



---

# Koelwater voor de nieuwe kerncentrales; de toepassing van koeltorens en hun implicaties – een overzicht en duiding op hoofdlijnen

**Report No.:** R2025-04b Definitief Rapport 20-11-2025, Rev. 1

**Document No.:** R2025-04b Definitief Rapport

**Date:** 20 November 2025





---

Project name: Koelwater voor de nieuwe kerncentrales; de toepassing van koeltorens en hun implicaties – een overzicht en duiding op hoofdlijnen

Report title: Koelwatervoorziening kerncentrales; de toepassing van koeltorens en hun implicaties – een overzicht en duiding op hoofdlijnen

Client: Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Directoraat-Generaal Klimaat & Energie (MinKGG)

Date of issue: 20 November 2025

Report No.: R2025-04b Definitief Rapport 20-11-2025, Rev. 1

Document No.: R2025-04b Definitief Rapport

*Foto titelpagina: hyperboloïde koeltoren van de EDF Civaux kerncentrale, Frankrijk (foto Pecten Aquatic).*

---

---

Pecten Aquatic  
Lentseveld 24, 6663 KM  
Lent, the Netherlands

[www.pectenaquatic.com](http://www.pectenaquatic.com)  
[info@pectenaquatic.com](mailto:info@pectenaquatic.com)

---

Copyright © Pecten Aquatic 2025. All rights reserved. This publication or parts thereof may not be copied, reproduced or transmitted in any form, or by any means, whether digitally or otherwise without the prior written consent of Pecten Aquatic. The content of this publication shall be kept confidential. Reference to part of this publication which may lead to misinterpretation is prohibited.

---



## Inhoudsopgave

SAMENVATTING.....	4
1 INLEIDING.....	9
1.1 Ontwikkeling nieuwe kerncentrales	9
1.2 Karakteristiek nieuwbouw kerncentrale volgens het PPE	9
1.3 Uitvoering IEA en m.e.r.	10
1.4 Toepassing koeltorens als uitvoeringsalternatief	10
1.5 Reikwijdte van dit rapport	11
1.6 Leeswijzer	11
1.7 Geraadpleegde bronnen	11
2 VERKENNING LOCATIES AAN DE NEDERLANDSE KUST.....	12
2.1 Potentiële kustlocaties	12
2.2 Geschiktheid van een locatie	13
3 ACHTERGRONDEN EN VEREISTEN VOOR KOELING VAN KERNCENTRALES.....	14
3.1 Condensorkoeling	14
3.2 Koeling van een kerncentrale	14
3.3 Ultimate Heat Sink (UHS)	15
3.4 Betekenis van de toenemende klimaatvariatie voor koelwatervoorziening en systeemkeuze	16
3.5 Typen koelwatersystemen	17
4 KOELTORENS.....	19
4.1 Werking van een koeltoren	19
4.2 Typen koeltorensystemen	19
4.3 Koeltorensystemen voor kerncentrales	20
4.3.1 Argumenten voor toepassen koeltorens	20
4.3.2 Primaire veiligheid	20
4.3.3 Impact op kosten	21
4.4 Keuze, specificatie en ontwerp koeltorensysteem	22
4.4.1 Ontwerpaspecten doorstroomsysteem	23
4.4.2 Ontwerpaspecten natte koeltorens	24
4.4.3 Ontwerpaspecten droge koeltorens	25
4.4.4 Ontwerpaspecten hybride koeltorens	25
4.4.5 Koeltorens als retrofit-optie	26
4.4.5.1 Enkele aspecten van koeltoren als retrofit optie	26
4.5 Operationele aspecten zeewater koeltoren	27
4.5.1 Zeewaterkwaliteit: waterconsumptie en koeltorenefficiëntie	28
4.5.2 Ruimtegebruik	28
4.5.3 Materiaalkeuze	29
4.5.4 Chemie	29
4.5.5 Sediment, slib en zwevend stof	30
4.5.6 Scaling en corrosie	31
4.5.7 Zicht en geluid	31
4.5.8 Pluimvorming – drift, carry-over en depositie	32
4.5.9 Bestrijding van biofouling	33
4.5.10 Thermofiele pathogenen	33
4.5.11 Samenvatting bedrijfsvoering koeltorens met zeewater	34
4.6 Koelwaterstrategieën	34
4.7 Beoordeling Risicoaspecten	39



---

5	BEKNOPTE DUIDING KOELWATER PER REGIO .....	40
5.1	Regio Eemshaven	40
5.2	Regio Maasvlakte	41
5.3	Regio Sloegebied	41
5.4	Regio Terneuzen	42
6	KOELWATEROPTIES AAN RIVIEREN.....	43
6.1	Inpassing kerncentrales binnenland	43
6.2	Koelwatercapaciteit rivieren	43
6.3	Toepasbare koelwatersystemen aan zoet water	44
6.4	Capaciteitsbeperking versus leveringszekerheid	45
	GERAADPLEEGDE BRONNEN.....	46
	ANNEX 1 LOCATIE-ALTERNATIEVEN AAN DE KUST .....	53
	ANNEX 2 SCHEMA'S WERKINGSPRINCIPE KOELWATERSYSTEMEN .....	54
	ANNEX 3 BESTAANDE KOELTORENS MET NATUURLIJKE TREK VOOR PWR .....	56
	ANNEX 4 KOELTORENS – ZOETWATER VERSUS ZEEWATER .....	57
	ANNEX 5 FACTOREN BIJ RETROFIT.....	58



## SAMENVATTING

Momenteel worden 4 regio's in Nederland verkent voor implementatie van een nieuwe kerncentrale (2 units). De evaluatie wordt uitgevoerd door modelering van de geloosde warmtevracht in relatie tot de koelcapaciteit van het ontvangende water op lange termijn, en toetsing aan de vigerende lozingscriteria.

Kerncentrales moeten voor hun specifieke bedrijfsvoering veel warmte afvoeren. Het hoogste elektrische rendement (netto MWe) wordt bereikt met directe koeling (doorstroomkoeling) en aan de kust is dit BBT door voldoende aanwezigheid van koelwater. Belangrijke aspecten daarbij zijn onder andere de nabijheid van andere grootschalige koelwatergebruikers (cumulatieve effecten), aangroeibestrijding, recirculatie, inzuiging van vis, etc.

De toepassing van indirecte koeling (recirculatie over een koeltoren) wordt gezien als een mogelijk uitvoeringsalternatief waarmee het effect van een aantal (kritische) aspecten in relatie tot de lozingscriteria en onttrekking van koelwater beperkt kunnen worden. De toepassing van koeltorens is in de huidige (rekenkundige) analyse van de locaties niet meegenomen.

Zeewater koeltorens hebben specifieke implicaties voor de efficiëntie van de installatie (netto MWe), ze vergen veel ruimte en hebben in de bedrijfsvoering continue aandacht nodig voor taken als onderhoud, reiniging (e.g. sediment) en conditionering met chemicaliën van het recirculerende koelwater. Daarbij is er een verhoogde kans op verspreiding met aerosolen van chemie, zouten en PM10 naar de omgeving.

De mogelijkheid voor toepassing van indirecte koeling met een zeewater koeltorensysteem als alternatief voor, of in aanvulling op doorstroomkoeling, is van belang voor de milieueffectrapportages en het uiteindelijke technisch advies bij de voorkeurslocatie.

Het koelwatersysteem van een kerncentrale moet ook onder de meest kritische (extreme) omgevingscondities in functie blijven en een efficiënte afvoer van restwarmte voorzien (UHS). Het ontwerp van koeltorens moet dan ook gebaseerd zijn op de (gemodelleerde) condities in de toekomst conform KNMI'23 (e.g. factoren als luchttemperatuur en vochtigheid, kwantitatieve en kwalitatieve beschikbaarheid oppervlaktewater (suppletie), etc).

Voor elk van de verschillende typen koeltorens die geschikt worden geacht voor een locatie, is alleen op basis van definitief ontwerp van de kerncentrale (MWe/MWth) en door toepassing van gemodelleerde worst-case scenario's vast te stellen wat de vereiste capaciteit, configuratie en omvang is. In dit rapport worden de verschillen geduid tussen de verschillende typen koelsystemen (en combinaties). Ook worden mogelijke strategieën voor inpassing op lange termijn (retrofit) aangegeven. De voor- en nadelen van de koelwaterstrategieën staan samengevat in onderstaande tabel i.



Tabel i. Koelwaterstrategieën.

Strategie	Omschrijving principe	Voordelen	Nadelen
Directe koeling	Doorstroom koelwatersysteem, met inlaat en uitlaat onshore of offshore	BBT (Best Beschikbare Techniek) vanwege beschikbaarheid voldoende koelwater aan de kust  Meest efficiënte optie voor koeling energiecentrales (MWth)  Relatief laag energieverbruik	Grote omvang koelwatervolume (m <sup>3</sup> /s) conform vereisten ontwerp  Onttrekking (inzuiging) van biota (impact op vis)  Warmtelast (lozing) mogelijk beperkt door hoge achtergrondtemperatuur in een warme zomer  Aangroeibestrijding: lozing restchemie bij chlorering, of extra warmte bij thermoshock  Kans op recirculatie (afweging ligging in- en uitlaat)
Verdunning	Doorstroom koelwatersysteem, met een extra set pompen, debiet in bypassroute direct naar het offshore uitlaatwerk	Lagere temperatuur lozing  Inzet alleen als het nodig is (beperkt tot warme periode)	Grotere onttrekking (m <sup>3</sup> /s) – extra debiet afhankelijk van gewenste verdunning om de koelwatertemperatuur omlaag te krijgen  Extra aantal verdunwaterpompen en groter inlaatwerk  Toename inzuiging biota in periode dat extra debiet wordt onttrokken  Extra maatregelen (en onderhoud) aan verdunwaterpompen, bijbehorende inlaat en leidingen als deze niet in bedrijf zijn
Helper-toren	Doorstroom koelwatersysteem, met in het uitlaatsysteem voor de lozing een koeltorensysteem	Lagere temperatuur lozing in kritische periode met hoge achtergrondtemperatuur bij gelijkblijvend koelwaterdebiet  Inzet alleen als het nodig is (beperkt tot warme periode)	Extra ruimtegebruik (totale capaciteit voor gehele debiet doorstroomsysteem, of deel debiet?)  Visuele impact (hoogte toren en pluim)  Geluid (afhankelijk van type koeltoren)  Kosten aanleg?  Extra booster-pomp(en)  Extra onderhoud tijdens stilstand (tijdelijk gebruik)  Extra taken tijdens bedrijfsvoering helper-toren voor de aspecten zoals genoemd bij 'indirecte koeling'  Vereisten waterbehandeling nog onbekend (beperkte periode in bedrijf)  Waterconsumptie (verdamping)



Strategie	Omschrijving principe	Voordelen	Nadelen
Indirecte koeling	Recirculatie over een koeltorensysteem	Lager debiet Kleinere onttrekking Lagere warmtelast Mogelijke combinatie met directe koeling (beperkt tot warme periode)	Lagere koefficiëntie – impact op de netto MWe (revenu) Hoger intern energieverbruik Significant groter ruimtegebruik Ingewikkelde infrastructuur Visuele impact (afhankelijk van hoogte toren en pluim) Geluid (afhankelijk van type koeltoren) Hoge impact door sediment, extra maatregelen nodig Lage concentratiefactor door zeewater Chemieverbruik waterbehandeling hoog: aangroeibestrijding, scaling, corrosie, pathogenen, etc Veel effort nodig voor algemeen civiel onderhoud constructie Verspreiding van zouten/pathogenen/PM10 naar omgeving Hoge waterconsumptie (verdamping)
Retrofit 1	Toevoegen extra pompen voor verdunning	Lagere temperatuur lozing Inzet alleen als het nodig is (beperkt gebruik in warme periode) Geen of beperkte impact op bedrijfsvoering	Grotere onttrekking (vergunning nodig) Grotere koelwaterinlaat: op voorhand al ruimte beschikbaar houden, eventueel deel van civiele bouw en voorbereiding bodem al uitvoeren Installatie periode buiten bedrijf tijdens aanpassing Kosten aanpassing infrastructuur Extra onttrekking, toename inzuiging biota Extra leiding voor bypass naar uitlaat Hoger intern energieverbruik koelwaterpompen



Strategie	Omschrijving principe	Voordelen	Nadelen
Retrofit 2	Toevoegen helper-toren	Lagere temperatuur lozing Inzet alleen als het nodig is (beperkt gebruik in warme periode) Geen of beperkte impact op bedrijfsvoering	Grotere koelwaterinlaat: op voorhand al ruimte beschikbaar houden, eventueel deel van civiele bouw en voorbereiding bodem al uitvoeren Extra ruimtegebruik nog onbekend (afhankelijk van vereiste MWth) Installatie periode buiten bedrijf tijdens aanpassing Kosten aanpassing infrastructuur Hoger intern energieverbruik boosterpompen Extra taken tijdens bedrijfsvoering en onderhoud koeltoren Vereisten waterbehandeling nog onbekend Toename waterconsumptie (verdamping)
Retrofit 3	Volledige ombouw van direct koelwatersysteem naar een indirect koelwatersysteem met koeltorens	Lager debiet Kleinere onttrekking Lagere warmtelast	Beperking van de efficiëntie van de kerncentrale (netto MWe) ten opzichte van het oorspronkelijke ontwerp Grotere koelwaterinlaat: op voorhand al ruimte beschikbaar houden, eventueel deel van civiele bouw en voorbereiding bodem al uitvoeren Installatie periode buiten bedrijf tijdens aanpassing Hoge kosten aanleg nieuwe infrastructuur Aanpassing inlaatwerk (kleinere koelwaterpompen?) Aanpassing condensor en koelers Grote impact op bedrijfsvoering en onderhoud Minimaal de nadelen zoals genoemd bij 'indirecte koeling'



Het toepassen van indirecte koeling als retrofit van een doorstroomsysteem, als mitigerende maatregel indien in de toekomst de omstandigheden voor koelwaterlozing dat vereisen, zal beduidende economische en technische consequenties hebben, inclusief impact op de netto MWe.

Er wordt in bovenstaande tabel geen voorkeur aangegeven, noch wordt de geschiktheid van een systeem of variant(en) beoordeeld voor een locatie. De in theorie geschikt geachte koelwaterstrategieën zullen voor de voorkeurslocatie in het project-MER moeten worden 'doorberekend' op basis van een reëel ontwerp om hun technisch-economische toepasbaarheid te kunnen vaststellen.

Het vaststellen van de haalbaarheid van een 'zeewater koeltoren' conform de vereisten voor de warmteafvoer (MWth) en veiligheid (UHS), kan alleen op basis van de genoemde technisch-economische detailuitwerking. Hierbij moeten de nuances die horen bij de locatiespecifieke omgevings situatie en waterkwaliteit (met toepassing van de gemodelleerde toekomstige klimatologische condities) in acht worden genomen. De impact van de inpassing als retrofit moet op voorhand al in kaart worden gebracht, om de nodige voorzieningen al in het primaire ontwerp in te passen. De detaillering van alle relevante aspecten van indirecte koeling met zeewater voor de uiteindelijke voorkeurslocatie(s), zoals benodigde capaciteit, het ruimtegebruik en civiele voorzieningen, moeten worden uitgewerkt door uitvoering van een multidisciplinaire studie.

## 1 INLEIDING

### 1.1 Ontwikkeling nieuwe kerncentrales

Het Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Directoraat-Generaal Klimaat & Energie (MinKGG) werkt momenteel aan de voorbereidingen van het nieuwbouwproject kernenergie. De eerste stap is de verkenning van potentiële kustlocaties (mariene/estuariene omgeving) voor de toekomstige nieuwbouw. Er wordt gekeken naar 4 regio's (Annex 1), waarin 7 alternatieven en 2 varianten, in totaal 9 potentiële locaties zijn aangewezen. Daarnaast is ook een start gemaakt met de verkenning van de mogelijkheden voor nieuwe kerncentrales in het binnenland, met strategische positie(s) aan riviersystemen.

Koeling is een primair proces binnen de energieproductie en een kritische factor voor opwekking met een hoog rendement. Het is ook vitaal voor de noodvoorzieningen van een kerncentrale. De beschikbare koelcapaciteit (i.e. de beschikbare ruimte in een ontvangend gebied voor het lozen van de restwarmte (warmtevracht, MWth) conform de vigerende criteria), en de bijbehorende onttrekking, zijn primair bepalend voor de geschiktheid van een locatie voor grootschalige onttrekking en lozing door een kerncentrale. Omdat in de bedrijfsvoering van een kerncentrale het koelwatersysteem de meeste impact zal hebben op het milieu, vereist dit diepgaande aandacht in het project-MER, en de evaluatie van uitvoeringsalternatieven is daarbij een belangrijk onderdeel.

Locatiespecifieke effecten en bezwaren met betrekking tot koeling, kunnen (mogelijk) worden ondervangen door strategische keuzes in het ontwerp en type koelwatersysteem (e.g. direct of indirecte koeling), en de ligging van de in- en uitlaat. De efficiëntie en continuïteit van het koelwatersysteem is direct gerelateerd aan de veiligheid en efficiëntie van de installatie.

Als de voorkeurslocatie bekend is, is het van groot belang om alle alternatieven (en bijbehorende varianten) te onderzoeken en door te rekenen en te evalueren – elke uniek alternatief (en varianten daarin) heeft eigen specifieke implicaties voor onder andere het ontwerp en engineering, effecten op onder andere de netto MWe efficiency, veiligheid en milieu, vergunningen, bedrijfsvoering, etc. Daarbij heeft elke ontwerpvariant een eigen fysieke omvang en complexiteit, met bijbehorende kosten voor de bouw en bedrijfsvoering.

### 1.2 Karakteristiek nieuwbouw kerncentrale volgens het PPE

Voor het koelwatersysteem van de nieuwe kerncentrales aan de kust, wordt uitgegaan van doorstroomkoeling met de volgende karakteristieken:

- Elektrisch vermogen: 3340 MWe (twee units van 1670 MWe)
- Thermisch vermogen: 9180 MWth
- Lozingstemperatuur: 35°C
- Totale koelwaterflow: 142 m<sup>3</sup>/s
- Temperatuurstijging: 7 – 12°C (over de condensor/warmtewisselaars)
- Warmtelast: 6000 MW m<sup>3</sup>/s @ °C (afgifte naar ontvangende watersysteem)

Voor het locatieonderzoek wordt voor het aspect koelwater per locatie gekeken naar beschikbaarheid van koelwater en het ontwerp van koelwater in- en uitlaat. De onderzoeksresultaten worden beoordeeld op kosten, tijd en vergunningsrisico's. Deze aspecten zullen sterk verschillen per type koelwatersysteem (direct of indirect), en een adequate detailuitwerking is van belang voor een juiste beoordeling.

### 1.3 Uitvoering IEA en m.e.r.

In de Integrale Effecten Analyse (IEA) en het plan-MER, uit te voeren voor de specifieke locaties, dienen naar redelijkheid de beschikbare alternatieven voor het koelwatersysteem te worden beschouwd – de ‘uitvoeringsalternatieven’. Dit betreft naast de varianten voor het tracé en lay out van directe koeling (doorstroomsysteem), en mogelijk ook de toepassing van koeltorens, zoals natte en hybride koeltorensystemen en combinaties van koeltoren en doorstroomkoeling.

De geschiktheid van een alternatief (en bijbehorende varianten) voor een locatie, kan alleen bepaald worden door deze in volledigheid te rekenen en te evalueren voor alle relevante aspecten (e.g. veiligheid, technische, economisch en ecologisch) conform nationale en internationale wet- en regelgeving en IAEA-standaarden. Het belang van koeling voor een kerncentrale is kritisch (zie ook ANVS, 2023 (Handreiking VOBK) en relevante zienswijzen van het ANVR (2024 en 2025)), en voor de ontwikkeling van een kerncentrale is dit aspect dan ook een kritische taak.

De IEA met als onderdeel het plan-MER, moet antwoord geven op de vraag of de vastgestelde uitvoeringsalternatieven zowel functioneel op alle relevante aspecten (technische-economisch, veiligheid, ruimtelijk inpasbaarheid en de effecten op de omgeving en het milieu zijn. Op basis van de uitkomsten van de IEA en het plan-MER kunnen in het inpassingsplan beargumenteerde keuzes worden gemaakt met betrekking tot de ontwerp-voorkeursbeslissing.

### 1.4 Toepassing koeltorens als uitvoeringsalternatief

De toepassing van koeltorens wordt in de huidige fase en bijbehorende interne discussies, gezien als een potentiële mogelijkheid om het effect van een aantal (kritische) aspecten in relatie tot de warmtevracht en onttrekking van koelwater te beperken. De toepassing van koeltorens is in de huidige (rekenkundige) analyse van de potentiële locaties niet meegenomen.

Voor de effectbeoordeling voor het aquatisch milieu voor een locatie, zijn de specifieke effecten die behoren tot een type koelwatersysteem van bepalend belang – o.a. koelwateronttrekking (inzuiging biota) en aangroeibestrijding, lozing van warmte en restchemie, etc. Een koeltoren maakt een locatie op die aspecten potentieel (meer) geschikt. Echter, de toepassing van koeltorens heeft significante implicaties op tal van aspecten die van belang zijn, waaronder de impact op de efficiëntie van de installatie (netto MWe), energieverbruik, chemicaliënverbruik, veiligheid, benodigde ruimte en effecten op de omgeving (zoals bijvoorbeeld visuele aspecten, geluid en drift van aerosolen, zouten, PM10, etc.).

Aangezien de huidige analyse van locaties een evaluatie is van een beperkt aantal technische opties van doorstroomkoeling voor de 9 locaties, zijn er nog weinig details van de installatie, en dus geen uitgewerkt technisch ontwerp en mogelijke alternatieven en varianten daarin. Pas als er een kleiner aantal voorkeurslocaties is vastgesteld, of eventueel een definitieve locatie, zal een verdere detaillering kunnen plaatsvinden. Het is van belang voor de definitief gekozen locatie om in het project-MER de varianten, inclusief de uitvoeringsalternatieven met (combinaties met) koeltorenbedrijf, uitgebreid uiteen te zetten. Op dit moment ontbreekt inzicht in de technische toepasbaarheid van beschikbare typen koeltorens voor de verschillende locaties, alsook de locatiespecifieke implicaties van de toepassing. Een gedetailleerde uitwerking van de lay out en ontwerp van elk alternatief en variant voor het koelwatersysteem, inclusief alle relevante aspecten en consequenties, en doorberekening daarvan, moet in het project-MER uitgevoerd.

Het is in alle fases van kritisch belang de aan de koelwateronttrekking en -lozing gerelateerde aspecten niet alleen in de huidige situatie en context van bestaande omstandigheden te bezien, maar ook op de lange-termijn door toenemende variaties (extremen) in het betreffende watersysteem als gevolg van klimaatverandering volgens de beschikbare klimaatscenario's (KNMI'23).

