TNO innovation for life

Flexibiliteitsrelevante assetbase van het Nederlandse bedrijfsleven

Een systemische reflectie op de omvang en het technisch potentieel van assets voor het verminderen van afnamecongestie



TNO Publiek ⟩ TNO-2026-18185

1 oktober 2026

ICT, Strategy & Policy
www.tno.nl
+31 88 866 00 00
info@tno.nl

TNO-2026-18185 – 1 oktober 2026

Flexibiliteitsrelevante assetbase van het Nederlandse bedrijfsleven

Een systemische reflectie op de omvang en het technisch potentieel van assets voor het verminderen van afnamecongestie

Auteurs	Bart Kaas, Roos van Dooren, Hanna Jonker

Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Programma	Dit onderzoek is gefinancierd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat uit het onderzoeksprogramma Kennis voor energiebeleid
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	102 (excl. voor- en achterblad)

Alle rechten voorbehouden
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Dit document is tot stand gekomen met behulp van generatieve AI. De auteurs blijven volledig verantwoordelijk voor de inhoud.

© 2026 TNO

Managementsamenvatting

Aanleiding en onderzoeksvraag
De toenemende netcongestie vraagt naast netuitbreiding om een betere benutting van de bestaande elektriciteitsinfrastructuur. Flexibiliteit bij bedrijven en instellingen wordt daarbij gezien als een belangrijke oplossingsrichting. Tegelijkertijd ontbreekt een samenhangend nationaal beeld van welke assets deze flexibiliteit kunnen leveren, hoe groot deze assetbase is en onder welke voorwaarden flexibiliteit daadwerkelijk inzetbaar is.

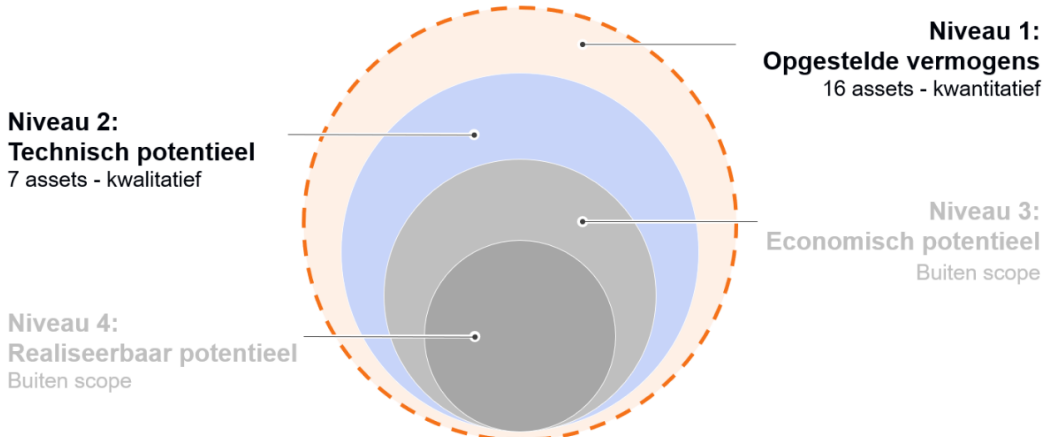
Het doel van dit onderzoek is daarom om inzicht te geven in de flexibiliteitsrelevante assetbase van bedrijven en instellingen en het bijbehorende flexibiliteitspotentieel voor het verminderen van afnamecongestie.

Methode en scope onderzoek
Dit onderzoek presenteert een eerste systematische inventarisatie van de flexibiliteitsrelevante assetbase van bedrijven en instellingen in Nederland. Daarbij is bewust gekozen voor een assetgeoriënteerde benadering. Flexibiliteit in het bedrijfsleven ontstaat uiteindelijk bij concrete fysieke assets achter de meter, zoals gebouwgebonden koeling en verwarming (ook wel Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)), WKK's, datacenters, laadinfrastructuur, batterijen en elektrolysers. Door flexibiliteit vanuit assets te benaderen ontstaat inzicht in waar flexibiliteit zich bevindt, hoe groot deze assetbase is en onder welke voorwaarden deze kan bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie.

Voor dit onderzoek hebben TNO en EZK samen een selectie gemaakt van zestien assets die naar verwachting relevant zijn voor congestieverlichting. De selectie is gebaseerd op criteria zoals nationaal opgesteld vermogen, verwacht flexibiliteitspotentieel, geografische spreiding, potentiële bijdrage op momenten van afnamecongestie en de meerwaarde van aanvullend beleid. Het overzicht van onderzochte assets is weergegeven in **Tabel 1.1**. Voor alle zestien assets is het nationaal opgesteld vermogen voor het zichtjaar 2027 bepaald. Voor zeven assets is daarnaast een verdiepende kwalitatieve analyse uitgevoerd naar randvoorwaarden voor flexibiliteitsontsluiting, als eerste stap richting het bepalen van het technisch potentieel.

De inventarisatie is uitgevoerd op basis van een combinatie van nationale databronnen, literatuuronderzoek, expertkennis, sectorspecifieke datasets en validatie met externe partijen. Waar directe gegevens over opgesteld vermogen beschikbaar waren, zijn deze gebruikt. Wanneer dergelijke gegevens ontbraken, zijn vermogens afgeleid uit aanvullende databronnen, kengetallen en aannames. Voor de analyse van randvoorwaarden is gebruikgemaakt van literatuur, expertinterviews en gesprekken met onder andere brancheorganisaties, waterschappen en kennisinstellingen.

Om verschillende vormen van flexibiliteit op een consistente manier te kunnen vergelijken, introduceert dit onderzoek een raamwerk met vier niveaus van flexibiliteitspotentieel: opgesteld vermogen, technisch potentieel, economisch potentieel en realiseerbaar potentieel. Daarbij vormt het opgestelde vermogen de fysieke bovengrens van het potentieel, terwijl op elk volgend niveau aanvullende technische, economische en organisatorische randvoorwaarden het daadwerkelijk inzetbare potentieel verkleinen.



Figuur 1.1: Schematische weergave van de vier niveaus van flexibiliteitspotentieel van assets en de scope van dit onderzoek. Niveau 1 (opgestelde vermogens) vormt de fysieke bovengrens van flexibiliteitspotentieel en is daarom weergegeven met een stippellijn.

De focus van deze studie ligt op niveau 1 (opgesteld vermogen) en deels op niveau 2 (technisch potentieel). Voor zestien assets is het nationaal opgesteld vermogen in kaart gebracht en voor zeven assets is verkend onder welke technische randvoorwaarden flexibiliteit kan worden ingezet. Niveaus 3 en 4, het economisch en realiseerbaar potentieel, worden wel conceptueel beschouwd maar niet kwantitatief uitgewerkt. **Figuur 1.1** geeft deze afbakening schematisch weer.

Belangrijkste bevindingen
Dit onderzoek laat zien dat bedrijven en instellingen beschikken over een omvangrijke flexibiliteitsrelevante assetbase. Voor zestien assetcategorieën is het nationaal opgesteld vermogen (niveau 1) in kaart gebracht, zie **Figuur 1.2**. Voor zeven assets zijn randvoorwaarden voor flexibiliteitsontsluiting kwalitatief onderzocht, als eerste stap richting niveau 2.

Tabel 1.1: Overzicht van de geselecteerde assets met indicatie van type analyse: blauw gearceerd = enkel bepaling van opgestelde vermogens; oranje gearceerd = zowel opgestelde vermogens als aanvullende analyse van randvoorwaarden.

Hoofdcategorie	Subcategorie	Asset
Verbruik	Power2Heat	Verwarming, ventilatie en airconditioning (HVAC)
		Industriële e-boiler
		Industriële warmtepomp
	Power2Motion	Gemalen
		Rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI)
	Power2ICT	Datacenters
	Power2Mobility	Walstroom voor zeevaart
		Walstroom voor binnenvaart
		Laadinfra weg mobiliteit, P < 50 kW ps
		Laadinfra weg mobiliteit, 50 < P < 150 kW ps
		Laadinfra weg mobiliteit, P > 150 kW ps
	Power2Chemicals	Waterstofelektrolysers
Opwek	Fossiele opwek	Warmtekrachtkoppeling (WKK)
		(Noodstroom)aggregaten
	Hernieuwbare opwek	Wind op land
Opslag	Batterijen	Batterij (BESS)

Een belangrijke uitkomst van dit onderzoek is dat voor verschillende assets de bepalende randvoorwaarden voor flexibiliteitsinzet zijn geïdentificeerd. De analyse laat zien dat het flexibiliteitspotentieel niet alleen afhangt van het opgesteld vermogen, maar vooral van factoren zoals de koppeling met het primaire proces, operationele randvoorwaarden, beschikbare buffers en de mate van digitalisering. Daarnaast zijn de belangrijkste technische barrières in kaart gebracht die de daadwerkelijke inzet van flexibiliteit beperken. Met name assets met een groot opgesteld vermogen, aanwezige buffers en een beperkte koppeling met het primaire proces bieden op korte termijn de beste mogelijkheden voor verdere flexibiliteitsontsluiting.

Een belangrijke aanleiding voor dit project was het ontbreken van een integraal nationaal overzicht van flexibiliteitsrelevante assets in het elektriciteitssysteem. Hoewel voor opwek en opslag reeds overzichten beschikbaar zijn of momenteel worden ontwikkeld, ontbreekt een vergelijkbaar overzicht voor verbruiksassets. Informatie over deze assets, hun vermogens en flexibiliteitskenmerken is slecht gedocumenteerd of verspreid over verschillende databronnen, wat beleidsontwikkeling, monitoring en analyse bemoeilijkt. Dit onderzoek zet een eerste stap in het samenbrengen van deze informatie en het creëren van meer inzicht in het beschikbare flexibiliteitspotentieel aan de verbruikszijde.

