Duisterluwte-gebeurtenissen. In scenario A2050 is er sprake van een grotere hoeveelheid interconnecties, wat helpt om prijsspieken aan de rechterkant van de grafiek af te vlakken.



Figuur 36: Duurcurves van uurlijkse elektriciteitsprijzen in 2015, 2030 en 2050 (Sijm, et al., 2017)

4 Impact van klimaatdreigingen

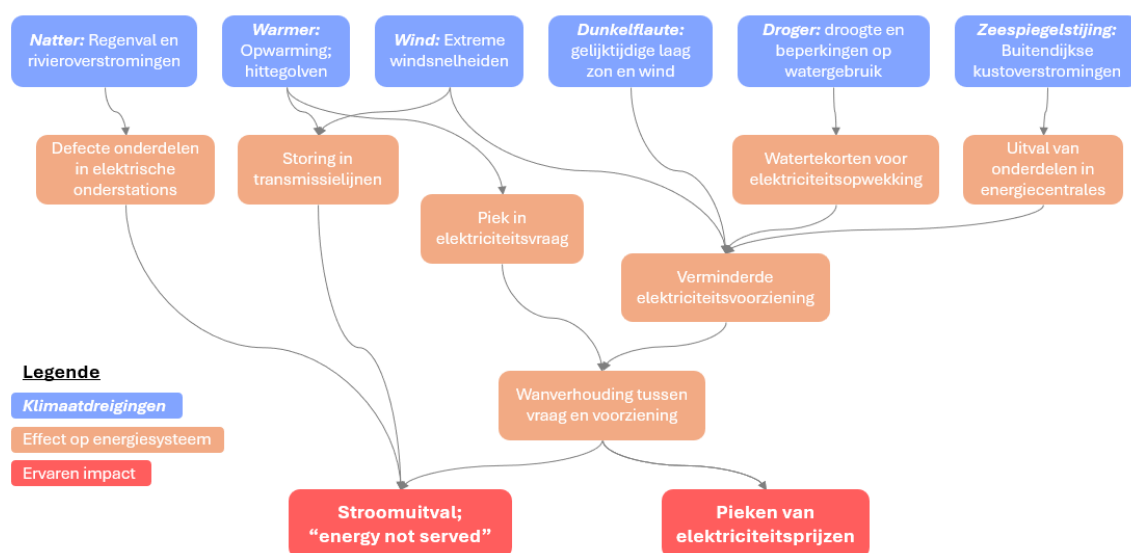
In dit hoofdstuk vertalen we de blootstelling uit hoofdstuk 2 en de waarschijnlijkheden uit hoofdstuk 3 naar sociaaleconomische impact. Waar relevant onderscheiden we het huidige beleid en de twee contextscenario's (*beperkt risicoverhogend* en *sterk risicoverhogend*).

4.1 Sociaaleconomische gevolgen van klimaatdreigingen

Mens en cultuur betreft de gevolgen van verstoringen in energievoorziening voor personen en samenleving. We duiden het aantal getroffen mensen en de duur van uitval, en beschrijven in hoeverre publieke functies en het dagelijks leven kunnen doorlopen. De inschaling van de eindimpact gebeurt met de vaste categorieën laag, middel of hoog, op basis van orde-grootte van getroffen personen en maatschappelijke effecten.

Natuur en milieu betreft de effecten op milieukwaliteit en ecosystemen die tijdens of na een gebeurtenis uit het energiesysteem voorkomen. Het gaat bijvoorbeeld om warmte- of watergerelateerde belasting, emissies of lekkages bij incidenten. We maken tot slot waar mogelijk onderscheid wat betreft schaal en herstelbaarheid.

Economie betreft de directe schade aan energieinfrastructuur, operationele kosten voor herstel en noodmaatregelen, en verliezen door niet-geleverde elektriciteit. Daarnaast beschrijven we prijseffecten en de duur daarvan, zonder macro-economische doorrekening om dubbeltellingen te vermijden.



Figuur 37: Klimaatdreigingen risicoboomb

4.2 Rivieroverstromingen

De gevolgen van rivieroverstromingen voor het energiesysteem zijn grotendeels beperkt tot elektriciteitstransmissie en -distributie. De impact op mensen hangt in beperkte mate af van het type gebeurtenis en de getroffen onderstations. Een rivieroverstroming die overmatige inundatie veroorzaakt bij een hoogspanningsonderstation zal waarschijnlijk niet leiden tot uitval in het merendeel van het land vanwege redundantie, maar kan zeker impact hebben op duizenden mensen, en is zeer kostbaar om te repareren.

Een huishouden in Nederland verbruikt gemiddeld circa 3 MWh per jaar en elk MWh huishoudelijk verbruik in Nederland kan worden gewaardeerd op ongeveer €44.000 (ACM, 2022). Met een kostenpost van circa €30.000 per kV kunnen de reparatiekosten van hoogspanningsonderstations in Nederland variëren tussen de €9 en €15 miljoen (ACER, 2023). Aangezien uitval van hoogspanningstations vaak opgevangen kan worden door redundantie, kan uitval bij een laagspannings- of lokaal distributieonderstation daarentegen wel direct gevolgen hebben voor de elektriciteitstoegang. Deze stations hebben wel lagere reparatiekosten. Tijdens een grotere overstroming die resulteert in het uitvallen van meerdere hoogspanningsstations of storingen bij veel lokale distributiestationen, zullen de kosten hoger oplopen. Ter illustratie: een verstoring die 50.000 huishoudens treft en waarvan het herstel twee dagen duurt, kan tot wel €36 miljoen kosten.

De impactschatting van rivieroverstromingen komt samen in Tabel 10, waarbij één huishouden gelijk staat aan 2,1 mensen (CBS, 2025). Onder beperkt risicoverhogend contextscenario schatten we dat een door rivieroverstroming veroorzaakte stroomstoring duizenden huishoudens treft. Een voorbeeld hiervan is de overstroming in Limburg 2021, waar in 700 huishoudens het stroom uitviel. Tijdens enkele dagen werden huishoudens gefaseerd weer aangesloten. De economische schade was zeer groot, alleen al aan de gedupeerde huishoudens werd 34 miljoen uitgekeerd (Enexis, 2021). Onder een sterk risicoverhogend contextscenario valt de eindimpact Hoog uit: door bevolkingsgroei en verstedelijking kan eenzelfde type overstroming meer onderstations raken, waardoor er het mogelijk wordt geacht dat meer dan 50.000 huishoudens (>100.000 mensen) zonder stroom komen te zitten. Dit wordt vervolgens ook gereflecteerd in de een hogere impact schatting voor de economie.

Tabel 10: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging rivieroverstroming

Eindrisico van de dreiging Rivieroverstroming	Context scenario	Impact		
		Mens en cultuur	Natuur en milieu	Economie
Uitval van een cruciaal onderdeel in een onderstation vanwege een rivieroverstroming, wat leidt tot stroomuitval	Beperkt	Middel: 10.000 – 100.000 getroffen mensen	N/A	Laag-Middel < € 100 mln. of € 100 mln. – 1 mld.
	Sterk	Hoog: > 100.000 getroffen mensen	N/A	Middel: € 100 mln. – 1 mld.

4.3 Extreme regenval

Extreme regenval raakt de energiesector via lokale wateroverlast bij distributie- en onderstations, waardoor, vergelijkbaar met rivieroverstromingen, stroomonderbrekingen kunnen ontstaan. Deze verstoringen kunnen wel makkelijker hersteld worden: omdat piekbuien vaak ruimtelijk beperkt zijn, kan na het wegtrekken van het water relatief snel worden geschakeld. Het incident in Nijverdal, december 2023, illustreert dit: een door hevige regenval overstroomd station legde >11.000 huishoudens tijdelijk stil; binnen circa zes uur was iedereen weer aangesloten (NL Times, 2023). Wij schatten dat een dergelijke verstoring ongeveer €2 miljoen aan schade veroorzaakt. De klimaatdreiging is vergeleken met rivieroverstromingen minder ernstig qua inundatie, en resulteert dit ook in een kleinschaliger impact.

Voor mens en cultuur betekent dit dat de maatschappelijke ontwrichting meestal gering is qua tijd, maar wel redelijk veel mensen lokaal kan raken (zoals te zien in Nijverdal). De gevoeligheid neemt toe naarmate elektrificatie vordert: als elektrische verwarming gangbaarder wordt, kan een winterse bui zonder snel herstel tot problemen leiden. De economische eindimpact blijft in de verwachte buien in de laagste categorie, onder €100 miljoen. In een toekomst met meer elektrificatie kunnen de kosten per uur met uitval verder op lopen door dat er meer afnemers zijn.

Tabel 11: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging extreme regenval

Eindrisico van de dreiging extreme regenval	Context scenario	Impact		
		Mens en cultuur	Natuur en milieu	Economie
Uitval van een cruciaal onderdeel in een onderstation vanwege extreme regenval, wat leidt tot stroomuitval	Beperkt	Middel: 10.000 – 100.000 getroffen mensen	N/A	Laag: < € 100 mln.
	Sterk	Middel: 10.000 – 100.000 getroffen mensen	N/A	Laag: < € 100 mln.

4.4 Zeespiegelstijging

Wanneer een kustoverstroming optreedt vanwege zeespiegelstijging en een centrale buiten werking stelt, kunnen de schadeposten aanzienlijk zijn. Reparatiekosten voor energiecentrales bedragen doorgaans ongeveer 10-30% van de initiële bouwkosten. Ter illustratie: de bouw van de Sloe centrale kostte €550 miljoen. De centrales op de Maasvlakte waren iets goedkoper in de bouw, terwijl de gascentrale in de Eemshaven circa €2,2 miljard kostte. In totaal kan dit neerkomen op enkele honderden miljoenen euro's aan reparatiekosten, maar wordt het limiet wel onder de miljard geschat. Hoewel deze centrales in 2024 ongeveer 20% van de nationale energiecapaciteit uitmaakten, draaien zij doorgaans niet op volle capaciteit. Hun aandeel zal naar verwachting afnemen met de groei van offshore wind en de geplande bouw van nog twee kerncentrales. Het uitvallen van centrales in de toekomst zal waarschijnlijk niet zal leiden tot volledig verlies van levering, maar dat dit wel de energieprijzen omhoog zal brengen.

Hoewel veel consumenten het acute effect op de energieprijzen ten gevolge van een kustoverstroming niet zouden voelen, vanwege de structuur van hun huishoudelijke elektriciteitscontracten, wordt het grootste deel van het land toch getroffen. Plotselinge hoge kosten voor de elektriciteitsleveranciers moeten nog steeds worden terugverdiend, dus ook kleinschalige gebeurtenissen van deze klimaatdreiging kunnen leiden tot een stijging van de elektriciteitsprijs in latere perioden. Geleidelijke stijgingen van de energiekosten als gevolg van verzilting kunnen ook leiden tot prijsstijgingen voor klanten, maar het is moeilijk in te schatten hoe dit zich vertaalt in de energieprijzen. Tenslotte is het mogelijk dat ammoniak lekken ontstaan door overstromingen van opslaglocaties, met invloed op lokale natuur en milieu.

Tabel 12: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging zeespiegelstijging

Eindrisico van de dreiging Zeespiegelstijging	Context scenario	Impact		
		Mens en cultuur	Natuur en milieu	Economie
Uitval van elektriciteitscentrales door kustoverstromingen	Beperkt	Laag: < 10.000 getroffen mensen	Laag: lokaal en omkeerbare schade op natuur en milieu	Middel: € 100 mln. – 1 mld.
	Sterk	Laag: < 10.000 getroffen mensen	Laag: lokaal en omkeerbare schade op natuur en milieu	Middel: € 100 mln. – 1 mld.

4.5 Droogte

Zoals eerder benoemd, begrenst het Nederlandse toetsingskader de riviertemperatuur, met een maximale opwarming 3 °C en een maximumtemperatuur van 28 °C (mogelijk 25 graden in de toekomst) (Deltares, 2024). Omdat rivierwater warmer wordt, komen deze grenswaarden sneller in zicht en nemen ecologische risico's toe als lozingsen toch plaatsvinden. De huidige regelgeving omtrent maximale riviertemperatuur is bedoeld om de ecologische impact van het gebruik van koelwater door elektriciteitscentrales te beperken, waarbij de vastgestelde grenswaarden slechts in uitzonderlijke situaties mogen worden overschreden. Er bestaat echter een verschil tussen wat is toegestaan en wat daadwerkelijk wordt geloozd, waardoor enige milieuschade toch mogelijk is. In extreme gevallen kan schade aan lokale visecosystemen onomkeerbaar zijn. Lozing van opgewarmd koelwater kan lokaal en stroomafwaarts leiden tot lagere zuurstofgehalten en warmtestress bij waterorganismen, met verstoringen van gedrag en vismigratie. De impact op natuur en milieu kan dus variëren tussen laag (lokaal) en middel (stroomafwaarts).

Vanwege de grote verscheidenheid aan energiebronnen in Nederland, en omdat de regelgeving energieopwekking aan de rivieren beschermt omtrent leveringszekerheid, is het onwaarschijnlijk dat droogte leidt tot stroomuitval. Wel zullen inneembeporingen leiden tot hogere elektriciteitsprijzen. Dit heeft effect op de gehele economie, echter zorgt het energieprijzplafond van 2023 wel dat de directe impact voor de meeste huishoudens beperken blijft. De droogte en hittegolf van 2003 zorgden voor veel discussie en aangescherpte regelgeving: de elektriciteitsprijzen waren tot wel zes keer hoger geworden binnen een week. De omvang, de kosten van de prijsspiek en de misgelopen omzet van de gepauzeerde centrales is lastig in euro's uit te drukken, maar wordt in een beperkt scenario geschat rond de 100 miljoen. In een sterk scenario valt dit hoger uit. Een systeem met een groot aandeel zonne- en windenergie, zoals verwacht in Nederland in 2050, is minder kwetsbaar zijn voor dit risico. Echter zullen er nog steeds onderdelen van het Nederlandse energiesysteem zijn (bijv. waterstof en kernenergie) die afhankelijk blijven van rivierwater.

Tabel 13: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging droogte

Eindrisico van de dreiging Droogte	Context scenario	Impact		
		Mens en cultuur	Natuur en milieu	Economie
Beleidsmatige waterrestricties bij de rivieren beperken elektriciteitsopwekking in fossiele en nucleaire centrales, en waterstofproductie.	Beperkt	Laag: Weinig huishoudens worden direct getroffen	Laag-Middel: lokaal en omkeerbare schade op natuur en milieu of regionaal en moeilijk omkeerbare schade op natuur en milieu	Laag-Middel < € 100 mln. of € 100 mln. – 1 mld.
	Sterk	Laag: Weinig huishoudens worden direct getroffen	Laag-Middel: lokaal en omkeerbare schade op natuur en milieu of regionaal en moeilijk omkeerbare schade op natuur en milieu	Middel: € 100 mln. – 1 mld.

4.6 Windstormen

Een windstorm waarbij meerdere stroomstoringen tegelijk optreden zal met hoge waarschijnlijkheid een stroomuitval veroorzaken. Een dergelijke stroomuitval kan gevolgen hebben voor een groot deel van de bevolking. Een zware storm in het overwegend landelijke gebied van Schotland in 2021 veroorzaakte een stroomuitval voor meer dan 180.000 mensen (GHD, 2022). Hoewel het Verenigd Koninkrijk doorgaans te maken heeft met zwaardere stormen dan Nederland, maakt onze hogere bevolkingsdichtheid ons wel gevoelig voor een zware storm. De regio met de hoogste windsnelheden (Noordwest) omvat verschillende middelgrote steden zoals Haarlem en Alkmaar met meer dan 100.000 inwoners. Dit betekent dat de impact op mens en cultuur in het hoogste categorie valt.

Met behulp van de *value of lost load*-methode kan bepaald worden dat een regio met een bevolking van 100.000-200.000 inwoners te maken krijgen met een stroomstoring van één tot twee dagen, met tot gevolg een verlies van € 36-144 miljoen aan economische activiteit (ACM, 2022). De reparatie van bovengrondse extra hoogspanningskabels kan € 2 miljoen per km kosten. De totale economische impact van een dergelijke gebeurtenis zal waarschijnlijk rond de €100-200 miljoen liggen. Dit betekent dat de impact op de economie zeer kan variëren afhankelijk van de ernst, maar waarschijnlijk ergens tussen laag en middel.