## 1.5 Reikwijdte van dit rapport

Dit rapport geeft een overzicht van achtergrondinformatie en duiding van de implicatie van toepassing van zeewater koeltorens. Deze achtergronden zijn gewenst bij de huidige en komende discussies die behoren tot de evaluatie van de potentiële locaties. De mogelijkheid voor toepassing van koeltorens als alternatief voor, of in aanvulling op doorstroomkoeling, is van belang voor het uiteindelijke technisch advies bij de locatiekeuze, en in voorbereiding op voorziene effectstudies.

De informatie in dit rapport over de toepassing van zeewater koeltorens en de implicatie als alternatief voor, of aanvulling op directe koeling (doorstroomstelsel) is indicatief – er zijn immers geen berekeningen gemaakt. Deze rapportage zal op onderdelen ook zeker niet volledig zijn. Het rapport bevat een selectie referenties met actuele informatie, rapportages en (wetenschappelijke) vakliteratuur, en dient daarmee ook als startpunt voor verdere detaillering in het project-MER.

Er wordt in dit rapport duiding gemaakt van de verschillen tussen de verschillende koelwaterstrategieën: directe doorstroomkoeling met varianten en (combinaties van) indirecte koelwatersystemen. Er wordt geen voorkeuren aangegeven, en wordt ook niet vastgesteld of een systeem wel of niet geschikt is voor een locatie. In een nadere detaillering en berekening van een specifiek geschikt zeewater koelwatersysteem dat toepasbaar is op een locatie, zullen alle relevante aspecten in volledigheid moeten worden uitgewerkt door uitvoering van een multidisciplinaire evaluatiestudie.

## 1.6 Leeswijzer

Dit rapport geeft, op hoofdlijnen, een overzicht van de algemene achtergronden en implicaties van de toepassing van de verschillende typen indirecte koelwatersystemen.

In hoofdstuk 2 wordt beknopt ingegaan op de verkenning van de potentiële locaties voor hun geschiktheid voor inpassing van een kerncentrale.

In hoofdstuk 3 wordt op hoofdlijnen ingegaan de achtergronden en vereisten voor het koelwatersysteem van een kerncentrale.

Hoofdstuk 4 gaat in op de operationele aspecten van zeewater koeltorens, waarbij op hoofdlijnen wordt aangegeven welke factoren een bepalende rol spelen.

Hoofdstuk 5 geeft een beknopte en algemene, beknopte duiding over toepassing van koeltorens per regio, voor zover mogelijk vanwege gebrek aan details.

In hoofdstuk 6 wordt kort ingegaan op de toepassing van koeltorens voor kerncentrales in het binnenland (riviersystemen).

## 1.7 Geraadpleegde bronnen

Voor dit rapport zijn bronnen geraadpleegd uit de openbare wetenschappelijke literatuur en rapportages, alsook onderliggende stukken en communicatie van het projectteam en ministerie. Deze zijn niet per se allemaal specifiek in de tekst gerefereerd, maar wel opgenomen in het overzicht van bronnen.

## 2 VERKENNING LOCATIES AAN DE NEDERLANDSE KUST

### 2.1 Potentiële kustlocaties

De achtergronden van de regio's en locaties staan samengevat in de concept Notitie Reikwijdte en Detailniveau (cNRD) (Antea, 2025). De heersende watertemperatuur (de achtergrondtemperatuur en lange-termijn ontwikkeling daarvan) speelt een bepalende rol in de definitieve locatiekeuze. De eerste stap in het evalueren (vergelijken) van de potentiële locaties wordt dan ook uitgevoerd op basis van de beschikbare lozingsruimte. Deze analyse wordt uitgevoerd door uitvoering van koelwatermodellering van verschillende technische opties (lay outs) van de toepassing van directe koeling (i.e. doorstroomkoeling). De kustlocaties die worden verkend zijn (zie kaart in Annex 1):

- Eemshaven - Westlob/ Emmapolder (twee varianten)
- Eemshaven - kolencentrale
- Eemshaven - gascentrale
- Maasvlakte II - Alexiahaven-westzijde
- Sloehaven - EPZ (noord)
- Sloehaven - Thermphos-terrein
- Terneuzen - Westelijke Mosselbanken/ Paulinapolder (twee varianten)

Vooralsnog is in de ontwikkeling van de nieuwe kerncentrale(s) aan de kust de aandacht op directe koeling gericht. Op elke locatie is de afstand de lengte van de koelwaterleidingen van belang, omdat de kosten voor het aanleggen van leidingen zeer hoog kunnen oplopen bij toenemende lengte en complexiteit. Belangrijk voor de configuratiekeuze is het voorkomen van recirculatie. In deze fase van de ontwikkeling worden de mogelijkheden en verschillende configuraties vooralsnog alleen getoetst aan de beschikbare koelcapaciteit, oftewel de beschikbare thermische ruimte in het ontvangende watersysteem om de warmtevracht binnen de daaraan gestelde criteria te lozen, en waarbij recirculatie minimaal of geheel uitgesloten is. De toepassing van koelwater voor een kerncentrale brengt op veel meer aspecten aandachtspunten met zich mee, welk in het project-MER ruim aan bod moeten komen. De aandachtspunten met betrekking tot koelwaterproblematiek betreffen onder andere:

- (Inter)nationale milieuregeling in relatie tot bedrijfsvoering (e.g. IED, KRW, etc.)
- Koelwaterinname (e.g. inname temperatuur, recirculatie, effecten op en door overige industrieën, achtergrondtemperatuur, eb/vloed, ligging (haven/kust/estuarium), etc.)
- Koelwaterlozing (CIW-beoordelingssystematiek, modellering alternatieven, etc.)
- Afstand in- en uitlaat (e.g. pompvermogen, kosten, review alternatieven, etc.).
- Interruptie koelwaterinname (e.g. verstopping door kwallen en vuil, of andere externe factoren)
- Biologie (e.g. aangroeibestrijding en -preventie, visinzuiging, etc)

De toepassing van koeltorens is in de huidige modelanalyse niet meegenomen, maar is in theorie een mogelijkheid om de impact van een aantal aspecten te reduceren, zoals de impact van het criterium voor opwarming, bij een beperkt beschikbare koelcapaciteit. De toepassing van een koeltoren heeft in zichzelf, beduidende implicaties (e.g. civieltechnisch, ontwerp, ruimte, veiligheid, onderhoud, etc), en limiteert mogelijk op voorhand de specificatie (efficiëntie) van de netto MWe-capaciteit van de voorgenomen installatie.

## 2.2 Geschiktheid van een locatie

De bouw en exploitatie van een kerncentrale heeft een breed scala aan impacts op de directe omgeving (Pondera, 2025). De effecten op het oppervlaktewater door het koelwatersysteem, zijn gerelateerd aan zowel de fysieke civiele constructie als de onttrekking en lozing van het koelwater. Het meest recente voorbeeld van de ontwikkeling van een grootschalig koelwatersysteem voor een kerncentrale, is de bouw van Hinkley Point C. Een overzicht van onder andere de effecten, mitigerende maatregelen en ervaringen met de ontwikkeling van het koelwatersysteem in relatie tot de (externe) milieuaspecten in kustgebieden en estuaria, zijn vastgelegd in Elliott & Wither (2024).

In de huidige verkenning (en vergelijking) van potentiële locaties in Nederland, wordt de vraag beantwoord op welke locatie(s) in beginsel geschikt zijn met volledige doorstroomkoeling, en de nieuwe kerncentrale 'vergunningbaar' is op basis van de bijbehorende thermische lozing. Deze toetsing wordt uitgevoerd op basis van modelstudies (3D modellering, door Deltares) van een aantal basisvarianten voor de lay out (ligging inlaat en uitlaat – onshore versus offshore) van het koelwatersysteem. Deze basisvarianten gaan uit van doorstroomkoeling met (locatiespecifieke) variaties in de ligging van de inlaat en uitlaat, positie en oriëntatie van de lozing.

Naast de koelcapaciteit van het ontvangende water spelen echter een scala aan andere kwalitatieve locatiespecifieke aspecten een rol, zoals bijvoorbeeld de invloed van beschikbare ruimte en omgevingsfactoren op de mogelijkheden en keuzes in het ontwerp en engineering van het koelwatersysteem, en daarmee op het thermisch (MW<sub>th</sub>) rendement, en dus het netto MWe rendement van de installatie. Het betreft aspecten zoals recirculatie, sedimentatie, permanente effecten op natuur, en overige factoren van de lokale ecologie, en de relatie tot aspecten als (toekomstige) extremen in waterpeil en achtergrondtemperatuur. Bij het vaststellen van de geschiktheid van een locatie speelt dus een complex aan milieufactoren een bepalende rol.

In geval volledige doorstroomkoeling niet toepasbaar blijkt, wordt gekeken naar de mogelijkheid voor de toepassing van alternatieve koelwaterstrategieën, zoals koeltorens, en wat dit betekent in termen van ruimte, milieueffecten, etc. Dit wordt in het project-MER en bij vergunningaanvraag doorgerekend.

## 3 ACHTERGRONDEN EN VEREISTEN VOOR KOELING VAN KERNCENTRALES

### 3.1 Condensorkoeling

De condensatie van stoom in de condensor resulteert in een vacuüm, de 'backpressure'. Het koelwatersysteem moet in staat zijn om continue en consistent de condensatietemperatuur te handhaven die overeenkomt met de optimale backpressure van de turbine – welke direct gerelateerd is aan de draaisnelheid van de turbine (rpm). Voor een gegeven stoomflow en koelwaterflow, is de basis ontwerp-parameter (en bedrijfs-parameter) voor de condensor de temperatuur van het inkomende koelwater, die variabel is. Omdat de condensor ook in een hele warme zomer de warmte moet afvoeren, is er een gespecificeerde dimensionering voor nodig. Zowel te weinig koeling (undercooling) als teveel koeling (overcooling) hebben gevolgen voor de efficiëntie en integriteit van componenten in het systeem.

### 3.2 Koeling van een kerncentrale

Er zijn voor een kerncentrale specifieke vereisten en beperkingen die van invloed zijn op de specificatie koelwatersystemen, welke opgedeeld is in de volgende drie categorieën:

- Koeling van de hoofdcondensator (*main cooling system*)
- Niet-essentiële koeling (*auxiliary cooling system, of supporting cooling system*)
- Essentiële koeling (*essential servicewater system*)

Zoals voor alle thermische centrales geldt, worden de koelvereisten voor een kerncentrale bepaald door de warmtebelasting (MWth) van de hoofdcondensator. Adequate koeling van de hoofdcondensator is essentieel om de gewenste turbine-uitlaatdruk, conform de specificatie van de stoom-cyclus (e.g. parameters als stoomdruk en -flow), te handhaven. Dit is van belang voor de continuïteit van de efficiëntie en commerciële output (netto MWe) van de centrale, binnen de range van de heersende omgevingsomstandigheden. Kerncentrales verschillen op drie manieren van vergelijkbare conventionele centrales, namelijk:

- De omvang van de warmtebelasting (MWth)
- De beperkingen door vereisten van de uitlaatdruk van de turbine
- De ongeschiktheid van directe droge koeling

De warmtebelasting van de condensor per MWe-eenheid is voor een nucleaire centrale hoger dan voor een conventionele centrale. De warmteafgifte van de turbine is hoger bij nucleaire centrales vanwege beperkingen aan de turbine-inlaatcondities. Hierdoor is stoom-flow naar de condensor per MWe hoger – dit verschilt overigens per specifieke ontwerp (en de leeftijd) van de eenheid. Dit resulteert uiteindelijk in een hogere warmtebelasting van de hoofdcondensator van kerncentrales in vergelijking tot conventionele centrales. Dit verschil is niet eenvoudig te berekenen uit de kentallen van de efficiëntie van centrales, omdat conventionele centrales een aanzienlijk deel van hun warmte via andere routes, zoals met de rookgassen (e.g. direct via de schoorsteen, de rookgasontzwavelinginstallatie) kwijtraken.

Turbines van kerncentrales verschillen qua ontwerp van turbines in kolencentrales of gasgestookte STEG-centrales op ten minste drie manieren. Ten eerste zijn ze in kerncentrales vaak groter vanwege de economische keuze voor de grootte (MWe) van de eenheid ten opzichte van conventionele centrales. Ten tweede, zoals hierboven aangegeven, de stoom-flow per MWe-eenheid output is hoger. Ten slotte is de rotatiesnelheid van turbines in kerncentrales lager dan die voor turbines bij conventionele centrales. Dit komt door de hogere stoom-flow in de grotere turbines, die grote uitlaatopeningen met lange bladen

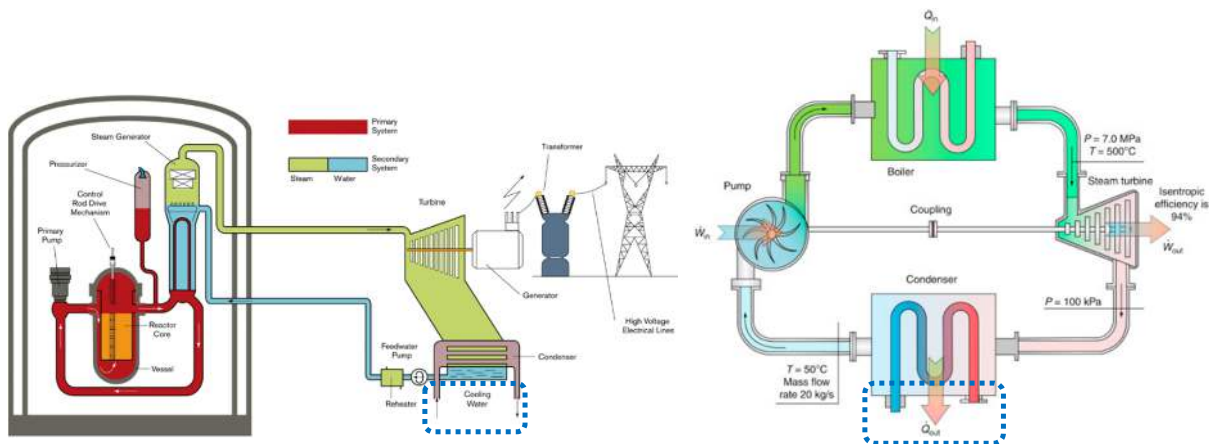
vereisen. De rotatiesnelheid wordt verlaagd om de (maximaal) toegestane tipsnelheden in de laatste trappen te handhaven. De maximaal toegestane uitlaatdruk van de turbine van een kerncentrale, waarboven schade aan de bladen van de laatste trap kan optreden, is beperkt in vergelijking met conventionele centrales.

Als gevolg hiervan, verschillen de turbinekarakteristieken, zoals gedefinieerd door de relatie tussen de uitlaatdruk van de turbine en het rendement en de MWe-output van de turbine bij een bepaalde stroomflow. De drijvende kracht van deze stroomflow is het drukverschil tussen de stoom-generator en het vacuüm in de hoofdcondensator. Deze relatie is cruciaal voor de selectie en dimensionering van een voorkeurs- of geoptimaliseerd koelwatersysteem op een bepaalde locatie.

Het gebruik van directe droge koeling met een luchtgekoelde condensator is in de regel niet acceptabel voor gebruik in nucleaire eenheden (EPRI, 2013). Directe droge koeling, noch in volledig droge systemen, noch in hybride, nat/droog systemen, wordt voor zover bekend nergens ter wereld bij kerncentrales toegepast.

### 3.3 Ultimate Heat Sink (UHS)

Voor een kerncentrale is een betrouwbare (continue) voorziening van koelwater nodig, voor de afvoer warmte naar oppervlaktewater en/of de lucht. De Ultimate Heat Sink (UHS) moet in staat zijn de (rest)warmte van de kerncentrale af te voeren tijdens normale bedrijfsvoering (als onderdeel van de Rankine Cycle, zie figuur 1 (rechts)), alle (on)verwachte operationele gebeurtenissen en noodsituaties (noodstops). De UHS moet voldoende koeling leveren om gelijktijdige, veilige uitschakeling en afkoeling van alle aanwezige reactoren op een locatie mogelijk te maken, waarbij de ontwerp-temperaturen van de veiligheids-gerelateerde apparatuur niet worden overschreden.



Figuur 1. Voorbeeld van de flows in een kerncentrale: Links – de UK EPR, Hinkley Point C (UK) ..... route naar het koelwatersysteem (figuur NNB Generation Company (Hinkley Point C) Limited). Rechts – de Rankin Cycle (figuur: Dincer, 2018).

De UHS kan normaal gesproken de restwarmte kwijt aan een waterlichaam (e.g. zee, rivier, meer, etc), of de atmosfeer (al dan niet in combinatie). De afvoer van restwarmte verloopt via fysische processen voor warmtetransport, waarvoor verschillende systemen kunnen worden toegepast: doorstroomkoeling, en verschillende varianten van koeltorensystemen. Deze criteria/vereisten voor de UHS worden normaal gesproken beschouwd in de context van de toepassing van directe koeling (doorstroomkoeling), en ligging aan een groot waterlichaam, zoals zee/oceanen, grote rivieren en grote meren. Immers,

doorstroomkoeling is de meest efficiënte en optimale (en kosteneffectieve) wijze van koeling. Alle overige indirecte koelsystemen zijn alternatieve opties waarmee water kan worden bespaard, met diverse combinaties van natte koeltorens (inclusief hybride (nat/droog) ontwerpen), vijvers en reservoirs, mits de omvang en capaciteit voldoet aan de vereisten van UHS, onder alle omstandigheden.

De toepassing van koeltorens als alternatief voor, of in aanvulling op doorstroomkoeling is primair een waterbesparende maatregel. Dit geldt in het algemeen voor bijvoorbeeld droge(re) gebieden en indien de voorziening van voldoende koelcapaciteit voor doorstroomkoeling naar verwachting beperkt kan zijn op een locatie. Alle alternatieve, waterbesparende opties, inclusief natte/droge koeltorens met geforceerde trek droge koeltorens met geforceerde trek, moeten worden geëvalueerd onder de meest veeleisende klimatologische omstandigheden en met betrekking tot de primaire functie van de UHS. Daarbij is het van belang de consequenties van deze alternatieve indirecte koelsystemen voor de stoomcyclus te onderkennen (lagere efficiëntie) en overige aspecten zoals hogere effort en kosten (e.g. energie) voor bedrijfsvoering, en kosten voor een meer complex civiel ontwerp en bouw, het technisch onderhoud, vereisten voor de waterkwaliteit en de continuïteit van de bedrijfsvoering.

### **3.4 Betekenis van de toenemende klimaatvariatie voor koelwatervoorziening en systeemkeuze**

Voor nieuwe kerncentrales, moet in het ontwerp en engineering van het koelwatersysteem rekening worden gehouden met de toename van mogelijke extremen in de toekomst. Het effect van die extremen uit zich met name in de beschikbaarheid van voldoende koelwater. Die beschikbaarheid kan worden beïnvloed door tal van aspecten, zoals bijvoorbeeld de heersende achtergrondtemperatuur, variaties in waterniveaus als gevolg van zeespiegelstijging, droogte of overstroming en extreme vloed, maar ook biologische aspecten zoals biologische aangroei (biofouling) en de impact van de plotseling aanwezigheid van grote hoeveelheden drijvende aquatische vegetatie, algen en kwallen.

Het is belangrijk voor nieuwe kerncentrales dat in het ontwerp maatregelen worden doorgevoerd om externe impacts als gevolg van klimaatverandering te ondervangen. Sterk variërende omstandigheden als gevolg van klimaatverandering zullen steeds vaker kunnen voorkomen. Uit een analyse van gegevens over de periode 2010-2020 (EPRI, 2022) blijkt dat extreme gebeurtenissen als gevolg van aan klimaat gerelateerde fenomenen en veranderingen, tot nu toe een verwaarloosbare impact hebben gehad op de beschikbaarheid en bedrijfsvoering van huidige kerncentrales, wereldwijd. De potentiële operationele impact door verwachte stijgingen van de lucht- en watertemperatuur, afname van de beschikbaarheid van oppervlaktewater (e.g. droogte) zullen mogelijk echter steeds vaker voorkomen als gevolg van intensere extreme weersomstandigheden.

Voor een toekomstbestendige, veilige en continue bedrijfsvoering van een kerncentrale, is het van belang een goed beeld te hebben van de mogelijke lokale gevolgen van veranderende klimaatrisico's. Deze factoren moeten worden meegenomen in hoofdprincipe van het koelwatersysteem, en alle systeemdetaïls. Het ontwerp van een nieuwe kerncentrale, en de functie voor het UHS van het koelwatersysteem, vergt daarom een multidisciplinaire aanpak, met tenminste de volgende expertisegebieden: ontwerptechniek en -engineering, systeemtechniek en -engineering, bedrijfsvoering van het systeem en componenten, milieu- en klimaatexpertise, onderhoudsplanning, installatiebeheer, algehele systeemefficiëntie (Balance of Plant – BOP) en expertise op regelgeving en vergunningen. Er zijn in relatie tot klimaatbestendigheid binnen de nucleaire sector bestaande richtlijnen, procedures (SOPs) en operationele ervaringen (OE) over de effectiviteit van het systeemontwerp en bedrijfsvoering. Deze zijn vastgelegd en beschikbaar voor de sector via rapportages van o.a. INPO, WANO, IAEA en EPRI.

Een juiste karakterisering van de verschillende klimaatscenario's en de bijbehorende risico's voor een specifieke locatie, zowel vanuit een historisch perspectief als op basis van toekomstige projecties, is een complexe, maar cruciale stap voor de ontwikkeling van het koelwatersysteem voor een nieuwe kerncentrale. Alle mogelijke impacts (*contingent issues*) moeten door adequate primaire systeemkeuze en deugdelijke ontwerpdetailering en engineering worden ondervangen.

### 3.5 Typen koelwatersystemen

Afhankelijk van de beschikbare koelcapaciteit van het oppervlaktewatersysteem, de beschikbare fysieke ruimte (hectare), en alle relevante impacts op de omgeving, bestaan de koelwateropties uit directe koeling (doorstroomkoeling) en indirecte koeling (recirculatie, met een koeltoren), of een combinatie daarvan. Koeltorens zijn te onderscheiden in natte of droge koeltorens met natuurlijke trek, of met mechanische trek, en hybride opties waarin de koelprincipes met elkaar gecombineerd worden (zie schema's Annex 2). Het is ook mogelijk doorstroomkoeling met een koeltoren te combineren ('helper'-toren). De optimale keuze wordt in beginsel bepaald door de af te voeren warmtevracht (MWth), de koelcapaciteit van het ontvangende watersysteem, en de vereisten voor de algehele efficiëntie en de veiligheid.