Kansrijke assets voor flexibiliteitsontsluiting
Van de onderzochte assets voor niveau 2 laat de analyse zien dat vooral assets met zowel een substantieel opgesteld vermogen als een beperkte koppeling met hun primaire functie kansrijk zijn voor flexibiliteitsontsluiting op korte termijn.

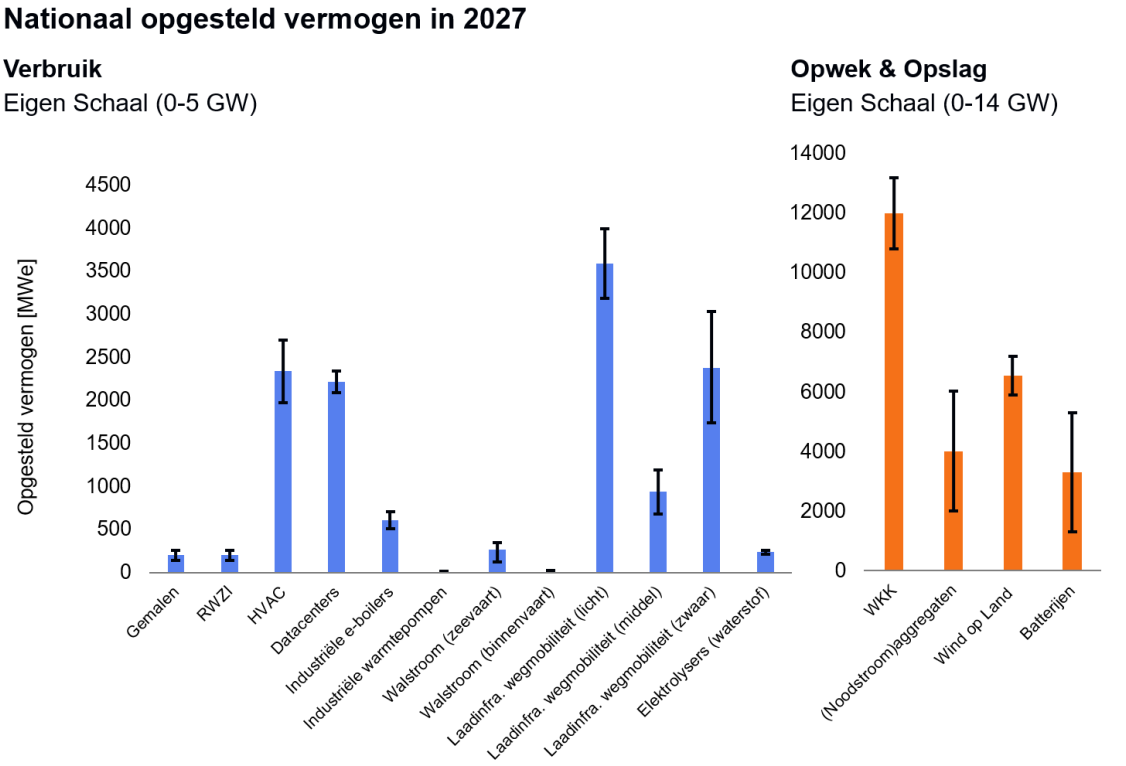
HVAC-systemen komen hierbij als meest kansrijke assetcategorie naar voren voor een aanvullende bijdrage op korte termijn. De combinatie van een groot opgesteld vermogen, aanwezige thermische buffers, beperkte impact op het primaire proces en toenemende digitalisering maakt deze categorie aantrekkelijk voor beleidsmatige ondersteuning.

Ook RWZI's en gemalen bieden kansen. Hoewel de vermogens beperkter zijn, bevinden deze assets zich binnen een relatief uniforme sector met een beperkt aantal stakeholders. Eerdere praktijkervaringen laten bovendien zien dat flexibiliteitsontsluiting technisch haalbaar is.

E-boilers beschikken eveneens over een aanzienlijk technisch potentieel dankzij warmtebuffering, hybride inzet en snelle regelbaarheid. Ze worden echter veelal al aangestuurd op basis van de elektriciteitsprijs. Voor deze assetcategorie ligt de grootste beleidsopgave waarschijnlijk niet in het ontsluiten van bestaande flexibiliteit, maar in het borgen van flexibiliteit bij verdere elektrificatie.

Voor WKK's geldt dat zij beschikken over het grootste regelbare opgestelde vermogen van de onderzochte assets. Tegelijkertijd wordt een deel van deze flexibiliteit waarschijnlijk al ingezet op bestaande elektriciteitsmarkten, waardoor onduidelijk is hoeveel additioneel potentieel nog beschikbaar is voor congestieverlichting.

Datacenters vertegenwoordigen een relatief hoog nationaal gesommeerd opgesteld vermogen, maar het realiseerbare potentieel op korte termijn wordt beperkt door hoge eisen aan beschikbaarheid, betrouwbaarheid en continuïteit van dienstverlening. Hier lijken de grootste kansen vooral te liggen bij toekomstige uitbreidingen.



Disclaimer: Deze figuur toont het opgestelde vermogen van assets. Dit vermogen vormt een fysieke bovengrens voor de flexibiliteit die beschikbaar is. Dit mag **niet** worden geïnterpreteerd als flexibiliteitspotentieel. In de praktijk is slechts een deel van dit vermogen daadwerkelijk flexibel inzetbaar.

Figuur 1.2: Inschatting van nationaal opgesteld vermogen in 2027 voor de onderzochte assetbase. De y-assen zijn bewust niet gelijk geschaald: verbruiksassets variëren tussen 0-5 GW, opwek- & opslagassets tussen 0-14 GW. Aparte schalen zijn gekozen om de interne variatie binnen deze groepen goed zichtbaar te houden. De zwarte balken geven de onzekerheidsmarge weer.

Hoofdconclusie en aanbevelingen

De centrale conclusie van dit onderzoek is dat bedrijven en instellingen beschikken over een omvangrijke flexibiliteitsrelevante assetbase, maar dat de daadwerkelijk inzetbare flexibiliteit sterk wordt bepaald door asset-specifieke randvoorwaarden. Het grootste potentieel bevindt zich niet noodzakelijk bij de assets met het hoogste vermogen, maar bij assets waarbij flexibiliteit relatief eenvoudig kan worden ingepast zonder het primaire proces te verstoren.

Voor effectief flexibiliteitsbeleid is daarom meer nodig dan alleen markt- en contractinstrumenten. Ook beter inzicht in de aanwezige assets, hun kenmerken en hun realiseerbaar potentieel is noodzakelijk.

Aanbevolen wordt om:

- Een structurele nationale kennisbasis voor flexibiliteitsrelevante assets te ontwikkelen
- Vervolgonderzoek uit te voeren naar economisch en realiseerbaar potentieel van kansrijke assets
- Flexibiliteit expliciet mee te nemen bij toekomstige elektrificatie- en investeringsbeslissingen
- Een meer assetgeoriënteerde benadering te ontwikkelen voor congestiebeleid

Deze studie vormt daarmee een eerste stap naar een systematischer begrip van de Nederlandse assetbase en de rol die deze kan spelen bij het verminderen van afnamecongestie. Op basis van de resultaten lijkt met name een gerichte focus op HVAC-systemen, RWZI's, gemalen en flexibele warmte-assets kansrijk voor verdere beleidsontwikkeling.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting 1

1 Inleiding 8
1.1 Aanleiding 8
1.2 Overzicht van relevante studies 9
1.3 Doel van het onderzoek 9
1.4 Scope van het onderzoek 10
1.5 Leeswijzer 11

2 Beter benutten en de rol van de aangesloten assetbase 12
2.1 Rol assetbase bedrijfsleven 12
2.2 Raamwerk: van assetbase naar flexibiliteitspotentieel 14
2.3 Vergroten van flexibiliteitspotentieel 16

3 Assetselectie en methode 18
3.1 Selectie van assets 19
3.2 Methode van onderzoek 20

4 Resultaten 24
4.1 Overzicht van opgestelde vermogens en randvoorwaarden 24
4.2 Uitwerking per asset 28
4.3 Conclusie 57

5 Conclusie en aanbevelingen 61
5.1 Algemene conclusie 61
5.2 Kansrijke assets voor verlichten congestie 62
5.3 Beleidsdilemma's rondom flexibiliteit 64
5.4 Aanbevelingen 65

6 Bronnenlijst 97

Bijlagen
Bijlage A: Betrokken partijen en personen 68
Bijlage B: Framework literatuur 69
Bijlage C: Onderzoek methode & scoping 73
Bijlage D: Verdere informatie voor geselecteerde assets 77

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De energietransitie leidt tot een fundamentele herinrichting van het elektriciteitssysteem. De groei van hernieuwbare elektriciteitsopwekking en de voortgaande elektrificatie van industrie, mobiliteit en de gebouwde omgeving zorgen voor een sterke toename van de belasting van het elektriciteitsnet. Zo is het opgesteld vermogen van zon en wind in Nederland inmiddels gegroeid tot tientallen gigawatts, terwijl ook verwacht wordt dat de elektriciteitsvraag richting 2030 aanzienlijk zal toenemen, afhankelijk van het tempo van elektrificatie (PBL, 2025).[1]

Deze ontwikkelingen leiden tot toenemende netcongestie. In grote delen van Nederland zijn inmiddels wachtlijsten ontstaan voor nieuwe of zwaardere aansluitingen, en worden bedrijven geconfronteerd met beperkingen in hun bedrijfsvoering en verduurzamingsplannen. De maatschappelijke impact hiervan groeit, onder andere economische activiteiten en woningbouw worden afgeremd en investeringen worden uitgesteld.