Storingen in de transmissie als gevolg van wind hebben geen directe gevolgen op natuur en milieu, maar zijn mogelijk wel een opzet voor brandgevaar. De verwachting hier van is echter wel laag, wegens strenge eisen die worden gesteld aan afstand tussen bomen en hoogspanningsleidingen. Brandgevaar als keteneffect van windstormen wordt verder behandeld in paragraaf 6.2.

Tabel 14: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging windstormen

Eindrisico van de dreiging Windstormen	Context scenario	Impact		
		Mens en cultuur	Natuur en milieu	Economie
Uitval van transmissielijnen bij hoge windsnelheden	Beperkt	Hoog: > 100.000 getroffen mensen	Laag: lokaal en/of omkeerbare schade op natuur en milieu	Laag-Middel < € 100 mln. of € 100 mln. – 1 mld.
	Sterk	Hoog: > 100.000 getroffen mensen	Laag: lokaal en omkeerbare schade op natuur en milieu	Laag-Middel < € 100 mln. of € 100 mln. – 1 mld.

4.7 Duisterluwte

Een extreme Duisterluwte-gebeurtenissen kan kritieke aanbodtekorten veroorzaken en ook leiden tot afhankelijkheid van buitenlandse elektriciteitsimport. Zelfs als de gebeurtenis niet tot stroomuitval leidt door een uit balans geraakt net, kunnen prijsspieken een grote impact hebben op de economie. In sommige gevallen kunnen extreme prijsspieken ertoe leiden dat hele fabrieken of sectoren ervoor kiezen geen goederen te produceren, omdat het economisch rendabeler is hun installaties stil te leggen. Van de productiegerichte risico's die wij in deze analyse meenemen is een Duisterluwte een van de zwaarste, omdat deze, vergelijkbaar als bij droogte, langdurig kan aanhouden. In tegenstelling tot droogte geldt echter dat Duisterluwte een groter risico vormt naarmate meer hernieuwbare energie wordt gebruikt in de energiemix. Wat betekent dat de impact van een Duisterluwte over de jaren steeds groter kan worden. Hoewel Duisterluwte serieuze gevolgen heeft, is de impact op mens en cultuur beperkt. De belangrijkste merkbare verandering is dat er meer geïmporteerde energievervanging zal zijn, wat duurder is en wordt gevoeld in de portemonnee.

In de Monitor Leveringszekerheid 2024 rapporteerde TenneT dat zij in 2033 naar verwachting 14,4 uur "loss of load" zal ervaren, wat neerkomt op 49,8 GWh aan "expected energy not served" (TenneT TSO B.B., 2024). Er loopt onderzoek om de belangrijkste oorzaken van dergelijke aanbodtekorten in Nederland vast te stellen. Over een jaar gerekend vertegenwoordigt dit, gewaardeerd op €44.000 per MWh verlies, een economische schade van €2 miljard. Uiteraard is niet al dit verlies van load toe te schrijven aan Duisterluwte, en het is mogelijk dat TenneT deze risico's verder weet te beperken voordat ze waarschijnlijker worden. Vanwege deze bevindingen valt de impact van een Duisterluwte op de economie tussen de categorie laag en middel.

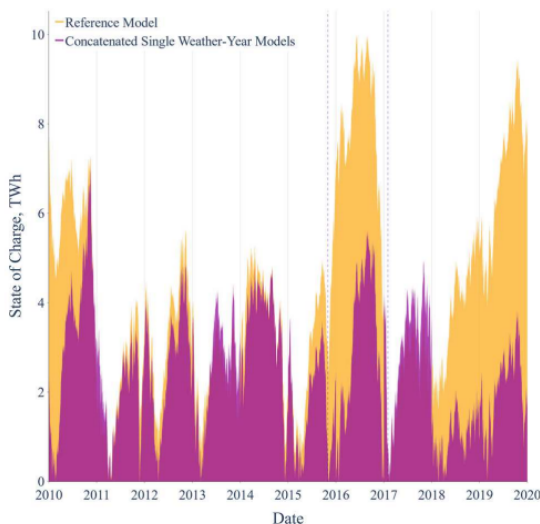


Figure 1. SOC for hydrogen storage over time for the reference model and concatenated single weather year models

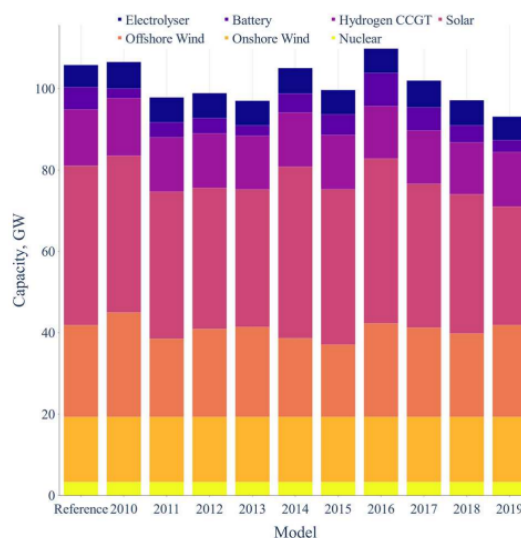


Figure 2. Capacity mix for the reference model and single weather year models

Figuur 38: Visualisatie meerjarige Duisterluwte model (Hawkins, van den Broek, & Bruninx, 2025)

Figuur 38 toont een onderzoek waarin meerjarige dunkeflaute-perioden zijn gesimuleerd om inzicht te krijgen in de vereiste opslagcapaciteit voor een volledig hernieuwbaar energiesysteem (Hawkins, van den Broek, & Bruninx, 2025). In het linker grafiek is in paars de omslagcapaciteit te zien voor één afzonderlijk jaar op basis van historische data. In geel is weergegeven hoe de cumulatieve opslagcapaciteit toeneemt wanneer meerdere jaren achter elkaar worden gesimuleerd.

Hieruit blijkt dat de totale benodigde overbrugging oploopt tot circa 10 TWh. Dat betekent dat energieproducenten (of het energiesysteem als geheel) in staat moeten zijn om over 10 TWh opslag te beschikken om een langdurige Duisterluwte volledig te kunnen opvangen in een situatie waarin de elektriciteitsvoorziening volledig hernieuwbaar is. Het onderzoek laat daarmee zien tot welk niveau TenneT (en het bredere energiesysteem) in theorie Duisterluwttes kan overbruggen met bestaande flexibiliteit, en vanaf welk punt aanvullende opslag nodig is die door de overheid of marktpartijen georganiseerd moet worden. De 10 TWh moet worden gezien als een benodigde basisreserve, maar deze waarde kan veranderen wanneer langere of andere historische datasets worden gebruikt. Door klimaatverandering zal de opslag waarschijnlijk iets groter moeten vergeleken met berekeningen op basis van historische klimaatreeksen, zoals wij eerder hebben laten zien. Het klimaatrisico kan dus als de delta opslag uitgedrukt worden door een veranderd klimaat.

Tabel 15: Gecategoriseerde impact van de klimaatdreiging Duisterluwte

Eindrisico van de dreiging Duisterluwte	Context scenario	Impact		
		Mens en cultuur	Natuur en milieu	Economie
Prijspieken en mogelijke uitval tijdens perioden van extreme lage elektriciteitsproductie	<i>Beperkt</i>	Laag: < 10.000 getroffen mensen	N/A	Laag-Middel < € 100 mln. of € 100 mln. – 1 mld
	<i>Sterk</i>	Laag: < 10.000 getroffen mensen	N/A	Laag-Middel < € 100 mln. of € 100 mln. – 1 mld

4.8 Samenvatting waarschijnlijkheden en impacts

De waarschijnlijkheden en impacts die zijn geïdentificeerd in hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4, zijn samengebracht in de Tabel 16. De tabel vat de uiteindelijke risico's die klimaatverandering vormt voor het Nederlandse energiesysteem samen, en is de basis voor een vergelijkbare tabel in paragraaf 7.3, waar de impact van verschillende adaptatiemaatregelen op deze impactschattingen te zien is.

Tabel 16: Samenvatting van de waarschijnlijkheden en de impact van de zes klimaatdreigingen

Dreiging	Waarschijnlijkheid 2050	Mens en cultuur		Natuur en milieu		Economie	
		Beperkt	Sterk	Beperkt	Sterk	Beperkt	Sterk
Rivieroverstroming	1:300 tot 1:3.000 jaar	Middel	Hoog	N/A	N/A	Laag-Middel	Middel
Regenval	1:70 tot 1:78 jaar	Middel	Middel	N/A	N/A	Laag	Laag
Zeespiegelstijging	1:1000 jaar	Laag	Laag	Laag	Laag	Middel	Middel
Droogte	1:25 tot 1:50 jaar	Laag	Laag	Laag-Middel	Laag-Middel	Laag-Middel	Middel
Windstormen	1:100 jaar	Hoog	Hoog	Laag	Laag	Laag-Middel	Laag-Middel
Duisterluwte	1:10 tot 1:100 jaar	Laag	Laag	N/A	N/A	Laag-Middel	Laag-Middel

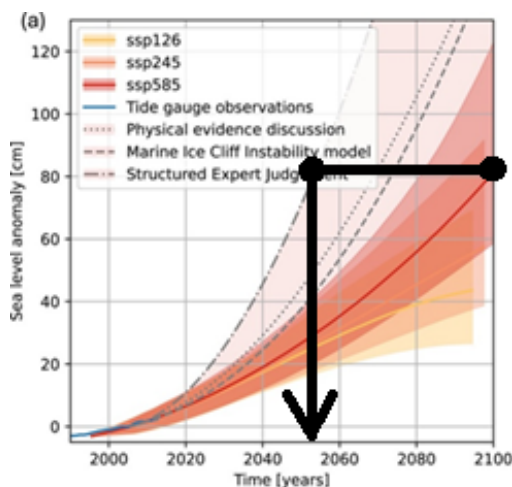
5 Wildcards

Klimaatverandering kent niet alleen geleidelijke trends en daaruit volgende blootstellingen, maar ook kantelpunten en snelle ontwikkelingen met grote systeemimpact. Dit wordt gedefinieerd als *wildcards*: “wat-als”-ontwikkelingen met een lage tot onzekere waarschijnlijkheid, maar potentieel zeer grote gevolgen. In dit hoofdstuk verkennen we twee door de opdrachtgever PBL voorgestelde wildcards, en het effect op de energiesector, als aanvulling op de analyse van Hoofdstuk 2 t/m 4.

5.1 Extreme zeespiegelstijging vanwege versnelde afsmelten Antarctische ijskappen

Eén van de geïdentificeerde wildcards voor de Nationaal Klimaatadaptatiestrategie 2026 is de extreme zeespiegelstijging als gevolg van het versneld afsmelten van de Antarctische ijskappen. PBL benoemt dat het smelten van met name de West-Antarctische ijskap mogelijk een kantelpunt kan bereiken, waarna de zeespiegel veel sneller stijgt dan in de aangenomen projecties. Zodra dit kantelpunt wordt overschreden is het proces onomkeerbaar op menselijke tijdschaal. Volgens het KNMI leidt dit tot een extra zeespiegelstijging van circa 45 cm in 2050 bovenop de reeds verwachte 24–27 cm, en wel 1,5 – 2,5 meter in 2100. In deze wildcard-analyse volgt het rapport de PBL-benadering: de nadruk ligt wederom op de mogelijke gevolgen voor de Nederlandse energiesector, en hoe een versnelde zeespiegelstijging de blootstelling, gevoeligheid en eindimpacts beïnvloedt.

Effect op blootstelling. Een versnelde zeespiegelstijging vergroot de kans op overstroming van buitendijkse energie-infrastructuur, zoals waterstofelektrolyzers, gas- en kerncentrales. In lijn met deze wildcard hanteren we in de verdere analyse het slechtste scenario (de linker curve in Figuur 39). Dat impliceert dat de zeespiegelstijging die in de eerdere analyse als kwestie rond 2100 is beschouwd, zich al rond 2050 zal voordoen. Dit zorgt ervoor dat het energiesysteem al veel eerder en sterker wordt blootgesteld aan zeespiegelstijging.



Figuur 39: Nadruk op de hoogst verwachte zeespiegelstijging in Nederland (Bars & Drijfhout, 2025)

Effect op gevoeligheid. De vereiste ophoog- en beschermingsniveaus voor energie-installaties aan de kust zal verder moeten toenemen: waar in paragraaf 3.3 al overstromingskansen worden voorzien, stijgt de gevoeligheid verder door hogere waterstanden. Verzilting zal een groter probleem worden, en in combinatie met het voordoen van droogte, zal er minder zoetwater beschikbaar zijn om de inlaten door te spoelen; dit raakt koel- en proceswater van kustcentrales en (toekomstige) elektrolyse-installaties. Bij een overstroming in havengebieden komt er verder druk op de centrales te staan (Vlissingen/Sloe, Rotterdam/Maasvlakte, Eemshaven) en vereist mogelijk langer herstel bij incidenten. Het is dus cruciaal om deze gevoeligheden niet alleen mee te nemen in de adaptatie van bestaande infrastructuur, maar ook voor toekomstige infrastructuur.

Effect op impact. Vanwege een snellere zeespiegelstijging zullen hogere waterstanden dus eerder verzilting met zich meenemen, en leiden tot moeilijkheden in de operationele processen, met doorwerking naar energieproductie en prijzen. Huishoudens zullen bij deze wildcard prijseffecten sneller voelen. Daarmee is de schatting dat de totale maatschappelijke impact toe zal nemen, met hogere kosten, langere hersteltijden en extra milieudruk dan in de eerder onderzochte zeespiegelstijging scenario's.

5.2 Extreme droogte en ruige winters vanwege stilvallen AMOC

De andere geïdentificeerde wildcards voor de Nationale Adaptatiestrategie 2026 is het sterk afzwakken van de *Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)*. De AMOC, die zorgt voor het warmtetransport van de evenaar naar de poolgebieden, is al aan het verzwakken en kan in de toekomst mogelijk tot stilstand kan komen. PBL benoemt in het startdocument dat dit leidt tot onder andere ruigere winters en droge zomer (niet perse tot een hogere zomertemperaturen). Volgens het KNMI duur het, na het bereiken van een kantelpunt, ongeveer een eeuw duren de AMOC geheel tot stilstand komt. In deze wildcard-analyse wordt er in gegaan op de mogelijke gevolgen voor het Nederlandse energiesysteem.

Effect op blootstelling. Een sterk afzwakken van de AMOC versterkt de reeds beschreven trend in paragraaf 2.4 en vergroot daarmee de blootstelling van het energiesysteem aan droogte gerelateerde risico's in de zomer. Langdurige perioden van lage rivierafvoeren worden waarschijnlijker, waardoor de beschikbaarheid van koel- en proceswater voor centrales verder onder druk komt te staan. Het sterk afzwakken van de AMOC zorgt daarnaast ook voor een toename van windstormen in de koudere winters, beschreven in paragraaf 2.5. Daarmee neemt de blootstelling van het Nederlandse energiesysteem verder netwerk toe, terwijl juist in kouder wordende wintermaanden ook de vraag naar dit energiesysteem toeneemt.

Effect op gevoeligheid. Een afzwakkende AMOC vergroot de gevoeligheid van het energiesysteem doordat de seizoen-extremen sterker worden. In de winter neemt de vraag naar elektriciteit en warmte toe door lagere temperaturen, terwijl windstormen het risico op storingen in transmissienetten vergroten. Daardoor neemt de kans toe dat aanbod en vraag gelijktijdig onder druk staan. In de zomer maakt langdurige droogte het systeem gevoeliger voor beperkingen in koel- en proceswater. De combinatie van lage rivierafvoeren, hogere watertemperaturen en verzilting kan leiden tot tijdelijke stilstand. Tot slot zorgt de grotere afhankelijkheid van weersafhankelijke, groene bronnen ervoor dat de kwetsbaarheid voor extreme seizoenpatronen verder toeneemt.

Effect op impact. De impact is merkbaar via de economische, ecologische en maatschappelijke effecten die elkaar kunnen versterken. Economisch vertaalt dit zich in hogere systeemkosten door schade aan infrastructuur bij stormen en schommelingen in energieprijzen door inconsistente centrale productie. In de winter kan een combinatie van hogere warmtevraag en tijdelijke uitval van netcomponenten leiden tot pieken in energieprijzen, terwijl in de zomer droogte en beperkte koelwaterbeschikbaarheid juist de productiecapaciteit drukken. De gevolgen voor mens en cultuur liggen in hogere energie- en verwarmingskosten. Daarmee leidt de AMOC-wildcard niet tot volledig nieuwe risico's, maar versterkt het de bestaande kwetsbaarheden van het Nederlandse energiesysteem.