Mogelijk toepasbare koelwatersystemen staan uitgebreid beschreven in verscheidene bronnen, zoals de BREF-IC (2001), EPRI (2013) en EA (2010). Tabel 1 geeft een beknopt overzicht en onderlinge vergelijking van koelsystemen op een aantal typische aspecten die van belang zijn, uit de rapportage over koelwateropties voor de nieuwe kerncentrales in de UK (UK Environment Agency, 2010). De potentiële locaties voor die nieuwe eenheden in de UK zijn geografisch en klimatologisch dichtbij, en allemaal aan de kust en estuaria gelegen, en dus qua achtergrond vergelijkbaar met de huidige planning van de eerste 2 nieuwe units voor Nederland.

Tabel 1. Typen koelwatersystemen en relatie tot enkele typische milieuaspecten (UK Environment Agency, 2010).

Milieuaspect	Directe koeling	Indirecte koeling (recirculatie met koeltoren)		
		Natuurlijke trek (nat)	Mechanische trek (nat)	Natuurlijke trek (droog)
Efficiëntie productie	Hoge efficiëntie. Gebruikt minder energie, lagere emissies naar de lucht	0,5 - 1,5% lagere efficiëntie dan directe koeling	~2% lagere efficiëntie dan directe koeling	2 - 3% lagere efficiëntie dan directe koeling
Complexiteit	Laag	Matig	Hoog	Zeer hoog
Wateronttrekking	Hoog	Matig/laag	Matig/laag	Geen
Effecten onttrekking	Locatiespecifiek, afhankelijk van lokale watersysteem			
Water consumptie	Geen	Matig	Matig	Geen
Zichtbare pluim	Geen	Matig	Matig/laag	Geen
Mist en ijs	Geen ijs. Lokale mist bij uitlaat mogelijk	Geen	Mogelijk	Geen
Visuele impact	Soms schuim aan de uitlaat	Hoog	Matig	Hoog
Afvoer van afval	Geen indien er een visretoursysteem is	Matig	Matig	Matig/geen
Ruimtegebruik	Geen/laag	Matig/hoog	Matig	Hoog



In droge koeltorens wordt het koelwater uit de condensor door lamellenbuizen gepompt, en bevindt zich niet direct in contact met lucht – er is dus geen waterverlies door verdamping. Bij geheel droge systemen (niet van toepassing voor kerncentrales!) is er helemaal geen koelwater bij betrokken en wordt de stoom die de turbine verlaat gecondenseerd in grote luchtgekoelde radiatoren.

## 4 KOELTORENS

### 4.1 Werking van een koeltoren

Door de toepassing van koeltorens wordt de restwarmte aan de lucht afgegeven. Het koeleffect bij natte koeltorens wordt voornamelijk bereikt door verdamping van een klein gedeelte door lozing van het recirculerende koelwater (spui). De warmteoverdracht bij droge koeltorens vindt uitsluitend plaats door convectie, door toepassing van warmtewisselaars bestaande uit gevinde pijpen. De hybride koeltoren is opgebouwd uit een nat en een droog gedeelte en wordt gebruik gemaakt van beide koelprincipes.

In natte torens wordt het contact tussen lucht en water geoptimaliseerd door de luchtstroom in te sluiten en te richten (volgens tegenstroom principe of zijstroom) waarbij het water als druppels valt of als een dunne film over lamellen stroomt. Het bassin onder een natte koeltoren dient om het vallende water op te vangen en is niet groter dan de basis van de toren. Koeling vindt plaats door de directe warmteoverdracht aan de lucht en door verdamping van een deel van het water. Een vuistregel is dat het verdampen van 1 kg water voldoende warmte onttrekt om 100 kg water met 10°C te koelen: een natte koeltoren hoeft dus minimaal slechts één procent van zijn circulerende volume bijgevuld te worden (make-up). In de praktijk wordt meestal ongeveer drie procent uit het recirculatiesysteem verwijderd, waarvan één procent verdampingsverlies (verbruik, consumptie) en de overige twee procent wordt afgevoerd (spui, of blow-down) naar het watersysteem. Door de continue verdamping vindt continu een 'indikking' vind plaats – de ophoping van opgeloste zouten, carbonaten en zwevende deeltjes in het recirculerende koelwater. Door toepassing van specifieke chemicaliën worden zouten en carbonaten in oplossing worden gehouden, en in combinatie met de suppletie en spui wordt een bepaalde concentratie aangehouden, ook wel aangeduid als de 'concentratiefactor' (CF). Door de CF te beheersen, wordt scaling (afzetting van (an)organische stoffen op het oppervlak waardoor de koefficiëntie afneemt) in de condensor en warmtewisselaars, en overige systeemdelen zoals de lamellen, en ook corrosie (aantasting van metalen onderdelen door oxidatie) beheerst.

### 4.2 Typen koeltorensystemen

Onderstaand staan beknopt de verschillende typen koeltoren systemen aangegeven. In Annex 1 staat van de verschillende koeltorens het werkingsprincipe en stroomschema schematisch weergegeven. Voordat het suppletiewater de koeltoren bereikt, zal dit afhankelijk van de waterkwaliteit een voorbehandeling moeten krijgen – deze bestaat in het algemeen op zijn minst uit een filtratie- of bezinkstap om sediment en zwevende materiaal te verwijderen. Aanvullende stappen zijn mogelijk flocculatie, precipitatie, ontharding en dergelijke.

#### Natte en droge koeltorensystemen

- Gesloten systeem, natte koeling (recirculatiesysteem)
  - Koeltorens met mechanische trek
  - Koeltorens met natuurlijke trek
- Indirecte droge koeling
  - Koeltorens met mechanische trek (luchtgekoelde warmtewisselaar)
  - Koeltorens met natuurlijke trek

## Hybride koeltorensystemen

- Hybride natte/droge koeling (separate constructies – geschakeld in serie of parallel)
  - Opties voor natte element
    - Mechanische trek
    - Natuurlijke trek
  - Opties voor droge element
    - Direct droge, luchtgekoelde condensor (ACC)
    - Indirect droge, luchtgekoelde warmtewisselaar (ACHE)
      - Mechanische trek
      - Natuurlijke trek
- Hybride natte/droge koeling (geïntegreerde, enkele constructie)
  - Mechanische trek
  - Natuurlijke trek

### 'Helper' koeltoren (helper-toren)

Om de thermische impact van een doorstroomsysteem te beperken, kan een koeltoren in het uitlaatsysteem worden ingepast. Een dergelijke koeltoren, ook wel 'helper-toren' genoemd, kan waarschijnlijk kleiner zijn dan die van een volledig indirect systeem met koeltorens, omdat de temperatuur slechts met enkele graden hoeft te worden verlaagd. Gedurende perioden met hoge achtergrondtemperaturen wanneer de lozingscriteria (mogelijk) worden overschreden, kan de helper-toren de temperatuur strategisch verlagen om aan de lozingslimiet te voldoen. In koelere periodes van het jaar is het mogelijk om dergelijke koeltorens uit bedrijf te houden om energiekosten te besparen. De dimensionering is afhankelijk van de benodigde extra koeling, en het koelwaterdebiet dat door de helper-toren(s) heen verpompt moet worden.

## 4.3 Koeltorensystemen voor kerncentrales

### 4.3.1 Argumenten voor toepassen koeltorens

De algemene trend naar minder waterverbruik is vormgegeven door de ontwikkeling van hybride systemen, dat natte en droge systemen combineert, waardoor de component verdampingskoeling (consumptie door verdamping) wordt verminderd. Veel kerncentrales aan riviersystemen passen hyperboloïde koeltorens (natte koeltorens met natuurlijke trek) toe (Annex 3). Koeltorenkoeling is in bepaalde situaties en onder bepaalde omstandigheden (steeds vaker) nodig om milieuredenen, omdat er minder water wordt onttrokken en minder warmte wordt afgevoerd naar het oppervlaktewatersysteem.

### 4.3.2 Primaire veiligheid

Koeltorens voor kerncentrales vormen van oudsher een fundamenteel veiligheidsprobleem: als er ooit radioactief materiaal in het secundaire koelwatercircuit zou lekken, dan bereikt het via de koeltoren de atmosfeer – het milieucompartiment waar een nucleaire lekkage het minst te veroorloven is. Verontreinigende stoffen die in de atmosfeer terechtkomen, hebben een onmiddellijke impact op zowel mensen als landbouwgrond. Als het in plaats daarvan naar zee zou gaan, zou het in ieder geval wat meer tijd geven om beheersmaatregelen uit te voeren. Het is de principiële reden waarom de

kerncentrales in het Verenigd Koninkrijk aan de kust worden gebouwd met directe (doorstroomkoeling): *zeewaterkoeltorens zijn op zich een interessant idee, maar moeten indien mogelijk worden vermeden – als directe koeling op een locatie niet mogelijk blijkt, kies dan voor een andere locatie.*

Alle systemen en componenten van de UHS die zorgen voor de koeling van veiligheid-gerelateerde apparatuur, moeten zijn ontworpen om de effecten van natuurverschijnselen zoals aardbevingen, tornado's, orkanen, overstromingen en externe impacts te weerstaan zonder verlies van het vermogen om hun veiligheid-gerelateerde functies uit te voeren. Het koelwatersysteem dat wordt toegepast moeten hieraan voldoen. Sommige kerncentrales hebben een zekere mate van droge koeling in hun UHS-ontwerp en -werking opgenomen, door toepassing van een combinatie van droge koeltoren met een natte koeltoren (hybride ontwerp), en een buffer van het water dat in het bassin van de natte koeltoren is opgeslagen. De dimensionering van de capaciteit van de droge en de natte koeltoren is van cruciaal belang om de warmte bij een noodstop af te kunnen voeren.

Naast de interne veiligheid, kan een complex koelwatersysteem een probleem ondervinden door externe omstandigheden, met mogelijk een noodstop van de eenheid tot gevolg. Een dergelijk (onverwachte) uitval heeft grote economische onbalans risico's. De uitval kan worden opgevangen vanuit omringende landen via het internationale netwerk (Continental Europe Synchronous Area (CESA)), beheerd door het European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), mits aan de criteria wordt voldaan en het elektriciteitsnetwerk voldoende zwaar is gedimensioneerd. Het landelijk netsysteem (beheerd door Tennet) dient in staat te zijn om binnen een korte tijdsmarge adequaat te reageren door inzet van de reservecapaciteit – deze standby reservecapaciteit moet dezelfde omvang hebben (MWe) als het grootste mono-blok dat in bedrijf is.

### 4.3.3 Impact op kosten

Voor de gespecificeerde turbine (MWe) is een bepaalde temperatuur en flow vereist in relatie tot de omvang van de condensor. In relatie met de natteboltemperatuur (maat voor luchtvochtigheid), bepaalt dit in feite de omvang van de koeltoren en daarmee de kapitaalsinvestering (zie als voorbeeld Zhang et al., 2024). Het toepassen van drypack- of hybride koeltorenoplossingen wordt al snel worden overwogen als alternatief voor de hoge, traditionele koeltorens, hetzij vanwege beperkte beschikbaarheid van water of landschappelijke problemen. Toepassing van deze opties levert extra problemen toe – zoals een sterk toegenomen ruimtegebruik, grotere civiele complexiteit (leidingtracés en regeltechniek), sterk verhoogde primaire kosten voor energieverbruik, bedrijfsvoering en onderhoud, en een sterk verhoogde kans op lekkage van het secundaire koelmiddel naar de grond. Tegelijkertijd neemt de economische haalbaarheid op lange termijn af – er is immers directe impact op de MWe-efficiëntie van de installatie.

Koeltorens worden traditioneel alleen gebruikt op locaties waar onvoldoende water beschikbaar is, of niet toegankelijk voor directe koeling. In sommige gevallen worden koeltorens alleen seizoensgebonden (in de zomer) in gebruik genomen. Koeltorenkoeling maakt in principe een flexibelere lokalisering van de installatie mogelijk, wat de kosten voor bijvoorbeeld brandstoftransport en/of transmissie/netaansluiting kan verlagen, of gunstiger in relatie tot vereisten in de vergunning. Daartegenover staan de hogere kosten investering en bedrijfsvoering van koeltorens (hoewel kosten voor het plaatsen of graven van leidingen met een grote diameter voor directe koeling ook hoog kunnen zijn).

Koeltorens, en met name droge torens, hebben in vergelijking met directe koeling (doorstroomkoeling) een lager thermisch rendement vanwege de hogere koelwatertemperaturen bij de condensorinlaat; dit kan het rendement (MWe) van de kerncentrale aanmerkelijk verlagen ten opzichte van directe koeling (zie tabel 2). In het BREF-document (BREF, 2001) worden nog meer kentallen over koefficiëntie en energieverbruik voor de verschillende typen koelwatersystemen die voor energiecentrales kunnen worden toegepast genoemd. Aan de andere kant kunnen in de situatie met een lagere turbinedruk (als

gevolg van de inefficiëntere koeling) leiden tot installatie van een meer compacte (economisch gunstigere) turbine. In elk geval moeten de economische argumenten en gevolgen per type koelwatersysteem, en de gevolgen voor het ontwerp van de turbine, goed worden doorgrond en afgewogen.

Tabel 2. Enkele karakteristieken van koelsystemen voor energiecentrales (Byers et al, 2014).

Cooling system	Description	Abstraction volumes l/kWh <sup>a</sup>	Consumptive losses (% of abstraction) <sup>b</sup>	Energy penalty as % of electrical output <sup>c</sup>
Once through (open loop)	Heat is removed through transfer to a running water source (can be direct or indirect).	43–168	0–1%	0.7–2.3
Closed (re-circulatory)	Heat is removed to the air by recirculating water cooled in ponds or under cooling towers that may be fan-assisted or natural draught.	1–5	Wet tower	1.8–6.3
			Pond	1.8–6.3
Air-cooled	Heat is removed by air circulation via fans and radiators. A setup that can operate without water.	22–67 0	4–9% –	1.8–6.3 3.2–11.2
Hybrid <sup>d</sup>	Cooling towers that can operate both with and without cooling water – either combining a wet/dry cooling tower, or a dry then wet system in series.	Between Closed and Air-cooled	61–95%	1.8–11.2

<sup>a</sup> Range of the medians for different cooled technologies taken from Table 3.

<sup>b</sup> Range of the medians for different cooled technologies taken from Table 2.

<sup>c</sup> Energy penalty range calculated from the ranges in the European Commission Joint Research Centre (2001, p. 69) report, by assuming plant thermal efficiencies from 60% to 30%.

<sup>d</sup> We present the range between closed and air-cooled, and not the figure quoted for hybrid, since the operational split between closed and air-cooled cooling is not specified in the report.

Een koeltoren vereist een grote en complexe bouw voor zowel koeltorens met natuurlijke trek (hyperboloïde) als hybride systemen met mechanische trek. De fundering van dergelijke constructies is van kritisch belang en moet volgens de nucleaire sector vereisten worden ontworpen en aangelegd. Vanwege de lagere efficiëntie van een koeltoren als zeewater wordt gebruikt, zal deze groter moeten zijn dan een koeltoren met zoetwater met dezelfde MWth specificatie. De kosten voor aanleg van het leidingtracé kunnen zeer hoog oplopen indien de lengte en complexiteit toeneemt. Vanwege de corrosiedruk bij toepassing van zeewater, zullen er corrosiebestendige materialen moeten worden toegepast. In vergelijking met een koeltoren op zoetwater, zijn de kosten voor een zeewaterkoeltoren 35 – 50% hoger (Maulbetsch & DiFilippo, 2008). Daarbij vergt het suppletiewater een adequate voorbehandeling (o.a. sedimentverwijdering) en toepassing van chemische conditioneringsproducten in het gerecirculeerde koelwater (e.g. anti-scaling, corrosie inhibitors, chemie ter beheersing microbiologie inclusief pathogenen, etc).

#### 4.4 Keuze, specificatie en ontwerp koeltorensysteem

De bedrijfsvoering is gericht op het voorzien van een gespecificeerde koeling (MWth) onder worst-case condities, daarbij hoort een bepaalde mate van verdamping om het recirculatiewater op de vereiste temperatuur te houden, met bijbehorende indikking. De mate van indikking leidt tot een specifieke chemische conditie, welke moet worden beheerst door deze met chemische producten in het gewenste evenwicht te houden. Elk type koeltorensysteem neemt eigen specifieke aspecten met zich mee welke moeten worden geëvalueerd en overwogen. De bedrijfsvoering (zowel thermische prestatie als chemische conditionering) kan worden doorgerekend met simulaties (Zhang et al 2024; Wang et al 2023; Zacherl & Baumann, 2025).

De systeemkeuzen en het specifieke ontwerp en de haalbaarheid van een 'zeewaterkoeltoren' voor de vereiste MWth, kan alleen op basis van een volledige technische uitwerking, waarbij de nuances van de lokale situatie en lange-termijn condities van de waterkwaliteit in acht worden genomen. Het ontwerp en detaillering van een koelwatersysteem voor een specifieke locatie, is een iteratief proces en vergt een

multidisciplinaire aanpak. Het aantal iteraties hangt af van de beschikbaarheid van kwalitatieve gegevens en de aanvaardbaarheid van het voorgestelde ontwerp voor aspecten zoals de warmteafvoer in relatie tot de UHS en toekomstige meteorologische omstandigheden, alle relevante milieueffecten, effecten op de omgeving, en noodzakelijke engineering en bijbehorende kosten voor bouw en bedrijfsvoering.

De timing van de verschillende fasen in het ontwerpproces is gekoppeld aan de ontwikkelingsfasen van de kerncentrale. Zo moeten het conceptontwerp en de milieueffecten worden vastgesteld voor de IEA en milieueffectrapportage. Aan de andere kant kan het definitieve, fysieke ontwerp van individuele systeemcomponenten in de regel pas tijdens de bouwfase worden afgerond. De bijbehorende onderzoeken worden vaak gesplitst. Een hydrografisch onderzoek wordt bijvoorbeeld meestal uitgevoerd als onderdeel van de pre-applicatiestudies (modelleringen). Het gedetailleerde grondonderzoek wordt vaak aan het begin van de bouwfase uitgevoerd, waarbij de keuze van het leidingtype (e.g. beton, GRP) aan de aannemer wordt overgelaten.

Alle componenten in het systeem, van inlaat tot uitlaat, hebben een directe functionele relatie met elkaar (zie §3.1 en 3.2) – aanpassing van 1 component heeft effect op de specificatie van de andere componenten. De primaire basis van het koelwatersysteem van de kerncentrale, is de turbine met een gespecificeerde output (MWe) en af te voeren restwarmte (MWth). De capaciteit van de condensor en de vereiste noodsystemen zijn hierop afgestemd. De inlaat en uitlaat, moeten dusdanig worden ontworpen en gedimensioneerd, dat onder alle omstandigheden het koelwater functioneel geleverd wordt om de vereiste koeling te garanderen – de ligging en oriëntatie van de koelwaterinlaat met zeefconfiguratie, de pompen hoofd- en hulpkoelwaterpompen (e.g. n pompen, inclusief redundancy ( $m^3/s$ )), de leidingen (e.g. diameter, route en lengte, stroomsnelheid, hoogteverschillen, etc.), capaciteit van condensor(s) en warmtewisselaars, tot de fysieke lozing van de warmtevracht conform de vergunningscriteria.

#### 4.4.1 Ontwerpaspecten doorstroomsysteem

Directe koelwatersystemen (doorstroomsystemen) voor kerncentrales vereisen voldoende koelwater, zeg  $\sim 60 m^3/s$  per 1000 MWe ( $\sim 2000 MWth$ ). Dit is doorgaans alleen beschikbaar aan een locatie aan de kust. De belangrijkste componenten van een doorstroom koelwatersysteem zijn: de inlaatconstructie, inclusief zeefconfiguratie – het pomphuis – de drukleiding voor de inlaat aan land (eventueel offshore leiding) – de condensor en warmtewisselaars – de drukleiding voor de uitlaat aan land (eventueel offshore leiding) – de afsluitstuw – de uitlaatconstructie. Als het systeem een offshore inlaat heeft, bevindt zich een inlaatileiding op zee tussen de inlaatconstructie en het pomphuis op land. Wanneer een systeem een offshore uitlaat heeft, bevindt zich een uitlaatileiding op zee tussen de afsluitstuwconstructie en de uitlaatconstructie op zee.

Het koelwatertracé van een energiecentrale heeft hydraulische gradiënt (Annex 2), gedefinieerd als het niveauverschil tussen het watersysteem waaraan koelwater wordt onttrokken, tot het hoogste niveau binnen het koelwatersysteem (de condensor) tot waar water stijgt. Om de pompkosten te reduceren, werken delen van het koelwatertracé onder een gedeeltelijk onderdruk (partieel vacuüm), omdat deze zich boven de hydraulische gradiënt bevinden – hierdoor ontstaat een sifonwerking. Deze sifonwerking in het koelwatersysteem moet tijdens elke opstart worden 'aangezet' als onderdeel van de opstartprocedure. Het koelwatersysteem heeft ook een afsluitstuw die openstaat bij atmosferische druk, en ervoor zorgt dat de hydraulische gradiënt niet verder kan dalen dan de maximaal toegestane sifondruk – anders zou de sifon immers kunnen breken.

De hoogte van het waterniveau aan de inlaat tot het niveau van de afsluitstuw wordt de 'statische opvoerhoogte' van het koelwatersysteem genoemd. Als de inlaat onder invloed is van getijdewerking, varieert de statische opvoerhoogte, en daarmee varieert de koelwaterflow met de getijkromme. Vaak

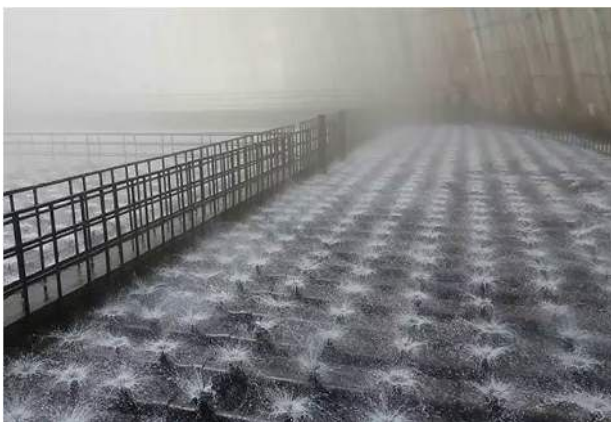
treedt de afsluitstuw alleen in werking bij laag water (eb). Bij vloed kan deze stuw onder water staan, en in dat geval blijft de koelwaterflow constant omdat de statische opwaartse kracht afwezig is.