Netuitbreiding vormt een essentieel onderdeel van de oplossing, maar kent lange doorlooptijden en is op korte termijn onvoldoende om de groei in vraag en aanbod bij te benen. Het beter benutten van bestaande netcapaciteit wordt daarom steeds belangrijker. In dit kader wordt flexibiliteit – de mogelijkheid om elektriciteitsopwekking, -opslag en -verbruik aan te passen – gezien als een cruciale oplossingsrichting om piekbelasting te verminderen en het systeem efficiënter te laten functioneren.

Het beter benutten van het net vraagt om verandering van gebruik van de assets die zijn verbonden met het net, zowel van particuliere huishoudens als van organisaties (bedrijven en instellingen). Zowel binnen het Landelijk Actieprogramma Netcongestie (LAN) als breder worden diverse oplossingen ontwikkeld om gedragsverandering te stimuleren en flexibiliteit te ontsluiten. Voorbeelden hiervan zijn alternatieve contractvormen, andere tariefstructuren, congestiemanagement en sectorgerichte aanpakken. Al deze oplossingen grijpen in op de assetbase van elektrische apparaten, echter daarover is nog veel onbekend.

Op basis van een synthese van beschikbare data kan worden geschat dat naar verwachting circa 80%[2] van het totale opgestelde elektrische vermogen voor zowel opwek-, opslag- en verbruiksassets, is geconcentreerd bij organisaties (bedrijven en instellingen), terwijl circa 20% zich bij huishoudens bevindt. Deze verhouding blijft waarschijnlijk ook ongeveer gelijk richting 2030. Dit rapport richt zich op die 80% van de totale elektrische assetbase, dus op assets bij bedrijven en instellingen. Onder assets verstaan we alle apparaten en installaties die verbonden zijn met het elektriciteitssysteem, zowel opwek, opslag als verbruik (en conversie).

[1] Klimaat- en Energieverkenning 2025, blz 25.
[2] Er is helaas geen enkele bron die deze 80/20-verdeling direct publiceert. Dat komt doordat de benodigde data verspreid is over verschillende domeinen (TenneT, CBS, RVO, Netbeheer Nederland, enz.) en nergens als één totaaltelling van alle elektrische assets wordt samengebracht.

1.2 Overzicht van relevante studies

Er is in de afgelopen jaren uitgebreid onderzoek gedaan naar flexibiliteit in het elektriciteitssysteem en de rol van bedrijven hierin. Deze studies hebben belangrijke inzichten opgeleverd, maar laten ook zien dat het huidige kennisbeeld gefragmenteerd is, zie ook bijlage B.2.

Op hoofdlijnen kunnen bestaande studies worden onderverdeeld in drie categorieën:

- Ten eerste zijn er studies die zich richten op het kwantificeren van het flexibiliteitspotentieel. Deze studies, waaronder analyses (Topsector Energie, 2022), (KWA, CF, EV, 2026) en (TNO, 2026c), laten zien dat met name de industrie en grootschalige assets een substantieel theoretisch potentieel vertegenwoordigen. De gehanteerde benaderingen zijn echter vaak top-down en gebaseerd op sectorale aannames, waardoor beperkt inzicht bestaat in de onderliggende assetstructuur.
- Ten tweede zijn er studies die zich richten op oplossingsrichtingen en beleidsinstrumenten. Voorbeelden hiervan zijn (CE Delft, 2026) en (RVO, 2025), waarin maatregelen zoals energiebeheer, opslag en contractvormen worden onderzocht. Deze studies bieden inzicht in hoe flexibiliteit kan worden ontsloten, maar geven geen integraal beeld van de totale beschikbare flexibiliteit. In de studie door (KWA, CF, EV, 2026) worden per sector oplossingsrichtingen geschetst.
- Ten derde zijn er studies die zich richten op barrières en randvoorwaarden voor flexibiliteit. Hierin wordt onder andere ingegaan op technische beperkingen, organisatorische uitdagingen en economische prikkels. Deze studies benadrukken dat flexibiliteit sterk contextafhankelijk is en dat ontsluiting maatwerk vereist. Bijvoorbeeld de studie (TNO, 2026a) waarin de barrières in de chemische- en voedingsmiddelindustrie zijn geanalyseerd.

Ondanks de groeiende aandacht voor energieflexibiliteit ontbreekt nog steeds een integraal beeld van de flexibiliteitsrelevante assetbase bij bedrijven en instellingen. Bestaande studies zijn veelal sectoraal of technologisch van aard, waardoor resultaten lastig vergelijkbaar zijn en een samenhangend nationaal overzicht ontbreekt. Daarnaast is beperkt inzicht beschikbaar in de omvang van het opgestelde vermogen van assets (met name verbruik), de technische inzetbaarheid ervan voor het verminderen van afnamecongestie en de randvoorwaarden die bepalen of deze flexibiliteit daadwerkelijk ontsloten kan worden. Hierdoor ontbreekt een consistente kennisbasis om flexibiliteitsopties te vergelijken, hun potentiële bijdrage te beoordelen en gericht beleid te ontwikkelen.

1.3 Doel van het onderzoek

Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft de ambitie om aanvullend nationaal beleid te ontwikkelen gericht op het versnellen van de ontsluiting van energieflexibiliteit, met als doel het verlichten van afnamecongestie. De verwachting is dat de mate van afnamecongestie de komende jaren tevens verder toeneemt als gevolg van voortgaande elektrificatie en economische groei. Vanwege de ontwrichtende effecten van afnamecongestie is een samenhangende aanpak voor ontsluiten van flexibiliteit wenselijk.

Voor het opstellen van een samenhangende aanpak is echter een analyseraamwerk en inzicht nodig om de aard, omvang en inzetbaarheid van het flexibiliteitspotentieel bij bedrijven en instellingen te kunnen duiden. Dit betreft inzicht in welke assets flexibiliteit kunnen leveren, hoe groot het bijbehorende opgestelde vermogen is, onder welke voorwaarden deze flexibiliteit inzetbaar is en hoe dit ontsloten kan worden. Dit biedt inzicht in welk aanvullend beleid kan leiden tot versnelde ontsluiting van het potentieel.

Dit rapport adresseert deze behoeftes door een analyseraamwerk te presenteren en de assetbase bij bedrijven en instellingen in kaart te brengen en hiervan gestructureerd het flexibiliteitspotentieel te bepalen. Het doel van het onderzoek wordt daarmee drieledig:

1. **Analyseraamwerk presenteren om het flexibiliteitspotentieel te duiden**; *Hoe kun je verschillende MW'en onderling met elkaar vergelijken?*

<u>En voor een relevante selectie van assets bij organisaties:</u>
2. **Inzicht verkrijgen in geïnstalleerde assetbase**; *Hoeveel MW staat er in Nederland?*
3. **Inzicht verkrijgen in het technische flexibiliteitspotentieel van deze assetbase voor het verminderen van afnamecongestie**; *Hoeveel MW is er technisch inzetbaar?*

Het onderzoek maakt deel uit van het Kennis voor Energiebeleid (KVE) programma. De nadruk in deze studie ligt dus op kennisopbouw.

1.4 Scope van het onderzoek

Dit onderzoek richt zich op de assetbase en het bijbehorend flexibiliteitspotentieel bij bedrijven en instellingen in Nederland, met als doel inzicht te krijgen in hun mogelijke bijdrage aan het reduceren van afnamecongestie in reguliere operatie.

De scope wordt als volgt afgebakend:

- **Scope van assets:**
  Afzonderlijk aanstuurbare assets achter-de-meter bij bedrijven en instellingen, inclusief
  - elektriciteitsopwekking, -opslag en -verbruik (incl. conversie)
  - kleine en grote aansluitingen
  - alle spanningsniveaus

  Complexere processen bestaande uit meerdere geïntegreerde assets, zoals in de chemische sector, zijn niet in scope van dit onderzoek. Bij de uitvoering van het project is een selectie van assets gemaakt om te onderzoeken, deze selectie wordt in hoofdstuk 3 toegelicht.
- **Tijdshorizon:**
  Voor dit onderzoek is het zichtjaar 2027 voor het bepalen van de assetbase van geselecteerde assets en bijbehorend flexibiliteitspotentieel. Daarmee ligt de focus op de bestaande assetbase, waarbij voor sommige assets een verwachte groei is gehanteerd. Dit zichtjaar is gekozen vanwege ingangsdatum van mogelijk aanvullend beleid.

Voor dit onderzoek hebben TNO en EZK gezamenlijk zestien assets geselecteerd waarvoor het opgestelde vermogen is bepaald (niveau 1) en daarbinnen zeven assets geselecteerd waarvoor kwalitatief ook is verkend hoe dit vermogen technisch te ontsluiten is (niveau 2). Hierbij wordt inzicht gegeven in de randvoorwaarden die bepalen of en hoe deze flexibiliteit gerealiseerd kan worden. Het derde en vierde niveau van flexibiliteit, respectievelijk het economisch en realiseerbaar potentieel, vallen buiten de scope van dit onderzoek.

Het onderzoek richt zich expliciet niet op:

- energiebesparing;
- inzet van elektrische assets en flexibiliteit voor andere doelen dan verminderen van afnamecongestie (zoals balanceringsdiensten);
- assets aangesloten achter een particuliere aansluiting;

- andere assets dan gezamenlijk door EZK en TNO geselecteerd in kader van dit onderzoek, zoals bijvoorbeeld bedoeld onder centrale productie van elektriciteit[3], of assets in complexe geïntegreerde processen;
- rol van langetermijn transitiescenario's (na 2030);
- kwantificatie van economisch en realiseerbaar potentieel (niveau 3 en 4).