6 Cascade-effecten

Dit hoofdstuk beschrijft cascade effecten, ofwel doorwerkingen van de klimaatgerelateerde verstoringen aan het energiesysteem op andere sectoren vanwege stroomuitval of kortsluiting. We sluiten dit hoofdstuk aan op de voorgaande analyses, en vertalen de bevindingen door naar keteneffecten en operationele implicaties.

6.1 Cascade-effecten vanwege uitvallen elektriciteit

De onderzochte klimaatdreigingen kunnen dus vanuit de energiesector doorwerken naar andere sectoren. Dit kan beschreven worden als een kettingreactie, waarbij de reactie ontstaat doordat een weersgebeurtenis (delen van) het energiesysteem platlegt. Hieronder wordt per sector relevante cascade-effecten van een stroomstoring uiteengezet aan de hand van gebeurtenissen uit het verleden.

6.1.1 Doorwerkingen op ICT

Eén van de eerste sectoren die geraakt wordt bij stroomuitval is de telecommunicatie binnen de ICT sector. Mobiele telefoonnetwerken kunnen geringe tijd werkende blijven, vanwege noodstroom: de meeste zendmasten zijn namelijk uitgerust met batterijen die enkele uren de telecommunicatie in stand houden (Schellevis, 2015). Kritieke zendmasten beschikken vaak over noodaggregaten, maar die zijn maar van beperkte duur. Het verleden laat zien dat bij stroomuitval een substantieel deel van de zendmasten wordt geraakt: in 2015 in Noord-Holland vielen ruim 70% van de T-Mobile zendmasten binnen een uur uit na een stroomstoring. De rest van de zendmasten vielen in de daaropvolgende uren uit nadat de reserveaccu's leeg waren (Schellevis, 2015). Bij stroomuitval van meer dan twee uur moet er rekening gehouden worden met uitval van vrijwel de gehele mobiele communicatie van de regio. Dit geldt niet alleen voor consumenten, maar ook voor hulpdiensten: ook C2000-zendmasten hebben maar voor circa 3 tot 4 uur noodstroom beschikbaar, daarnaast zullen ook de NL-alerts niet meer bruikbaar zijn (Inspectie Veiligheid en Justitie & Agentschap Telecom, 2015).

Naast telecommunicatie treft de doorwerking van stroomuitval op de ICT ook internet- en datacenters. Datacenters beschikken ook vaak over noodaggregaten, zodat de hoofdstructuur van het internet overeind blijft tijdens kortdurende storingen: bij de stroomstoring in 2015 bijvoorbeeld schakelde een datacenter direct op noodstroom over, echter vielen op een den duur de koelsystemen uit, waardoor de temperatuur opliep en zij servers toch moesten afschakelen (Schellevis, 2015).

Tot slot functioneren veel digitale diensten en besturingssystemen niet meer zonder telecommunicatie en datacenters. Denk aan PIN- en online betalingsverkeer: tijdens de Iberische stroomuitval van april 2025 was dit het geval (Stratix, 2025). Daarnaast zijn er ook veel moderne noodsystemen zoals brand- en inbraakalarmen die de aangetast kunnen worden voor stroomuitval. Deze voorbeelden illustreren dat stroomuitval in de ICT-sector al na korte tijd tot een vrijwel volledige digitale black-out kan zorgen voor ICT processen in Nederland (Inspectie Veiligheid en Justitie & Agentschap Telecom, 2015).

6.1.2 Doorwerkingen op veehouderij

In de veehouderij zijn veel processen geautomatiseerd en afhankelijk van stroom. Een direct risico bij stroomuitval is het wegvallen van ventilatie in stallen. Moderne veestallen zijn vaak geïsoleerd tegen geur en klimaat: voor luchtverversing en koeling zijn ze daarom vaak volledig afhankelijk van elektrische ventilatoren. Bij warm weer kan de temperatuur en CO₂-concentratie in een afgesloten stal zonder ventilatie razendsnel oplopen: onder extreme hittecondities raken dieren bij ventilatie-uitval al binnen 15 minuten in levensgevaar (NOS, 2019). Tijdens de hittegolf van juli 2019 zijn enkele duizenden varkens bezweken toen door een stroomstoring in Maarheeze de ventilatiesystemen uitvielen; binnen zeer korte tijd steeg de temperatuur in de stal boven 40 °C en raakte de zuurstof op (HVNL, 2021). Dit toont aan hoe kritisch stroom is voor dieren in de veehouderij. Naast ventilatie vallen bij stroomuitval ook andere systemen uit die allicht minder direct levensbedreigend zijn voor de dieren in de veehouderij, zoals automatische voeder- en drinksystemen. Korte onderbrekingen hierin zijn niet direct bedreigend, maar een langdurige uitval verstoort de dagelijkse processen, met gezondheidsproblemen en productieverlies tot gevolg.

Nederlandse veehouders zijn verplicht maatregelen te treffen: alle stallen met kunstmatige ventilatie moeten een alarm hebben dat waarschuwt bij ventilatie-uitval. Sinds juli 2024 is het ook verplicht om een noodstroomaggregaat te hebben voor een minimum van 6 uur (RVO, 2024). Ondanks zulke voorzorgen blijft de veehouderij kwetsbaar voor storingen in het energiesysteem ten gevolgen van blootstelling aan toekomstige klimaatdreigingen.

6.1.3 Doorwerkingen op openbaarvervoer

Het openbaar vervoer in Nederland is voor een groot deel elektrisch aangedreven. Alle stads- en metrotrams rijden op stroom uit bovenleidingen, en het spoorwegnet is voor circa 74% geëlektrificeerd (Engels, 2024). Daarnaast wordt het busvervoer ook geëlektrificeerd, inmiddels is 39% van de OV-bussen ofwel batterij-elektrisch ofwel waterstof-elektrisch (Zero Emissie Bus, n.d.). Deze verduurzaming betekent echter ook dat een grootschalige stroomstoring vrijwel het gehele openbaar vervoer kan platleggen.

In Amsterdam, Rotterdam en Den Haag valt bij stroomuitval meteen het metro en tramverkeer stil. Dit gebeurde tijdens de Noord-Hollandse stroomstoring van 2015: al het elektrisch openbaarvervoer in Amsterdam viel stil en ook het treinverkeer in de regio kon niet verder, midden in de ochtendspits (Nieuwsuur, 2015). De storing duurde nog geen uur, maar ontregelde toch de rest van de dag het openbaarvervoer in de gehele regio. Ook Schiphol ondervond gevolgen: de luchthaven schakelde weliswaar op noodstroom, maar uit voorzorg werden veel vluchten opgeschort (Parool, 2015). Al met al raakt zo'n evenement vele duizenden mensen, en zal met toenemende waarschijnlijkheid van klimaatdreigingen steeds vaker voor komen. De beschreven stroomstoring in 2015 was vanwege het uitvallen van een hoogspanningsstation in Diemen, en was maar van korte duur; een langere stroomstoring kan de effecten op het OV vele malen verergeren.

Samengevat leidt stroomuitval ertoe dat het OV niet goed kan functioneren. Dit heeft directe maatschappelijke gevolgen: mensen kunnen niet naar werk of school, en essentiële vervoersstromen komen tot stilstand. Het effect is dus direct voelbaar voor reizigers. Een enkel uur stilstand kan flinke economische schade veroorzaken, en ook veiligheidsrisico's met zich meebrengen (bijv. mensen vast in liften, overvolle perrons). De benoemde casus in 2015 bracht Nederland onverwacht "tot stilstand" (Nieuwsuur, 2015).

6.1.4 Doorwerkingen op essentiële voorzieningen

Onder essentiële voorzieningen vallen zaken zoals drinkwaterlevering en rioleringsystemen, die continu stroom vergen voor pompen en zuiveringsinstallaties. De drinkwatervoorziening is zo ontworpen dat korte stroomstoringen niet meteen tot verstoringen zorgen: waterbedrijven beschikken over reservoirs die bij uitval nog uren druk op het netwerk kunnen houden (Veilig Vooruit Nederland, 2025). Overheidsbeleid schrijft daarnaast voor dat drinkwaterbedrijven een noodplan paraat moeten hebben zodat er bij stroomuitval *minimaal tien dagen* aan drinkwater geleverd kan worden (Veiligheidsregio IJsselland, n.d.) In flatgebouwen vormt waterdruk echter wel een zwak punt: het pompsysteem dat water naar de bovenste verdiepingen verscheept werkt niet bij stroomuitval, waardoor flatbewoners geen water kunnen drinken en hun toilet niet kunnen doorspoelen.

Een andere essentiële voorziening die kwetsbaar is zijn ziekenhuizen, al hebben die doorgaans uitgebreide noodstroomvoorzieningen. Alle ziekenhuizen in Nederland beschikken over dieselgeneratoren die bij stroomuitval vrijwel direct aanslaan, zodat kritieke afdelingen door kunnen werken (TNO, 2012). Toch zijn er risico's: bij de Amsterdamse storing van 17 januari 2017 werkte in één ziekenhuis de noodaggregaten niet, en konden operaties niet doorgaan (Inspectie Veiligheid en Justitie & Agentschap Telecom, 2017). Dit voorbeeld toont aan dat ondanks noodstroom, een technisch mankement de zorgcontinuïteit kan doorbreken.

In de thuiszorg kan stroomuitval levensbedreigend zijn. Een groeiende groep mensen in Nederland gebruikt thuis medische apparatuur die continu stroom vergt: in Nederland zijn ca. 4.500 patiënten aangewezen op chronische thuisbeademing (FMED, 2025). Als deze uitvallen komt het vaak neer op de persoonlijk voorbereidingen van de gebruikers, tot dat zij bijgestaan kunnen worden door de leveranciers van het apparaat. In Nederland wordt er sinds 2023 actief gewerkt aan adequate alarmering van verantwoordelijkheden bij beademde patiënten, waarbij er in kaart gebracht wordt wie in een regio thuis stroomafhankelijke medische apparaten gebruikt, zodat zij bij een stroomstoring z.s.m. geholpen kunnen worden (Federatie Medisch Specialisten, 2021). Naast beademing zijn er ook andere kwetsbare groepen: diabetici met gekoelde insuline, ouderen die afhankelijk zijn van traplift, etc. Samenvattend raakt stroomuitval essentiële voorzieningen vooral indirect, via falende apparaten, wat mensenlevens in gevaar brengen als er niet tijdig wordt ingegrepen.

6.1.5 Doorwerkingen op bedrijfsleven

Doorwerkingen op het gebied van bedrijven, zijn wegens hoge economische gevolgen ook belangrijk om te benoemen. Een stroomstoring brengt namelijk voor bedrijven vrijwel onmiddellijk productieverlies en financiële schade met zich mee. Fabrieken en andere productiebedrijven moeten bij stroomuitval hun processen (abrupt) stilleggen wat kan leiden tot materiaalverlies, beschadigde apparatuur en kostbare herstartprocedures. De kosten kunnen enorm oplopen, afhankelijk van het bedrijf en de duur en het moment van de uitval. Zo gaf staalproducent Tata Steel IJmuiden aan dat de onderbreking van enkele uren door de 2015-stroomstoring hen naar schatting €14 miljoen heeft gekost (NH Nieuws, 2019). Ook MKB-bedrijven en dienstverleners kunnen worden getroffen. Winkels en supermarkten moeten sluiten of kunnen niet afrekenen zonder stroom. Koelhuizen en distributiecentra riskeren bederf van voorraden als koeling uitvalt. Kantoorwerk komt eveneens tot stilstand: computers, dataverbindingen en verlichting vallen uit, waardoor werknemers naar huis worden gestuurd. Tot slot kan er naast financiële schade ook sprake zijn van reputatieschade (door niet geleverde diensten), waardoor klanten in de toekomst eventueel voor een concurrent kiezen (DSEIT, 2018)

6.2 Doorwerkingen op bosbranden

Er zijn meerdere manieren dat brand kan ontstaan door klimaatdreigingen die het stroomnetwerk aantasten. Het meest voor de hand liggende voorbeeld is wanneer een windstorm ervoor zorgt dat rommel op de bovengrondse bekabeling vliegt, en kortsluiting veroorzaakt in elektriciteitslijnen. Daarnaast is het ook mogelijk dat vanwege een windstorm kabels tegen elkaar aan komen, en er kortsluiting ontstaat. Als deze verschijnselen samenkomen met extreme droogte, kunnen vonken overslaan op vegetatie in de nabije omgeving, wat vervolgens tot brand kan leiden (Bard, 2023).

Hoogspanningsleidingen kunnen tijdens een windstorm ook slingeren en nabije takken raken, waardoor vonken op de ondergrond vallen. Dit mechanisme lag aan de basis van catastrofale branden “Camp Fire 2018” in Californië en “Black Saturday 2009” in Australië, die beide ontstonden door stormschade aan stroomleidingen. Wereldwijd nemen netbeheerders maatregelen om de beschreven risico te beheersen. Zo worden bij extreem weer preventief delen van het net spanningsloos gemaakt via Public Safety Power Shutoffs. Echter is in het huidig klimaat van Nederland dit nog niet het geval, wegens de nog lage waarschijnlijkheid van het voordoen van dit kaliber windstormen (Bard, 2023). Wel investeert Nederland in het proactief snoeien van vegetatie en in de technische oplossingen van het ondergronds aanbrengen van kabels. Integratie van stormdynamiek in bosbeheer in combinatie met elektriciteitsinfrastructuur helpt om dergelijke cascade-effecten te voorkomen.

7 Adaptatiemaatregelen

Extreme weersomstandigheden zijn onvermijdelijk, en ongeacht hoe goed systemen zijn ontworpen blijft het falen van het energiesysteem altijd een mogelijkheid. Adaptatiemaatregelen zijn cruciaal om ervoor te zorgen dat de Nederlandse energiesector blijft functioneren, zowel op de korte termijn (2050) als op de lange termijn (2100).

7.1 Huidige adaptatiemaatregelen

Tabel 17 geeft de huidige adaptatiemaatregelen weer voor de zes eerder geïdentificeerde klimaatdreigingen. Deze worden in de hierop volgende paragrafen uitgewerkt.

Tabel 17: Samenvatting huidige adaptatiemaatregelen

Klimaatdreiging	Huidig adaptatiemaatregelen
<i>Rivieroverstroming</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Redundantie in hoogspanningsnet (verdubbeling kritieke onderdelen, ringstructuur tussen naburige onderstations) • Hoogwaterstations: sommige onderstations verhoogd tot ca. +200 cm (TenneT) • Regionale stations: kritieke onderdelen verhoogd 50–100 cm (niet verplicht, vaak om Arbo-redenen) • Geen wettelijke richtlijnen of afstemming met lokale overstromingsprofielen • Maatregelen vooral sectoraal initiatief (niet wettelijk verplicht)
<i>Extreme regenval</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Zelfde redundantieprincipe als bij rivieroverstromingen • Zelfde adaptatierichtlijnen als bij rivieroverstromingen
<i>Zeespiegelstijging</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sectorale bescherming van kritieke infrastructuur (geen landelijke norm) • Bescherming via havenautoriteiten (bijv. Maasvlakte, Sloegebied, Eemshaven) • Nieuwe infrastructuurprojecten: mogelijkheid tot terreinverhoging en integratie van waterveiligheidsmaatregelen • Beleid vooral gebaseerd op vrijwillige samenwerking (geen wettelijke verplichting)
<i>Droogte</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Europese regelgeving: lozingsbeperking bij >28 °C rivierwater (met als doel 25 °C) • Handhaving beperkt; centrales kunnen soms blijven lozen • Alternatieve lozing op grotere diepte bij estuaria (minder opwarming oppervlak) • Gebruik van koeltorens om minder water te verbruiken (duurder, maar effectiever) • 'Verdringingsreeks' bepaalt prioriteit watergebruik
<i>Windstormen</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Investerings in ondergronds brengen van leidingen (<150 kV standaard, 380 kV in proefstadium sinds 2018) • Structuurschema Elektriciteitsvoorziening III: elke nieuwe bovengrondse verbinding, vereist dat één bestaande vervangen wordt door ondergrondse • Redundantie: dubbele circuits en transformatoren, ringstructuur ('N-1' ontwerp)
<i>Duisterluwte</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Balancering via internationale interconnecties voor leveringszekerheid (Duitsland, België, VK, Noorwegen, Denemarken) • Gebruik van gascentrales, reserves en beperkte batterijopslag • Bezig met uitbreiding interconnectiecapaciteit tot 2050 • Ontwikkeling waterstofopslag (Gasunie, eerste zoutcaverne gepland voor 2031) • Langetermijnopslag (waterstof/ammoniak) als aanvullende adaptatie

7.1.1 Rivieroverstromingen & extreme regenval

De gevolgen van klimaatdreigingen op het energiesysteem, vanwege zowel rivieroverstromingen als extreme regenval, worden in het huidige beleid voornamelijk aangepakt door twee vormen van redundantie: binnen onderstations worden kritieke componenten zoals transformatoren gedupliceerd, en verbindingen tussen onderstations worden in een ringvormige structuur aangelegd, zodat een elektriciteit bij de verstoring van één onderstation langs alternatieve route omgeleid kan worden. Dit zijn preventieve adaptatiemaatregelen, bedoeld om de blootstelling van kritieke onderdelen aan inundatie te beperken.