Het moet voor het ontwerp van het koelwatersysteem, i.e. het totale koelwatertracé inclusief de gespecificeerde hydraulische gradiënt, naast de huidige en toekomstige waterniveaus in het onttrekkingsgebied, ook rekening worden gehouden met de veiligheidsvereisten die gelden voor kerncentrales, met de hoogteligging van hoofd- en hulpkoelwaterpompen en alle noodvoorzieningen. Dit is cruciaal in het ontwerp, en is mogelijk beperkend voor de mogelijkheden op een specifieke locatie.

Een ander kritisch aspect is de ligging en lay out (e.g. positie en oriëntatie) van de in- en uitlaat. De ligging van de inlaat is daarbij gerelateerd aan aspecten zoals bijvoorbeeld de bereikbaarheid van koelende watermassa (e.g. offshore leidingen), de onttrekking van biota en sedimentatie, en met recirculatie van opgewarmd koelwater. De ligging en oriëntatie van de uitlaat is van belang voor de gewenste strategische afvoer van warmte en restchemie (e.g. opmenging versus stratificatie) in relatie tot de hydraulische dynamiek over het getij.

#### 4.4.2 Ontwerpaspecten natte koeltorens

De belangrijkste factoren bij het ontwerp van een natte koeltoren zijn de maximale waterflow (instroomvolume) en -temperatuur, de ratio lucht:water en de natteboltemperatuur. Om de natteboltemperatuur te benaderen (hoog temperatuurbereik van de koeling) is een grote ratio lucht:water vereist. Echter, aangezien de luchtstroom de belangrijkste bepalende factor is voor de fysieke omvang van de koeltoren en de kosten, is er economische limiet voor de omvang. Een andere strategie is om te kiezen voor een kleinere, lagere koeltoren met een beperkte ratio lucht:water, die verder verwijderd is van de natteboltemperatuur, en een kleiner bereik heeft (minder koeling). Er zijn dan echter meerdere units nodig voor om de totale vereiste afkoeling te bereiken, wat meer ruimte vergt en een hogere complexiteit van het leidingnetwerk.



Figuur 2. Het versproeien van koelwater in een natte koeltoren met natuurlijke trek.

De meeste ontwerpvereisten (i.e. MWth restwarmte die moet worden afgevoerd) vallen ergens tussen de bovengenoemde uitersten. Specifieke indicatoren voor de koeling (performance-indicatoren) en koelcoëfficiënten kunnen aangeven hoe dicht een bepaalde koeltoren bij een ideaal scenario komt. Om consistente, adequate koeling te garanderen, wordt op basis van historische gegevens een "worst case" natteboltemperatuur (bijvoorbeeld een temperatuur die niet meer dan één procent van de tijd in de zomer wordt overschreden) geselecteerd.

Met de lange levensduur van een kerncentrale, en de verwachte toename in variaties in de klimatologische condities (e.g. luchttemperatuur en luchtvochtigheid in de zomer), moeten er afdoende modelstudies worden uitgevoerd waarin deze condities/criteria over de lange termijn worden geëvalueerd. Dit is van belang voor de garantie van de vereiste efficiëntie, alsook voor de economische rendabiliteit van dit type koeling voor de lange termijn.

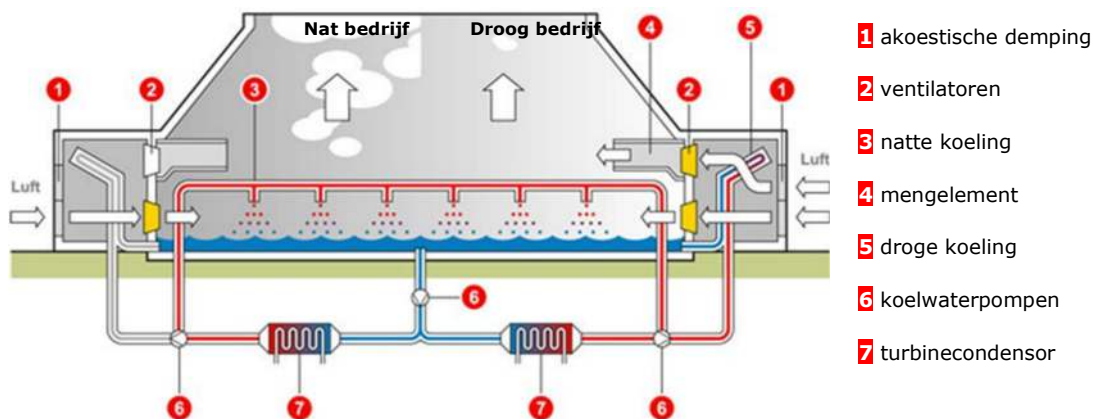
### 4.4.3 Ontwerpaspecten droge koeltorens

Voor een droge koeltoren is de bepalende parameter de drogeboltemperatuur, en de kritische tijdsperiode zou in de orde van grootte van een uur kunnen liggen. De acceptabele meteorologische basisconditie voor het ontwerp van een droge koeltoren is in de regel de maximale drogeboltemperatuur gedurende één uur, gebaseerd op regionale klimatologische geschiedenis op de locatie (zeg 30 jaar geschiedenis), maar ook deze moet voor de (gemodelleerde) klimatologische condities in de toekomst worden geëvalueerd.

Als de ontwerp temperatuur voor de koeling wordt overschreden, dan heeft dat direct impact op de bedrijfsvoering en efficiëntie van de koeltoren, en daarmee op de koeling van de kritische componenten (e.g. de condensors en warmtewisselaars), en daarmee op de bedrijfsvoering van de turbine (volgens specificatie) en ultimo op de veiligheid van de installatie. Het is dan altijd noodzakelijk om direct een alternatieve mogelijkheid te hebben met directe koeling (koelwater) om in noodsituaties de warmte af te kunnen voeren.

### 4.4.4 Ontwerpaspecten hybride koeltorens

Voor het ontwerp van hybride koeltorens spelen de koelprincipes van droge en natte koeltorensystemen een rol. Een belangrijk uitgangspunt is de flexibele inzet van, en de mogelijkheid om te schakelen tussen de aparte circuits voor droge en natte koeling, en een combinatie daarvan. Intern is het systeem voorzien van koelpakkingen (fills) en gevinde buizen (coils), en ventilatoren en geluiddempers. De toepassing van de juiste (corrosiebestendige) materialen is essentieel voor de efficiëntie van het systeem en een lange levensduur.



Figuur 3. Voorbeeld van complex, geoptimaliseerd ontwerp van een hybride koeltoren – de Vattenfall Moorborg kolencentrale (totale breedte 129,5 m, totale hoogte 60,5 m): doorsnede met links de werking van het 'natte' deel en rechts de werking het 'droge' deel (bron: Vattenfall).

#### 4.4.5 Koeltorens als retrofit-optie

Bij de ontwikkeling van een nieuwe kerncentrale, moeten de effecten van toekomstige milieuvariaties (klimaat), met als belangrijkste factor de koelcapaciteit, worden meegenomen in het ontwerp. Nucleaire units hebben een vaste specificatie voor het economisch rendement (MWe) van de turbine, waarop de gehele technisch-operationele infrastructuur in de primaire en secundaire circuits zijn afgestemd. De bijbehorende restwarmte (MWth) moet onder alle omstandigheden afgevoerd kunnen worden (UHS), waarbij vigerende milieucriteria niet mogen worden overschreden.

Aanpassing achteraf van het type koeling, is een significante ingreep en afwijking van de oorspronkelijke ontwerpcriteria voor de turbine en condensor, en vraagt beduidende aanpassingen om aan de netto MWe vermogen te blijven voldoen. Het heeft mogelijk ook invloed op de veiligheid van de installatie. Een dergelijke aanpassing achteraf is, mits de fysieke ruimte beschikbaar is, complex en kostbaar (Annex 5). In de Verenigde Staten heeft EPRI, naar aanleiding van plannen van de Environmental Protection Agency (US EPA) om voor alle energiecentrales indirecte koeling te verplichten, uitvoerige studies uitgevoerd naar de technische mogelijkheid en economische consequenties van het retrofit implementeren en toepassen van koeltorens (zie ook EPRI, 2011a, b, c en d, 2012a en b, en 2013).

##### 4.4.5.1 Enkele aspecten van koeltoren als retrofit optie

Het zou een strategie kunnen zijn om de kerncentrale in eerste instantie met directe koeling (doorstroom) uit te voeren, en in de toekomst het systeem aanpassen naar recirculatie. Er moet dan al wel rekening worden gehouden met de inpassing en bedrijfsvoering van koeltorens. Dit kan alleen op basis van aannames, omdat nog niet voorzien kan worden wel type onder de nog onbekende toekomstige condities het meest optimaal zullen presteren voor alle relevante aspecten. Ook moeten daarvoor reeds investeringen worden gemaakt in de civiele voorbereidingen, zoals voldoende ruimte voor recirculatie- en boosterpompen, leidingen, fundering en bassins en aansluitingspunten, en alle benodigde aanvullende noodvoorzieningen. Een aantal relevante aspecten/implicaties van retrofit worden hieronder benoemd. Daarbij moet ingepast worden in een bestaand systeem met specifieke hydraulische condities binnen het tracé van het directe systeem (van inlaat tot de uitlaatstuw), en capaciteit van de condensor (MWth) in verband met de flow-aanpassing bij koeltorenbedrijf in vergelijking tot doorstroom – er is immers een aanmerkelijk verschil in koeltemperatuur van het recirculerende koelwater in vergelijking tot de temperatuur van koelwater bij directe koeling.

**Kosten:** De kosten voor de ontwikkeling, inpassing en bouw van koeltorens is substantieel. Er is een significante impact op de efficiëntie van de installatie (netto MWe): lagere output en hoger intern energieverbruik. Een koelwatersysteem met koeltorens is ingewikkelder, ander leidingwerk en tracés zouden nu al moeten worden ontworpen en voorbereid (vrij beschikbare ruimte en tie-ins voor inpassing). Dit zou dan nu al budget kosten, doordat het eventueel het primaire ontwerp van het doorstroomstelsel beïnvloedt. Mogelijk moet ook met de retrofit ook aanpassing van de condensor worden gemaakt, en andere mogelijk noodzakelijke modificaties van componenten in het koelwatertracé.

**Koelefficiëntie:** De exacte toekomstige klimatologische omstandigheden en specifieke condities die nodig zijn voor het ontwerp, zijn nog volledig onbekend. De eventuele benodigde omvang van de koeling MWth en relatie tot de nattebol/drogebol-temperaturen, kan nu nog niet in detail worden vastgesteld – er kan alleen van een gemodelleerde inschatting van de worst-case worden uitgegaan. Het is wellicht wel mogelijk om vanuit een multidisciplinaire aanpak, een volgorde te maken van voorkeursopties voor retrofit met indirecte koeling (koeltorens), gekoppeld aan de impact op algehele efficiëntie van de installatie, en de 'verloren efficiency' versus 'gewonnen thermische lozingsruimte'.

**Ruimtegebruik:** Afhankelijk van type koeltoren, is een bepaald oppervlak nodig. Naast de omvang van de koeltoren zelf, is er ook ruimte nodig voor de leidingtracés en pompstation(s). Op basis van de

afstand tot andere gebruiksfuncties in de omgeving en richting van de wind, moet de impact rondom de koeltorens worden vastgesteld.

**Basislast – netto MWe:** De rol van een kerncentrale is levering van basislast in het elektriciteit-systeem. De omvang van de te leveren MWe is vastgelegd, en een economisch argument voor de investering in de ontwikkeling van de kerncentrale. Indien door retrofit met koeltorens verlies van efficiëntie plaatsvindt (netto MWe), zeg een reductie van 5 – 10% (Byers et al., 2014), dan heeft dat mogelijk impact op de oorspronkelijke business-case (investering versus opbrengsten).

## 4.5 Operationele aspecten zeewater koeltoren

De bedrijfsvoering van een koeltoren met toepassing van zeewater is mogelijk, maar brengt specifieke technische (e.g. ontwerp, engineering, materialen – zie Annex 4 voor een beknopt overzicht) en operationele problemen met zich mee (Maulbetsch & DiFilippo, 2008; Zhang et al., 2024). Voorbeelden hiervan zijn concentratiefactor, corrosie, effect zwevend stof en slib (particulate matter), scaling en afzetting van vaste deeltjes op koelpakketen en -lamellen en aangroeibestrijding (zowel de afzetting van macrofouling (e.g. mosselen, pokken, etc) als microfouling (afzetting van biofilm, een slijm laag gevormd door bacteriën).

Deze kritische aspecten spelen een bepalende rol in het ontwerp van het systeem. Het vergt in de bedrijfsvoering een regulier schema en adequate uitvoering van inspecties, en preventief onderhoud. Naar verwachting moet dat in een zeewater koeltoren systeem meer frequent worden uitgevoerd, mogelijk met verplichte stilstand van de installatie als gevolg (afhankelijk van de taak). Tenminste de volgende aspecten moeten bij het evalueren van de mogelijkheden van een zeewaterkoeltoren, al in een vroeg stadium worden onderzocht:

- Effect waterkwaliteit op koelvermogen van de koeltoren: verdamping
- Effect chemische waterkwaliteit op bedrijfsvoering hybride koeltoren (o.a. materiaalaspecten in verband met corrosie, afzetting van scaling en slib, etc.)
- Effect sediment en zwevend stof op ontwerp van de koeltoren - o.a.
  - Afzetting van sediment/slib en eisen voor draagconstructies in verband met gewicht, en materiaalaspecten in verband met corrosie en scaling, etc.
  - De afzetting op en in kritische onderdelen in de koeltoren op de efficiëntie, veiligheid (pathogenen, algen) en bedrijfsvoering, alsook chemicaliënverbruik (conditionering)
- Effect waterkwaliteit op engineering van het koelwatersysteem, inclusief componenten – de hogere zoutconcentratie en overige chemische aspecten, stellen hogere eisen aan het materiaal dat wordt toegepast voor (kritische) componenten als de condensor(s) en warmtewisselaars, leidingwerk en afsluiters, etc.
- Opties voor chemische waterbehandeling (conditionering van zeewater) in verband met corrosie, scaling, managen concentratiefactor: toepassing model
- Toepassing en ruimtegebruik van pre-filtratie, side-stream filtratie en bezinkbassins
- Lozing koelwater (warmte/chemie): waterkwaliteit – toepassing 3D modellen (near field / far field).
- Energieverbruik koelwaterpompen in relatie tot de opvoerhoogte en debiet per koeltoren
- Koeling/temperatuur onder extreme omstandigheden – modellering van de efficiëntie van het koeltorensysteem over lange termijn, met extremere omstandigheden luchttemperatuur

#### 4.5.1 Zeewaterkwaliteit: waterconsumptie en koeltorenefficiëntie

Door de verdamping, verbruiken koeltorensystemen water wat niet meer teruggevoerd wordt naar het oppervlaktewater. Dit verbruik van koelwater, of waterconsumptie, wordt berekend als de totale hoeveelheid koelwaterinname minus de totale hoeveelheid geloosd koelwater. Het is het deel van het koelwater dat dat zijn functie binnen de werking van de koeltoren vervuld door verdamping, maar verdwijnt in de atmosfeer en is dus niet langer beschikbaar is voor hergebruik of lozing naar het oppervlaktewater.

Zeewater van normale sterkte bevat in de regel 26.000 mg/L chloride (als NaCl) en 30 tot 34.000 mg/L aan totale opgeloste vaste stoffen (3 tot 3,4%). Bij een concentratiefactor (CF) van 1,3 tot 1,5 kan het gehalte opgeloste vaste stoffen in het circulerende koelwater oplopen tot vijf procent, oftewel 50.000 mg/L. Zeewatercircuits gaan zelden boven een concentratiefactor van 2.

Bij hogere concentraties zouten, wijken parameters zoals soortelijk gewicht, kookpunt/partiële druk en soortelijke warmte aanzienlijk af van de waarden die gelden voor zoetwater. Daarmee moet rekening worden gehouden in de ontwerpberekeningen voor natte koeltorens. Een hoge saliniteit verhoogt het soortelijk gewicht, maar voor de thermische prestaties in een koeltoren is de afname van de dampspanning en de soortelijke warmte (thermische capaciteit) van groter belang. Een zoutwater koeltoren moet om die reden een grotere recirculatieflow over de condensor, of een groter bereik van de koeling hebben om dezelfde warmtebelasting (MWth koeling) te bereiken.

De thermische prestaties van een typische koeltoren met mechanische trek kunnen met 2 – 5% afnemen bij 50.000 mg/L opgeloste vaste stoffen. Een bedrijfsvoering op basis van een lagere CF zou de toename van opgeloste vaste stoffen beperken, maar met het risico dat de aanvoer van zwevende stoffen toeneemt (er is immers meer suppletie nodig).

#### 4.5.2 Ruimtegebruik

Koeltorens die een grote warmtevracht moeten koelen, zijn complex en heel groot in omvang. Een hyperboloïde koeltoren met natuurlijke trek is gewoonlijk 150 – 200 m hoog en 100 – 150 m doorsnede aan de basis. Het leidingwerk is een stuk complexer in vergelijking tot een doorstroomsysteem, en er is een groot bassin nodig met voldoende capaciteit (volume) om de UHS-koeling te waarborgen. Dit vergt een groot oppervlak. Koeltorens met mechanische trek zijn in principe kleiner (lager), maar hebben ook in totaliteit ook een groot oppervlak nodig.



Figuur 4. Voorbeeld van koeltoren complexiteit: links - aan/afvoer binnen het complex met koeltorens van de Drax energiecentrale (UK) (bron foto: Drax website); rechts - fundering van de mega-zeewaterkoeltorens (basis 175 m, hoogte 218 m) van de Lianjiang kerncentrale in China (1224 MWe/unit) (bron foto: WNN website).



Figuur 5. Voorbeeld van het ruimtegebruik: links koeltorens met mechanische trek (30 m hoog) van EDF Chinon B kerncentrale in Frankrijk (bron foto: World Nuclear Association website), rechts koeltorens met natuurlijke trek, Drax energiecentrale in de UK (bron foto: Drax website).

### 4.5.3 Materiaalkeuze

De te selecteren materialen voor componenten van het koeltorensysteem bij gebruik in zeewater zijn redelijk goed bekend. De omstandigheden in de koelwatercircuits en in de koeltorens zelf zijn echter extremer dan gebruikelijk, omdat de temperatuur en zoutconcentratie verhoogd zijn en het koelwater oververzadigd kan zijn met lucht – corrosie verloopt het snelst aan een lucht-watergrensvlak (meestal aan de waterlijn) en in vochtige, goed beluchte omstandigheden. Een helder inzicht wordt gegeven door Maulbetsch & DiFilippo (2008).

Voor de koeltorenbasins en alle interne constructies die in gewapend beton moeten worden vervaardigd, worden specifieke eisen gesteld aan beton, en specifieke mixen toegepast (bijvoorbeeld door toevoegingen als poederkoolvliegias (PFA) of gemalen hoogovenslak (GGBS). Dergelijke ingrediënten verminderen de chloridediffusie bij watertemperaturen tot respectievelijk 30 en 40°C. Het bewapeningstaal kan met epoxy gecoat zijn, met een minimale vereiste dat de staven vóór plaatsing niet verontreinigd zijn met zout uit de atmosfeer. Alle metalen componenten, zelfs kleinste onderdelen zoals moeren en bouten, kunnen heel snel door corrosie worden aangetast.

Als alternatief voor stalen constructieve onderdelen die blootgesteld worden aan zeewater, kan ook drukbehandeld hout worden toegepast. De toepassing van coatings wordt in het algemeen als onbetrouwbaar beschouwd, en kan het beste worden vermeden als er alternatieve corrosiebestendige materialen beschikbaar zijn. Buizen en profielen van MDPE of GRP, hebben voorkeur boven gecoat staal.

### 4.5.4 Chemie

Door de verdamping vindt indikking plaats en neemt de zoutconcentratie toe, en is er sprake van lozing van 'brine' met het spuien van de koeltoren. Door de indikking heerst er een specifieke chemische conditie in het recirculerende koelwater, welke moet worden beheerst door toevoer van vers water (suppletie) en afvoer van ingedikt water (spui), gecombineerd met een koelwaterconditionering (i.e. de dosering van chemicaliën om de chemie en effecten daarvan op het fysieke systeem te beheersen). Een aantal chemische aspecten zijn:

**pH** – dit is een kritische parameter voor alle koelwatersystemen met betrekking tot corrosie en vorming van scaling (e.g. calciumcarbonaten). Zeewater heeft van nature een pH van ongeveer 8 en is goed gebufferd; deze pH ligt buiten het bereik van 6-7 dat normaal wordt aanbevolen om scaling en corrosie te minimaliseren. Ook wordt de werking van veel biociden beïnvloedt door pH.



**Sulfaten** – deze komen van nature voor in alle typen water, en kunnen van natuurlijke bronnen komen, maar ook potentieel van naburige industrieën. Sulfaten kunnen mogelijk aanleiding geven tot de vorming van sterke zuren, of betrokken raken in reacties waardoor de oplosbaarheid van metalen en andere materialen (o.a. cement/beton) beïnvloed wordt.

**Chloriden** – een algemeen anion in water, waarvan meer aanwezig is als de saliniteit toeneemt. Het is van invloed op de corrosie, en mogelijk reacties met cement.

**Calcium** – kationen als calcium hebben de neiging om neer te slaan als de temperatuur toeneemt, en het vergt beduidende hoeveelheden inhibitoren (polymeren) om dit onder controle te houden.

**Ammonia** – is van nature aanwezig in oppervlaktewater, maar kan ook naburige industrieën als bron hebben. Het speelt rol in corrosie van koper, en speelt rol in het chloordemand bij chlorering.

Het gevolg van deze chemische conditie zijn met name corrosie en scaling, en deze moeten met specifieke chemicaliën (waterbehandeling) worden beheerst. Deze chemicaliën worden semi-continue aan het recirculerende koelwater toegevoegd, om de werkende concentratie continue op peil te houden. Vanwege de aanwezigheid van vaste deeltjes in het recirculerende koelwater (afkomstig uit het aanvoerwater en de lucht die door de koeltoren stroomt, maar ook aanwezig in het suppletiewater), is ook filtratie van toepassing.

De noodzakelijke inzet van additieven in open recirculatie koelwater-systemen wordt voornamelijk bepaald door de aanwezigheid van hardheidszouten (zoals calcium en bicarbonaten) in combinatie met de pH van het koelwater, de verzadigings-pH waarbij scaling wordt gevormd en de maximale temperatuur in het systeem. Zouten in het suppletiewater kunnen bij het verhogen van de indikkingfactor dusdanig worden geconcentreerd dat ze onoplosbaar worden en neerslaan op oppervlakken in het koelwatersysteem, waarbij warmte de afzetting positief beïnvloedt.