1.5 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2 introduceert het gehanteerde raamwerk voor het analyseren van flexibiliteitspotentieel. Hierin wordt flexibiliteit in een systemisch perspectief geplaatst en wordt toegelicht hoe flexibiliteit wordt gestructureerd langs verschillende dimensies, waaronder type assets, gebruikscontext en randvoorwaarden. Dit hoofdstuk vormt de conceptuele basis voor de verdere analyse.
- In hoofdstuk 3 wordt de selectie van assets en de toegepaste onderzoeksmethode beschreven. Hierin wordt toegelicht op basis van welke criteria de relevante assets zijn geselecteerd en hoe het opgestelde vermogen en de randvoorwaarden voor flexibiliteitsinzet zijn bepaald.
- Hoofdstuk 4 presenteert de resultaten van het onderzoek. Allereerst wordt een overzicht gegeven van het opgestelde vermogen van de geselecteerde assets op nationaal niveau. Vervolgens worden per asset de belangrijkste kenmerken en randvoorwaarden voor flexibiliteit uitgewerkt. Het hoofdstuk sluit af met een conclusie van de resultaten. Voor onderbouwing, aannames en berekeningsstappen, wordt verwezen naar Bijlage D.
- Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek. Hierin worden de belangrijkste bevindingen samengevat en geplaatst in het perspectief van de bredere beleidsopgave rondom netcongestie en energietransitie. Daarnaast worden aanbevelingen geformuleerd voor beleid en verdere kennisontwikkeling. Hierbij wordt ingegaan op mogelijke richtingen voor het versnellen van de ontsluiting van flexibiliteit bij bedrijven en instellingen.
- De bijlagen bevatten aanvullende achtergrondinformatie, waaronder een nadere toelichting op het gehanteerde raamwerk, de methodologische keuzes en de onderliggende berekeningen per asset.

[3] Centrale productie van elektriciteit | CBS

2 Beter benutten en de rol van de aangesloten assetbase

Dit onderzoek richt zich op het verminderen van afnamecongestie, zoals in hoofdstuk 1 toegelicht. Afnamecongestie ontstaat wanneer de gevraagde elektriciteit op een bepaald moment en locatie de beschikbare transportcapaciteit van het net overschrijdt. Dit doet zich met name voor tijdens piekmomenten, waarbij gelijktijdig elektriciteitsverbruik leidt tot een overbelasting van het net. In Nederland treedt dit probleem in toenemende mate op door groei van bepaalde sectoren en elektrificatie van processen, warmte en mobiliteit.

Indien niet naar andere energiedragers kan worden uitgeweken, zijn er twee hoofdrichtingen om afnamecongestie te verminderen: netverzwaring, waarbij de beschikbare transportcapaciteit wordt vergroot, en beter benutten, waarbij de bestaande netcapaciteit efficiënter wordt gebruikt. Dit rapport richt zich op deze tweede oplossingsrichting.

Afnamecongestie is vooral dus een gelijktijdigheidsprobleem op een bepaalde locatie wanneer netto afname de beschikbare capaciteit overstijgt. In dit rapport verstaan we onder het verminderen van afnamecongestie daarom het terugbrengen van de netto afname tot binnen de beschikbare transportcapaciteit. Dit kan plaatsvinden door elektriciteitsverbruik te verminderen of te verschuiven, opslag in te zetten, lokale opwek te vergroten of een combinatie hiervan.

Centraal daarbij staat het gedrag van de elektrische assets die zijn aangesloten achter de netcomponent waar de congestie optreedt. De mogelijkheid om dit gedrag aan te passen wordt aangeduid als energieflexibiliteit. Het gaat hierbij om veranderingen aan de vraagzijde, maar ook om de inzet van opslag, regelbare opwek en contractuele vormen, zoals groepstransportovereenkomsten (gTO's) en cable pooling.

Voldoende inzicht in de assetbase en het bijbehorende flexibiliteitspotentieel is essentieel om te bepalen in welke mate deze assets kunnen bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie.

Congestiemanagement wordt door netbeheerders ingezet om ervoor te zorgen dat de fysieke grenzen van het net in de dagelijkse operatie niet worden overschreden. Dit onderzoek richt zich op de kennisopbouw die nodig is om flexibiliteit beter te kunnen ontsluiten, zodat deze zowel achter de meter als via congestiemanagement kan bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie.

2.1 Rol assetbase bedrijfsleven

Dit onderzoek hanteert een assetgeoriënteerde benadering voor het bepalen van flexibiliteitspotentieel. Daarbij staan de fysieke assets die flexibiliteit kunnen leveren centraal, zoals batterijen, WKK's, warmtepompen, elektrolysers en procesinstallaties. Het belangrijkste voordeel van deze benadering is dat zij aansluit bij de technische oorsprong van flexibiliteit: flexibiliteit wordt uiteindelijk altijd geleverd door een fysieke asset. Hierdoor ontstaat inzicht in de omvang, kenmerken, locatie en technische potentie van de assetbase, onafhankelijk van

de huidige markt- of contractstructuren. Markt- en contractgeoriënteerde benaderingen geven inzicht in de flexibiliteit die vandaag economisch of contractueel ontsloten kan worden, maar zijn afhankelijk van bestaande marktmechanismen en regelgeving. De assetgeoriënteerde benadering brengt juist het onderliggende potentieel in beeld en vormt daarmee een logisch vertrekpunt voor een sector overstijgende analyse van flexibiliteitsopties.

De totale assetbase kan worden onderverdeeld in assets achter particuliere aansluitingen en assets achter aansluitingen van organisaties, ofwel bij bedrijven en instellingen. In het vervolg zal worden gesproken over het bedrijfsleven. In juridische termen zijn particuliere aansluitingen doorgaans kleine aansluitingen en in het bedrijfsleven zijn zowel kleine als grote aansluitingen. De scope van dit onderzoek beperkt zich tot de assetbase van het bedrijfsleven.

Een asset wordt hierbij gedefinieerd als een apparaat, installatie of proces waarbij elektriciteit een input en/of output is. Assets kunnen hiermee worden onderverdeeld in drie hoofdcategorieën: opwek, opslag of verbruik (zie tekstbox 1 voor een definitie). Binnen deze hoofdcategorieën worden verschillende subcategorieën onderscheiden, zie ook Bijlage C.1. In hoofdstuk 3. wordt beschreven welke assets onderdeel zijn van dit onderzoek en hoe hiertoe gekomen is. Combinaties van assets achter een aansluiting, zoals een laadpaal met een batterij worden in dit onderzoek enkel als afzonderlijke assets beschouwd. Idealiter was dit meegenomen, maar wegens beperkte databeschikbaarheid was dat niet mogelijk in dit onderzoek.

Alle drie de hoofdcategorieën assets – opwek, opslag en verbruik – kunnen bijdragen aan beter benutten. Verbruiksassets kunnen flexibel worden aangestuurd om de elektriciteitsafname tijdens congestiemomenten tijdelijk te verlagen. Opslag- en regelbare opwekassets, zoals batterijen, WKK's en aggregaten, kunnen juist lokaal elektriciteit leveren, waardoor de netto afname van het elektriciteitsnet afneemt en de belasting van het net wordt verlicht.

Daarnaast kan ook het contractueel koppelen van verbruik met lokale opwek bijdrage aan het verminderen van afnamecongestie. Indien rekening gehouden wordt met het congestie tijdstip en de netto afname hierop aangepast wordt. Dit kan bijvoorbeeld via cable pooling, een directe lijn, een gesloten distributiesysteem of een groepstransportovereenkomst (gTO). [4] Specifiek voor niet-regelbare opwek, zoals zon PV en wind opwek, is deze contractuele koppeling een mogelijkheid om bij te dragen aan afnamecongestie.

Tekstbox 1: Soorten assets

Een asset (apparaat/installatie) wordt beschouwd als een systeem met inputs en outputs. Assets zijn relevant voor dit project als een input of output elektriciteit is, dit leidt tot drie hoofdcategorieën qua assets:

- **Verbruik**: Elektriciteit wordt gebruikt als input (dus incl. conversie)
- **Opwek**: Elektriciteit wordt geproduceerd als output
- **Opslag**: Elektriciteit is zowel input als output



[4] Overzicht en inzicht congestiemaatregelen ACM | ACM

Een laadplein dat is gekoppeld aan een windpark kan bijvoorbeeld een groter deel van zijn elektriciteitsvraag invullen met lokaal opgewekte elektriciteit. Hierdoor neemt de netto belasting van het elektriciteitsnet af. In dergelijke configuraties wordt de benodigde flexibiliteit veelal geleverd door opslag of vraagsturing, terwijl de omvang van het potentiële effect mede wordt bepaald door het beschikbare vermogen aan hernieuwbare opwek.

De totale assetbase in het bedrijfsleven is bijzonder heterogeen en divers van aard. Voor het bepalen van de mogelijke bijdrage ervan aan beter benutten is gekeken naar hoe deze assets zich gedragen, welke gebruikspatronen deze hebben en welke randvoorwaarden er gelden. Om het flexibiliteitspotentieel van een assetbase te bepalen is het relevant om dit gestructureerd te doen.

2.2 Raamwerk: van assetbase naar flexibiliteitspotentieel

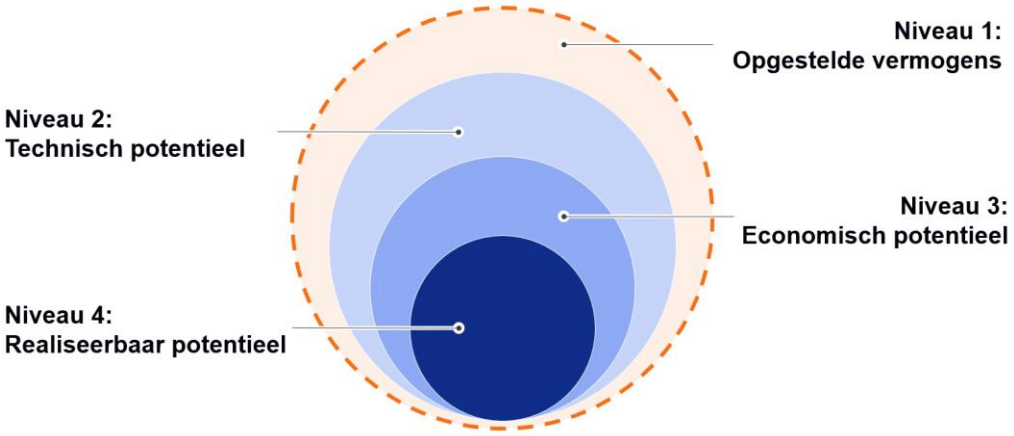
De mate waarin een asset zijn elektrische input en/of output bereid is te wijzigen hangt van veel zaken af. In dit onderzoek spreken we in dat kader van het flexibiliteitspotentieel. Dit potentieel is afhankelijk van welk doel het dient: in dit onderzoek gaat het enkel over het flexibiliteitspotentieel van assets in het kader van beter benutten. Het flexibiliteitspotentieel kan niet met één enkele maat worden beschreven.