Naast redundantie is een belangrijkste adaptatiemaatregel van het huidige beleid dat sommige onderstations zijn aangewezen als 'hoogwaterstations' en daarom al boven het maaiveld zijn verheven (Kolen, 2024). Transmissiesysteembeheerder TenneT verhoogt zijn stations in dit soort gevallen 200 cm boven het maaiveld, echter zijn hier geen overkoepelende ontwerprichtlijnen voor en worden deze dus niet uniform toegepast (TenneT TSO B.V., 2013). De mate van ophoging wordt daarnaast ook niet volgens ontwerprichtlijnen afgestemd op lokale overstromingsprofielen. Voor kleinere, regionale distributiestationen worden de kritieke onderdelen in het huidige beleid vaak op enige hoogte geplaatst, rond de 50 cm. Hoewel dit als een "aanpassingsmaatregel" wordt beschouwd, wordt dit ontwerpcriterium niet toegepast vanwege het risico op overstroming, maar vanwege gezondheids- en veiligheidsoverwegingen van de Arboret (Expert Interview). Met andere woorden: de maatregelen zijn niet wettelijk verplicht en komen van de sector zelf, zonder overkoepelende risicosturing.

7.1.2 Zeespiegelstijging

Energiecentrales implementeren in het huidige situatie zelf overstromingsbescherming tegen het risico van zeespiegelstijging, wat neerkomt op sectorale aanpassing. Overstroming van belangrijke infrastructuurlocaties is namelijk zeer kostbaar en vergt daarom uitgebreide bescherming van de industriegebieden. Er zijn hier echter geen overkoepelende, strikte normen voor. De havenautoriteit speelt wel een belangrijke rol, door maatregelen voor te leggen en accurate informatie beschikbaar te stellen. De haven van Rotterdam heeft bijvoorbeeld een overzicht gemaakt van mogelijke maatregelen, die de bedrijven over kunnen nemen (Port of Rotterdam Authority, n.d.).

Het is echter onzeker in hoeverre deze worden doorgevoerd: uit gesprekken met de havenautoriteit bleek dat de urgentie vaak niet hoog is omdat bedrijven de kans als erg beperkt zien [Expert Interview]. Het is makkelijker dit soort maatregelen mee te nemen in nieuwe uitbreidingen, in vergelijking met onnodig geachte (dure) aanpassingen zonder subsidies vanuit de overheid. Dit biedt dus wel kansen voor nieuwe infrastructuur in de haven, en dit is ook terug te zien in de conceptplannen van de nieuwe kerncentrales: hierin staat dat nieuwe infrastructuur in het buitendijkse gebied gebouwd mag worden, mits er ook terreinverhogingen worden doorgevoerd, bijvoorbeeld in gebieden Eemshaven, Maasvlakte en Sloegebied (RVO, 2025).

7.1.3 Droogte

Het huidige beleid schrijft voor dat energiecentrales, en andere industriële gebruikers van rivierwater voor koeling, geen koelwater mogen lozen als de rivier een temperatuur van 28 °C of meer heeft, of als het de temperatuur van het oppervlaktewater met meer dan 3 °C verhoogt (Deltares, 2024). De Europese wetgeving waarop dit beleid is gebaseerd stelt een bovengrens van 25 °C voor; echter is dit slechts nog maar een voorstel, en ligt deze in Nederland nog op 28 °C (Tummers, 2022). Deze maatregel, die is aangenomen om rivierecosystemen te beschermen, is de primaire dreiging voor het energiesysteem met betrekking tot droogte. Geen toegang hebben tot koelwater (of dit niet kunnen lozen) leidt ertoe dat centrales hun activiteiten moeten verminderen of stopzetten. In de nabije toekomst is het dus de bedoeling dat de bovengrens verplaatst naar 25 °C; dit zal de frequentie waarmee centrales hun energieproductie moeten stopzetten doen toenemen.

Elektriciteitscentrales hebben verschillende manieren om tijdens droogte toch te blijven functioneren. Enkele centrales beschikken over zogenoemde “koeltorens”, waarbij koelwater wordt rondgepompt en gekoeld zonder dat het hoeft te worden geloosd in een waterlichaam. Dit vergt aanzienlijk minder water. Koeltorens zijn echter duur en worden daarom meestal alleen toegepast wanneer koelwater niet beschikbaar is uit natuurlijke bronnen zoals rivieren. Koeltorens verliezen wat water door verdamping en hebben dus toegang tot nieuw water nodig, maar aanzienlijk minder dan open-loop koeling.

Wat betreft waterschaarste wordt er in Nederland gebruik gemaakt van een ‘verdringingsreeks’ om prioriteiten te stellen tussen verschillende vormen van watergebruik tijdens perioden van schaarste (IPLO, 2020). Categorie 1 is gereserveerd voor de *meest* kritische en beschermde toepassingen van water, en categorie 4 voor de *minst* kritische. Watergebruik voor energie valt over het algemeen in categorie 2, het gebruik van water voor energie “anders dan belang van leveringszekerheid” wordt beschouwd als categorie 4.

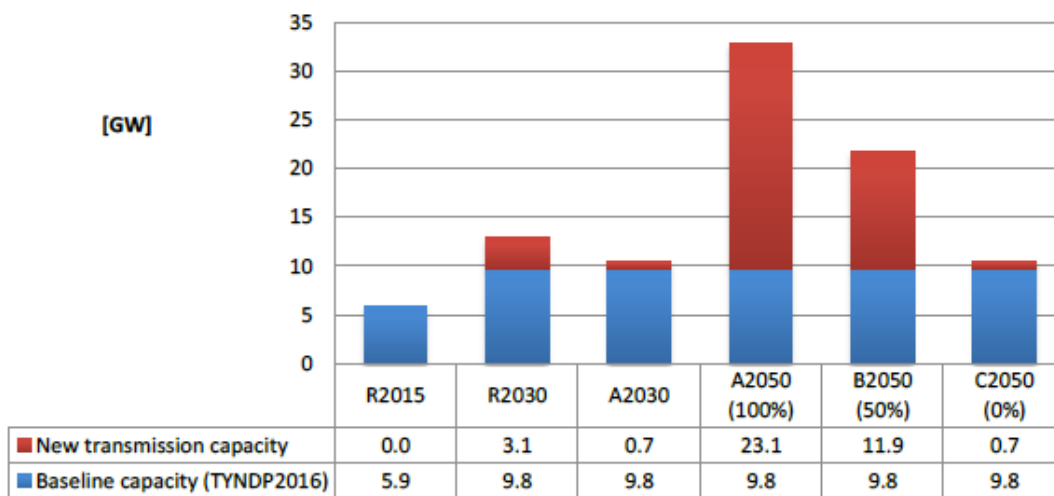
7.1.4 Windstormen

Niet alle elektriciteitstransportleidingen in Nederland zijn blootgesteld aan wind, aangezien een deel ondergronds is aangelegd. Over het algemeen worden de hoogspanningsleidingen bovengronds aangelegd, daarentegen worden laagspanningsleidingen ($\leq 150\text{kV}$) vaker ondergronds aangelegd. Zoals uiteengezet in het *Structuurschema Elektriciteitsvoorziening III*, moet voor elke nieuwe bovengrondse elektriciteitsverbinding die in Nederland wordt aangelegd, een gelijkwaardige lengte aan bovengrondse verbindingen worden vervangen door een ondergrondse verbindingen (Rijksoverheid, 2009). De afgelopen jaren is er zelfs ook gewerkt aan het ondergronds brengen van 380 kV-kabels, echter is dit technologisch nog wel ingewikkeld (Tennet BSO B.V., n.d.). Naarmate deze technologie verbetert, wordt het ondergronds brengen van het hele netwerk een steeds realistischere beleids optie.

Een alternatieve adaptatiemaatregelen die wordt toegepast is het inbrengen van redundantie in het energienetwerk. Zoals vermeld op de website van Tennet: *“Ons transmissiesysteem heeft ingebouwde redundantie. Dit betekent dat de kritieke componenten zijn gedupliceerd: er zijn twee circuits voor elke hoogspanningsverbinding en extra transformatoren in de hoogspanningsonderstations. Bovendien is het net ringvormig gestructureerd. Als er ergens een storing is, kunnen we de elektriciteit via een alternatieve route omleiden”* (TenneT TSO B.V., n.d.). Dit is in overeenstemming met de traditionele ‘N-1’ redundantiestructuur. Aangezien grote windgebeurtenissen echter tegelijkertijd grote gebieden kunnen treffen, kan men zich afvragen of de N-1 voldoende is, vooral als extratropische stormen in de toekomst voor kunnen komen (zie paragraaf 7.2.5).

7.1.5 Duisterluwte

Het bewerkstelligen van een energiesysteem dat bestand is tegen een Duisterluwte is momenteel de verantwoordelijkheid van energie-exploitanten. Duisterluwttes worden namelijk beschouwd als onderdeel van de operationele systeembalancering en leveringszekerheid. Het wordt dus aangenomen dat de gevolgen van Duisterluwttes door hen worden meegenomen in de ontwikkelingen van het toenemende aandeel variabele energie. Het is echter realistisch dat het risico niet volledig wordt afgedekt, dit is immers erg duur. Het is daarom belangrijk om de mogelijkheid van een extreme Duisterluwte te evalueren, bijvoorbeeld één die weken of maanden aanhoudt. Hoewel het waarschijnlijk is dat het energiesysteem een *eens-in-de-10-jaar Duisterluwte* kan opvangen, is het mogelijk dat het voor de energie-exploitanten te kostbaar is om zich te beschermen voor een extremere gebeurtenissen (bijv. 1:50 jaar). Daarom zijn vraaggerichte beleidsmaatregelen en internationale interconnecties cruciaal. Periodes van lage hernieuwbare energieopwekking kunnen als nodig worden opgevangen door internationale energie-import, gasturbines en reserves, en een beperkte hoeveelheid kleinschalige batterijopslag. Nederland beschikt momenteel over interconnecties met Duitsland, België, het Verenigd Koninkrijk, Noorwegen en Denemarken. Figuur 40 laat zien wat de benodigde capaciteit van de connecties zouden moeten zijn in de toekomst, en neemt in 2050 duidelijk sterk toe (Sijm, et al., 2017).



Figuur 40: Weergave van de vereiste interconnectorcapaciteit in Nederland 2015, 2030 en 2050

Verder zijn er binnen het huidige beleid adaptatie ontwikkelingen, zoals waterstofopslag in zoutcavernes en import van groene ammoniak. Gasunie is van plan om in 2031 de eerste zoutcaverne-installatie voor waterstofopslag in Nederland operationeel te hebben (Gasunie, n.d.). Hoewel deze locatie vooral is ontworpen voor snelle, kortetermijnbuffering van het aanbod, benadrukken zij ook het potentieel van zoutcavernes om de langetermijnopslagbehoeften te bevorderen. Er blijft echter een risico voor prijsspieken, wanneer een Duisterluwte meerdere landen in Europa treft.

7.2 Toekomstige adaptatiemaatregelen

In dit hoofdstuk verkennen we twee ontwikkelpaden voor de klimaatadaptatie van het energiesysteem. Eerst volgt een beschrijving van twee adaptatiestrategieën vanuit PBL: *intensiveren* en *transformeren*:

Intensiveren betekent dat het huidige systeem in stand gehouden wordt, aangevuld met technische maatregelen. De functie stuurt het systeem, locaties blijven grotendeels gelijk (*incrementeel, reactief, sterk vertrouwen in techniek/markt*). Dit scenario heeft een technische focus: het doorontwikkelen van het huidige beleid en gericht op oplossingen via technische maatregelen, waarbij in grote lijnen dezelfde dingen worden gedaan op dezelfde locaties, maar de effecten van klimaatverandering zoveel mogelijk worden verkleind. Daarmee is dit scenario *incrementeel, reactief* van aard, en vooral gericht op het beperken van de *gevoeligheid* van mensen en objecten voor de klimaatdreigingen.

Transformeren betekent dat het huidige systeem robuuster wordt ontwikkeld, gestuurd door water- & bodemsystemen en ruimtelijke herordening. Het systeem stuurt de functie waarbij de locatiekeuze cruciaal wordt geacht (*proactief, integraal, met gedrags- en vraagsturing*). In dit scenario wordt ervan uitgegaan dat er bij ontwikkelingen in hoge mate rekening wordt gehouden met de omgeving, en er wordt gezocht naar natuurgerichte oplossingen. Dit scenario is *proactief en integraal* van aard en draait meer om het verminderen van de *blootstelling* van mensen en objecten voor klimaatverandering.

Tabel 18 toont per klimaatdreiging de adaptatiemaatregelen onder beide scenario's. In de volgende paragrafen werken we per klimaatdreiging de adaptatiemaatregelen uit.

Tabel 18: Samenvatting toekomstige adaptatiemaatregelen

Klimaatdreiging	Intensiveren	Transformeren
<i>Rivieroverstroming</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Uniforme ophoging van 50cm voor alle MS/LS binnen niveau 1-5 	<ul style="list-style-type: none"> • Risicogestuurde ophoging van 50cm of 200cm voor alle HS/MS/LS binnen niveau 3-5 • Voor niveaus 1-2 (<1:3000 jaar) worden er met Ad-hoc bescherming gewerkt (mobiele flood-barriers)
<i>Extreme regenval</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Uniforme ophoging van 30cm voor alle MS/LS 	<ul style="list-style-type: none"> • Risicogestuurde ophoging van tot boven de 30cm voor alle MS/LS (locatie specifiek, kan dus ook +0,10 m) • Alleen voor rivieroverstromingen 1:100 jaar (niet 1:1000jaar)
<i>Zeespiegelstijging</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Verantwoordelijkheid adaptatie bij industrie • m.b.v. subsidies van de overheid • Locaties behouden, maar adapteren • Ophoging terreinen • Ontwikkeling van de compartimentering kritieke assets 	<ul style="list-style-type: none"> • Verantwoordelijkheid adaptatie bij overheid • d.m.v. strakkere uniforme normen, • Verplaatsen infrastructuur naar binnendijkse locaties • Gefaseerde uitrol vanaf hotspots met hogere blootstelling aan zeespiegelstijging
<i>Droogte</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Huidig centrales ontwikkelen • Inzet (hybride) closed-loop koeling • Koeltorens waar haalbaar • Optimalisatie in-/uitlaten • Open-loop met strikte monitoring en tijdelijke ontheffingen 	<ul style="list-style-type: none"> • Huidige centrales verplaatsen • Nieuwe centrales naar kust/estuaria • Gefaseerde uitrol vanaf hotspots met hogere blootstelling aan rivierdroogte • Lozingskader, zonder uitzonderingen naar 25 °C
<i>Windstormen</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ondergronds brengen van lijnen <150 kV – 220kV, waar mogelijk 380kV • Prioriteit stedelijke regio's en hoge-wind-corridors 	<ul style="list-style-type: none"> • Redundantie richting n-2 • d.m.v. extra circuits & transformatoren • d.m.v. interconnecties tussen deelnetten • Prioriteit bij knooppunten en hoge-wind-corridors
<i>Duisterluwte</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkeling centrale energie reserves • Waterstofopslag in zoutcavernes • Ondersteund door overheidsinvesteringen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkeling decentrale opslag (buurt-batterijen) • Vraag- & prijssturing via HEMS • Strategische import via internationale verbindingen

7.2.1 Rivieroverstromingen

Intensiveren

In het adaptatiescenario 'intensiveren' wordt in lijn met het huidige beleid ingezet op het generiek ophogen van onderstations, zonder specifiek risicoprofiel. Alle MS/LS-locaties binnen de Nederlandse overstromingsgebieden worden met 50cm verhoogd. HS worden niet opgehoogd, vanwege de ligging van de kritieke onderdelen, zie Tabel 19. Deze keuzes zijn gebaseerd op eerder werk binnen het NKWK-programma wateroverlast en overstroming (2023–2024) (Honingh, et al., 2024). In de adaptatiemaatregel wordt er gekeken naar een intensiverende ophoging van 50cm. Hierbij blijft een rivieroverstroming van >200cm nog mogelijk: een maatregel die alles generiek ophooft tot >200cm neemt vrijwel alle problemen m.b.t. rivieroverstromingen direct weg, maar is in praktijk niet realistisch.