Naast de conditionering van het recirculatiewater met specifieke chemicaliën, worden ook biociden gedoseerd voor de bestrijding van biologie, met name microbiologie (biofilm). De werking van biociden is specifiek, en geeft ook aanleiding voor maatregelen om emissie van deze stoffen met de pluim (drift) adequaat te ondervangen in het ontwerp (RIVM, 2024).

#### 4.5.5 Sediment, slib en zwevend stof

Sediment en zwevend stof zullen zich afzetten op en in systeemonderdelen waar de hydraulische conditie dit toelaat – met name waar lage stroomsnelheden heersen. Voorbeelden van effecten zijn:

- Sedimentatie in bassins, waardoor het (gespecificeerde) koelvolumen afneemt
- Sedimentatie en afzetting in leidingdelen met weinig doorstroming (systeemdelen binnen het complexe systeem, die beperkt gebruikt worden)
- Verstopping van nozzles waardoor het water minder efficiënt wordt verspreid, en de efficiëntie van de koeltoren afneemt
- Afzetting op koeltorenpakketten – de luchtdoorstroming neemt niet alleen af, maar deze worden ook zwaarder, waardoor er een hoge belasting ontstaat op de draagconstructie
- Slibafzetting kan leiden tot anaerobe condities aan het oppervlak en versnelde corrosie
- Zwevend stof kan de koeltoren met de emissie van aerosolen (drift) de koeltoren verlaten en met depositie in de omgeving terecht komen (PM10)



Figuur 6. Voorbeeld van slibafzetting in een koeltorenpakket (Maulbetsch & DiFilippo, 2008 ppt).

Het probleem met sedimentatie (grof sediment en slib) en zwevend stof, is over het algemeen niet groter op kustlocaties dan op veel (laagland)rivierlocaties. Mariene sedimenten zijn in veel gevallen grover dan riviersedimenten en kunnen gemakkelijker uit het inkomende water worden verwijderd. Als ze blijven liggen, zal grof en fijn zand vrijwel zeker in het circuit terechtkomen. Als er aanwijzingen zijn voor hoge concentraties zwevend zand en slib, moeten in het ontwerp maatregelen worden genomen om deze af te vangen, voordat het gesuppleerd wordt. Het aanhouden van hoge watersnelheden in het recirculatiesysteem en een hellende bodem in het bassin, zijn daarvoor niet toereikend. Er moeten een effectieve zandvang worden toegepast (bezinkbassin) met automatische zandverwijdering, en eventueel (retrofit) hydrocyclonen. Met name in gebieden met sterke getijdenwerking en -stroming, en sedimenttransport (inclusief de fijnste deeltjes), moet een recirculatiesysteem hier op aangepast worden.

#### 4.5.6 Scaling en corrosie

Scaling en corrosie zijn kritische factoren, en moeten vanaf de initiële ontwerpfase van zeewatercircuits worden meegenomen in de engineering en ontwerp waterconditionering. Vaak wordt Langelier-verzadigingsindex, een evenwichtsindex die echter geen indicatie geeft van de mate van scaling die zal optreden. Scaling en corrosie worden in belangrijke mate beïnvloed door pH, calciumhardheid (mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ), m-alkaliteit (mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ), totale hoeveelheid opgeloste vaste stoffen (mg/L) en de temperatuur. In theorie kan een evenwichtstoestand worden gehandhaafd waarbij scaling en corrosie afwezig zijn, maar dat is nagenoeg onmogelijk door de dynamiek in een koeltorensysteem.

Bij een lage concentratiefactor (relatief hoge spui en suppletie), is het verbruik van corrosie-inhibitoren hoog, met bijbehorende economische en ecologische impact. Soms worden recirculatiecircuits ontworpen met een laag volume, om zodoende hoge watersnelheden te handhaven om slib en fijn zand in beweging te houden. Als deze vaste deeltjes niet (permanent) in suspensie worden gehouden, kunnen deze door een schurende werking slijtage veroorzaken aan beschermende passivatielagen op metalen componenten en de corrosiesnelheid verhogen.

#### 4.5.7 Zicht en geluid

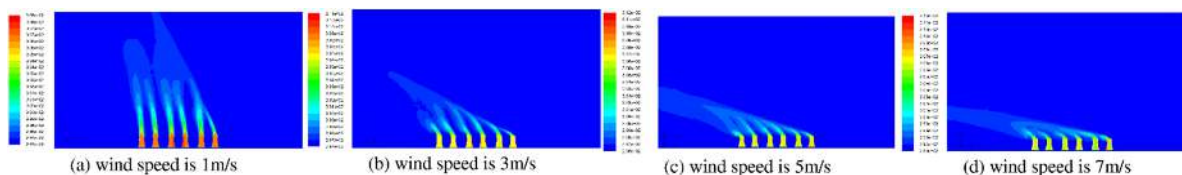
Met name natte koeltorens met natuurlijke trek vallen zeer op door hun grote hoogte (zeg 150 – 200 m) en de pluim. Het geluid is voornamelijk afkomstig van het vallende water, maar kan behoorlijk zijn. Koeltorens met mechanische trek zijn (aanmerkelijk) lager (zeg 20 – 60 m), maar nog steeds visueel aanwezig en produceren meer geluid door de toepassing van ventilatoren. Bij deze systemen kunnen technieken worden toegepast om de visuele pluim die de toren verlaat te beperken.

Naast dat natte koeltorens grote afmetingen hebben en zichtbare pluim, produceert het ook geluid als gevolg van de vallende waterdruppels en bij geforceerde trek het geluid van de ventilatoren. De hybride koeltorens, bestaande uit een droog een nat gedeelte produceren een beperkte pluim. De geluidemissie, afkomstig van de noodzakelijke ventilatoren en van het vallende water, is behoorlijk.

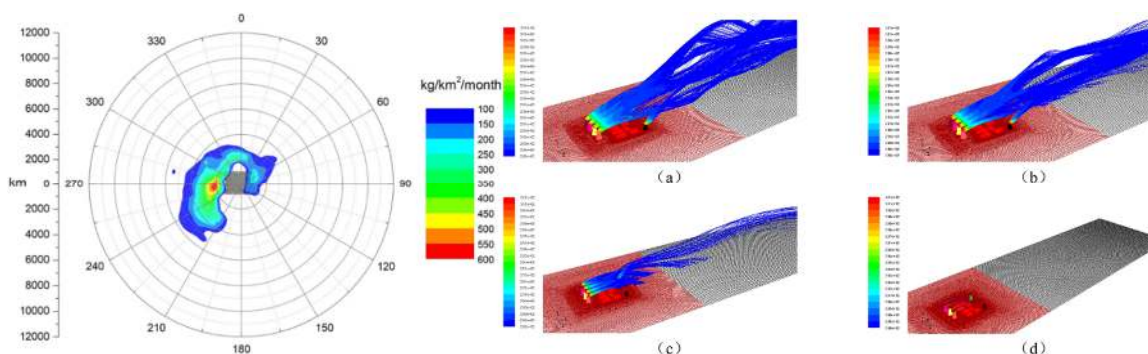
#### 4.5.8 Pluimvorming – drift, carry-over en depositie

Drift en chemische emissies vanuit een koeltoren dienen adequaat te worden beheerst (Ruiz Ramírez et al 2017; RIVM, 2024), en heeft betrekking op de gezondheid van mensen en overige impacts op de omgeving. Het gaat daarbij om de verspreiding van pathogenen, chemie, deeltjes, zouten, etc.

In het ideale geval is de pluim uit een koeltoren zuiver condensaat, en zou als zodanig vrijwel geen zout moeten bevatten, mits er geen aerosolen ontsnappen. In koeltorens met mechanische trek worden druppelvangende (drift-eliminators) toegepast, om de aerosolen (met daarin zouten, PM10) af te vangen.



Figuur 7. Voorbeeld van modelering van het effect van windsnelheid op drift uit koeltorens (Liang et al 2023).



Figuur 8. Voorbeeld van modelering jaarlijkse cumulatieve zoutdepositie in de omgeving (links) en verspreidingsroutes van aerosolen (rechts) (Li et al 2025).

Door fysieke krachten als gevolg van lucht- en waterbelasting, en vervuiling/verstopping, of door inadequaat onderhoud en (her)montage van onderdelen, verandert de luchtstroom, en neemt het zogenaamde 'driftverlies' toe (i.e. koelwaterverlies anders dan door verdamping). Door koeltorens met natuurlijke trek worden de aerosolen op grote hoogte uitgestoten die relatief snel in omvang afnemen door verdamping naarmate ze verder verwijderd raken van de toren. Zouten en fijnstof (PM10) verlaten met de aerosolen het systeem en worden met de pluim naar de omgeving verspreid. Afhankelijk van de omstandigheden vindt depositie in de omgeving plaats, met mogelijke impact op de leefomgeving en bebouwde omgeving (corrosie van metalen constructies op de eigen locatie alsook op de omliggende omgeving, onder andere industriële complexen, bewoond gebied, landbouwgrond, etc). Hoewel zout-drift uniek is voor zeewater koeltorens, is drift van vaste stoffen (en overige chemie) een probleem voor elke type koeltoren die met een hoge concentratiefactor (CF) werkt.

#### 4.5.9 Bestrijding van biofouling

Op de verschillende mogelijke kustlocaties (kustwater/estuariene milieus) zijn de te verwachten aangroeiorganismen: zeewatermosselen, oesters, met name de Japanse oester, zeepokken en brakwaterpokken, brakwatermosselen, hydroïden, ook wel 'apehaar' genaamd, kokerwormen (*Sabellaria*), en kalkkokerwormen. De larven van deze soorten komen met het suppletiewater het koeltorensysteem in. Afhankelijk van het ontwerp, zijn er specifieke locaties waar deze zich zullen hechten en mogelijk uitgroeien tot grote gemeenschappen (kolonies).

Een standaardmethode voor de bestrijding van macrofouling in doorstroom zeewatersystemen is dosering van natrium-hypochloriet (chlorering) – te doseren volgens BBT-principes (Pecten Aquatic, 2025). Ook in indirecte systemen (koeltorens) is chlorering een standaardmethode, maar worden ook wel andere biociden toegepast, en andere hulpchemie. Naast de 'macrofouling'-organismen is ook bacteriële aangroei ('microfouling', of biofilm) van belang. Een biofilm kan thermofiele pathogenen herbergen (ziekteverwekkende bacteriën die groeien bij hoge temperaturen, >45°C), en afzetting van biofilm op metalen oppervlakken kan leiden tot specifieke microbiologische corrosie (MIC). Microbiologische aangroei vindt plaats binnen het recirculerende koelwatersysteem, waarvoor een adequate, gerichte chemische waterbehandeling nodig is.

Op sommige locaties is vanwege lokale natuurwetgeving geen mogelijkheid om natrium-hypochloriet te doseren. Alternatieve chemie (biociden) is in de regel minder kosteneffectief. Een alternatieve methode is een frequente thermische behandeling, de zogenaamde thermoshock toe (alleen van toepassing voor doorstroomsystemen, met een specifiek daartoe ontworpen koelwatersysteem) (Pecten Aquatic, 2025). Het opgewarmde koelwater wordt tijdelijk gerecirculeerd (over de condensor of met een retourleiding) om de temperatuur binnen het koelwatercircuit tot een hoogte te brengen waarbij macrofouling wordt afgedood. De procedure neemt zeker een halve dag in beslag, en heeft een beduidende impact op de output (MWe) van de installatie, en vergt tevens een specifieke, risicovolle procedure om het koelwater intern te recirculeren, door het gelijktijdig dichtzetten en openen van strategische afsluitkleppen.

Thermoshock is niet mogelijk indien een koeltoren wordt toegepast. Voor de bestrijding van biofouling in een recirculatiesysteem met koeltoren is alleen dosering van chemicaliën van toepassing. De lozing van de restchemie als bijproduct van de aangroeibestrijding, is mogelijk niet vergunbaar en kan daardoor mogelijk bepalend zijn voor de mogelijkheid om op een locatie een koeltoren toe te passen.

#### 4.5.10 Thermofiele pathogenen

Thermofiele pathogene micro-organismen zijn aanwezig in het oppervlaktewater en hebben in vochtige warme milieus een toenemende groei en ontwikkeling, met name recirculerende koelsystemen. Door toename van de temperatuur van het oppervlaktewater, neemt de kans toe op de aanwezigheid. In zoet water betreft het bijvoorbeeld *Legionella*, zogenaamde vrijlevende amoeben (Free Living Amoebae - FLA) als *Naegleria fowleri*, en *Clostridium botulinum* (gerelateerd aan vogelkadavers). In Frankrijk en België worden dergelijke thermofiele pathogenen reeds standaard gemonitord in de uitlaat van koeltorens (Binet, 2023; Marolleau et al 2024). Studies laten zien dat de invloed op rivierwater door een koelwatersysteem aanzienlijk kan zijn. In zout water is bijvoorbeeld *Vibrio cholera* van belang (gerelateerd aan schaaldieren). Thermofiele pathogenen kunnen voorkomen in de biofilm, en in kadavers en resten van vogels, vissen en schelp- en schaaldieren die in het systeem terechtkomen. De veiligheidsaspecten die gerelateerd zijn aan deze pathogenen (inclusief de verspreiding naar de omgeving), zijn direct gerelateerd aan het onderhoud, de chemische conditionering van het recirculerende water en beheersing van de aerosolpluim.

#### 4.5.11 Samenvatting bedrijfsvoering koeltorens met zeewater

Koeltorens die worden toegepast met zeewater zijn al eerder overwogen, maar hebben tenminste alle problemen van zoetwaterkoeltorens plus die van directe koeling. Hun efficiëntie is lager, met proportioneel grotere volumes te lozen water dan een zoetwater koeltoren. Chemische waterbehandeling is van cruciaal belang, en er spelen meerdere chemische evenwichten een rol. Chemische conditionering van het recirculerende koelwater is een noodzaak in verband met concentratiefactor, scaling, corrosie, biofouling, en verspreiding van pathogenen met de pluim (*Vibrio sp*), maar ook managen van zwevend stof, slib en zand. De aerosolpluim is zout en bevat fijnstof, dus moet rekening worden gehouden met de depositie in de omgeving (landbouw (e.g. gewassen en bodem), bebouwing, en naburige industriële installaties (e.g. zilte aanslag en corrosie). De mechanische processen (e.g. pompen en afsluiters) en de toegepaste materialen voor kritische componenten als condensors en warmtewisselaars in het recirculatiesysteem moeten zowel geschikt zijn voor het corrosievere koelwater als, cruciaal, een veel hogere concentratie zwevende deeltjes en problemen met de afzetting en bezinking van de vaste deeltjes (slib, klei, zand, etc). Bedrijfsvoering zonder intensief onderhoud en reguliere stops is alleen in theorie haalbaar, in de praktijk zijn frequente inspecties en onderhoudstops strikt noodzakelijk – hierdoor ontstaan er operationele problemen (impact op MWe capaciteit), alsook problemen door vergaande vereisten in het ontwerp. Dit heeft consequenties voor de economische haalbaarheid.

#### 4.6 Koelwaterstrategieën

De volgende strategieën zijn ter overweging. De technische haalbaarheid op een locatie, waarbij wordt voldaan aan alle vereisten voor een kerncentrale, zal moeten worden onderzocht. Het is waarschijnlijk dat door de verschillen per locatie (e.g. ligging ten opzichte van oppervlaktewater, beschikbare ruimte en de omgeving), voor elke specifieke locatie een specifieke strategie kan worden vastgesteld.

Voorkeuren kunnen per locatie worden vastgesteld door een rekenkundige onderbouwing en duiding van de consequenties voor kritische aspecten zoals het functionele vereisten voor ontwerp, de bouw(kosten), bedrijfsvoering, gebruik van ruimte, impact op netto MWe, veiligheid van mens en milieu, etc. Voor een warmtelozing >10 MWth aan de kust, is vanwege de beschikbaarheid van voldoende koelwater een doorstroomsysteem BBT (Best Beschikbare Techniek; zie o.a. tabel 4.2 en Annex XII in de BREF, 2001) waarbij recirculatie van het geloosde warme koelwater naar de inlaat moet worden voorkomen. Doorstroomkoeling is dan ook het uitgangspunt in de locatiekeuze voor de nieuwe kerncentrales. Ondanks kan het nodig zijn in het ontwerp mitigerende maatregelen te nemen, of een alternatief voorhanden te hebben, indien (op termijn) de omstandigheden en criteria de warmtelozing van een direct systeem beperken of (tijdelijk) niet toelaten. Met het oog op potentiële toekomstige beperking van de warmtelozing (indien structureel), moet nu al gekeken worden naar civiele voorbereidingen in het primaire ontwerp om mitigerende maatregelen te kunnen implementeren.

Mogelijke koelwaterstrategieën zijn als volgt:

**Directe koeling** – een doorstroom koelwatersysteem is de meest efficiënte wijze van koeling voor een kerncentrale. Het is optimaal om een locatie te kiezen waar dit over de gehele levensduur van de installatie, inclusief fase van ontmanteling, toegepast kan worden zonder noodzakelijke tussentijdse aanpassing. Het is van belang in het ontwerp met voldoende redundancy rekening te houden. De ligging van de inlaat en het uitlaatwerk moeten dusdanig worden gedimensioneerd en gepositioneerd (diepte, oriëntatie, etc) dat de hydraulische condities optimaal zijn – bij het inlaatwerk in relatie tot de inzuiging van biota, met name vis, en bij het uitlaat werk om het opgewarmde koelwater naar het oppervlak te sturen – stratificatie is nodig voor het voorkomen/beperken van recirculatie, én door op deze wijze te lozen kan de koelwaterpluim aan het oppervlak snel afkoelen naar de lucht en zal de pluim de bodem

niet raken. Het is daarbij van belang een adequate aangroebestrijding toe te passen (BREF, 2001; Pecten Aquatic, 2025), om de efficiëntie te waarborgen.

**Verdunning** – het is een mogelijkheid om in een direct koelsysteem het opgewarmde koelwater voordat het geloosd wordt, te verdunnen met niet-opgewarmd oppervlaktewater. Dit zou alleen nodig kunnen zijn in perioden waarin (tijdelijk) de lozingscriteria naar verwachting zullen worden overschreden. Een dergelijke verdunning wordt reeds elders toegepast in warme gebieden, bijvoorbeeld bij Barakah NPP (UAE) en andere installaties in het Midden-Oosten en ook bijvoorbeeld Florida. Hiervoor zijn extra koelwaterpompen nodig en bijbehorende infrastructuur. Het heeft consequenties voor de totale onttrekking (grote koelwaterinlaatconstructie) en bijbehorende vergunningen. NB, in het Midden-Oosten moet de temperatuur in gevallen bijna worden gehalveerd ( $\Delta T$  4°C). De hoeveelheid extra pompen is afhankelijk van de benodigde verdunning om de gewenste verlaging van de temperatuur te krijgen.

**Helper-toren** – met het toevoegen van een helper-toren aan een direct koelsysteem, wordt het opgewarmde koelwater gekoeld voordat het geloosd wordt - de temperatuur kan mogelijk met enkele graden worden verlaagd. Hiervoor is extra infrastructuur nodig en additionele pompen om het water door de toren heen te krijgen. Er is in principe geen extra onttrekking, maar wel een invloed op infrastructuur, bouw(kosten), ruimte, en bedrijfsvoering van de koeltoren. De helper-toren hoeft feitelijk alleen gedurende kritische perioden, waarin de achtergrondtemperatuur kan leiden tot overschrijding van de lozingscriteria, worden toegepast. Dit betekent dat het systeem een groot deel van de tijd niet in bedrijf is, waarvoor specifiek onderhoud nodig is.

**Indirecte koeling** – het is mogelijk de gehele koeling uit te voeren met indirecte koeling, met recirculatie over een koeltoren. De meest efficiënte koeltoren is een natte koeltoren met natuurlijke trek (hyperboloïde toren) – NB het ontwerp van een natte koeltoren moet gebaseerd zijn op condities die gelden onder toekomstige klimatologische omstandigheden. Alle andere opties, zijn minder efficiënt (en zijn dus meer of grotere torenunits nodig) en verbruiken meer energie (e.g. pompen en ventilatoren), en de waterconsumptie ligt hoger. Koeltorens met zeewater vergen daarnaast extra aandacht vanwege de specifieke chemie en benodigde inspectie en onderhoud. Indirecte en directe koeling kunnen ook worden gecombineerd, het koelwatersysteem moet hiervoor worden ingericht, en het koelvermogen van de koeltoren moet dusdanig worden gedimensioneerd dat het minstens de koeling van het directe systeem kan behalen. Het heeft consequenties voor de bedrijfsvoering, welke berekend moet worden. Eventueel is indirecte koeling te combineren met directe koeling, waarbij recirculatie alleen wordt toegepast tijdens periodes waarin zich omstandigheden voordoen die leiden tot overschrijding van de lozingscriteria – de overige periode kan het directe systeem worden toegepast.

**Retrofit** – als wordt gestart met een direct systeem, moet deze op termijn mogelijk worden aangepast indien er structurele overschrijding is van de lozingscriteria (warmtelozing), als een toename van de achtergrondtemperatuur daar aanleiding toe geeft. Er kan dan in principe gekozen worden uit bovenstaande opties, i) verdunning, ii) helper-toren(s), of iii) ombouwen naar een indirect systeem (recirculatie over koeltorens). Met name de laatste optie heeft significante gevolgen voor de installatie, en vereist onder andere- aanpassing van condensor en leidingsysteem, alsook de inlaat en pompen, etc. Er moet ook vooraf al rekening worden gehouden met ruimtegebruik.

De hierboven beschreven koelwaterstrategieën zullen voor een locatie moeten worden 'doorberekend' om hun toepasbaarheid te kunnen vaststellen. In onderstaande tabel 3 wordt een overzicht gegeven van de voor en nadelen van genoemde strategieën.



Tabel 3. Koelwaterstrategieën.