In aansluiting op de gangbare literatuur over potentieanalyses wordt onderscheid gemaakt tussen vier niveaus van flexibiliteitspotentieel:

- **Niveau 1 Opgesteld vermogen:** het totale aanwezige vermogen van een asset en daarmee de fysieke bovengrens van het flexibiliteitspotentieel;
- **Niveau 2 Technisch potentieel**: het deel van dit vermogen dat, rekening houdend met technische en operationele randvoorwaarden, flexibel inzetbaar is;
- **Niveau 3 Economisch potentieel**: het deel van het technisch realiseerbare potentieel dat onder de geldende economische randvoorwaarden ontsloten kan worden;
- **Niveau 4 Realiseerbaar potentieel**: het deel van het economisch potentieel dat rekening houdend met resterende randvoorwaarden zoals organisatorische, institutionele en marktbarrières ontsloten wordt.

Deze gelaagde benadering, zie **Figuur 2.1**, maakt het mogelijk om onderscheid te maken tussen wat technisch aanwezig is en wat daadwerkelijk inzetbaar is voor het verlichten van netcongestie. Het biedt tevens een raamwerk om verschillende getallen voor vermogens in relatie tot elkaar te zetten en over assets heen bij elkaar op te kunnen tellen.

Vanwege budgettaire beperkingen en beperkte databeschikbaarheid ligt de focus in dit onderzoek op niveau 1 en deels niveau 2. Niveaus 3 en 4 worden enkel conceptueel beschouwd, maar niet kwantitatief uitgewerkt. Per type asset dient hiertoe een vervolg analyse gedaan te worden. Wegens bovenstaande beperkingen richt omvat dit onderzoek enkel een beperkte set aan assets, hoofdstuk 3 beschrijft de assetselectie.



Figuur 2.1: Schematische weergave van de vier niveaus van het flexibiliteitspotentieel van assets.

Niveau 2: Technisch potentieel

Het technisch potentieel beschrijft welk deel van het opgestelde vermogen van een asset flexibel inzetbaar is wanneer rekening wordt gehouden met technische en operationele randvoorwaarden. De aanwezigheid van vermogen alleen is daarvoor onvoldoende; bepalend is of een asset zijn elektriciteitsgebruik of -productie daadwerkelijk kan aanpassen op momenten dat dit gewenst is.

Om het technisch potentieel van verschillende assets op een consistente wijze te kunnen vergelijken, wordt in dit onderzoek gekeken naar drie categorieën randvoorwaarden:

- **Technische kenmerken van flexibiliteit**, zoals de mate van aanstuurbaarheid, automatiseringsgraad en aansluiting op het elektriciteitsnet. Daarnaast kan een asset ook op verschillende manieren flexibiliteit leveren:
  - Tijdsverschuiving (time shifting): het verplaatsen van elektriciteitsverbruik buiten piekmomenten, bijvoorbeeld via thermische buffering (HVAC, vriessystemen), procesbuffers of flexibilisering van laadmomenten (mobiliteit).
  - Vermogensreductie (peak shaving): het tijdelijk verlagen of afschakelen van elektriciteitsverbruik tijdens congestiemomenten, al dan niet met impact op het primaire proces.
  - Hybride inzet: het tijdelijk overschakelen naar alternatieve energiebronnen (bijv. gas of warmtebuffers) om elektriciteitsafname te beperken.
  - Lokale opwek en teruglevering: het verhogen van lokale productie (bijv. WKK) waardoor de netto afname van het net wordt verminderd.
  - Opslag en buffering: het tijdelijk opslaan van energie (elektrisch of thermisch) om vraag en aanbod in de tijd te ontkoppelen.
- **Gebruiks- en belastingpatronen**, waaronder de momenten waarop de asset normaal gesproken actief is, seizoensinvloeden, beschikbaarheid van flexibiliteit gedurende de dag en de mate waarin deze samenvalt met typische congestiemomenten.

Deze twee categorieën vormen gezamenlijk de kapstok voor de analyse van een aantal assets voor het technisch potentieel in hoofdstuk 4.

Niveau 3: Economisch potentieel

Het economisch potentieel betreft het deel van het technisch potentieel dat onder de geldende economische randvoorwaarden rendabel ontsloten kan worden. Naast technische haalbaarheid spelen hierbij factoren zoals investeringskosten, operationele kosten,

energieprijzen, nettarieven, beschikbare marktproducten en mogelijke opbrengsten uit flexibiliteitsdiensten een rol. Assets kunnen technisch geschikt zijn voor flexibiliteitsinzet, maar toch niet economisch aantrekkelijk zijn wanneer de benodigde investeringen of operationele consequenties niet worden gecompenseerd door voldoende inkomsten.

Niveau 4: Realiseerbaar potentieel
Het realiseerbaar potentieel betreft het deel van het economisch potentieel dat daadwerkelijk beschikbaar komt in de praktijk. Naast technische en economische aspecten spelen hierbij ook organisatorische, institutionele en gedragsmatige factoren een rol. Voorbeelden zijn beperkte kennis over flexibiliteitsmarkten, onvoldoende beschikbare sturingssystemen, contractuele beperkingen, een gebrek aan vertrouwen in nieuwe werkwijzen of beperkte beschikbaarheid van dienstverleners. Het realiseerbaar potentieel is daarmee het deel van de flexibiliteit dat uiteindelijk daadwerkelijk kan bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie.

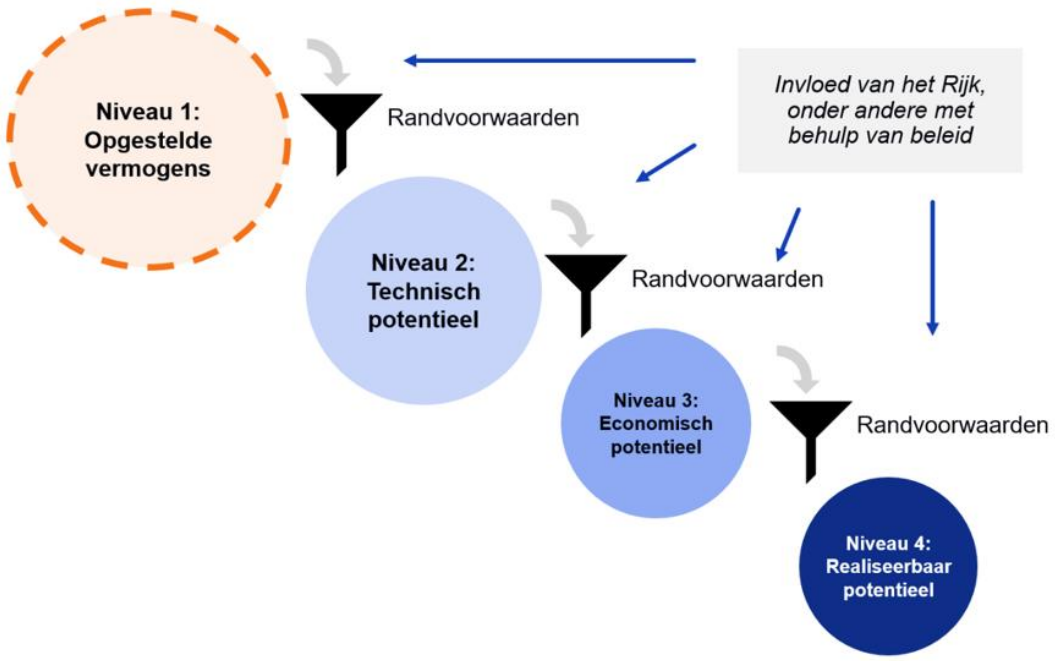
2.3 Vergroten van flexibiliteitspotentieel

Het onderscheid tussen opgesteld vermogen, technisch potentieel, economisch potentieel en realiseerbaar potentieel maakt inzichtelijk dat het ontsluiten van flexibiliteit meer vraagt dan alleen de aanwezigheid van geschikte assets. Tussen de fysieke assetbase en de flexibiliteit die in de praktijk daadwerkelijk beschikbaar komt, bevinden zich verschillende technische, economische, organisatorische en institutionele randvoorwaarden. Daarmee ontstaat ook een handelingsperspectief voor beleid: verschillende typen interventies kunnen aangrijpen op verschillende niveaus van het flexibiliteitspotentieel. Dit is schematisch weergegeven in **Figuur 2.2**.

Kennis over de samenstelling van de assetbase en het technisch potentieel maakt het mogelijk om te identificeren bij welke assets de grootste kansen liggen voor flexibiliteitsontsluiting. Vervolgens bepalen economische randvoorwaarden, marktprikkels en investeringsafwegingen welk deel van dit technisch potentieel daadwerkelijk aantrekkelijk is om te benutten. Tot slot bepalen factoren zoals kennis, organisatie, regelgeving, contractvormen, digitalisering en beschikbare dienstverlening welk deel van dit potentieel ook daadwerkelijk wordt gerealiseerd.