Tabel 19: Effecten van adaptatiemaatregel 'intensiveren' op blootstelling aan rivieroverstroming

Blootstelling-niveau	2050, >50 cm overstroming			2050, >200 cm overstroming		
	HS	MS	LS	HS	MS	LS
0	0%	60.82%	65.78%	80.55%	84.88%	88.91%
1	0%	6.83%	8.55%	4.49%	3.74%	2.87%
2	0%	18.72%	17.0%	10.22%	7.61%	6.19%
3	0%	13.06%	8.45%	4.74%	3.67%	2.0%
4	0%	0.37%	0.18%	0.0%	0.07%	0.02%
5	0%	0.2%	0.04%	0.0%	0.03%	0.01%

De gevoeligheid van het systeem daalt in beide contextscenario's (beperkt en sterk risicoverhogend), vanwege het feit dat kritieke componenten nu structureel hoger liggen, en inundatie dus niet meer plaats vind bij een rivieroverstroming van >50cm. Tijdens het gefaseerd uitvoeren van de ophogingen blijft er echter gedurende langere tijd een periode waar risico's blijven bestaan. Per saldo neemt de operationele gevoeligheid van de sector af, met een de facto gevoeligheid die afhangt van uitvoeringsvolgorde en kwaliteit van uitgevoerd onderhoud. Het systeem blijft in deze adaptatiestrategie gevoelig voor diepe overstromingen van >200 cm.

De eindimpacts verschuiven in waarschijnlijkheid van voorkomen. Bij rivieroverstromingen is het aannemelijk dat storingen gelijktijdig optreden in distributie- en hoogspanningsinfrastructuur binnen het overstromingsgebied. Door de generieke ophoging wordt de kans dat een station daadwerkelijk geraakt kleiner. Op netwerkniveau daalt het verwachte aantal uitgevallen locaties per gebeurtenis en de cumulatieve uitvalduur. De economische eindimpact gaat in beide contextscenario's omlaag.

Transformeren

In het adaptatiescenario 'transformeren' worden onderstations eveneens opgehoogd, maar ditmaal risicogestuurd in plaats van generiek. Dit komt neer op een hoogte van 50cm voor alle MS/LS stations met kans op een 50cm overstroming binnen categorie 3/4/5, en 200cm voor alle HS/MS/LS stations met een kans van op een 200cm overstroming binnen categorie 3/4/5. Alleen infrastructuur in overstromingsgebieden met een voldoende kans op inundatie worden dus aangepakt; locaties met een zeldzamere blootstelling worden niet verhoogd. De beredening is dat investeringen dan beter aansluiten op feitelijke waarschijnlijkheden van de klimaatdreiging, en zijn daarom kosteneffectiever.

Resterende locaties, waarbij een risico wordt geaccepteerd, worden voorzien van ruimtelijke ad-hoc adaptatie, zoals mobiele flood-barriers (Tieleman, et al., 2024).

Tabel 20: Effecten van adaptatiemaatregel 'transformeren' op blootstelling aan rivieroverstroming

Blootstelling-niveau	2050, >50 cm overstroming			2050, >200 cm overstroming		
	HS	MS	LS	HS	MS	LS
0	0.0%	60.82%	65.78%	80.55%	84.88%	88.91%
1	0.0%	6.83%	8.55%	4.49%	3.74%	2.87%
2	0.0%	18.72%	17.0%	10.22%	7.61%	6.19%
3	0.0%	13.06%	8.45%	4.74%	3.67%	2.0%
4	0.0%	0.37%	0.18%	0.0%	0.07%	0.02%
5	0.0%	0.2%	0.04%	0.0%	0.03%	0.01%

De risicogestuurde ophoging richt zich op de blootstelling van >50cm én >200cm rivieroverstromingen in de blootstellingsniveaus (3–5; circa 1:30 tot 1:3000 jaar), zie Tabel 20. Locaties met een geschatte overstromingskans zeldzamer dan 1:3000 jaar worden dus niet opgehoogd, maar voorzien van ad-hoc adaptaties. Er zijn geen HS onderstations in categorie 4 en 5 die blootgesteld kunnen zijn aan een >200cm overstroming, vandaar dat deze niet worden verhoogt. Vanwege deze adaptatie neemt netwerkblootstelling sneller af in vergelijking met intensiveren (gerichtere adaptatie), en vindt de adaptatie ook juist plaats op de plekken waar het risico het grootst is.

De gevoeligheid van het systeem daalt onder deze aanpak, doordat onderhoud en uitvoering geconcentreerd worden op de hoogste risicolocaties: maatregelen kunnen sneller en met meer effect per bestede euro worden doorgevoerd. De keerzijde is dat infrastructuur in de lagere risicoklassen (1–2) niet wordt verhoogd en bij zeldzame, diepe overstromingen dus restrisico's zijn. Impact na de adaptatiemaatregel verschuift wederom door een lagere waarschijnlijkheid van uitval op netwerkniveau. Lokaal blijft het herstelpad vergelijkbaar wanneer een locatie desondanks onderloopt. Voor mens en cultuur is de verwachting dat de risicogestuurde adaptatie het aantal getroffen personen bij rivieroverstromingen verlaagt. Voor de economie verschuift de impact, evenals bij intensiveren, naar een lager niveau: door prioritering vallen wel minder stations uit en nemen zowel herstelkosten als verliezen door niet-geleverde elektriciteit af.

7.2.2 Extreme regenval

Intensiveren

In het adaptatiescenario 'intensiveren' wordt voortgebouwd op het huidig beleid: de bestaande infrastructuur blijft op haar plek en wordt, vergelijkbaar met adaptatie tegen rivieroverstromingen, met ophoging robuuster gemaakt. Concreet gaat dit om een generieke verhoging van alle onderstations met 30cm, een preventieve maatregel die voorkomt dat kritieke componenten door inundatie worden geraakt. In Tabel 21 is te zien dat alleen bij MS en LS en waterdiepteniveaus 4 en 5 er überhaupt geen risico is (grijze vakken). Door de maatregel worden alle risico's van LS onderstations die vallen niveau 4 gemitigeerd. Dit betekent dat bij intensiveren, een klein percentage van MS/LS stations nog blootgesteld blijft (niveau 5, groter dan 30cm, rode vakken).

Tabel 21: Effecten van adaptatiemaatregel 'intensiveren' op blootstelling aan extreme regenval

Waterdiepte-niveau	1:100 jaar gebeurtenis			1:1000 jaar gebeurtenis		
	HS	MS	LS	HS	MS	LS
0 (geen risico)	86.53%	83.35%	79.29%	78.55%	71.03%	63.86%
1	6.48%	7.07%	8.19%	6.73%	7.73%	7.59%
2	3.49%	4.25%	5.62%	4.74%	6.07%	6.99%
3	1.75%	2.40%	3.33%	3.49%	4.66%	6.14%
4	1.25%	1.79%	2.36%	4.49%	5.91%	8.69%
5	0.5%	1.14%	1.21%	2.0%	4.6%	6.75%

De ophoging verandert het voordoen van regenval niet en dus ook niet de hydraulische blootstelling (de diepte op de kaart). Wat wél verschuift is de effectieve blootstelling van kritieke componenten ten opzichte van die waterdieptes. In praktijk betekent dit dat waterdiepte-niveaus 1–4 (0–30 cm) de kritieke componenten niet meer bereiken; alleen inundaties van niveau 5 blijven een dreiging. Voor beide herhalingsstijden verschuift daarmee een groot deel van de infrastructuur naar “geen functioneel risico” bij dezelfde bui.

Omdat dit een generieke maatregel is die overal wordt toegepast bestaat er een tussenperiode met blootstelling op nog niet aangepaste locaties, en ook ná aanpassing blijft een restrisico bestaan. Per saldo neemt de operationele gevoeligheid af, waarbij het gerealiseerde effect afhangt van uitvoeringsvolgorde. Op netwerkniveau vertaalt dit zich in minder incidenten per jaar en een lagere cumulatieve uitvalduur; de ernst per individueel incident blijft vergelijkbaar met het huidige beleid.

Transformeren

In het adaptatiescenario 'transformeren' worden onderstations eveneens verhoogd, maar dit keer risico-gestuurd aan de hand van de benodigde hoogte per locatie en alleen voor 1:100 jaar gebeurtenissen. Op basis van de verwachte overstromingshoogte krijgen onderstations dus gerichte ophogingen, waarbij er nu ook meer dan 30cm opgehoogd kan worden. Deze aanpak vergt meer onderzoek en voorbereiding dan een uniforme verhoging, maar leidt op termijn tot minder onnodige ingrepen, en uiteindelijk minder gevoeligheid (minder onderstations die geraakt kunnen worden). Dit is terug te zien in Tabel 22. Ook te zien is dus dat, in tegenstelling tot bij intensiveren, alle dreigingen van 1:100 jaar (groene vakken) gemitigeerd worden, maar geen bij 1:1000 jaar (rode vakken). Er blijft bij deze risicogestuurde adaptatie dus een rest risico bestaan voor dreigingen van 1:1000 jaar.

Tabel 22: Effecten van adaptatiemaatregel 'transformeren' op blootstelling aan extreme regenval

Waterdiepte-niveau	1:100 jaar gebeurtenis			1:1000 jaar gebeurtenis		
	HS	MS	LS	HS	MS	LS
0 (geen risico)	86.53%	83.35%	79.29%	78.55%	71.03%	63.86%
1	6.48%	7.07%	8.19%	6.73%	7.73%	7.59%
2	3.49%	4.25%	5.62%	4.74%	6.07%	6.99%
3	1.75%	2.40%	3.33%	3.49%	4.66%	6.14%
4	1.25%	1.79%	2.36%	4.49%	5.91%	8.69%
5	0.5%	1.14%	1.21%	2.0%	4.6%	6.75%

De blootstelling wordt onder transformeren selectief verminderd: bestaande stations in risicogebieden krijgen onderhoud en verhoging, terwijl nieuwe stations op veiligere locaties komen. Zo sluit de bescherming aan bij de daadwerkelijke dreiging. De gevoeligheid van het systeem daalt verder dan bij de generieke uitrol van intensiveren, omdat kwetsbare locaties geprioriteerd worden. Zo neemt de kans dat een storing maatschappelijk doorwerkt gerichter af per verhoging. De lokale ernst per incident blijft gelijk: valt een locatie toch uit, dan zijn oorzaak en herstelpad vergelijkbaar met het huidige beleid.

7.2.3 Zeespiegelstijging

Intensiveren

In het adaptatiescenario 'intensiveren' blijft de verantwoordelijkheid om adaptatiemaatregelen te treffen primair bij de bedrijven. De lijn van het huidige systeem wordt doorgezet: locaties als Maasvlakte, Sloe en Eemshaven blijven waar ze zijn, met individueel maatwerk en beperkt aantal uniforme normen. De overheid versnelt echter de uitvoering via gerichte subsidies, maar legt weinig extra verplichtingen op. Concreet gaat het om het stimuleren van ophoging van terreinen, waterdichte afwerking, en compartimentering van kritieke assets, zodat incidentele overstromingen niet direct leiden tot problemen. Doel is de bestendigheid tegen zeespiegelstijging vergroten zonder grootschalige verplaatsing of zware verplichtingen.

Ten opzichte van het huidige beleid verandert de ruimtelijke spreiding van blootgestelde assets slechts beperkt: buitendijkse clusters blijven risico hotspots. Het verschil zit hem juist in de functionele blootstelling van kritieke delen. Door deze adaptatie neemt het aantal componenten dat bij inundaties uitvalt af, en wordt de frequentie waarmee water een installatie binnendringt kleiner. Kaarten van overstromingsdiepte en -kans (zoals voor de Rotterdamse haven) zijn dan leidend voor prioritering van adaptatie. De gevoeligheid van kritieke componenten, en de infrastructuur als geheel zullen dalen vanwege de adaptatiemaatregel. Wat is

De impact van zeespiegelstijging verschuift daarmee in frequentie en schaal. Onder huidig beleid leidt een kustoverstroming vooral tot prijseffecten en maatschappelijke kosten door tijdelijke productie-uitval en herstelkosten; het prijssignaal raakt vooral huishoudens met dynamische contracten. Bij intensiveren blijft dit bestaan, maar door het stimuleren van adaptatie bij bedrijven komt uitval minder voor.

Transformeren

In het transformerend scenario kiest de overheid voor strakkere, uniformere normen en actieve ruimtelijke sturing: er is minder vrijheid bij bedrijven. In plaats van bestaande locaties vooral te versterken (zoals bij intensiveren), worden per locatie en risicoprofiel nieuwe assets op veilige plekken gerealiseerd en bestaande installaties verplaatst en herbouwd. De uitrol start gefaseerd bij cruciale locaties. De publieke sturing en subsidie-intensiteit zijn hoger dan bij intensiveren, wat de uitvoeringszekerheid vergroot, maar ook meer publieke financiering vraagt.

De blootstelling wordt hiermee structureel verkleind. Nieuwe waterstofassets worden, waar haalbaar, verplaatst buiten kwetsbare buitendijkse zones. Hotspotkaarten van bijvoorbeeld de haven van Rotterdam, sturen dan de volgorde van aanpak; rond de Sloe centrale kan de risicoschaal worden gebruikt om objecten stapsgewijs uit hogere risicoklassen te verplaatsen. De gevoeligheid daalt in dit scenario verder dan bij intensiveren, omdat de zekerheid van uitvoering toeneemt door

overheidssturing. Voor geadapteerde assets zullen de restrisico's kleiner zijn dan onder intensiveren. De eindimpacts vallen lager uit voor mens en cultuur en economie: productie-onderbrekingen zijn zeldzamer. Voor natuur en milieu nemen de risico's zoals kans op ammoniaklekkages bij overstroming wederom meer af dan bij intensiveren.

7.2.4 Droogte

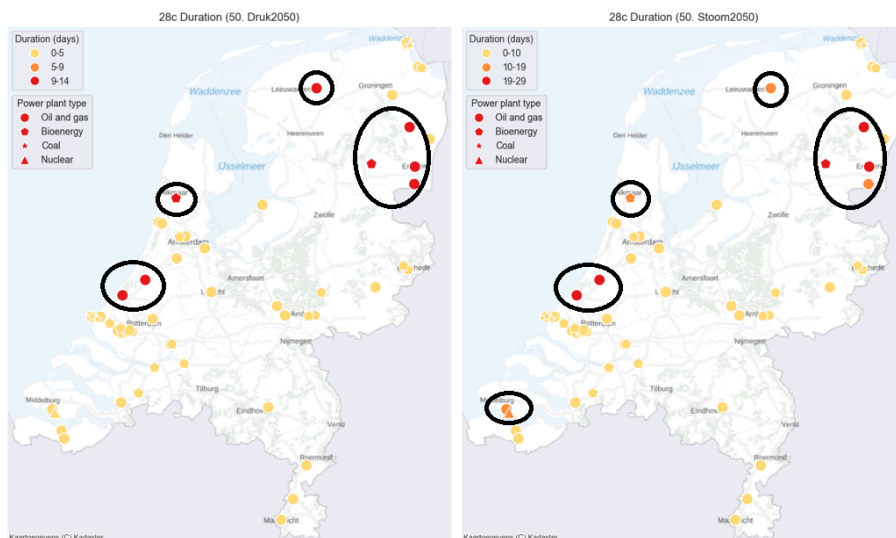
Intensiveren

Bij het adaptatiescenario 'intensiveren' blijven de bestaande riviergebonden locaties (die niet uitgefaseerd zijn) in gebruik. Uitval van de centrales wordt voorkomen door technische maatregelen te treffen. De overheid stimuleert het voortbouwen op huidige kader voor lozingstemperaturen (28 °C, met mogelijke ontwikkelingen naar 25 °C) en de verdringingsreeks waarin energie doorgaans als categorie 2 valt (Deltares, 2024). Waar mogelijk worden centrales omgebouwd naar (hybride) closed-loop koeling met waterhergebruik en worden inlaat/uitlaat geoptimaliseerd per situatie, zodat de ecologische impact op de rivier afneemt terwijl de centrale beschikbaar blijft. Als koeltorens ruimtelijk of financieel niet haalbaar zijn, blijft een open-loop in gebruik onder striktere monitoring; in uitzonderlijke situaties kan nog steeds via tijdelijke ontheffingen stilval worden voorkomen, met duidelijke ecologische randvoorwaarden. Dit is een preventieve adaptatie: de gevoeligheid van installaties voor droge perioden wordt omlaag gebracht zonder verplaatsing van de infrastructuur.