Strategie	Omschrijving principe	Voordelen	Nadelen
Directe koeling	Doorstroom koelwatersysteem, met inlaat en uitlaat onshore of offshore	BBT (Best Beschikbare Techniek) vanwege beschikbaarheid voldoende koelwater aan de kust  Meest efficiënte optie voor koeling energiecentrales (MWth)  Relatief laag energieverbruik	Grote omvang koelwatervolume (m <sup>3</sup> /s) conform vereisten ontwerp  Onttrekking (inzuiging) van biota (impact op vis)  Warmtelast (lozing) mogelijk beperkt door hoge achtergrondtemperatuur in een warme zomer  Aangroeibestrijding: lozing restchemie bij chlorering, of extra warmte bij thermoshock  Kans op recirculatie (afweging ligging in- en uitlaat)
Verdunning	Doorstroom koelwatersysteem, met een extra set pompen, debiet in bypassroute direct naar het offshore uitlaatwerk	Lagere temperatuur lozing  Inzet alleen als het nodig is (beperkt tot warme periode)	Grotere onttrekking (m <sup>3</sup> /s) – extra debiet afhankelijk van gewenste verdunning om de koelwatertemperatuur omlaag te krijgen  Extra aantal verdunwaterpompen en groter inlaatwerk  Toename inzuiging biota in periode dat extra debiet wordt onttrokken  Extra maatregelen (en onderhoud) aan verdunwaterpompen, bijbehorende inlaat en leidingen als deze niet in bedrijf zijn
Helper-toren	Doorstroom koelwatersysteem, met in het uitlaatsysteem voor de lozing een koeltorensysteem	Lagere temperatuur lozing in kritische periode met hoge achtergrondtemperatuur bij gelijkblijvend koelwaterdebiet  Inzet alleen als het nodig is (beperkt tot warme periode)	Extra ruimtegebruik (totale capaciteit voor gehele debiet doorstroomsysteem, of deel debiet?)  Visuele impact (hoogte toren en pluim)  Geluid (afhankelijk van type koeltoren)  Kosten aanleg?  Extra booster-pomp(en)  Extra onderhoud tijdens stilstand (tijdelijk gebruik)  Extra taken tijdens bedrijfsvoering helper-toren voor de aspecten zoals genoemd bij 'indirecte koeling'  Vereisten waterbehandeling nog onbekend (beperkte periode in bedrijf)  Waterconsumptie (verdamping)



Strategie	Omschrijving principe	Voordelen	Nadelen
Indirecte koeling	Recirculatie over een koeltorensysteem	Lager debiet Kleinere onttrekking Lagere warmtelast Mogelijke combinatie met directe koeling (beperkt tot warme periode)	Lagere koefficiëntie – impact op de netto MWe (revenu) Hoger intern energieverbruik Significant groter ruimtegebruik Ingewikkelde infrastructuur Visuele impact (afhankelijk van hoogte toren en pluim) Geluid (afhankelijk van type koeltoren) Hoge impact door sediment, extra maatregelen nodig Lage concentratiefactor door zeewater Chemieverbruik waterbehandeling hoog: aangroeibestrijding, scaling, corrosie, pathogenen, etc Veel effort nodig voor algemeen civiel onderhoud constructie Verspreiding van zouten/pathogenen/PM10 naar omgeving Hoge waterconsumptie (verdamping)
Retrofit 1	Toevoegen extra pompen voor verdunning	Lagere temperatuur lozing Inzet alleen als het nodig is (beperkt gebruik in warme periode) Geen of beperkte impact op bedrijfsvoering	Grotere onttrekking (vergunning nodig) Grotere koelwaterinlaat: op voorhand al ruimte beschikbaar houden, eventueel deel van civiele bouw en voorbereiding bodem al uitvoeren Installatie periode buiten bedrijf tijdens aanpassing Kosten aanpassing infrastructuur Extra onttrekking, toename inzuiging biota Extra leiding voor bypass naar uitlaat Hoger intern energieverbruik koelwaterpompen



Strategie	Omschrijving principe	Voordelen	Nadelen
Retrofit 2	Toevoegen helper-toren	<p>Lagere temperatuur lozing</p> <p>Inzet alleen als het nodig is (beperkt gebruik in warme periode)</p> <p>Geen of beperkte impact op bedrijfsvoering</p>	<p>Grotere koelwaterinlaat: op voorhand al ruimte beschikbaar houden, eventueel deel van civiele bouw en voorbereiding bodem al uitvoeren</p> <p>Extra ruimtegebruik nog onbekend (afhankelijk van vereiste MWth)</p> <p>Installatie periode buiten bedrijf tijdens aanpassing</p> <p>Kosten aanpassing infrastructuur</p> <p>Hoger intern energieverbruik boosterpompen</p> <p>Extra taken tijdens bedrijfsvoering en onderhoud koeltoren</p> <p>Vereisten waterbehandeling nog onbekend</p> <p>Toename waterconsumptie (verdamping)</p>
Retrofit 3	Volledige ombouw van direct koelwatersysteem naar een indirect koelwatersysteem met koeltorens	<p>Lager debiet</p> <p>Kleinere onttrekking</p> <p>Lagere warmtelast</p>	<p>Beperking van de efficiëntie van de kerncentrale (netto MWe) ten opzichte van het oorspronkelijke ontwerp</p> <p>Grotere koelwaterinlaat: op voorhand al ruimte beschikbaar houden, eventueel deel van civiele bouw en voorbereiding bodem al uitvoeren</p> <p>Installatie periode buiten bedrijf tijdens aanpassing</p> <p>Hoge kosten aanleg nieuwe infrastructuur</p> <p>Aanpassing inlaatwerk (kleinere koelwaterpompen?)</p> <p>Aanpassing condensor en koelers</p> <p>Grote impact op bedrijfsvoering en onderhoud</p> <p>Minimaal de nadelen zoals genoemd bij 'indirecte koeling'</p>



---

## 4.7 Beoordeling Risicoaspecten

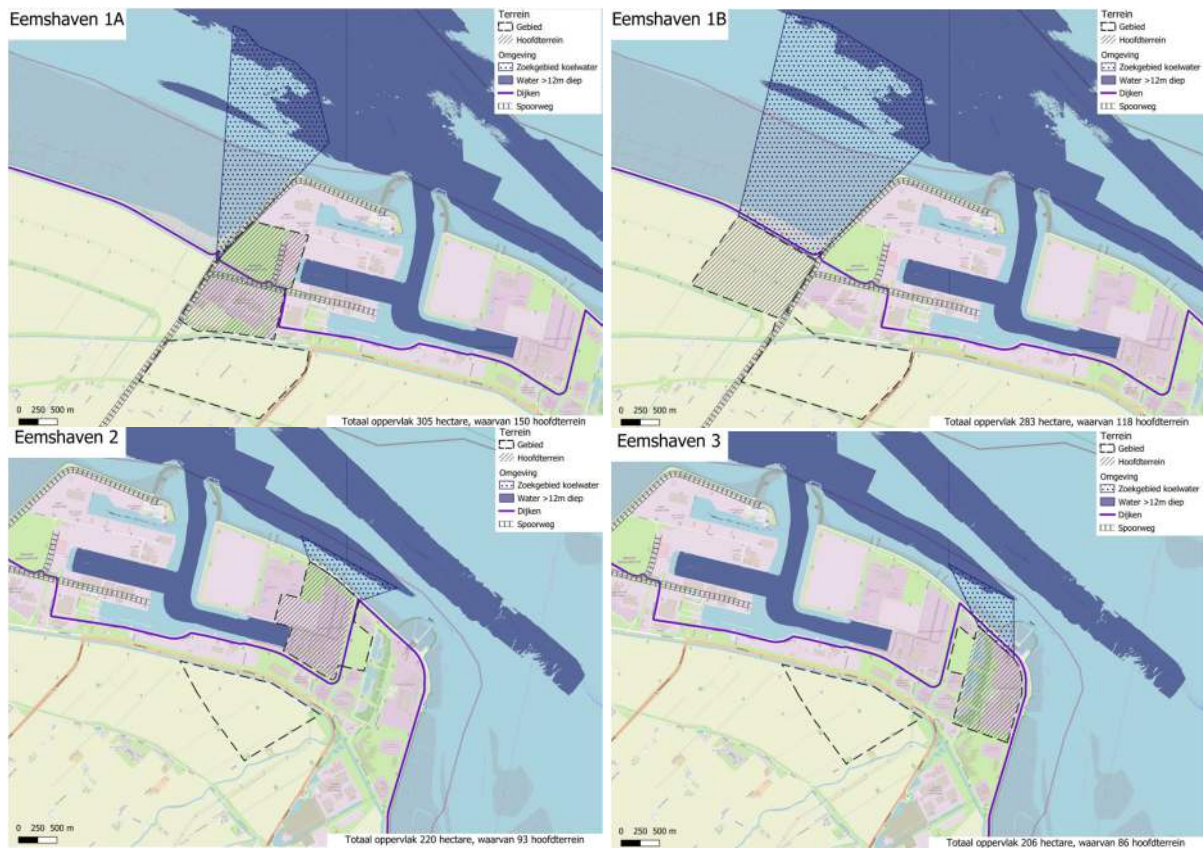
Zonder een locatiespecifiek ontwerp van een koeltorensysteem, is geen duiding te maken welke van de relevante risicoaspecten risicovoller zijn. De bijbehorende risico's zijn primair onder te verdelen in risico's met betrekking tot de bedrijfsvoering, gezondheid personen (personeel en in omgeving) en het milieu. De mater waarin een risicoaspect zich voordoet, is afhankelijk van de lokale situatie en omgeving. Deze risicobeoordeling zal dan ook onderdeel zijn van de evaluatie in het project-MER.

## 5 BEKNOPTE DUIDING KOELWATER PER REGIO

Ondanks dat alle locaties aan de kust liggen, zijn er duidelijke verschillen in het type gebied (e.g. havens, open kustgebied en estuarium, etc). Dit betreft kenmerken van het watersysteem en dynamiek daarin (e.g. getijdenwerking, doorstroming, sedimentatieprocessen, etc), maar ook aspecten als de nabijheid van overige functies zoals industrie, bewoning, landbouw en natuur, etc. Hieronder wordt kort per regio beknopt een duiding gemaakt, er is geen uitgebreide analyse per locatie uitgevoerd voor de relevante aspecten. Het evalueren en ontwikkelen van uitvoeringsalternatieven voor koeling vergt een multidisciplinaire proces.

### 5.1 Regio Eemshaven

In het Eemsgebied is voldoende koelwater beschikbaar en op deze locatie is doorstroomkoeling BAT. Er heeft reeds nieuwbouw plaatsgevonden, wat gevolgen kan hebben voor de beschikbaarheid van koelwater en met name beïnvloeding van de inlaattemperatuur (recirculatie). Het meest optimaal is koelwateronttrekking uit de haven, en lozing via een offshore leiding (voorkomen beïnvloeding van de overige grootschalige onttrekkers koelwater). Het toevoegen van een derde grote koelwatergebruiker met onttrekking uit de Eemshaven heeft een grotere, een permanente flow vanuit de Waddenzee naar de haven tot gevolg, wat effecten zal hebben op slibtransport en visdichtheden en soorten in de haven.



Figuur 9. Locatieschetsen voor de Eemshaven.

Het watersysteem van de Waddenzee kent een zeer groot en dynamisch transport en afzetting van (fijn) slib. De bestaande koelwatersystemen ondervinden specifieke operationele problemen met sedimentatie en afzetting van fijne deeltjes, met name voor de koelwaterinlaat en in leidingdelen met beperkte doorstroming. Een koeltorensysteem zal hier significant veel last van hebben, en om kritische effecten te beheersen zal een effectief bezinkbassin moeten worden voorzien. Als te veel slib het recirculatiesysteem binnentreedt, heeft dat significante impact op de efficiëntie, bedrijfsvoering, verbruik van chemicaliën en structurele veiligheid van het koeltorensysteem.

## 5.2 Regio Maasvlakte

Voor de locatie Maasvlakte wordt uitgegaan van de Maasvlakte 2. Ook hier is het van belang om een locatie te kiezen waarbij er een minimale recirculatie van geloosde warmte optreedt. Bij onttrekking van koelwater uit de haven en lozing op de Noordzee, treedt recirculatie in principe niet op. Bij de lozing in de haven zal ophoping van warmte plaatsvinden, en daar is in principe geen ruimte voor een kerncentrale.



Figuur 10. Locatieschets voor Maasvlakte II

In dit gebied speelt sedimentatie ook een rol, waarbij fijn materiaal wordt aangevoerd met de getijdenbeweging, en bezinkt in de relatief stilstaand delen, de havens aanpalend aan het Beerkanaal. De warmtelozing van overige koelwatergebruikers, en uitwisseling (verversing) van het watervolume in de havens is beperkt. Dit heeft een invloed op de waterkwaliteit van het suppletiewater. Vanwege de aanwezigheid van veel industrie in het gebied, is de impact van drift uit de koeltoren een kritisch aspect.

## 5.3 Regio Sloegebied

De locatie Borssele ligt aan de noordkant van de Westerschelde aan een 10 tot 25 meter diepe geul. De getijdenbeweging is hier sterk. Door deze sterke getijdenbeweging kan in het algemeen een goede menging en beperkte recirculatie verwacht worden. De koelcapaciteit van de Westerschelde is daarmee groot, en het opgewarmde koelwater kan relatief gemakkelijk op de Westerschelde, dicht bij de geul, worden geloosd.

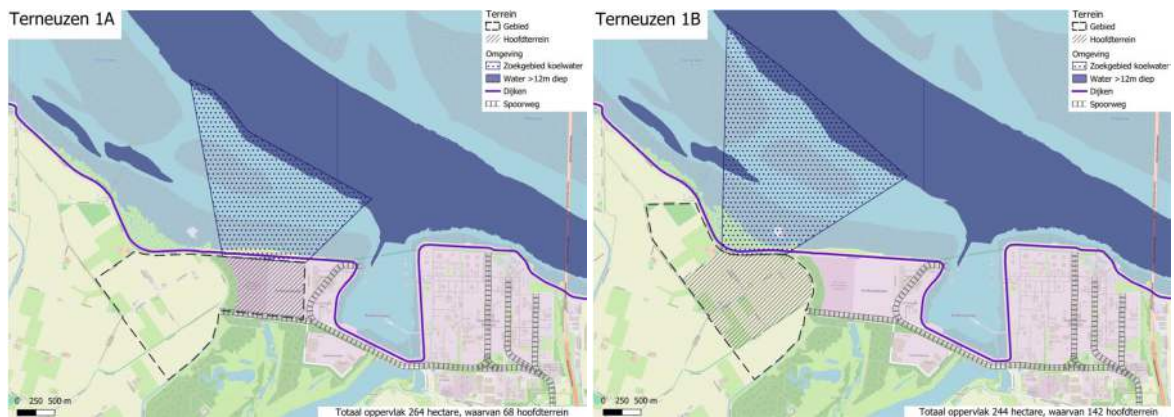


Figuur 11. Locatieschetsen voor het Sloegebied

Het sedimenttransport in het gebied is zeer groot, en er wordt frequent baggerwerkzaamheden uitgevoerd om de vaargeul beschikbaar te houden voor grote zeeschepen naar en vanuit de haven van Antwerpen. Inname en lozing in of nabij deze vaargeul kent dus veiligheidsrisico's in relatie tot baggerwerk en grote schepen. In dit gebied kan een grote belasting van sediment en fijn slib worden verwacht, waarvoor adequate voorzieningen moeten worden getroffen voor het afvangen van sediment voordat dit gesuppleerd wordt. Vanwege de aanwezigheid van veel industrie in het gebied, is de impact van drift uit de koeltoren een kritisch aspect.

## 5.4 Regio Terneuzen

De locatie Terneuzen ligt aan de zuidkant van de Westerschelde, eveneens aan een vaargeul. De getijdenbeweging is hier net als aan de noordzijde, sterk.



Figuur 12. Locatieschetsen voor Terneuzen.

De effecten met betrekking tot de toepassing van koeltorens zijn vergelijkbaar met de situatie aan de noordkant. Vanwege de aanwezigheid van een groot naburig industrieel complex, is de impact van drift uit de koeltoren een kritisch aspect, en zo ook de belasting van sediment en fijn slib.

## 6 KOELWATEROPTIES AAN RIVIEREN

### 6.1 Inpassing kerncentrales binnenland

Het MinKGG kijkt ook naar opties voor strategische inpassing van kerncentrales in het binnenland. In riviersystemen is toepassing van doorstroomkoeling, met name op lange termijn, een onzekere factor door toenemende variaties in beschikbaarheid aan voldoende koelwater (droogte), en beperking van de beschikbare koelcapaciteit in perioden met een (te) hoge achtergrondtemperatuur (stroomopwaarts). De toepassing van indirecte koeling (eventueel indien de situatie zich ervoor leent, in combinatie met doorstroomkoeling) is dan de primaire keuze in verband met de vereiste thermische ruimte, alsook flexibiliteit. Voor de veiligheid (UHS, inclusief alle niet-essentiële en essentiële koeling) en continuïteit van de bedrijfsvoering, zijn er dezelfde kritische vereisten voor het ontwerp als voor een kerncentrale aan de kust. Het is mogelijk dat de beperkingen van koeling en beschikbaarheid van koelwater op de lange termijn, de omvang (MWe) van een kerncentrale aan een rivier op voorhand al beperken.

### 6.2 Koelwatercapaciteit rivieren

In Nederland is het 'Nationaal Deltaprogramma' in werking, waarin op de thema's waterveiligheid, zoet water en ruimtelijke adaptatie, projecten (maatregelen) worden ontwikkeld en uitgevoerd om de klimaatbestendigheid en waterrobuustheid van het watersysteem te vergroten, en aan te passen aan de effecten van veranderende klimatologische omstandigheden. Een belangrijk onderdeel is de beschikbaarheid van zoetwater voor verschillende gebruiksfuncties, waaronder natuur, drinkwater, landbouw, scheepvaart, industrie, energievoorziening, etc.

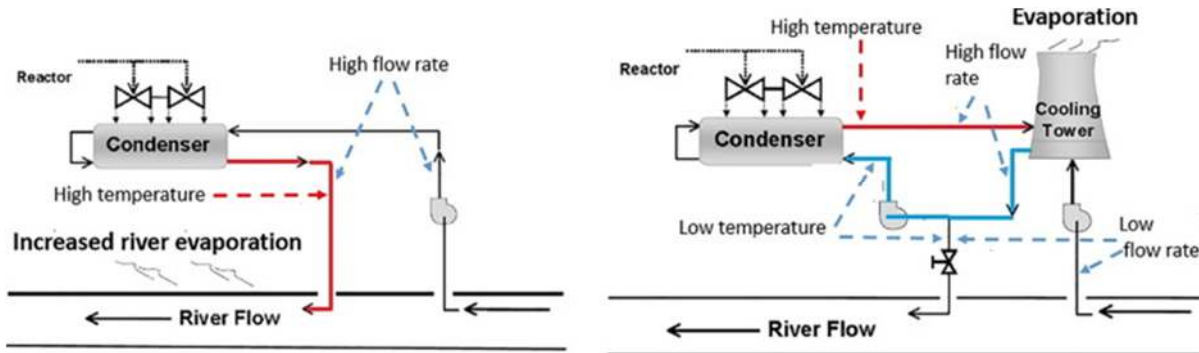
Als onderdeel van de eerste fase van het Deltaprogramma, is een Zoetwaterverkenning uitgevoerd, met daarin het traject 'Koelwater & Energievoorziening', inclusief modelering (1D SOBEK) en een knelpuntenanalyse (zie ook Deltares, 2008; Deltares, 2012). In dit traject is gekeken naar toekomstige ontwikkelingen in klimaat en economie en de effecten daarvan op het watersysteem en op het gebruik daarvan. Met betrekking tot koelwater gaat het om ontwikkelingen in opgesteld vermogen (E-productie) en capaciteit van de industrie en de daarbij behorende warmtelast naar het zoete oppervlaktewater. Op basis van deze aanpak en een update van de informatie, en huidige klimaatmodellen (Deltares, 2023; KNMI'23) met daarin te verwachten extremen in de temperatuur van lucht en water (achtergrondtemperatuur) en waterafvoeren van de verschillende riviersystemen, kan modelmatig de koelcapaciteit van potentiële locaties aan rivieren in detail worden geëvalueerd.

De kwantificering van effecten van koelwaterbeperking voor energiecentrales (inclusief kerncentrales) is alleen rekenkundig/modelmatig vast te stellen. Voorbeelden van deze effecten zijn de veranderingen in hydrologie en (achtergrond)temperatuur en algehele waterkwaliteit in riviersystemen als gevolg van klimaatverandering. Dit is onderzocht voor verschillende kerncentrales aan verschillende riviersystemen (zie o.a. Ouranos, 2016; Collet et al., 2025; Gosse & Samie, 2020; Guénand et al., 2024). Dergelijke achtergronden kunnen in het detailontwerp worden meegenomen.

De effecten op de energievoorziening zijn overigens complexer dan alleen achtergrondtemperatuur, rivierdebiet en koelcapaciteit. Naast de operationele aspecten van koeling spelen ook effecten van (onder andere) de commerciële, strategische inzet van elektriciteitsopwekking (o.a. inzet hernieuwbare energie, marktwerking brandstoffen, netto import/expert, etc.), en de energieprijs voor consument (dispatch model). Op die manier kan een juiste beoordeling gemaakt worden van de mogelijke effecten op lange termijn, als gevolg van de verschillende klimaatscenario's zoals vastgesteld door het KNMI (KNMI'23) en als zodanig worden meegenomen in de koelwatermodellen.

### 6.3 Toepasbare koelwatersystemen aan zoet water

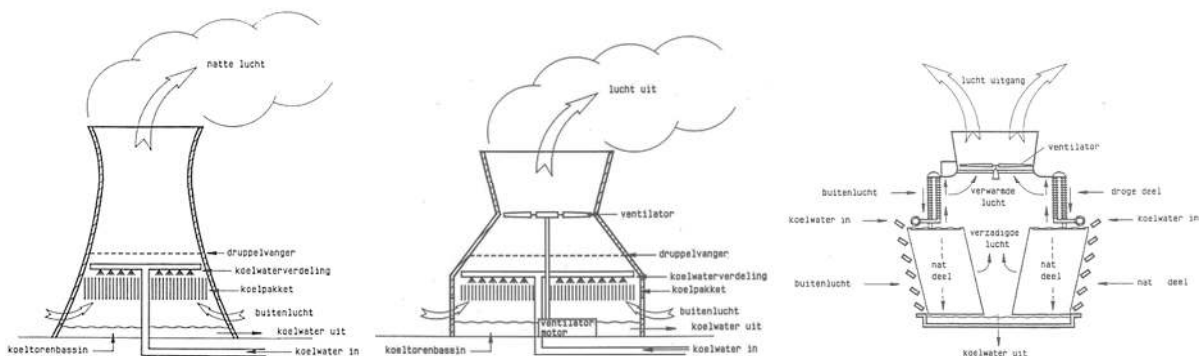
Kerncentrales in het binnenland, maken oudsher bijna allemaal gebruik van directe (doorstroom) koeling, of indirecte koeling met natte koeltorensystemen (Gosse & Samie, 2020; IAEA, 2012).



Figuur 13. toepassing van de koelopties aan rivieren: links directe koeling, en rechts indirecte koeling met natte koeltoren (figuur uit Gosse & Samie, 2020).

Koelwaterbeperking voor elektriciteitscentrales (en overige industrieën) aan rivieren komt voornamelijk door de volgende situaties: *i.* te hoge achtergrondtemperatuur, *ii.* te laag debiet (rivieren), en *iii.* te laag waterniveau om het koelwater effectief te verpompen. Voor binnenwateren doen zich onder de huidige klimatologische en hydrologische omstandigheden al situaties voor waardoor bij hoge achtergrondtemperaturen, een beperkt koelwateraanbod (debiet) of een combinatie van beide, elektriciteitscentrales hun productie moeten beperken om zodoende binnen de lozingslimiet te blijven.