Vanuit beleidsperspectief betekent dit dat het vergroten van het realiseerbaar potentieel langs verschillende sporen kan plaatsvinden. Denk hierbij aan het stimuleren van nieuwe assets en flexibiliteitsopties, het wegnemen van technische of organisatorische belemmeringen, het verbeteren van markt- en contractvoorwaarden, het versterken van digitalisering en sturing, of het creëren van financiële prikkels om flexibiliteit aantrekkelijker te maken. Welke beleidsinstrumenten het meest effectief zijn, verschilt per assetcategorie en hangt samen met de randvoorwaarden die de overgang tussen de verschillende niveaus van flexibiliteitspotentieel beperken.

Het in dit onderzoek gehanteerde raamwerk biedt daarmee niet alleen een methode om flexibiliteit te analyseren, maar ook een systematische manier om beleidsmaatregelen en marktontwikkelingen te positioneren ten opzichte van de onderliggende oorzaken die flexibiliteitsontsluiting beperken.



Figuur 2.2: Illustratieve weergave om handelingsperspectief van het Rijk te duiden om het flexibiliteitspotentieel te vergroten en ontsluiten.

3 Assetselectie en methode

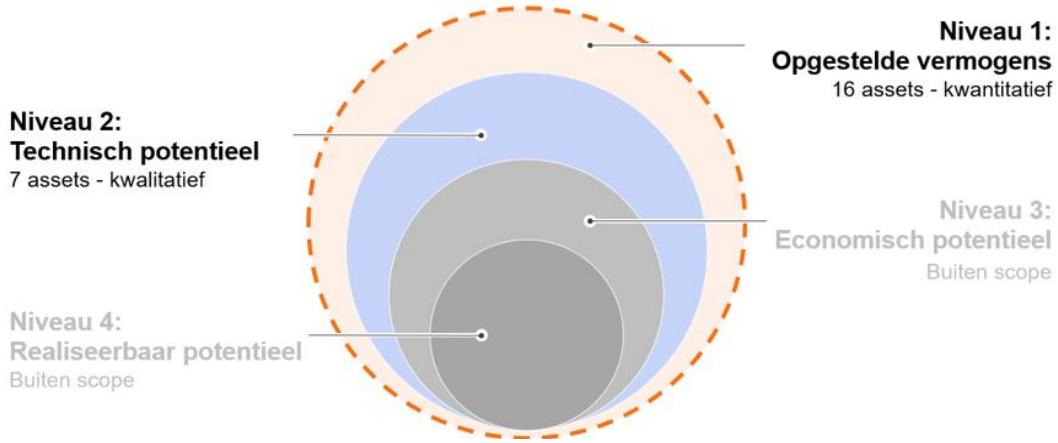
De totale assetbase in het Nederlandse bedrijfsleven is bijzonder heterogeen en divers van aard. Om een eerste stap te zetten in het verkrijgen van inzicht in de huidige assetbase en het bijbehorende flexibiliteitspotentieel, wordt in deze studie een aantal assets geselecteerd. De in dit onderzoek onderzochte assets vormen een eerste selectie, maar dekken niet de volledige breedte van de Nederlandse assetbase.

Het bepalen van opgestelde vermogens van de assetbase is de eerste stap in het systemisch identificeren van het flexibiliteitspotentieel. Om van niveau 1 (opgesteld vermogen) naar niveau 2 (technisch potentieel) te gaan, is het nodig om aan verschillende operationele en technische voorwaarden te voldoen. Hierbij kan worden gedacht aan voorwaarden vanuit het onderliggende proces, maar ook aan technische eigenschappen van de asset zelf.

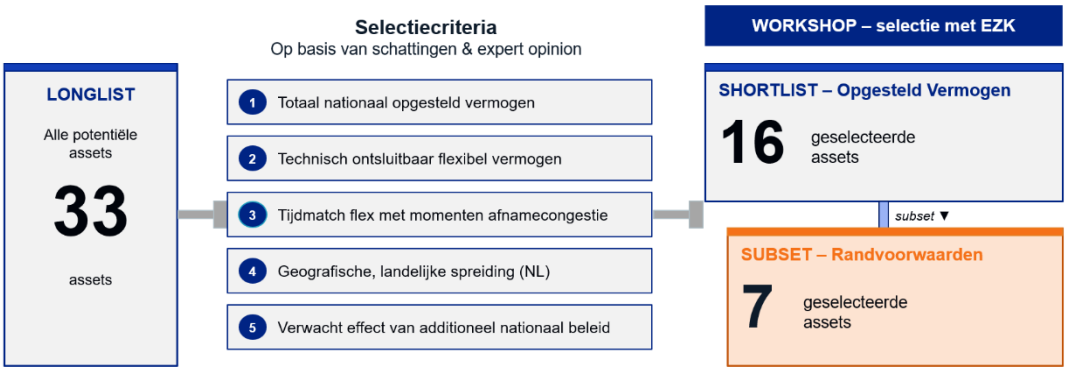
Het verkennen van deze randvoorwaarden legt de eerste stap richting het kwantificeren van het technisch potentieel. Voor alle (zestien) assets wordt een inschatting van het opgesteld vermogen in 2027 gemaakt. Voor een deel van de assets (zeven) worden de technische randvoorwaarden kwalitatief in beeld gebracht, als eerste stap richting niveau 2. Het economisch potentieel (niveau 3) en realiseerbaar potentieel (niveau 4) vallen buiten de scope van dit onderzoek. Voor een overzicht, zie **Figuur 3.1**.

Dit hoofdstuk beschrijft hoe de assetselectie tot stand is gekomen (paragraaf 3.1) en welke methode is toegepast voor het bepalen van het opgestelde vermogen per asset en de verkenning van randvoorwaarden voor de subset van assets (paragraaf 3.2).

Combinaties van assets achter een aansluiting, zoals een laadpaal met een batterij worden in dit onderzoek enkel als afzonderlijke assets beschouwd. Idealiter was dit meegenomen, maar wegens beperkte databeschikbaarheid was dat niet mogelijk in dit onderzoek.



Figuur 3.1: Overzicht van niveaus van flexibiliteitspotentieel en scope in dit onderzoek.



Figuur 3.2: Selectieproces van assets voor de analyse, van longlist (33 assets) naar shortlist (16 assets) en subset (7 assets) op basis van vijf selectiecriteria.

3.1 Selectie van assets

Het doel van deze assetselectie is het selecteren van assets bij bedrijven en instellingen die relevant zijn voor het verminderen van afnamecongestie. In dit onderzoek worden de opgestelde vermogens bepaald voor het zichtjaar 2027, als mogelijke ingangsdatum van aanvullend nationaal beleid ter stimulering van flexibiliteit. Daarmee gaat de studie grotendeels uit van de huidige assetbase; elektrificatie van de energievraag en ingroei van nieuwe assets worden slechts beperkt meegenomen. Effecten op de middellange en lange termijn – zoals voor 2030 of later – vallen buiten de scope.

Binnen de categorieën opwek, opslag en verbruik wordt een selectie van relevante assets gemaakt op basis van een aantal criteria. Zoals eerder genoemd, is het uitgangspunt hierbij het identificeren van assets met een relatief hoge relevantie voor het reduceren van afnamecongestie. Deze relevantie kan voortkomen uit een groot opgesteld vermogen, een hoog flexibiliteitspotentieel, een verwachte groei van de assetcategorie, of een combinatie hiervan. Daarnaast is rekening gehouden met de mate waarin de flexibiliteit van een asset reeds in bestaande studies is onderzocht.

Per asset is de relevantie beoordeeld op de volgende criteria:

- **Relevantie op basis van opgesteld vermogen**
  Een eerste inschatting van het totaal gesommeerd nationaal opgesteld vermogen in 2027
- **Relevantie op basis van flexibiliteitspotentieel**
  - Inschatting van mate waarin er flexibiliteit technisch ontsloten kan worden (bijv. opschakelbaar voor opwek en afschakelbaar voor verbruik)
  - Inschatting van de match in de tijd tussen beschikbaarheid van flexibiliteit en momenten van afnamecongestie
- **Relevante op basis van geografische spreiding**
  Een eerste inschatting van landelijke spreiding van opgesteld vermogen. Hierbij ligt focus op assets die niet uitsluitend geconcentreerd zijn op specifieke locaties, zoals krakers in industrieclusters
- **Meerwaarde van aanvullend beleid**
  Een eerste inschatting van de mate waarin flexibiliteit via additioneel beleid versneld ontsloten kan worden voor verlichten afnamecongestie.

Tabel 3.1: Overzicht van de geselecteerde assets met indicatie van type analyse: blauw gearceerd = enkel bepaling van opgestelde vermogens; oranje gearceerd = zowel opgestelde vermogens als aanvullende analyse van randvoorwaarden.

Hoofdcategorie	Subcategorie	Asset
Verbruik	Power2Heat	Verwarming, ventilatie en airconditioning (HVAC)
		Industriële e-boiler
		Industriële warmtepomp
	Power2Motion	Gemalen
		Rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI)
	Power2ICT	Datacenters
	Power2Mobility	Walstroom voor zeevaart
		Walstroom voor binnenvaart
		Laadinfra weg mobiliteit, P < 50 kW ps
		Laadinfra weg mobiliteit, 50 ≤ P ≤ 150 kW ps
		Laadinfra weg mobiliteit, P > 150 kW ps
	Power2Chemicals	Waterstofelektrolysers
Opwek	Fossiele opwek	Warmtekrachtkoppeling (WKK)
		(Noodstroom)aggregaten
	Hernieuwbare opwek	Wind op land
Opslag	Batterijen	Batterij (BESS)

Op basis van deze criteria is gekomen tot de selectie van assets zoals weergegeven in **Tabel 3.1**. De motivatie voor de selectie van de assets is opgenomen in Bijlage C.2. De beschrijving van de assets en de verdere afbakening (bijvoorbeeld naar sectoren) zijn opgenomen in het resultatenhoofdstuk, zodat deze in de context van de resultaten kunnen worden gelezen.