De blootstelling blijft in ruimtelijke zin grotendeels gelijk aan de huidige situatie: de meeste centrales liggen langs de grote rivieren en ondervinden dus dezelfde temperatuur- en droogtedynamiek. Estuaria en diepe wateren (zoals Sloe/Borssele) zijn hierbij doorgaans minder kwetsbaar. Omdat locaties in dit adaptatiescenario niet worden verplaatst, blijven dezelfde clusters blootgesteld: de gevoeligheid daalt dus door de technische mitigaties. Vanwege de adaptatiemaatregelen verschuift uitval tijdens droge perioden van "hard stoppen" naar geplande, kortere terugschakeling. In een sterk risicoverhogend klimaatbeeld duren overschrijdingen vaker langer, maar óók dan dempen de maatregelen de kans en duur van productiestop ten opzichte van het huidige beleid. De impact verschuift dus in frequentie en duur. Onder het huidige beleid manifesteert droogte zich via prijsspieken door terugschakeling of stilval van centrales aan de rivier. Ook na het adaptatiebeleid intensiveren, blijft die dynamiek bestaan, echte krimpt de ernst.

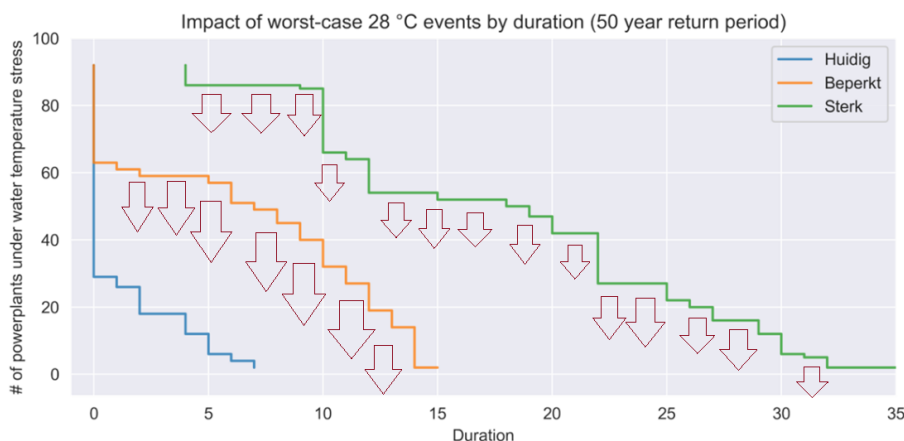
Transformeren

In het transformerend scenario verlegt beleid de blootstelling structureel via strakkere normen (lozingskader 25 °C, zonder uitzonderingen) en actieve ruimtelijke sturing: nieuwe kern-, gas- en waterstofcentrales worden niet langer langs de grote rivieren gepositioneerd, maar aan kust en estuaria met ontzilting voor proces- en koelwater. Daarnaast worden bestaande rivierlocaties worden gefaseerd verplaatst; vergunningen worden expliciet gekoppeld aan regionale droogterisicoprofielen en de prioritering uit de verdringingsreeks. Ten opzichte van intensiveren, pakt transformeren de blootstelling aan via het vermijden van nieuwe investeringen langs "warme rivieren". Dit heeft een directe impact op de gevolgen van de klimaatdreiging, maar vergt ook veel hogere investeringen. We gebruiken wederom de overschrijdingskaarten als sturingsbasis, zie Figuur 41. Centrales en clusters met de langste overschrijdingsduren zijn gemarkeerd en worden in deze adaptatie als eerste verplaatst. Zo verschuift capaciteit uit de hoogste risicoklassen, daalt het aandeel "rode" centrales en neemt het totaal aan blootgestelde dagen op systeemniveau af.



Figuur 41: Geprioritiseerde centrales voor verplaatsing binnen adaptatiemaatregel 'transformeren'

Eventuele effecten beperken zich vaker tot kleine, kortdurende prijsprikkelers of logistieke beperkingen, terwijl ecologische druk en vergunning knelpunten op rivieren afnemen. Vanwege deze adaptatie verschuift de verdelingslijn van de duurklassen omlaag, zie Figuur 42.

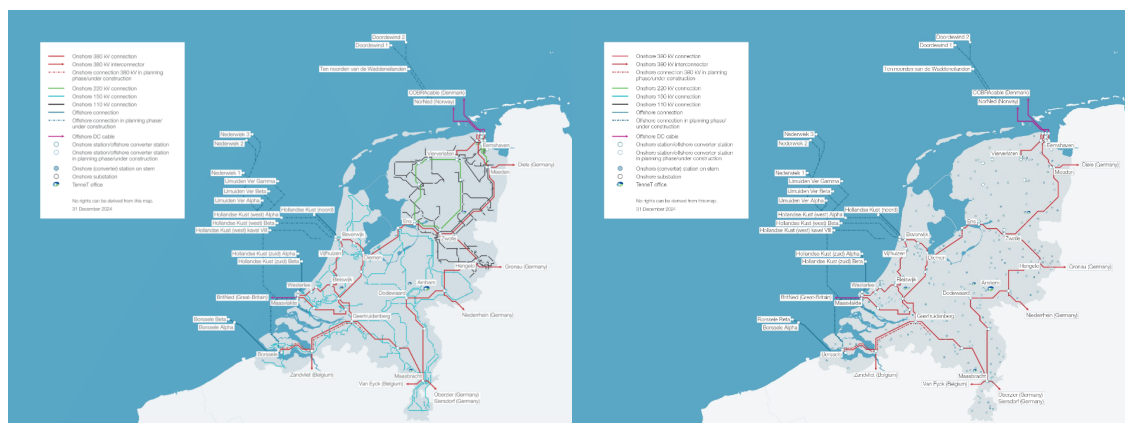


Figuur 42: Notities droogtegrafiek van afname waterstress bij adaptatiemaatregel 'transformeren'

7.2.5 Windstormen

Intensiveren

In adaptatiescenario 'intensiveren' staat het ondergronds brengen van hoogspanningsleidingen centraal. Wat onder huidig beleid al deels gebeurt (ondergronds bij nieuwe aanleg of ondergrondse vervanging vergelijkbare lengte), wordt bij intensiveren opgeschaald: alle bestaande bovengrondse verbindingen (<380kV) worden vervangen door ondergrondse verbindingen. De prioriteit ligt bij trajecten waar hoge windsnelheden samenkomen met grote maatschappelijke schade bij uitval: stedelijke regio's en kritieke corridors gaan eerst. Het effect is preventief: windgerelateerde storingen aan lijnen nemen sterk af, en herstel na een storm gaat sneller doordat er minder fysieke schade aan verbindingen optreedt.



Figuur 43: Huidige hoogspanningsnet (L), met >380kV ondergronds (R) (TenneT TSO B.V., 2025)

De blootstelling van lijnen door extreme wind neemt hierdoor dus fors af, aangezien er veel minder lijnen boven de grond zijn, zie Figuur 43. Resterende blootstelling zit in delen van het netwerk die (nog) niet ondergronds kunnen worden aangelegd. De gevoeligheid van het systeem daalt hierdoor: ondergrondse kabels zijn praktisch niet gevoelig voor wind. De impact van windstormen verschuift van grootschalige regionale uitval naar lokale verstoringen, waar de adaptatie (nog) niet uitgevoerd is.

Transformeren

In het 'transformeren' scenario staat redundantie centraal: het netwerk wordt zo ingericht dat storingen gestructureerd kunnen worden opgevangen (richting n-2), zodat uitval lokaal blijft en niet doorwerkt naar naastliggende gebieden. Waar onder huidig beleid n-1 de norm is, wordt dit in transformerende scenario opgeschaald met extra circuits, transformatoren en meer verbindingen tussen deelnetten. De prioriteit ligt bij knooppunten met hoge afnemersdichtheid, trajecten met de hoogste windsnelheden en clusters waar uitval tot grote cascade-effecten leidt. Het effect is, in vergelijking met intensiveren, zowel *preventief* (hogere faaltolerantie) als *reactief* (effectievere mogelijkheid tot herverdelen van levering na schade), waardoor grootschalige consequenties minder waarschijnlijk worden.

Daarmee verandert de ruimtelijke situatie op een wezenlijk andere manier dan bij intensiveren: de blootstelling van de lijnen aan wind neemt per saldo toe: er komen extra bovengrondse verbindingen bij om n-2 te kunnen verwezenlijken. Op cruciale locaties groeit dus de lengte aan bovengrondse lijnkilometers. De gevoeligheid van het systeem gaat echter juist omlaag. De component-gevoeligheid van een bovengrondse lijn voor windstormen is in essentie ongewijzigd, maar door extra redundantie en meer koppelingen leiden lokale lijnstoringen minder snel tot grootschalige uitval.

De eindimpact verschuift daardoor van potentieel brede regionale uitval naar lokaal/regionaal begrensde en kortdurende verstoringen. Bij zware stormen kunnen nog steeds lijnen uitvallen, maar het netwerk vangt dit op. Alleen in extreem zeldzame situaties waarin de schade het n-2-niveau overschrijdt, kan groter uitval ontstaan. Waar intensiveren (momenteel) technisch beperkt is tot 380 kV, kan transformeren juist op dat spanningsniveau adapteren.

7.2.6 Duisterluwte

Intensiveren

In dit scenario wordt aanvullend op het huidige leveringszekerheidsbeleid zwaarder ingezet op centrale buffers en netwerkreserves, met een stimulerende rol van de overheid. Duisterluwtes worden primair overbrugt d.m.v. opslag en centrale reservevoorzieningen, waaronder waterstofopslag in zoutcavernes, in lijn met de nu voorziene ontwikkeling richting 2031 (Gasunie, n.d.). Deze investeringen zijn over het algemeen duur, en moeten door overheidsinvesteringen ondersteund worden. Bestaande afspraken worden doorgezet en geïntensiveerd, met als doel dat langdurige Duisterluwtes binnenlands kunnen worden overbrugd zonder aanvullende maatregelen buiten het centrale systeem; extra inzet op internationale import is geen onderdeel van deze adaptatiescenario.

De blootstelling van het energiesysteem vanwege Duisterluwte verandert hierbij niet: de klimaatdreiging en de ruimtelijke verdeling van zon- en wind blijven gelijk aan het huidige beleid. De blootstelling wordt pas verminderd als er wordt overgestapt op minder wind en zon energie. In het beperkt risicoverhogend contextscenario, met hogere elektrificatie, valt de blootstelling relatief hoger uit dan in zowel de huidige situatie als het sterk risicoverhogend scenario. De gevoeligheid van het systeem neemt door de adaptatie af, doordat centrale opslag en extra netwerkreserves langere perioden met lage opwek kunnen overbruggen. Zolang buffers goed zijn afgestemd in het beleid, blijven prijseffecten en leveringsrisico's beperkt; pas bij zeer langdurige of herhaalde Duisterluwtes nemen prijzen toe.

Transformeren

Bij adaptatiemaatregel transformeren ligt de focus op het strategisch importeren van energie en het ontwikkelen van lokale flexibiliteit. De nadruk verschuift t.o.v. intensiveren van centrale opslag naar decentrale opslag (buurt- en thuisbatterijen), ondersteund door vraag- én prijssturing via een Home Energy Management System (HEMS), zodat verbruik tijdelijk kan meebewegen tijdens een Duisterluwte. De innovatie van lokale opslag en effectieve HEMS wordt in dit scenario gestimuleerd door overheidsinvesteringen. Tegelijk wordt de rol van internationale interconnecties vergroot; extra importcapaciteit en slimme inzet daarvan helpen tekorten dempen, terwijl het binnenlandse systeem dankzij lokale flexibiliteit minder afhankelijk wordt van centrale reserves.

De blootstelling aan Duisterluwte verandert in de transformerende adaptatie evenmin. Maar de gevoeligheid wordt sterk aangepakt, doordat de omgang met de vermindering van het energie aanbod lokaal plaatsvindt: buurt- en thuisbatterijen en HEMS dempen direct de gevolgen voor afnemers. Strategisch importeren is daarnaast dus een expliciet onderdeel van de adaptatiescenario, echter kunnen handelspartners bij een Europees regionale Duisterluwtes gelijktijdig geraakt worden, wat moeilijkheden qua strategisch import met zich mee kan brengen, zie Figuur 21.

7.3 Samenvatting effecten van toekomstige adaptatiemaatregelen

In Tabel 23 wordt er weergegeven hoeveel impact elke adaptatiemaatregel heeft, door te kijken naar de specifieke afname van de eindimpact per categorie op een 5-punts-schaal. Voor interpretatie is er per adaptatie (intensiveren/transformeren) per klimaatdreigingen aangegeven met pijltjes (↓↓↓↓/↓↓↓) hoeveel verandering er wordt bewerkstelligd. Als de impact in de huidige situatie al laag is, kan het uiteraard niet naar een lagere categorie in de schaal, maar kan de adaptatiemaatregel nog steeds wel relevante impact hebben.

Tabel 23: Samenvatting effecten van toekomstige adaptatiemaatregelen op de eindimpacts

Dreiging		Mens en cultuur		Natuur en milieu		Economie	
		Beperkt	Sterk	Beperkt	Sterk	Beperkt	Sterk
Rivier overstroming	Huidig	Middel	Hoog	N/A	N/A	Laag-Middel	Middel
	Intensiveren	Laag (↓↓)	Middel (↓↓)	N/A	N/A	Laag (↓)	Laag (↓↓)
	Transformeren	Laag (↓↓)	Middel (↓↓)	N/A	N/A	Laag (↓)	Laag (↓↓)
Regenval	Huidig	Middel	Middel	N/A	N/A	Laag	Laag
	Intensiveren	Laag (↓↓)	Laag (↓↓)	N/A	N/A	Laag	Laag
	Transformeren	Laag (↓↓)	Laag (↓↓)	N/A	N/A	Laag	Laag
Zeespiegel stijging	Huidig	Laag	Laag	Laag	Laag	Middel	Middel
	Intensiveren	Laag	Laag	Laag	Laag	Laag-Middel (↓)	Laag-Middel (↓)
	Transformeren	Laag	Laag	Laag	Laag	Laag-Middel (↓)	Laag-Middel (↓)
Droogte	Huidig	Laag	Laag	Laag-Middel	Laag-Middel	Laag-Middel	Middel
	Intensiveren	Laag	Laag	Laag-Middel	Laag (↓)	Laag (↓)	Laag (↓↓)
	Transformeren	Laag	Laag	Laag-Middel	Laag (↓)	Laag-Middel	Laag (↓↓)
Wind stormen	Huidig	Hoog	Hoog	Laag	Laag	Laag-Middel	Laag-Middel
	Intensiveren	Laag-Middel (↓↓↓)	Middel (↓↓)	Laag	Laag	Laag (↓)	Laag (↓)
	Transformeren	Laag-Middel (↓↓↓)	Middel (↓↓)	Laag	Laag	Laag (↓)	Laag (↓)
Duisterluwte	Huidig	Laag	Laag	N/A	N/A	Laag-Middel	Laag-Middel
	Intensiveren	Laag	Laag	N/A	N/A	Laag (↓)	Laag (↓)
	Transformeren	Laag	Laag	N/A	N/A	Laag (↓)	Laag (↓)

8 Limitaties

Hier beschrijven we de belangrijkste beperkingen van onze analyse, zodat de analyse in de juiste context wordt geïnterpreteerd. Het hoofdstuk onderscheidt eerst algemene limitaties en onzekerheden en specificeert vervolgens per klimaatdreiging welke kennishiaten uit ons onderzoek naar voren komen.