Als gevolg van klimaatverandering kunnen deze situatie steeds vaker voorkomen. Een eerste planmatige aanpassing hierop was de verplaatsing van opwekkingsvermogen naar de kust, waar (in principe) voldoende koelwatercapaciteit aanwezig is. Indien nieuw opwekkingsvermogen door een kerncentrale vanwege strategische redenen in het binnenland gewenst is, kan dat (naar verwachting) alleen met toepassing van indirecte koeling. Eventueel is een systeemontwerp mogelijk waarin doorstroom en recirculatie wordt gecombineerd en afhankelijk van de condities in de rivier (koelcapaciteit, temperatuur van het rivierwater en het debiet) kan worden overgeschakeld.



Figuur 14. De verschillende typen natte koeltorensystemen – links: koeltoren met natuurlijke trek, midden: koeltoren met mechanische trek, en rechts: hybride koeltoren.

Aan het koeltorensysteem zullen grote capaciteitseisen worden gesteld, omdat deze ook onder de meest extreme omstandigheden met hoge luchttemperaturen en met beperkte beschikbaarheid van kwalitatief suppletiewater, een veilige koeling van de installatie (UHS) te voorzien. Een grote, economisch efficiënte koeling wordt in principe bereikt met een grote natte koeltoren met natuurlijke trek. Deze heeft een lagere waterconsumptie (verdamping) en interne energieconsumptie in vergelijking met systemen met mechanische trek (geforceerde trek door ventilatoren).

Verder is voor de installatie van natte koeltorens met natuurlijke en geforceerde trek en hybride koeltorens veel ruimte nodig, en gelden ten aanzien van het rendement, pluimvorming en de geluidemissie, nadelen in vergelijking tot doorstroomkoeling.

## **6.4 Capaciteitsbeperking versus leveringszekerheid**

De afweging voor het implementeren van opwekkingsvermogen door kernenergie aan riviersystemen, moet worden gezien in het kader van de leveringszekerheid van elektriciteit op nationaal niveau. Op dat niveau worden, rekening houdend met het nationaal beschikbare reservevermogen, door Tennet maatregelen afgewogen (stappenplan) bij lokale beperkingen van de energieproductie. De belangrijkste capaciteitsbeperking aan riviersystemen is de koelwaterbeperking, hetzij door beperking vanwege lozingscriteria, dan wel door verdergaande beperking van de koelcapaciteit als gevolg van (kort- of langdurige) lage rivierafvoeren en hoge achtergrondtemperaturen.

Hierbij moet opgemerkt dat de vereisten van het koelwatersysteem voor het UHS, inclusief alle noodvoorzieningen, zeer hoog zijn. Tevens, de aard van de bedrijfsvoering van een kerncentrale niet geschikt voor het reactief snel op- en afregelen (tijdelijke productiebeperking – 'derating') of uit- en aanschakelen (ongeplande shut-downs).



## GERAADPLEEGDE BRONNEN

- Amin, S. & Ali, R. 2017. Analysis of alternative cooling options for a 1000 MWe Power Plant at reduced temperature difference across Ultimate Heat Sink. Int. J. of Thermal & Environmental Engineering. Volume 15, No. 2 (2017) 87-96.
- Antea, 2025. Concept notitie Reikwijdte en Detailniveau. Plan-MER locatiestudie twee nieuwe kerncentrales. Revisie 01, 16 mei 2025.
- ANVS, 2023. Handreiking VOBK 2023: Handreiking voor een veilig ontwerp en het veilig bedienen van kernreactoren, Guidelines on the safe design and operation of nuclear reactors. 01-02-2023.
- ANVS, 2024. Zienswijze op nieuwe kerncentrales in Nederland – brief: Reactie relevante aspecten locatie nieuwe kerncentrales. 3 april 2024. ANVS-2024/1626.
- ANVS, 2025. Zienswijze op concept NRD – brief: Reactie ANVS op concept-NRD. 25 juni 2025. ANVS-2025/7677.
- Arcadis, 2023. Concept notitie Reikwijdte en Detailniveau. Bedrijfsduurverlenging Kerncentrale Borssele. Ministerie van Economische Zaken & Klimaat. 16 mei 2023.
- ATKB, 2019. Herziening ecologische beoordelingsmethodiek koelwateronttrekking Rapportnummer: 0170278/03 (concept). Auteur: F.T. Vriese. Adviesbureau voor bodem water en ecologie, april 2019.
- Ayoub, A., Gjorgiev, B. & Sansavini, G. 2018. Cooling towers performance in a changing climate: Techno-economic modeling and design optimization. Energy. Volume 160, 1 October 2018, Pages 1133-1143.
- Binet, M. 2023. Current and emerging methods for *Legionella* and *Naegleria fowleri* monitoring in cooling circuits of EDF nuclear power plants - T05-2-1. International conference on nuclear plant chemistry (NPC 2023), Antibes, Juan-les-Pins (France). Societe Francaise d'Energie Nucleaire - Sfen.
- BREF, 2001. Reference document on the application of Best Available Techniques to industrial cooling systems. December 2001.
- Bruijs M. C. M. & Jenner H. A. 2012. Cooling water system design in relation to fouling pressure. In: Operational and Environmental Consequences of Large Industrial Cooling Water Systems. Rajagopal S., Jenner H.A. & Venugopalan V.P. (Eds). ISBN 9781461416975. Springer New York, NY. 2012.
- Bruijs M.C.M., F.T. Vriese and D. Bijstra. 2014. Fish impingement at cooling water intakes in The Netherlands: current developments in effect-evaluation, regulations and technical measures. In: International Fish Screening Techniques. Turnpenny A.W.H. & Horsfield A. (Eds.). 2014, 206 pp. ISBN: 978-1-84564-849-7.
- Bruijs M.C.M., Taylor C.J.L. 2012. Fish impingement and prevention seen in the light of population dynamics. In: Operational and Environmental Consequences of Large Industrial Cooling Water Systems. Rajagopal S., Jenner H.A. & Venugopalan V.P. (Eds). ISBN 9781461416975. Springer New York, NY. 2012.
- Bruijs, M.C.M., Jenner, H.A., Bijstra, D. and Kerkum F.C.M. 2008. New regulations on the discharge of heated water in the Netherlands. In: Proceedings: Second Thermal Ecology and Regulation Workshop. October 2 – 3, 2007. EPRI Technical Report 1016809.
- Bruijs, M.C.M., Turnpenny, A. and N. Edwards. 2019. Regulatory aspects of cooling water discharge by large-scale cooling water systems in Europe. In Electric Power Research Institute (EPRI). Fifth Thermal Ecology and Regulation Workshop Proceedings. EPRI, Palo Alto, CA. 3002016569.
- Byers, E.A., J.W. Hall, & J.M. Amezcaga. 2014. Electricity generation and cooling water use: UK pathways to 2050. Glob. Environ. Change, 25 (2014), pp. 16-30.
- Chy, I. Uddin A., Fardin, Md & Awall, Md & Biswas, A. 2025. Dynamic analysis of cooling tower considering two different column modeling approaches. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 10. 1-12.



Collet, L., J. Gailhard, Y. Guénand, C. Monteil, B. Oueslati, P.-Y. Peton, C. Martinet, C. Bono. 2025. Future nuclear power outages in a changing climate - A case study on two contrasted French power plants. *Energy*, Volume 320, 2025, 135207.

Commissie-mer, 2025. Locatiekeuze nieuwe kerncentrales. Advies reikwijdte en detailniveau van het milieueffectrapport. 25 september 2025 / projectnummer: 3933. <https://commissiemer.nl/adviezen/3933>.

Deltares, 2008. Bepaling koelcapaciteit van Rijkswateren. Q4498. Oktober, 2008.

Deltares, 2012. Zoetwatervoorziening in Nederland – aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw. 1205970-000-VEB0013. 2e druk. 22 mei 2012.

Deltares, 2017. Deltascenario's, de randvoorwaarden voor de 100-jarige reeks. Deltares rapport 11200554-000-ZWS-0011.

Deltares, 2023. Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse 11209265-002-ZWS-0003, 7 December 2023.

Deltares, 2024a. Hoe verandert het afvoerregime van de Rijn in de toekomst, en welke impact heeft dit op zoetwaterbeschikbaarheid, waterveiligheid, natuur en bevaarbaarheid? 11210275-004-BGS-0001, 9 februari 2024.

Deltares, 2024b. Vertaling van de Deltascenario's 2024 naar invoer voor het Nationaal Water Model. 11209219-018-ZKS-0001, 19 april 2024.

Deltares, 2024c. Brief 'Samenvatting regelgeving koelwater Borssele', 19 april 2024. 11209639-002-GEO-0008.

Diehl, T.A., and M.A. Harris. 2014. Withdrawal and consumption of water by thermoelectric power plants in the united states. 2010, Scientific Investigations Report 2014-5184, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Dincer, I. (editor). 2018. Chapter 1.6 Exergy, 'Energy Fundamentals', in *Comprehensive Energy Systems*. Volume 1, 2018, Pages 212-264. Elsevier. ISBN 9780128149256.

DOE, undated, "Best Management Practice #10: Cooling Tower Management," Federal Energy Management Program. <http://energy.gov/eere/femp/best-management-practice-10-cooling-towermanagement>. Accessed Oct. 7, 2014.

DOE/NETL 2006: Estimating freshwater needs to meet future thermoelectric generation requirements, DOE/NETL-2006/1235

DOE/NETL 2008: Estimating freshwater needs to meet future thermoelectric generation requirements, update, DOE/NETL-400/2008/1339

DOE/NETL 2009: Water requirements for existing and emerging thermoelectric plant technologies, DOE/NETL-402/080108

DOI, 2011. (U.S. Department of the Interior) Analysis of Water from Four Wells at the Brackish Groundwater National Desalination Research Facility, Bureau of Reclamation, Brackish Groundwater National Desalination Research Facility, Alamogordo, NM. [http://www.usbr.gov/research/AWT/BGNDRF/Alamogordo\\_well\\_water\\_2nd\\_rpt-Final.pdf](http://www.usbr.gov/research/AWT/BGNDRF/Alamogordo_well_water_2nd_rpt-Final.pdf).

DOW, 2013. (Dow Chemical Company) Dow Water & Process Solutions FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual. [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_08db/0901b803808db77d.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/60900071.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08db/0901b803808db77d.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/60900071.pdf&fromPage=GetDoc).

Du, T., Dugdale, S.J., & Johnson, M.F. 2026. A scenario-based, generalised model of the thermal impacts of cooling water discharge from thermoelectric power plants: thermopeaking and spatio-temporal interactions. *Water Research*. Volume 288, Part A, 1 January 2026, 124529.

Elliott, M. & Wither, A. (Eds). 2024. Environmental consequences and management of coastal industries: Terms and Concepts. Elsevier, Amsterdam, ISBN 978-0-443-13752-5, 370pp.

ENERGO, 2019. Presentation. NPP thermal performance monitoring and optimization system VVER 2019 Recent & Future 11 – 12 November 2019, Prague, Czech Republic.



EPRI, 2002a. Water and Sustainability (volume 3): US water consumption for power production - the next half century, EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1006786.

EPRI, 2002b. Guide for predicting long-term reliability of nuclear power plant systems, structures and components. EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1002954.

EPRI, 2004. Comparison of alternate cooling technologies for US power plants: economic, environmental, and other tradeoffs. EPRI, Palo Alto, CA: 2004. 1005358.

EPRI, 2008. Water use in electric power generation. EPRI, Palo Alto, CA: 2008. 1014026.

EPRI, 2011a. Closed-Cycle cooling system retrofit study: Capital and Performance Cost Estimates. EPRI, Palo Alto, CA: 2011.1022491.

EPRI, 2011b. National cost estimate for retrofit of US power plants with closed-cycle cooling technical brief — Clean Water Act fish protection issues. EPRI, Palo Alto, CA: 2011. 1022212.

EPRI, 2011c. Evaluation of the national financial and economic impacts of a closed-cycle cooling retrofit requirement. EPRI, Palo Alto, CA: 2011. 1022751.

EPRI, 2011d. Hybrid cooling systems: technology overview. EPRI, Palo Alto, CA: 2011. 1024710.

EPRI, 2012a. Economic evaluation of alternative cooling technologies. EPRI, Palo Alto, CA: 2012. 1024805.

EPRI, 2012b. Potential impacts of closed-cycle cooling retrofits at U.S. Power plants – Technical Brief. EPRI, Palo Alto, CA: 2011. 1025097.

EPRI, 2013. Advanced cooling options for nuclear power plants. EPRI, Palo Alto, CA: 2013. 1025068.

EPRI, 2022a. Climate vulnerability assessment guidance for nuclear power plants. EPRI, Palo Alto, CA: 2022. 3002023814.

EPRI, 2022b. Advanced nuclear technology: site selection and evaluation criteria for new nuclear energy generation facilities (Siting Guide). 2022 Revision. EPRI, Palo Alto, CA: 2022. 3002023910.

Feyen L., Ciscar J.C., Gosling S., Ibarreta D., Soria A. (editors), 2020. Climate change impacts and adaptation in Europe. JRC PESETA IV final report. EUR 30180EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-18123-1.

Ghoddousi, S., Anderson, A. and Rezaie, B. 2021. Advancing water conservation in cooling towers through energy-water nexus. European Journal of Sustainable Development Research 2021, 5(3): 2542-4742. Review Article.

Gosse, P. & Samie, R. 2020. Water evaporation at wet-cooled nuclear power plants on river banks: Application to the French Rhône river. Water-Energy Nexus. Volume 3, 2020, Pages 155-169.

Guénand, Y., Gailhard, J., Monteil, C., Peton P.Y., Martinet, C., Collet, L. & Bono, C. 2024. Climate change impact on nuclear power outages - Part I: A methodology to estimate hydro-thermic environmental constraints on power generation. Energy. Volume 307, 30 October 2024, 132648.

Gutting, A. 2025. From cooling water war to cooling towers: Transnational water diplomacy around the allocation of nuclear cooling on the Aare and Rhine Rivers, 1965-1972. Water Alternatives 18(1): 59-85.

Gutting, A. Högselius, P. & Burkhardt-Holm, P. 2025. Atomic rivers. The (un)sustainability of nuclear power in an age of climate change. Energy Policy Volume 203, August 2025, 114631.

Harto, C., Finister M., Schroeder, J. and Clark, C. 2014. Saline water for power plant cooling: challenges and opportunities. ANL/EVS-14/15. Report by Argonne NL for the US-DOE.

Hogan T., M.C.M. Bruijs and J. Black. 2021. Intake reliability in the age of environmental uncertainty: key considerations for intake operators. POWER Magazine. October 1, 2021.



- Hoogland, J. 2007. Seawater Cooling Towers for HVAC Operations. in Proceedings of the 2007 International District Cooling Symposium, Dubai, United Arab Emirates, Oct. 28–30.
- IAEA, 1981. Ultimate heat sink and directly associated heat transport systems for nuclear power plants: a Safety Guide. IAEA Safety Series No. 50-SG-D6, IAEA, Vienna, 1981.
- IAEA, 1986. General Design Safety Principles for NPPs. IAEA Safety Series No IAEA-50-SG-D11, Vienna, 1986.
- IAEA, 2011. Meteorological and hydrological hazards in site evaluation for nuclear installations. IAEA Safety Standards Series No SSG-18. Vienna, 2011.
- IAEA, 2012. Efficient water management in water-cooled reactors, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.6. Vienna, 2012.
- IAEA, 2015. Site survey and site selection for nuclear installations. Specific Safety Guide No. SSG-35. Vienna, 2015.
- IAEA, 2019. Site evaluation for nuclear installations. Specific Safety Requirement No. SSR-1. Vienna, 2019.
- IAEA, 2020. Design of the reactor coolant system and associated systems for nuclear power plants specific Safety Guide No. SSG-56. Vienna, 2020.
- Ibrahim, Said & Attia, Sami. 2014. The influence of condenser cooling seawater fouling on the thermal performance of a nuclear power plant. *Annals of Nuclear Energy*. 76.
- IED BREF-ICS, 2001. Reference document on the application of Best Available Techniques to industrial cooling systems. 2001.
- INPO, 2007. Institute of Nuclear Power Operations (INPO). Intake Cooling Water Blockage. INPO. Atlanta, GA. 2007. SOER 07-02.
- Jenner H.A., Whitehouse J.W., Taylor C.J.L., Khalanski M. 1998. Cooling water management in European power stations. Biology and control of fouling. *Hydroécologie Appliquée* 10 (1-2): i-v + 1-225.
- Jones, N., Kaplan, C. and Narula, R. 2010. Appraising our future cooling water options. *POWER Magazine* June 1, 2010 (online <https://www.powermag.com/appraising-our-future-cooling-water-options/>).
- Katinas, C., Thomas, R., & d'Entremont, B., Ray, W., Willis, M. & Kulp, T. 2022. Calculation of Nuclear Reactor Cooling Tower Performance With Limited Data Streams. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 15. 1-23.
- KEMA, 2000. (Haddingh & Janssen-Mommen) Inventarisatie gevoeligheid oppervlaktewateren voor warmtelozingen. KEMA rapport 00-6057.
- KEMA, 2007. (M.C.M. Bruijs) Bureaustudie naar technische en operationele maatregelen bij koelwaterinlaten om de effecten van visinzuiging te reduceren. TSA rapport 50731068-TOS/MEC 07-9194.
- Khazaal, Shaymaa & Makki, Hasan. 2025. Characterization of corrosion behavior of ST37-2 low-carbon steel in a cooling tower using seawater as the working media. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 11.
- KNMI, 2023a. KNMI'23 klimaatscenario's voor Nederland. KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03 – digitale versie 2023
- KNMI, 2023b. KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands R. van Dorland, J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Groenland, R. Haarsma, C. Homan, I. Keizer, F. Krikken, D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Meijgaard, J. F. Meirink, B. Overbeek, T. Reerink, F. Selten, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, C. de Valk, P. van Velthoven, H. de Vries, M. van Weele, B. Wichers Schreur, K. van der Wiel. Scientific report; WR-23-02.
- Li, Lujun & Zhu, Qing & Song, Xiaojun. 2025. Study on salt deposition distribution and environmental effect of seawater cooling tower. *Scientific Reports*. 15.
- Liang, Ziqi & Li, Lujun & Yang, Jie & Zhu, Qing. (2023). Numerical simulation of deposition of drifts and salt from multiple super-large seawater cooling towers. *Scientific Reports*. 13.



- Liu, Ms & Yang, Ms. 2023. Environmental impact study of super-large natural ventilation seawater cooling tower of a nuclear power plant. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE). 2023.30. 1696.
- Macknick, J., Newmark, R., Heath G. & Hallett, K.C. 2012. Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. *Environ. Res. Lett.* 7 (2012) 045802 (10pp).
- Marolleau, Franck & Mitsch, Delphine & Sylvie, Soreau & Celine, Bouteleux & Herbelin, Pascaline & Bretaude, Maxime & Charrel, Véronique. 2023. Chemistry control of open recirculating cooling circuits in EDF NPPs. Conference presentation: International Conference on Nuclear Plant Chemistry 2023. Juan les Pins - Antibes - France.
- Maulbetsch, J.S. and DiFilippo, M.N. 2008. Performance, cost, and environmental effects of saltwater cooling towers. California Energy Commission. PIER Energy-Related Environmental Research Program. CEC-500-2008-043.
- Maulbetsch, J.S. And DiFilippo, M.N., 2008. Salt water cooling towers. PowerPoint presentation. Once-through cooling: Results Symposium. University of California, Davis California.
- MinKGG, 2025a. Brief minister KGG aan Tweede Kamer der Staten-Generaal, 16 mei 2025. Vergaderjaar 2024–2025, 32 645, nr. 156.
- MinKGG, 2025b. Nota ter Beslissing. Voortgangsbrief nieuwbouw kernenergie, 8 mei 2025. KGG / 98741803.
- MinKGG, 2025c. Nota ter Advisering. 2 oktober 2025. DGKE / 101541224.
- Mohammed, S., E-Lamia, S., Galib, M. & Sarkar, M. 2015. Thermal analysis and design of a natural cooling tower of a 1000MW nuclear power plant. 2nd International Bose Conference, 2015. December 03-04, 2015, University of Dhaka.
- Mujtaba MA, Munir MA, Akhtar M, Mahmood B, Ansar T, Khawar Z, Khalid S, Basit A, Jamil S, Kalam MA, Hussain F and Bhowmik C. 2025. Leveraging machine learning to optimize cooling tower efficiency for sustainable power generation. *Front. Energy Res.* 13:1473946.
- Mysak, J.S. & Kuznetsova, M.Ya & Rymar, T.E. & Matiko, Fedir. 2017. Enhancement of reliability and efficiency of cooling towers of nuclear power plants. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi.* 3. 54-58.
- NEI, 2010. Nuclear Energy Institute fact sheet 'Water Use and Nuclear Power Plants'. May 2010.
- Nuclear Energy Institute, Water Use and Nuclear Power Plants fact sheet fact sheet (November 2013).
- Nuclear Engineering handbook 2010.
- Ouranos 2016. Cooling for thermal generation in a changing climate. Case study presented to Climate Change Impacts and Adaptation Division, Natural Resources Canada, 7 p.
- Pan, S.-Y., Snyder S.W., Packman, A.I., Lin, Y.J. & Chiang, P.-C. 2018. Cooling water use in thermoelectric power generation and its associated challenges for addressing water-energy nexus. *Water-Energy Nexus.* Volume 1, Issue 1, June 2018, Pages 26-41.
- Pan, W.-G & Li, Z.-M & Hu, B. & Li, X.-Y. 2010. Application of mechanical draft cooling tower in inland nuclear power plants. 31. 92-95+101.
- Payet-Burin R, Bertoni F, Davidsen C, Bauer-Gottwein, P. 2028. Optimization of regional water - Power systems under cooling constraints and climate change. *Energy* (2018), doi: 10.1016/j.energy.2018.05.043.
- Pecten Aquatic, 2025. Bestrijding van biologische aangroei in doorstroom koelwatersystemen in het Eemsgebied. R20225-05.Pecten Aquatic. 2022. Reductie effecten visinzuiging; Technische en operationele maatregelen bij grootschalige koelwateronttrekkingen van energiecentrales om effecten visinzuiging te reduceren, 2022. M.C.M Bruijs. Report No.: R2022-0x DRAFT 15 SEPT, Rev. 1 Document No.: R2022-0x Pecten Aquatic.