De selectie betreft nadrukkelijk geen uitputtende weergave van de Nederlandse assetbase, maar een eerste selectie van assets die naar verwachting relevant zijn voor congestieverlichting en waarvoor binnen de beschikbare tijd en databeschikbaarheid een analyse kon worden uitgevoerd.

3.2 Methode van onderzoek

Om inzicht te verkrijgen in de assetbase en het bijbehorende flexibiliteitspotentieel van het bedrijfsleven, wordt in dit onderzoek zowel het opgestelde vermogen als randvoorwaarden voor flexibele inzet in kaart gebracht. De resultaten zijn breed ter feedback voorgelegd zowel intern bij TNO als extern, zie Bijlage A voor de betrokken partijen en personen bij de totstandkoming van dit rapport. Tijdens het onderzoek zijn de volgende methodes gehanteerd.

3.2.1 Methode voor opgestelde vermogens

Voor zestien assets wordt een inschatting gemaakt van het nationaal gesommeerd vermogen in 2027. Op hoofdlijnen zijn er twee benaderingen te onderscheiden om dit opgesteld vermogen te bepalen:

1. Directe bronnen van opgesteld vermogen.
2. Afleiding van opgesteld vermogen op basis van andere data waarbij gebruik gemaakt wordt van kengetallen en aannames.

De keuze tussen deze twee benaderingen hangt af van de beschikbaarheid en kwaliteit van data. De voorkeur gaat uit naar de methode met de hoogst mogelijke betrouwbaarheid, en daarmee de laagste onzekerheid. In dit geval is dat de methode die gebruik maakt van directe bronnen van opgesteld vermogen van assets. Databeschikbaarheid, -kwaliteit en -compleetheid verschilt echter per asset. In zijn algemeenheid is er weinig data beschikbaar over nationale totalen van opgestelde vermogens van assets.

Wanneer deze data niet beschikbaar is, wordt opgesteld vermogen op een andere manier ingeschat. Opgesteld vermogen wordt dan afgeleid van andere data (denk bijvoorbeeld aan elektriciteitsverbruik) aan de hand van kengetallen en aannames. Hier wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van (interne) datasets. Er geldt nog steeds dat wordt gestuurd op het beperken van onzekerheden, door het aantal aannames en conversiestappen te beperken. TNO-experts zijn geraadpleegd bij het maken van aannames. Daarnaast is voor sommigen assets contact met externen geweest om aannames te valideren (**Tabel 3.2**).

De oorspronkelijke onderzoeksmethode was gebaseerd op een analyse van het energieverbruik per SBI-subsector. Hiervoor was een koppeling voorzien tussen energieverbruiksdata en SBI-subsectorclassificaties, die door een externe partij zou worden gemaakt. Deze koppeling bleek gedurende het onderzoek niet beschikbaar te komen door technische complicaties, waardoor de benodigde data niet kon worden verkregen. Daarom is voor een deel van de assets tijdens het onderzoek een alternatieve methodiek ontwikkeld om het opgesteld vermogen te bepalen. Voor drie initieel geselecteerde assets – elektrisch aandrijfsysteem, vrieshallen en overige commerciële Power2Heat – leverde deze alternatieve aanpak onvoldoende data op om een betrouwbare inschatting van het opgesteld vermogen te maken. Tijdens het onderzoek zijn wel relevante inzichten opgedaan voor deze assets. Deze worden gepresenteerd in bijlage D.4.

De gebruikte databronnen hebben veelal betrekking op de huidige assetbase (2026) of recente historische gegevens. Waar nodig zijn deze gegevens geëxtrapoleerd naar 2027 op basis van verwachte ontwikkelingen binnen de betreffende assetcategorie. Omdat het inschattingen betreft, is voor elke asset ook ingeschat wat de bandbreedte is.

Voor alle assets is in Bijlage D toelichting gegeven over de berekeningsstappen voor het opgestelde vermogen.

Tabel 3.2: Overzicht van geraadpleegde externe partijen.

Assetcategorie	Organisatie	Onderwerp	Scope in onderzoek
(Noodstroom)aggregaten	Stichting SCIOS	Bron van data en review	Opgesteld vermogen
Gemalen en RWZI's	Unie van Waterschappen	Validatie aannames en review	Opgesteld vermogen / randvoorwaarden
	KienIA	Praktijkervaring met industriële automatisering	Opgesteld vermogen
HVAC	Deerns	Technische randvoorwaarden voor flexibiliteit	Randvoorwaarden
E-boilers	S. Oxenaar en T. Butler	Randvoorwaarden voor flexibiliteit	Randvoorwaarden

3.2.2 Methode voor randvoorwaarden

Voor alle assets is aangegeven op welke manier ze flexibel kunnen worden ingezet. Voor een subset (7) van de assets wordt aanvullend een verdiepende analyse uitgevoerd naar de randvoorwaarden voor flexibele inzet: de stap van niveau 1 (opgesteld vermogen) naar niveau 2 (technisch potentieel).

Voor het in kaart brengen van deze randvoorwaarden wordt gebruikgemaakt van een combinatie van literatuur, expertkennis en gesprekken met relevante externe partijen. Een overzicht van de geraadpleegde externe partijen en hun bijdrage aan het onderzoek is opgenomen in **Tabel 3.2.** Voor andere assets, waaronder datacenters, bood beschikbare literatuur, openbare bronnen en aanwezige expertkennis voldoende basis voor de analyse.

Het in hoofdstuk 2 beschreven raamwerk onderscheidt binnen niveau 2 de volgende categorieën:
1. Technische kenmerken van flexibiliteit
2. Gebruiks- en belastingpatronen

Bij technische kenmerken van flexibiliteit is gekeken naar type flexibiliteit, bron van flexibiliteit, type elektriciteitsaansluiting, typische vermogen bij gebruiker, de mate van IT-aansturing en de rol in het bedrijfsproces. Voor type flexibiliteit is onderscheid gemaakt tussen time shifting, geografische shifting, hybride inzet en inzet van buffering. Ook is beschreven wat de bron is van de flexibiliteit, daarmee wordt bedoeld op welke manier deze flexibiliteit geleverd kan worden. Voor de assets is beschreven om wat voor vermogens per bedrijf/instelling het typisch gaat. Ook is er voor bedrijven bepaald welke elektriciteitsaansluiting er typisch is. Andere technische aspecten zijn, hoeveel vermogen wordt er typisch geplaatst, en wordt de asset centraal en geautomatiseerd (via IT) aangestuurd en of de asset onderdeel is van het primaire proces.

Voor het gebruikspatroon is beschreven wat het typische gebruiksprofiel is. Daarbij is ook beschreven of er seizoensverschillen zijn, of verschillen tussen het gebruik gedurende de dag en nacht en doordeweeks of ‘s weekends. Wanneer relevant is er onderscheid gemaakt tussen sectoren.

Daarnaast worden, ter duiding, barrières beschreven die betrekking hebben op niveau 3 en 4. Deze worden niet gebruikt om het economisch of realiseerbaar potentieel te bepalen. De analyse van niveau-2-randvoorwaarden resulteert in een kwalitatief inzicht in de technische inzetbaarheid op korte termijn.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek gepresenteerd. Voor alle assets wordt het opgestelde vermogen bepaald. Voor een subset (zeven assets) worden de aanvullende resultaten omtrent randvoorwaarden voor flexibele inzet gepresenteerd. Voor een overzicht voor welke assets deze aanvullende analyse omtrent randvoorwaarden is uitgevoerd, zie **Tabel 3.1** (paragraaf 3.1).

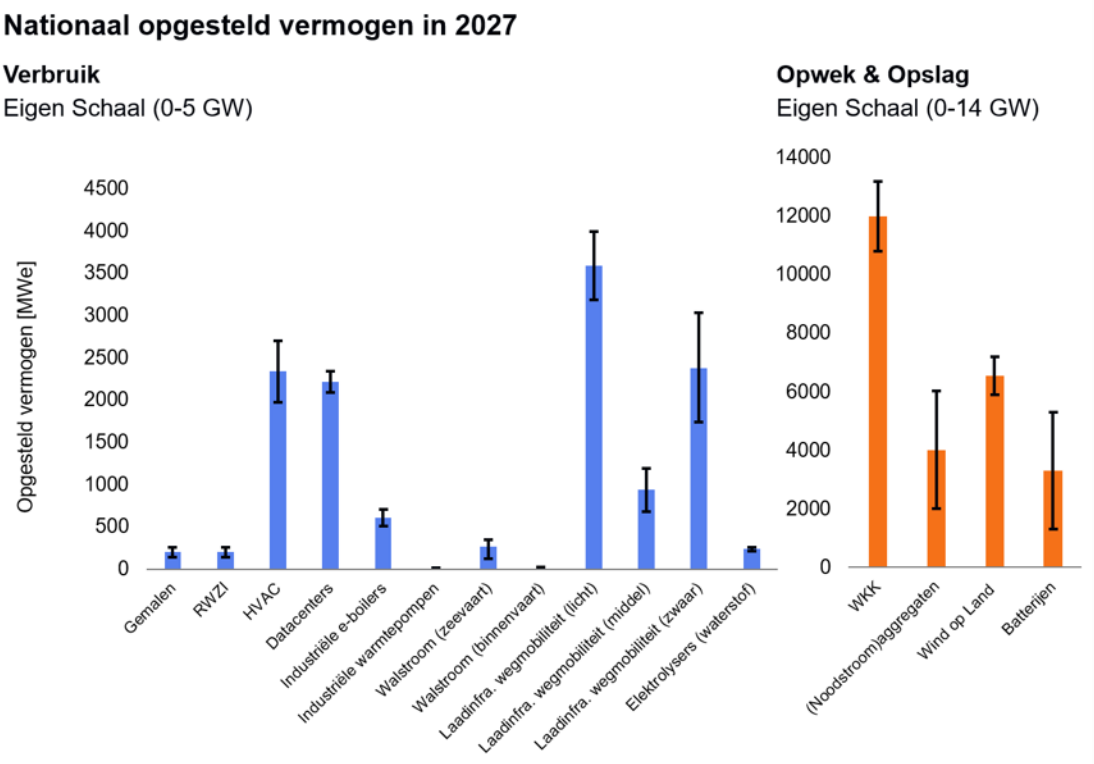
Allereerst wordt in paragraaf 4.1 een overzicht gegeven van het ingeschatte nationale totale opgestelde vermogen in 2027 van de onderzochte assets. Hierbij worden de assets naast elkaar gezet om inzicht te geven in de relatieve omvang van het opgestelde vermogen. Daarnaast wordt voor de 7 assets die in scope zijn voor de aanvullende analyse omtrent randvoorwaarden, een samenvatting gegeven van de randvoorwaarden voor flexibele inzet van de asset.