8.1 Algemeen

- **Scope en toepassingsniveau:** Onze aanpak is gericht op systeeminzichten op nationaal niveau. Dat betekent dat we breedte boven diepte kiezen: per onderdeel geven we ordegrottes en relatieve kwetsbaarheden, maar geen project specifieke ontwerpadviezen, wat dus consequenties heeft voor de bruikbaarheid voor specifieke strategieën.
- **Moeilijkheden kwantificeren cascades:** Mogelijke cascade-effecten van het energiesysteem op andere sectoren zijn lastig te kwantificeren; onze resultaten leggen deze effecten indicatief, maar niet diepgaand, vast.

8.2 Rivieroverstromingen en extreme regenval

- **Realistische ruimtelijke overstromingsevenementen i.p.v. lokale inundatiedieptes:** Voor toekomstige analyses kunnen de resultaten worden verbeterd door gebruik te maken van realistische, ruimtelijk samenhangende overstromingsevenementen in plaats van uitsluitend lokale inundatiedieptes. Gegeven de gekozen risicokwantificering van dit project is dit laatste minder bruikbaar. Aanvullend onderzoek is nodig naar de kans dat de wettelijke normen in 2050 daadwerkelijk worden gehaald en wat dit betekent voor restrisico's.
- **Ontwerpeigenschappen ontbreken:** De locaties van infrastructuur zijn bekend, maar specifieke ontwerpeigenschappen ter plaatse niet. Die kunnen sterk variëren (bijv. distributiehuisjes met beschermende muren) en zijn bepalend voor de gevoeligheid. Hierdoor kan kwetsbaarheid lokaal worden over- of onderschat.

8.3 Zeespiegelstijging

- **Onbekende buitendijkse bescherming en besluitvorming:** Er is beperkte zichtbaarheid of en welke overstromingsmaatregelen in buitendijkse gebieden al zijn getroffen en in hoeverre energiebeheerders zeespiegelstijging expliciet meenemen in assetbeheer en investeringsbesluiten. Dit kan leiden tot over- of onderschatting van de risico's, en vergt in een vervolgonderzoek een gerichte inventarisatie.
- **Kwetsbaarheid waterstofinstallaties slecht gedocumenteerd:** Er is weinig literatuur beschikbaar over de gevoeligheid van waterstofproductie- en opslagfaciliteiten voor overstromingen, met name bij zout water. Hierdoor zijn onze aannames wellicht conservatief.

8.4 Droogte

- **Afwezigheid data:** Er bestaat geen publiek toegankelijke dataset die de frequentie en duur van stilstand van elektriciteitscentrales door koelwaterschaarste vastlegt. De analyse is daardoor aangewezen op verwachtingen en aannames.
- **Onzekere prijsdoorwerking:** De relatie tussen koelwaterbeperkingen, beschikbaar productievermogen en import/export is contextafhankelijk. Prijseffecten zijn daardoor lastig vast te stellen en worden hier dus indicatief geschat.
- **Beperkte ruimtelijke samenhang in WABES-data:** WABES levert station-per-station informatie over afvoer en watertemperatuur. Tijdens regionale droogte zullen echter gelijktijdige beperkingen optreden op meerdere locaties. Deze verbintenis ontbreekt in de beschikbare data, waardoor systeemimpact lastig in te schatten valt.

8.5 Winstormen

- **Beperkte projecties van windstoten:** Er zijn bij het KNMI geen robuuste projecties van toekomstige windstootstatistieken beschikbaar (pieksnelheden i.p.v. gemiddelden). Daardoor ontbreekt een consistente basis om de blootstellingen van de energieinfrastructuur te kwantificeren; ontwikkeling van dergelijke projecties zijn daarom wenselijk.
- **Onzeker toekomstig stormklimaat:** Hoe zware stormen in Noordwest-Europa in frequentie en intensiteit toenemen is onzeker; studies komen tot uiteenlopende uitkomsten. We hebben dit daarom slechts beperkt meegenomen, waardoor conclusies over rest-risico's indicatief zijn.

8.6 Duisterluwte

- **Geen eenduidige definitie:** De uitkomsten van een analyse naar Duisterluwte hangen sterk af van hoe je 'Duisterluwte' definieert (duur, drempelwaarden, gebied). Door het ontbreken van een standaard is vergelijking tussen studies lastig en zijn trends onzeker.
- **Afhankelijkheid van systeemontwerp:** De impact op leveringszekerheid hangt af van kwesties zoals de toekomstige energiemix, interconnectoren, opslag, en vraagrespons. Deze keuzes bepalen of Duisterluwttes leiden tot knelpunten; onze huidige representatie hiervan is vereenvoudigd en vanwege de scope van het project niet volledig systeem-specifiek.

9 Vervolgonderzoek

In dit hoofdstuk doen wij een aantal suggesties voor mogelijke vervolgstappen en benoemen wij aspecten die in dit onderzoeksrapport niet of beperkt zijn uitgewerkt. Deze vervolgstudies kunnen helpen om de robuustheid van het Nederlandse energiesysteem onder veranderende klimaatomstandigheden beter te kwantificeren.

9.1 Integreeren klimaatdreigingen met energiesysteemmodel

Wij raden aan om in vervolgonderzoek klimaatdreigingen te integreren in een bestaand energiemodel. Dit zou een koppeling moeten zijn tussen een ruimtelijk model, om schade te modelleren, en een systeemmodel om de markteffecten te simuleren. Hiermee kunnen verschillende (combinaties van) klimaatscenario's doorgerekend worden, om zo de aanbod en prijseffecten beter in beeld te brengen. Door deze twee aspecten te integreren kunnen de eindimpacts en investeringsbeslissingen systematisch worden doorgerekend.

9.2 Verdieping op combinaties van klimaatdreigingen

Een relevante toevoeging aan onze analyse is een verdieping in de combinatie van afzonderlijke klimaatdreigingen. In vervolgonderzoek kan bijvoorbeeld nader worden onderzocht hoe verschillende dreigingen elkaar mogelijk versterken, en welke combinaties vanuit systeemoptiek het meest kritisch zijn. Dit kan geïntegreerd worden in een energiemodel, zie paragraaf 9.1, om realistische faalscenario's te bestuderen in plaats van geïsoleerde gebeurtenissen.

9.3 Verdieping op ontwikkelingen van assets en kwetsbaarheden

In onze analyse hebben we uitvoerig gekeken naar de blootstelling van het energiesysteem aan klimaatdreigingen. Echter zijn er continue ontwikkelingen van assets in het energienetwerk en is het niet altijd duidelijk hoe kwetsbaar ze zijn: bijvoorbeeld door reeds uitgevoerde adaptatie. Daarom is er wat betreft de blootstellingen en kwetsbaarheden verdere verdieping aan te raden. Dit betreft verdieping rondom de functies van afzonderlijke assets en de vraag welke onderdelen daadwerkelijk kritiek zijn voor het functioneren van het energiesysteem. Er is daarnaast ook verdere verdieping nodig rondom de ruimtelijke keuzes: waar wordt nieuwe energie-infrastructuur gepland, en in hoeverre is daarbij rekening gehouden met toekomstige klimaatdreigingen. Op dit moment gaan we er in de analyse van uit dat het energiesysteem wordt blootgesteld aan de geschetste dreigingen, terwijl in praktijk bij ontwerp en vergunningverlening mogelijk al adaptatiemaatregelen zijn voorzien. Toegang tot relevante documenten van overheden of netbeheerders kan helpen dit beter mee te nemen.

9.4 Verkenning van internationale dimensie

Tot slot is het relevant om de internationale dimensies van het energienetwerk verder te verkennen, iets wat wij in onze analyse alleen hebben meegenomen bij het verkennen van Duisterluwtes. Klimaatrisico's in het buitenland kunnen namelijk via netwerkeffecten het Nederlandse energiesysteem aantasten. Vervolgonderzoek kan in kaart brengen welke typen risico's over de grens relevant zijn en

hoe deze zich in verschillende scenario's ontwikkelen. Door deze internationale context systematisch mee te nemen, kan beter worden beoordeeld hoe kwetsbaar het Nederlandse energiesysteem is wanneer het afhankelijk is van import. Bijvoorbeeld tijdens een langdurige Duisterluwte, of een combinatie van meerdere klimaatdreigingen, zie paragraaf 9.2.

10 Conclusie

Dit onderzoek had als doel om de huidige en toekomstige klimaatrisico's voor het Nederlandse energiesysteem in kaart te brengen. We hebben hierbij de nadruk gelegd op zes klimaatdreigingen: rivieroverstromingen, extreme regenval, droogte, zeespiegelstijging, windstormen en Duisterluwte. Per klimaatdreiging zijn de waarschijnlijkheid, blootstelling en kwetsbaarheid in beeld gebracht, alsmede de mogelijke impacts voor mens, natuur en economie. Deze analyse is uitgevoerd voor twee toekomstige scenario's onder het huidige beleid. Daarnaast hebben wij twee adaptatiestrategieën uitgewerkt; één waar de nadruk ligt op technische oplossingen (intensiveren) en één waar transformatie en ruimtelijke planning centraal staat (transformeren).

De toekomstige risico's die zich onder de huidige beleidssituatie ontwikkelen zijn in de meeste gevallen beperkt en grotendeels beheersbaar. Door redundantie in het elektriciteitsnet, wettelijke normen voor waterveiligheid, en aanwezigheid van baseload en regelbaar vermogen zijn mogelijk door klimaat veroorzaakte storingen vaak lokaal. Lokale impacts kunnen echter wel tot nationale prijsstijgingen leiden, vooral als gevolg van langdurige droogte, Duisterluwte en schade aan energiecentrales. Uit onze analyse blijkt echter dat een combinatie van versnelde klimaatverandering in combinatie met een veranderende energiemix ook voor nieuwe risico's kan zorgen. In het beperkt risicoverhogend scenario, met toenemende elektrificatie, kan de blootstelling van het energiesysteem snel toenemen, met hogere risico's als gevolg. In het sterk risicoverhogend scenario neemt juist de waarschijnlijkheid snel toe omdat klimaatdreigingen vaker voorkomen en de ruimte om aanvullende maatregelen te nemen beperkter is. De scenario's laten zien dat klimaatrisico's geen stabiele achtergrondfactor zijn, maar sterke interacties heeft met de toekomstige ontwikkelingen in het nationale energiesysteem zelf.

Adaptatie is daarom een cruciale strategische opgave. De aankomende investeringen en keuzes die gemaakt moeten worden komende jaren bieden een belangrijk venster om toekomstige kwetsbaarheden tijdig te verkleinen. Dit kan door middel van verschillende adaptatiemaatregelen. Voorbeelden hiervan zijn het risicogestuurd ophogen van onderstations en het versneld ondergronds brengen van hoogspanningslijnen. Zulke technische maatregelen kunnen veel van de geïdentificeerde risico's verkleinen. Daarnaast kunnen risico's verminderd worden door middel van klimaatbewuste ruimtelijke sturing. Voorbeelden hiervan zijn het vermijden van riviergebonden locaties voor nieuwe waterstofcentrales en het gefaseerd verplaatsen van kwetsbare assets in kustgebieden. Deze maatregelen zijn het meest effectief wanneer verwachte klimaatrends worden geïntegreerd met de toekomstige ontwikkeling van het energiesysteem. Uiteindelijk zal een combinatie van technische en ruimtelijke interventies nodig zijn om toekomstige klimaatrisico's beheersbaar te houden.

Ons rapport benadrukt daarom dat klimaatadaptatie niet los staat van de energietransitie. Wij raden daarom aan om meekoppelkansen te identificeren en deze, waar mogelijk, te benutten. Dit maakt samenwerking tussen publieke en private partijen noodzakelijk, vooral als het gaat om het ontwikkelen van nieuwe normen, het maken van klimaatbewuste ruimtelijke keuzes en het stimuleren van adaptief gedrag.

Referenties

- ACER. (2023). *Union-wide increcapacity report 2023*. Agency of the Cooperation of Energy Regulators. Opgehaald van https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/UIC_report_2023.pdf
- ACM. (2022). *Vaststelling Value of Lost Load*. Autoriteit Consument & Markt. Opgehaald van <https://www.acm.nl/system/files/documents/vaststelling-value-of-lost-load.pdf>
- Atlas Leefomgeving. (n.d.). *Kaarten van Atlas leefomgeving*. Opgehaald van Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat: <https://www.atlasleefomgeving.nl/>
- Bard, S. (2023, juli 31). *Preventing Wildfires Sparked by Power Lines*. Opgehaald van San Diego State University: <https://www.sdsu.edu/news/2023/07/preventing-wildfires-sparked-by-power-lines#:~:text=There%20are%20several%20potential%20ways,fact%2C%20the%20Oregon%20Department%20of>
- Bars, D., & Drijfhout, S. (2025). Connecting the Past and the Future to Build Regional Sea-Level Projections. *Earth S Future*, 13(8). doi:<https://doi.org/10.1029/2024ef005623>
- Bevacqua, E., Rakovec, O., Schumacher, D. L., Kumar, R., Thober, S., Samaniego, L., . . . Zscheischler, J. (2024). Direct and lagged climate change effects intensified the 2022 European drought. *Nature Geoscience*, 17, 1100-1107.
- Bilfinger. (n.d.). *Sustainable energy from sea to land through high-voltage cables*. Opgehaald van Bilfinger: <https://www.bilfinger.com/en/sustainable-energy-from-sea-to-land-through-high-voltage-cables/>
- Boogert, A., & Dupont, D. (2005). The nature of supply side effects on electricity prices: The impact of water temperature. *Economic Letters*, 88, 121-125. doi:10.1016/j.econlet.2004.12.029
- CBS. (2019, March 15). *Natural gas trade deficit for the first time in 2018*. Opgehaald van Statistics Netherlands: <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2019/11/in-en-uitvoerwaarde-van-aardgas>
- CBS. (2024, March 7). *Bijna helft elektriciteitsproductie komt uit hernieuwbare bronnen*. Opgehaald van Statistiek Netherlands: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2024/10/bijna-helft-energieproductie-komt-uit-hernieuwbare-bronnen>
- CBS. (2024). *Energy balance sheet; supply and consumption*. Opgehaald van Statistics Netherlands: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/en/dataset/82883ENG/table?ts=1731323181525>
- CBS. (2024). *Huishoudens; samenstelling groote, regio, 1 januari*. Opgehaald van Statistics Netherlands: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/81955NED/table>
- CBS. (2024). *Zonnestroom; installaties, vermogen en opbrengts naar regio*. Opgehaald van Statistics Netherlands: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/85005NED/table>
- CBS. (2025). *Huishoudens nu*. Centraal Bureau voor de Statistiek. Opgehaald van <https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/dashboard-bevolking/woonsituatie/huishoudens-nu>
- CE Delft. (2022). *The natural gas phase-out in the Netherlands*. CE Delft. Opgehaald van https://ce.nl/wp-content/uploads/2022/04/CE_Delft_210381_The_natural_gas_phase-out_in_the_Netherlands_DEF.pdf
- CIW. (2004). *Beoordelingssystematiek warmtelozing*. Commissie Integraal Waterbeheer . Rijkswaterstaat. Opgehaald van https://iplo.nl/publish/pages/130600/ciw42004-11beoordelingssystematiek_warmtelozingen.pdf
- Damm, A., Köberl, J., Pretenthaler, F., Rogler, N., & Töglhofer, C. (2017). Impacts of +2 °C global warming on electricity demand in Europe. *Climate Services*, 7, 12-30.