- Polman H.J.G., Jenner. H.A. & Bruijs M.C.M. 2020. Corrosion and fouling control in desalination industries. In: Corrosion and fouling control in desalination industry. Viswanathan S. Saji, Abdelkader A. Meroufel and Ahmad A. Sorour (Eds.). 2020. ISBN: 978-3-030-34284-5 (Online). Springer International Publishing 2020.
- Polman, H.J.G, Verhaart F., Bruijs M.C.M., 2012. Impact of biofouling in intake pipes on the hydraulics and efficiency of pump capacity. Publication in Desalination and Water Treatment 1/20 12, www.deswater.com. 25 June 2012.
- Pondera & CE Delft. 2025. Milieupactanalyse kernenergie in de energiemix. Rapport 724276 Definitief/2, 30 juli 2025.
- Rajagopal S., Jenner H.A. & Venugopalan V.P. (Eds.). 2012. Operational and environmental consequences of large industrial cooling water systems. ISBN 9781461416975. Springer New York, NY. 2012.
- Rajagopal, S., van der Velde, G., Jansen, J., van der Gaag, M., Atsma, G., Janssen-Mommen, J., Polman, H. and Jenner, H. 2005. Thermal tolerance of the invasive oyster *Crassostrea gigas*: Feasibility of heat treatment as an antifouling option, *Water Research*, 39: 4335–4342.
- Raupach, M., Helm, C. & Eisenkrein-Kreksch, H. 2025. Monitoring of the corrosion behaviour of the reinforcement at a cooling tower working in sea water operation using embeddable polymeric cathode sensors. *MATEC Web of Conferences*. 409.
- Reisman, Joel & Frisbie, Gordon. 2002. Calculating realistic PM10 emissions from cooling towers. *Environmental Progress*. 21. 127 - 130. 10.1002/ep.670210216.
- Rijkswaterstaat, 2004. CIW beoordelingssystematiek warmtelozingen 25 november 2004.
- RIVM, 2024. Environmental emission estimation of cooling water biocides. Update of the Emission Scenario Document for open recirculating cooling towers. RIVM report 2024-0042.
- Ruiz Ramírez, Javier & Kaiser, A.S. & Lucas, M.. 2017. Experimental determination of drift and PM10 cooling tower emissions: Influence of components and operating conditions. *Environmental Pollution*. 230. 422-431.
- RVO, 2015. Best practices waterkoeling. 9pp.
- Satzinger, U.; Bachmann, D. The role of high water temperature in the context of low-flow risk analysis. *Water* 2025, 17, 1247.
- Schulze C., B. Raabe, C. Herrmann, S. Thiede. 2018. Environmental Impacts of Cooling Tower Operations – The Influence of Regional Conditions on Energy and Water Demands. *Procedia CIRP*. Volume 69, 2018, Pages 277-282.
- Sharqawy, MH, Lienhard, JH, V, & Zubair, SM. "On thermal performance of seawater cooling towers." *Proceedings of the 2010 14th International Heat Transfer Conference*. 2010 14th International Heat Transfer Conference, Volume 4. Washington, DC, USA. August 8–13, 2010. pp. 779-786. ASME.
- Sinyatnikova, S., Baklanov, M., Burdakov, S. & Zayarov, Y. 2025. Development and design of NPP fan cooling tower. *Global Nuclear Safety*. 15. 36-45..
- STOWA, 2024. Droogtestatistiek KNMI'23-klimaatscenario's. STOWA 2025-23. ISBN 978.94.6479.114.3.
- TetraTech, 2014. Summary of materials on evaporative losses – memorandum. January 7, 2014. AR-343.
- Turnpenny A., Bruijs M. C. M., Wolter C. and Edwards N. Regulatory aspects of choice and operation of large-scale cooling systems in Europe. In: *Operational and Environmental Consequences of Large Industrial Cooling Water Systems*. Rajagopal S., Jenner H.A. & Venugopalan V.P. (Eds). ISBN 9781461416975. Springer New York, NY. 2012.
- Uddin, Intekhab & Chy, Intekhab Uddin Ahmad & Fardin, Md & Biswas, Anik & Awall, Md. 2024. Dynamic analysis of the hyperbolic cooling tower at Rooppur nuclear power plant. 7th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE-2024)At: CUET-Chittagong, Bangladesh.



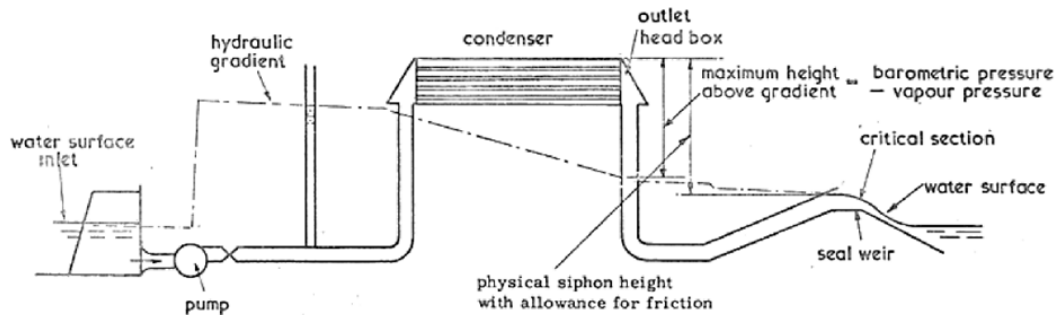
- UK Environment Agency, 2005. Environment Agency. 2005. Screening for intake and outfalls: a best practice guide. Science Report SC030231. Environment Agency, Bristol. UK Environment Agency, 2010. Cooling water options for the new generation of nuclear power stations in the UK. SC070015/SR3 ISBN:978-1-84911-192-8.
- US EPA 2002. National Pollutant Discharge Elimination System – Proposed regulations to establish requirements for cooling water intake structures at Phase II Existing Facilities. Federal Register 67(68): 17122-17225.
- US EPA 2003. National Pollutant Discharge Elimination System – Proposed regulations to establish requirements for cooling water intake structures at Phase II Existing Facilities; Notice of Data Availability. Federal Register 68 No. 53: 13522-13587.
- US EPA, 2004a. Cooling Water Intake Structures - Section 316(b). Final regulations for cooling water intake structures at large power plants (Phase II).
- US EPA, 2004b. Technical Development Document for the Final Section 316(b) Phase II Existing Facilities Rule. February 12, 2004.
- US EPA, 2009a. AP 42, Fifth Edition compilation of air pollutant emission factors, Volume 1: stationary point and area sources, Chapter 13. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42>. Accessed Oct. 7, 2014.
- Vine, G. 2010. Cooling water issues and opportunities at US nuclear power plants. A report to the US Department of Energy, Office of Nuclear Energy. December 2010. INL/EXT-10-20208. Rev. 1 <https://doi.org/10.2172/1004239>.
- Wang X, Liu S, Cao P, Song J, Wang C, Xu S, Zhu S. 2023. SACTI model in prediction and assessment of large scale natural draft cooling tower environmental impact of nuclear power plant. *Sci Rep.* 2023 Jul 10;13(1):11171.
- Wang, X.; Wei, G.; Wang, S.; Yang, Y.; Du, F., and Wang, B., 2020. Impact of large cooling tower on atmospheric dispersion of effluent from coastal nuclear power plant. In: Yang, Y.; Mi, C.; Zhao, L., and Lam, S. (eds.), *Global Topics and New Trends in Coastal Research: Port, Coastal and Ocean Engineering*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 103, pp. 474–478. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Wang, Xuan & Wei, Guoliang & Wang, Shaowei & Yang, Yang & Du, Fenglei & Wang, Bo. (2020). Impact of large cooling tower on atmospheric dispersion of effluent from coastal nuclear power plant. *Journal of Coastal Research*. 103.
- Wang, Yihui & Zhao, Tingting & Gao, Wei & Wang, Yufei. (2025). Multiperiod optimization of closed seawater circulating cooling water system. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 19.
- William Skaff, Nuclear Energy Institute, Water Use, Electric Power, and Nuclear Energy: a Holistic Approach to Environmental Stewardship, presented at the Ground Water Protection Council (GWPC) 2009 Annual Forum, 14-16 September 2009
- Wojewnik-Filipkowska, Anna & Koszarek-Cyra, Aleksandra & Nawrocka, Ewelina. 2024. Problems in sustainable energy transition – the first Polish nuclear power plant in the Pomeranian region. *Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series*. 2023. 685-707..
- Yoon Changmin and Jeong Ik Lee. 2024. Review of cooling tower technology applied to nuclear power plants globally. *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Changwon, Korea, October 24-25, 2024*
- Yu, Yang & Qi, Xiaoni & Hou, Xiaochen & Qu, Xiaohang & Guo, Qianjian & Zhu, Hegang. 2022. Heat and mass transfer performance and exergy performance evaluation of seawater cooling tower considering different inlet parameters. *Thermal Science*. 26. 312-312.
- Zacherl, L. & Baumann, T. 2025. Digital Twin of an open cooling tower: experimental studies and numerical validation. *ACS Engineering Au* 2025 5 (4), 347-358.
- Zhang, W., Li, Y., Liu, P. & Wei, H. 2024. Improved design and economic estimation of cold-end systems for inland nuclear power plants. *Energies* 2024, 17, 2410.

## ANNEX 1 LOCATIE-ALTERNATIEVEN AAN DE KUST

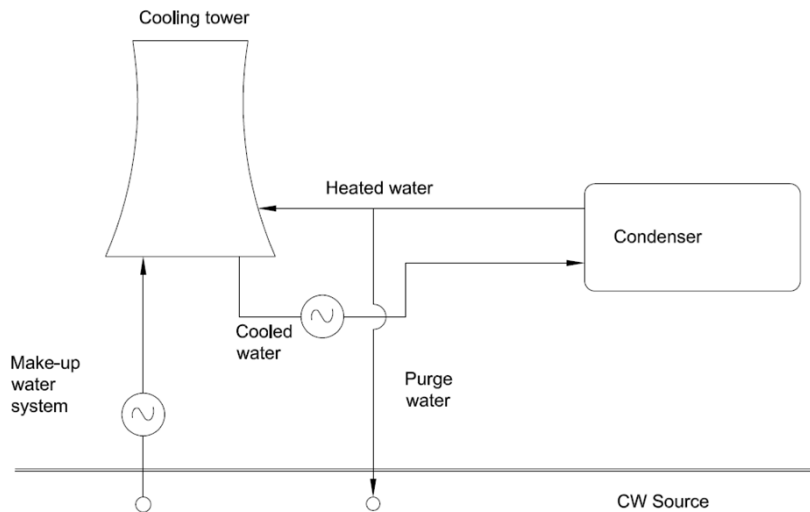


Figuur 15. Overzicht locaties (bron MinkGG).

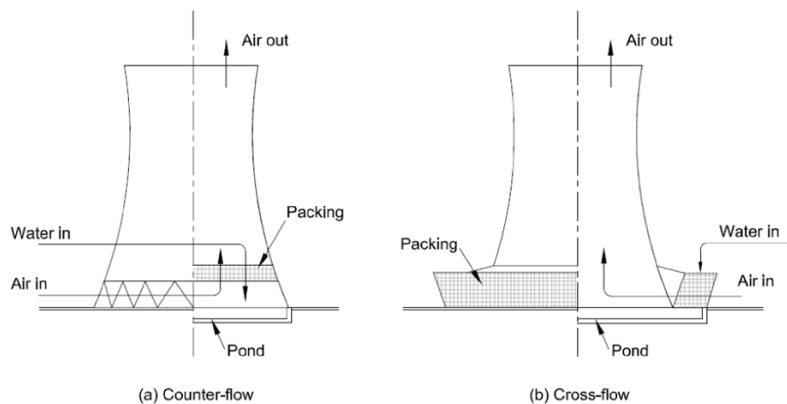
## ANNEX 2 SCHEMA'S WERKINGSPRINCIPE KOELWATERSYSTEMEN



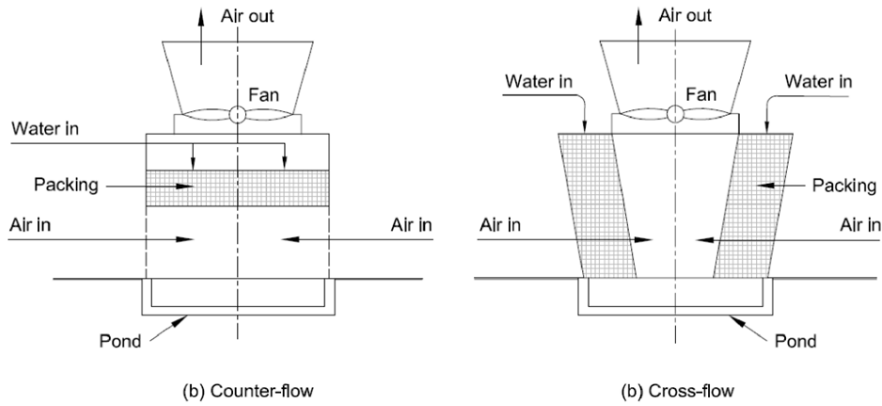
Figuur 16. Schematische weergave van typische doorstroomstelsel (bron: EA, 2010).



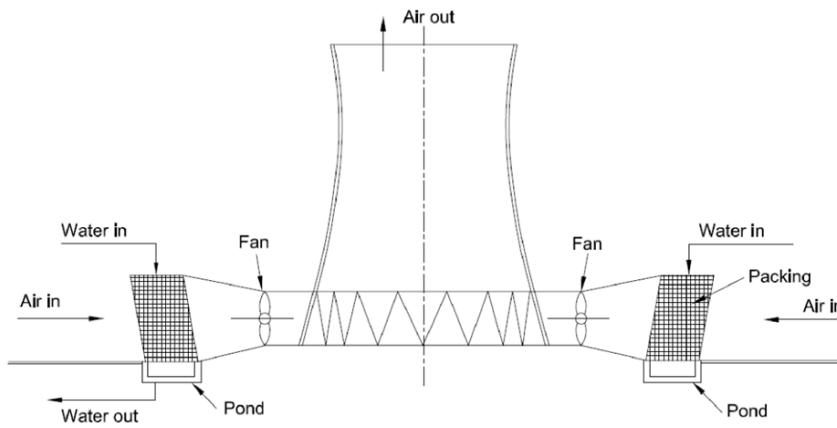
Figuur 17. Schematische weergave van typische indirecte natte koeltoren (bron: EA, 2010).



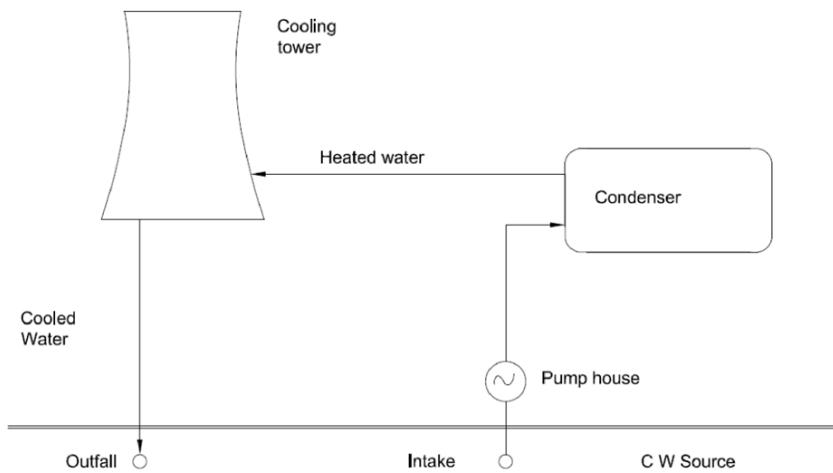
Figuur 18. Schematische weergave van enkele configuraties van natuurlijke trek koeltorens (bron: EA, 2010).



Figuur 19. Schematische weergave van enkele configuraties van mechanische trek (geïnduceerde) koeltorens (bron: EA, 2010).



Figuur 20. Schematische weergave van typische hybride koeltoren (bron: EA, 2010).



Figuur 21. Schematische weergave van een 'helper' koeltoren (bron: EA, 2010).



## ANNEX 3 BESTAANDE KOELTORENS MET NATUURLIJKE TREK VOOR PWR

Overzicht van koeltorens met natuurlijke trek voor PWR, gerangschikt naar hoogte van de koeltoren.

Tabel 4. List of pressurized water nuclear reactor cooling towers worldwide (uit Yoon & Lee, 2024).

Name	Country	Location	Height (m)	Capacity (MWe)	Temperature range (°)	Relative humidity (%)
Vogtle Electric Generating Plant Unit 3 & 4	USA	Burke County, Georgia	180	1150	7.8 ~ 27.6	61 ~ 75
Civaux Nuclear Power Plant, cooling tower 1	France	Civaux	180	1561	0~27	71 ~ 84
Cooling towers Nuclear Power Plant	France	Golfech	179	1363	3~29	66 ~ 85
Cooling towers of Chooz Nuclear Power Plant	France	Chooz	172	1560	0 ~ 22	79.98 ~ 90.27
Novovoronezh Nuclear power plant, Unit II-1	Russia	Voronezh Oblast	170	1150	-6.4 ~ 22	85 ~ 59
Doel Nuclear Power Station, cooling tower 1	Belgium	Beveren	169	1056	5.8 ~ 23.19	87.13 ~ 74.35
Callaway Nuclear Generating Station	USA	Fulton, MO	169	1215	-0.5 ~ 26.1	64 ~ 68
Vogtle Electric Generating Plant Unit #1	USA	Burke County, Georgia	167	1150	7 ~ 27	67.1 ~ 89
Leningrad Nuclear Power Plant Unit II-2	Russia	Leningrad oblast	167	1188	-6.15 ~ 22.05	70.45~ 93.54
Nine Mile Point Nuclear Generating Station	USA	Scriba, NY	166	1375	-6 ~ 18.3	55 ~ 64
Cooling towers of Belleville Nuclear Power Plant	France	Belleville-sur- Loire	165	1300	4.54 ~ 21.6	71.51 ~ 86.05
Cooling towers of Cattenom Nuclear Power Plant	France	Cattenom	165	1300	3.3 ~ 19.7	71 ~ 87
Cooling towers of Nogent Nuclear Power Plant	France	Nogent-sur- Seine	165	1300	3.64 ~ 21.66	70.02 ~ 87.62
Gundremmingen Nuclear Power Plant, cooling tower 1	Germany	Gundremmingen	160	1284	2 ~ 23.5	77.4 ~ 89.46
Torre de refrigeración de Central nuclear de Ascó	Spain	Ascó	160	1033	8.9 ~ 23.6	69 ~ 75
Temelín Nuclear power plant	Czech Republic	Temelin (using two towers)	160	1080	1 ~ 23.25	74.08 ~ 87.6
Cooling towers of Cruas Nuclear Power Plant	France	Cruas	155	956	3.91 ~ 23.77	64.55 ~ 83.98
Watts Bar Nuclear Plant, cooling tower 1	USA	Rhea County, TN	154	1165	4.2 ~ 26	72 ~ 80
Dukovany Nuclear Power Station	Czech Republic	Dukovany (using two towers)	125	510	-0.39 ~ 21.2	72 ~ 86



## ANNEX 4 KOELTORENS – ZOETWATER VERSUS ZEEWATER

(Bron tabellen: Harto et al., 2014).

Tabel 5. Comparison of cooling tower performance and cost factors (Harto et al., 2014).

Factors	Saline Cooling Towers	Freshwater Cooling Towers
Vapor pressure	Lower vapor pressure due to increased salinity decreases performance	Higher vapor pressure due to low salinity
Materials	Corrosion resistant materials are necessary due to saline drift, and more expensive	Conventional materials are suitable
Drift eliminator	Improved performance due to salinity increasing surface tension, but higher concentration of impurities leading to greater PM <sub>10</sub> emissions and salt deposition	Lower concentration of impurities resulting in lower PM <sub>10</sub> emissions and salt deposition
Cycles of concentration	1.5–2	2–4 are common, with >6 possible, depending upon water quality
Water treatment for tower performance	Biocides, corrosion inhibitors, electrochlorination, bromation, and hardness stabilizers	Biocides, corrosion inhibitors

Sources: Maulbetsch and DiFilippo (2008); DOE (undated); EPA (2009a).

Tabel 5. General characteristics of fresh and saline waters (Harto et al., 2014).

	Freshwater	Brackish Water	Seawater
Total dissolved solids (TDS)	<1,000	1,000–15,000	15,000–45,000
pH	6.0–8.0	6.5–8.2	7.5–8.5
Sulfate (SO <sub>4</sub> ), ppm	<400	120–3,400	2,500–3,900
Chloride (Cl <sup>-</sup> ), ppm	<50	30–700	18,000–28,000
Calcium (Ca <sup>2+</sup> ), ppm	<100	20–550	600–600
Ammonia (NH <sub>3</sub> ), ppm	<1	<1-66 <sup>a</sup>	<1

<sup>a</sup> Higher values correspond to ammonium (NH<sub>4</sub>) concentration found in industrial wastewaters. In general, the concentrations of ammonia/ammonium will be in equilibrium in water.

Sources: DOI (2011); DOW (2013).



## ANNEX 5 FACTOREN BIJ RETROFIT

(Bron: EPRI, 2013).

Tabel 6. Factors influencing degree of difficulty and retrofit cost (EPRI, 2013).

<b>Factor</b>	<b>Description</b>
1	The availability of a suitable on-site location for a tower
2	The separation distance between the existing turbine/condenser location and the selected location for the new cooling tower
3	Site geological conditions which may result in unusually high site preparation or system installation costs
4	Existing underground infrastructure which may present significant interferences to the installation of circulating water lines
5	The need to reinforce existing condenser and water tunnels
6	The need for plume abatement
7	The presence of on- or off-site drift deposition constraints
8	The need for noise reduction measures
9	The need to bring in alternate sources of make-up water
10	Any related modifications to balance of plant equipment, particularly the auxiliary cooling systems, that may be necessitated by the retrofit
11	Re-optimization of the cooling water system or extensive modification or reinforcement of the existing condenser and circulating water tunnels
12	The need for anti-scalant chemical feed systems. Additionally, this can result in added O&M costs of ~\$200,000 per year / 850 MWe

### **About Pecten Aquatic**

Pecten Aquatic aims to safeguard the aquatic environment from industrial impacts. It does so by assisting large-scale surface water users both in their mitigation of environmental impacts on daily operations and in complying with permit requirements while maintaining a safe, reliable and commercially robust operation. Pecten Aquatic assists legislative/permitting authorities by providing objective insights for framing effective and realistic regulatory requirements. As an impartial expert, Pecten Aquatic is able to provide an objective evaluation of the operational and ecological problems, determine and perform research to find solutions, and evaluate technical and operational measures to develop cost-effective solutions to safeguard the environment. By seeking the assistance of Pecten Aquatic, any client whether industrial or regulatory will be better able to make well-founded decisions.