- Deloitte. (2023, September 11). *Energy storage: Development of the market*. Opgehaald van Deloitte Netherlands: <https://www.deloitte.com/nl/en/Industries/energy/perspectives/energy-storage-development-of-the-market.html>
- Deltares. (2024). *Samenvatting regelgeving koelwater Borssele*. Overkernenergie.nl. Opgehaald van <https://www.overkernenergie.nl/site/binaries/site-content/collections/documents/2024/06/05/koelwaterstudie-borssele-deltares/Samenvatting%2Bregelgeving%2Bkoelwater%2BBorssele.pdf>
- DSEIT. (2018, november 12). *Impact van stroomuitval*. Opgehaald van DSEIT: <https://dseit.nl/nieuws-it/impact-van-stroomuitval/>
- Eagleston, H., Bester, M., Yusuf, J., Damodaran, A., & Reno, M. (2025, februari 18). Systemic Drivers of Electric-Grid-Caused Catastrophic Wildfires: Implications for Resilience in the United States. *Challenges 2025*. doi:<https://doi.org/10.3390/challe16010013>
- EEA. (2019, February 14). *Replacing overhead lines with underground cables in Finland*. Opgehaald van Climate-ADAPT, European Environment Agency: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/replacing-overhead-lines-with-underground-cables-in-finland>
- Enexis. (2021, September). *Gevolgen wateroverlast in Limburg*. Opgehaald van Enexis: <https://www.enexis.nl/over-ons/nieuws/2021/07/gevolgen-wateroverlast-in-limburg>
- Engels, D. (2024, maart 15). *Elektrificatie op het spoor: Nederland aan de Europese top*. Opgehaald van Brusselse Nieuws: <https://brusselsenieuwe.nl/elektrificatie-op-het-spoor-nederland-aan-de-top-van-de-europese-trend/#:~:text=grootste%20aandeel%20aan%20elektrische%20spoorwegen,van%20de%20spoorwegen%20elektrisch%20is>
- Federatie Medisch Specialisten. (2021, juli 8). *Adequate alarmering van en verantwoordelijkheden bij beademde patiënten*. Opgehaald van Richtlijnen Database: https://richtlijnendatabase.nl/richtlijn/chronische_beademing/transitie_naar_de_verblijfsituatie_bij_chronische_beademing/adequate_alarmering_van_en_verantwoordelijkheden_bij_beademde_patiënten.html#:~:text=Adequate%20alarmering%20van%20en%20verantwoorde
- FMED. (2025, juli 07). *Vorbereiding op langdurige stroomuitval: overleg over continuïteit zuurstoftherapie en thuisbeademing*. Opgehaald van Federatie van Medische Technologiebedrijven: <https://www.fmed.nl/nieuws-updates/alle-nieuwsberichten/1156-voorbereiding-op-langdurige-stroomuitval-overleg-over-continuïteit-zuurstoftherapie-en-thuisbeademing#:~:text=In%20Nederland%20zijn%20circa%2030,snel%20tot%20acute%20situaties%20leiden>
- Gasunie. (sd). *HyStock hydrogen storage*. Opgehaald van Gasunie: <https://www.gasunie.nl/en/projects/hystock-hydrogen-storage>
- GHD. (2022). *Storm Arwen - Technical Review of DNO Response*. Gutteridge Haskins & Davey Limited. Opgehaald van <https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/2022-06/GHD%20-%20Storm%20Arwen%20Review%20Main%20Report.pdf>
- Global Energy Monitor. (n.d.). *Global Integrated Power Tracker – datasets of global power-plants and generation by primary energy*. Opgehaald van Global Energy Monitor: <https://globalenergymonitor.org/download-data-success>
- HaskoningDHV, Royal. (2024). *Water voor waterstof: Onderzoek naar de relatie tussen waterbeschikbaarheid en grootschalige elektrolyse*. Rijksoverheid. Opgehaald van <https://open.overheid.nl/documenten/3cc7e7b5-7bca-4884-b6ce-1d58f61ddb5a/file>

- Hawkins, D., van den Broek, M., & Bruninx, K. (2025). Exploring the impact of interannual dynamics on long-duration energy storage in energy system models. IEEE. doi:<https://doi.org/10.1109/EEM64765.2025.11050355>
- Honingh, D., Kolen, B., Lugt, D., Caspers, J., Kind, J., Nomden, H., . . . Damen, C. (2024). *Werkpakket wateroverlast en overstroming 2023–2024: Methodiek voor een kwantitatieve risicodialoog en het opstellen van een bibliotheek met kritieke uitvalwaarden inclusief voorbeelden van beschermingsmogelijkheden van vitale infra*. NKWK. Opgehaald van https://klimaatadaptatienederland.nl/publish/pages/228716/eindrapport_pr4708_nkwk_kbs_wateroverlast_en_overstromingen_vitale_functies_risicodialoog-1-.pdf
- HVNL. (2021, juli 20). *2100 varkens dood door stroomstoring in stal Maarheeze, NVWA doet onderzoek*. Opgehaald van Hart van Nederland: <https://www.hartvannederland.nl/milieu-gezondheid/dieren/artikelen/2100-varkens-dood-door-stroomstoring-stal-maarheeze-nvwa-doet-onderzoek>
- IEA. (2024). *The Netherlands: Efficiency and Demand*. Opgehaald van International Energy Agency: <https://www.iea.org/countries/the-netherlands/efficiency-demand>
- IEA. (2024). *The Netherlands: Energy mix*. Opgehaald van International Energy Agency: <https://www.iea.org/countries/the-netherlands/energy-mix>
- IFV. (2017). *Natuurbrandbeheersing in Nederland*. Uitgave van Infopunt Veiligheid van het Instituut Fysieke Veiligheid, , Instituut Fysieke Veiligheid. Opgehaald van <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/03/20170621-IFV-KP-Natuurbranden.pdf#:~:text=maar%20we%20hebben%20ook%20te,in%20het%20Fochtelo%20C3%ABveen%20en%20Aamsveen>
- Inspectie Veiligheid en Justitie & Agentschap Telecom. (2015). *Stroomstoring Noord-Holland 27 maart 2015 - Lessen uit de crisisbeheersing en telecommunicatie*. Opgehaald van <https://www.inspectie-jenv.nl/site/binaries/site-content/collections/documents/2016/07/07/stroomstoring-noord-holland-27-maart-2015---lessen-uit-de-crisisbeheersing-en-telecommunicatie/Stroomstoring+Noord-Holland+27+maart+2015.pdf#:~:text=Wees%20bewust%20>
- Inspectie Veiligheid en Justitie & Agentschap Telecom. (2017). *Onderzoek naar de stroomstoring Amsterdam en omstreken 17 januari 2017*. Opgehaald van <https://www.inspectie-jenv.nl/documenten/2017/07/26/onderzoek-naar-de-stroomstoring-amsterdam-en-omstreken-17-januari-2017>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Annex 1: Glossary. In K. R. Riahi, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Chang*. Cambridge: Cambridge University Press. Opgehaald van https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-i.pdf
- IPLD, Informatiepunt Leefomgeving. (2020). *Vedringingsreeks*. Opgehaald van Rijkswaterstaat: <https://iplo.nl/thema/water/beheer-watersysteem/vedringingsreeks/>
- Jamieson, M. R., Strbac, G., & Bell, K. R. (2020). Quantification and visualisation of extreme wind effects on transmission network outage probability and wind generation output. *IET Smart Grid*, 3(2), 112-122. doi:10.1049/iet-stg.2019.0145
- Klimaat-effectatlas. (n.d.). *Klimaat-effectatlas*. Opgehaald van Klimaat-effectatlas: <https://www.klimaat-effectatlas.nl/>
- Kolen, B. (2024, October 16). Discussie over de kwetsbaarheid van de energiesector bij overstromingen.

- Li, B., Basu, S., Watson, S. J., & Russchenberg, H. W. (2020). Mesoscale modeling of a "Duisterluwte" event. *Wind Energy*, 24, 5-23.
- Li, B., Basu, S., Watson, S. J., & Russchenberg, H. W. (2021). A Brief Climatology of Duisterluwte Events over and Surrounding the North and Baltic Sea Areas. *Energies*, 14(20), 6508. doi:<https://doi.org/10.3390/en14206508>
- Lindberg, E. (2011, December). *The overhead line sag dependence on weather parameters and line current*. Uppsala: Uppsala University. Opgehaald van <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A499977/FULLTEXT01.pdf>
- NH Nieuws. (2019, maart 14). *Tata Steel ziet 'goede kans' voor miljoenen claim bij TenneT*. Opgehaald van NH Nieuws: <https://www.nhnieuws.nl/nieuws/242129/tata-steel-ziet-goede-kans-voor-miljoenen-claim-bij-tennet>
- Nieuwsuur. (2015, maart 27). *Grote stroomstoring TenneT legt Noord-Holland plat*. Opgehaald van NOS: <https://nos.nl/nieuwsuur/artikel/2027234-grote-stroomstoring-tennet-legt-noord-holland-plat>
- NL Times. (2023, December 26). *Flooding in many parts of the Netherlands; situation closely monitored, says Rutte*. Opgehaald van NL Times: <https://nltimes.nl/2023/12/26/flooding-many-parts-netherlands-situation-closely-monitored-says-rutte>
- NOS. (2019, juli 26). *Varkens hebben het moeilijk met hitte, zonder ventilatie gaan ze snel dood*. Opgehaald van Nederlandse Omroep Stichting: <https://nos.nl/artikel/2295251-varkens-hebben-het-moeilijk-met-hitte-zonder-ventilatie-gaan-ze-snel-dood>
- Ogundipe, O. B., Okwandu, A. C., & Abdulwaheed, S. A. (2024). Recent advances in solar photovoltaic technologies: Efficiency, materials, and applications. *GSC Advanced Research and Reviews*, 20(1), 159-175. Opgehaald van <https://gsconlinepress.com/journals/gscarr/sites/default/files/GSCARR-2024-0259.pdf>
- Parool. (2015, maart 27). *Stroomstoring in Amsterdam voorbij, treinverkeer komt langzaam op gang*. Opgehaald van Het Parool: <https://www.parool.nl/nieuws/stroomstoring-in-amsterdam-voorbij-treinverkeer-komt-langzaam-op-gang~b513df10/?referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>
- Port of Rotterdam Authority. (n.d.). *Kaarten waterveiligheid*. Opgehaald van PortMaps (ArcGIS Online): <https://portmaps.maps.arcgis.com/apps/instant/sidebar/index.html?appid=875d8d11855f4991835cf43d7698a28e>
- Port of Rotterdam Authority. (n.d.). *Waterveiligheid overzicht*. Opgehaald van <https://www.portofrotterdam.com/nl/waterveiligheid-overzicht>
- Rijksoverheid. (2009). *Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III) – Planologische kernbeslissing, deel 3: Beslissing van de Regering*. Tweede Kamer der Staten-Generaal.
- Rijksoverheid. (n.d.). *Instrument waterbeschikbaarheid hoofdwatersysteem*. Opgehaald van WABES: <https://wabes.nl>
- Rijksoverheid. (n.d.). *Nederland gaat stap voor stap over op duurzame energie*. Opgehaald van Rijksoverheid: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-energie/nederland-gaat-stap-voor-stap-over-op-duurzame-energie>
- Rijkswaterstaat. (n.d.). *Prognosis - National Storm Surge*. Opgehaald van Waterveiligheidsportaal: <https://waterveiligheidsportaal.nl/nss/prognosis>
- RVO. (2024, juli 5). *Regels nood- en alarmsysteem stallen met kunstmatige ventilatie*. Opgehaald van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/welzijnseisen-dieren/huisvesting-verzorging/regels-nood-en-alarmsysteem-stallen>

- RVO. (2025). *Bijlage 3 – ZEEF 1 locaties nieuwbouw kerncentrales*. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. Opgehaald van <https://www.rvo.nl/files/file/2025-05/Bijlage%203-Zeef-1-locaties-nieuwbouw-kerncentrales.pdf>
- RVO. (2025). *Nieuwe windparken op zee*. Opgehaald van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-zee/nieuwe-windparken-op-zee>
- Schellevis, J. (2015, maart 27). *Stroomstoring zorgt voor problemen bij mobiele providers en publieke omroep*. Opgehaald van Tweakers: <https://tweakers.net/nieuws/102152/stroomstoring-zorgt-voor-problemen-bij-mobiele-providers-en-publieke-omroep.html#:~:text=Vodafone%20heeft%20ook%20last%20gehad,hoeveel%20zendmasten%20daarvan%20waren%20voorzien>
- Siecker, J., Kusakana, K., & Numbi, B. P. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 192-302.
- STOWA. (2024). *Neerslagstatistiek, -reeksen en -gebeurtenissen op basis van de KNMI'23 klimaatscenario's: Meteo-onderzoek ten behoeve van het waterbeheer (Deelrapport 1A)*. STOEa. Opgeroepen op 10 29, 2025, van <https://www.stowa.nl/sites/default/files/2024-11/STOWA%202024-37%20WEB.pdf>
- Stratix. (2025, april 30). *Mobiele netwerken beter beschermen tegen stroomuitval*. Opgehaald van Stratix: <https://stratix.nl/mobiel-netwerk-stroomuitval/#:~:text=Bellen%2C%20Whatsappen%2C%20websites%2C%20maar%20ook,ons%20in%20Nederland%20bereikbaar%20bleven>
- Tennet BSO B.V. (n.d.). *Kabels in de grond: een koud kunstje?* Opgeroepen op 2025, van TenneT: <https://www.tennet.eu/nl/kabels-de-grond-eeen-koud-kunstje>
- TenneT TSO B.B. (2024). *Rapport Monitoring Leveringszekerheid 2024*. Opgehaald van <https://www.tennet.eu/nl/over-tennet/publicaties/rapport-monitoring-leveringszekerheid>
- TenneT TSO B.V. (2013). *Position paper: Underground cables and overhead lines*. TenneT TSO B.V. Opgehaald van <https://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/01/TenneT-Europacable-Joint-Position-Paper-31-January-2013.pdf>
- TenneT TSO B.V. (2023). *TenneT's position on Battery Energy Storage Systems*. TenneT TSO B.V. Opgehaald van https://tennet-drupal.s3.eu-central-1.amazonaws.com/default/2023-06/TenneT_s_position_large_BESS_-_Public_Info_-_update.pdf
- TenneT TSO B.V. (2025). *Grid at a glance – Onshore Netherlands (December 2024 update)*. TenneT. Opgehaald van https://tennet-drupal.s3.eu-central-1.amazonaws.com/default/2025-01/GB_DEC2024_Onshore_Netherlands.pdf
- TenneT TSO B.V. (sd). *Infrastructure Management*. Opgehaald van TenneT: <https://www.tennet.eu/infrastructure-management>
- TenneT TSO B.V. (2019, November 18). *High-voltage network of the Netherlands*. TenneT TSO B.V. Opgehaald van https://tennet-drupal.s3.eu-central-1.amazonaws.com/default/2022-06/HV_network_the_Netherlands_18-11-2019_rev4.pdf
- TNO. (2012). *Noodstroom in de zorg*. Inspectie voor de Gezondheidszorg, Behavioural and Societal Sciences. TNO. Opgehaald van <https://publications.tno.nl/publication/33606495/mu5WDd/TNO-2012-R10683.pdf>
- Tummers, R. (2022, 12 05). *Koelwaterbeleid zet industrie en energiesector klem*. Opgehaald van VEMW: <https://www.vemw.nl/nieuwsbericht/2022/12/05/Koelwaterbeleid-zet-industrie-en-energiesector-klem>
- van den Brink, H., Wijnant, I., Bosveld, F., & Stepek, A. (2017). *Klimatologie van extreme windvlagen*. KNMI.

van Duinen, B. v. (2025, July 10). Meteorological drivers of co-occurring renewable energy droughts in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115993>

Veilig Vooruit Nederland. (2025, februari 27). *Komt er nog water uit de kraan tijdens een blackout?*

Opgehaald van Veilig Vooruit Nederland: <https://veiligvooruitnederland.nl/blogs/news/komt-er-nog-water-uit-de-kraan-tijdens-een-blackout?srsId=AfmBOop-Bx5IsAOyWdLo4KYF0-hzuGHZH9PX386O7gskFBxSjIjxDpQ0#:~:text=Over%20het%20algemeen%20blijft%20er,v aak%20gebruikmaken%20van%20waterreservoirs%20en>

Veiligheidsregio IJsselmeer. (n.d.). *Wat te doen bij uitval van drinkwater?* Opgehaald van

Veiligheidsregio IJsselmeer: <https://www.vrijsselmeer.nl/uitval-drinkwater/#:~:text=verschillende%20plekken.%20,tien%20dagen%20water%20beschikbaar%20is>

Zero Emissie Bus. (n.d.). *Info*. Opgehaald van Zero Emissie Bus:

<https://zeroemissiebus.nl/#:~:text=Beschrijving>