Vervolgens worden in paragraaf 4.2 de individuele assets uitgewerkt. Per asset wordt ingegaan op een korte beschrijving, het ingeschatte opgestelde vermogen, en, voor een aantal assets, de randvoorwaarden voor flexibiliteitsontsluiting. Daarbij wordt per asset beschreven welke vorm van flexibiliteit mogelijk kan worden ontsloten. Hierbij wordt aangesloten op de definities zoals beschreven in paragraaf 2.2. De onderliggende berekeningen en databronnen zijn opgenomen in de bijlage (zie Bijlage D) van de desbetreffende assets. Tot slot wordt in paragraaf 4.3 een conclusie gegeven over de resultaten.

4.1 Overzicht van opgestelde vermogens en randvoorwaarden

Figuur 4.1 geeft het ingeschatte nationale opgestelde vermogen in 2027 weer van de assets die binnen de scope van deze studie zijn onderzocht. Door deze assets naast elkaar te presenteren ontstaat inzicht in de relatieve omvang van het opgestelde vermogen van de geselecteerde assets. Bij deze vermogens is ook bandbreedte meegenomen in de vorm van een zwarte balk. Deze bandbreedte geeft de onzekerheid in de inschatting van het opgestelde vermogen weer. De omvang ervan verschilt per asset en hangt samen met zowel de kwaliteit en compleetheid van data als de mate van onzekerheid over de ontwikkeling van een asset richting 2027. Hierover wordt een verdere toelichting gegeven in Bijlage D.

Binnen de verbruiksassets valt op dat een beperkt aantal assets duidelijk hogere opgestelde vermogens kent dan de overige geselecteerde assets. Met name HVAC-systemen, datacenters en laadinfrastructuur voor wegmobiliteit (zowel licht als zwaar) springen eruit. De overige onderzochte assets bevinden zich grotendeels in dezelfde orde van grootte. Hierbij moet worden opgemerkt dat de verbruikszijde van het elektriciteitssysteem veel diverser is dan de in deze studie opgenomen selectie van assets. Zoals toegelicht in hoofdstuk 3 betreft dit een beperkte selectie van assets die op voorhand als relevant zijn beschouwd voor hun landelijke bijdrage aan het verminderen van afnamecongestie.



Disclaimer: Deze figuur toont het opgestelde vermogen van assets. Dit vermogen vormt een fysieke bovengrens voor de flexibiliteit die beschikbaar is. Dit mag **niet** worden geïnterpreteerd als flexibiliteitspotentieel. In de praktijk is slechts een deel van dit vermogen daadwerkelijk flexibel inzetbaar.

Figuur 4.1: Inschatting van nationaal opgesteld vermogen in 2027 voor de onderzochte assetbase. De y-assen zijn bewust niet gelijk geschaald: verbruiksassets variëren tussen 0-5 GW, opwek- & opslagassets tussen 0-14 GW. Aparte schalen zijn gekozen om de interne variatie binnen deze groepen goed zichtbaar te houden. De zwarte balken geven de onzekerheidsmarge weer.

Aan de aanbodzijde is het beeld anders. Het totale opgestelde vermogen van de opwekassets ligt gemiddeld een stuk hoger dan die van de verbruiksassets. Daarnaast valt op dat een beperkt aantal technologieën een substantieel deel van de nationale opwekkingscapaciteit vertegenwoordigt. Met name WKK-installaties en wind op land nemen hierin een dominante positie en zijn gezamenlijk goed voor een aanzienlijk aandeel (ongeveer een derde) van de totale opwekcapaciteit in Nederland. (Noodstroom)aggregaten worden doorgaans niet meegenomen in de nationale opwekcapaciteit, omdat deze niet structureel aan het elektriciteitsnet leveren, hoewel zij in totaal wel een significant geïnstalleerd vermogen vertegenwoordigen.

Naast de analyse van het opgestelde vermogen per asset wordt in een overzicht gegeven van de belangrijkste kenmerken en eigenschappen voor flexibele inzet per asset. Dit wordt alleen gedaan voor de zeven assets in scope voor de aanvullende analyse omtrent randvoorwaarden voor flexibele inzet (niveau 2 van flexibiliteitspotentie).

Per asset wordt inzicht gegeven in het type flexibiliteit, kenmerken die bepalend zijn voor het verminderen van afnamecongestie (zoals gebruikspatronen en spanningsniveau), de relatie met het primaire proces en de mate van IT-aansturing, evenals een inschatting van het niveau van benodigde economische prikkel voor ontsluiting van flexibiliteit.

Tekstbox 2 Legenda voor Tabel 4.1

Kenmerk	Omschrijving	Invulling
• **Type asset**	Richting van flexibiliteit	Afname / invoeding
• **Bron van flex**	Oorsprong van flexibiliteit	Tijdsverschuiving (time shifter) / regelbare opwek / hybride / geografische verschuiving
• **Spanningsniveau**	Spanningsniveau van het elektriciteitsnet waar de asset doorgaans op aangesloten is	Laagspanning (LS) / Middenspanning (MS) / Hoogspanning (HS)
• **Type aansluiting**	Type aansluiting waar achter de asset doorgaans is geïnstalleerd; kleinverbruik (KVB) of grootverbruik (GVB)	KVB / GVB
• **Beschikbaarheid van flex**	Momenten waarop flexibiliteit beschikbaar is	Ochtend / avond / continu
• **Duur van flex**	Typische inzetduur van flexibel vermogen	15 min / uren / dagen
• **Primair proceskritisch**	Mate waarin de asset essentieel is voor het primaire proces	Laag / Midden / Hoog
• **IT-aansturing**	Mate waarin de asset geautomatiseerd aangestuurd kan worden op basis van prikkels vanuit de elektriciteitsmarkt	Laag / Midden / Hoog
• **Geografische spreiding**	Mate van geografische spreiding	Laag / Midden / Hoog
• **Benodigde economische prikkel**	Inschatting van relatieve hoogte benodigde prikkel voor ontsluiting van flexibiliteit	€ / €€ / €€€

Zowel de inzichten uit deze analyse, als een toelichting omtrent de opgestelde vermogens, worden in de volgende paragraaf (4.2) per asset uitgewerkt. Als toelichting op de tabel worden de factoren eerst beschreven, inclusief de gehanteerde invulling per kenmerk (zie Tekstbox 2).

Tabel 4.1: Overzicht van assets in scope voor randvoorwaarden met hun nationaal gesommeerde ingeschatte opgestelde vermogen in 2027 en een kwalitatieve beoordeling van flexibiliteitsrandvoorwaarden, inclusief technische kernmerken, beschikbaarheid en benodigde economische prikkels.

Asset	Totaal opgesteld vermogen	Flexibiliteitskenmerken									
		Technische aspecten								Andere aspecten	
		Type asset	*Bron van flex*	*Spannings-niveau*	*Type aansluiting*	*Beschikbaar-heid flex*	*Duur van flex*	*Primair proces-kritisch*	*IT-aansturing*	*Geografische spreiding*	*Benodigde economische prikkel*
Gemalen	**200**	Afname	Time shifter	LS/MS	KVB/GVB	Afhankelijk van neerslag	Uren	Ja	Laag	Hoog	€€
HVAC	**2300**	Afname	Time shifter / hybride	LS/MS	KVB/GVB	Afhankelijk gebruiksfunctie en seizoen	Uren	Nee	Laag	Hoog	€
Industriële E-boiler	**600**	Afname	Time shifter / hybride	MS	GVB	Afhankelijk vorm flex	Uren	Ja	Midden	Midden	€
Industriële warmtepomp	**9**	Afname	Time shifter / hybride	MS	GVB	Afhankelijk vorm flex	-	Ja	Midden	Laag	€€€
Datacenter	**2200**	Afname	Time shifter / geografische shifter	MS/HS	GVB	Afhankelijk vorm flex	Minuten	Ja	Midden	Laag	Onbekend
WKK[5]	**12.000**	Invoeding	Regelbare opwek	MS/HS	GVB	Ochtend + avond	Uren	Nee	Hoog	Hoog	€
RWZI	**200**	Afname	Time shifter	LS/MS	m.n. GVB	Grotendeels continu maar afhankelijk van neerslag	Uren	Ja	Laag	Hoog	€€

[5] In het kader van dit onderzoek micro- en mini-WKKs buiten beschouwing gelaten. Daarmee zijn WKK's vrijwel uitsluitend bij GVB voor de in dit onderzoek relevante WKK-populatie

4.2 Uitwerking per asset

In de vorige paragraaf is een overzicht gegeven van de resultaten. Daarbij zijn de opgestelde vermogens van de geselecteerde assets naast elkaar gezet en zijn voor een subset van de assets de randvoorwaarden gepresenteerd in een tabel.

In deze paragraaf worden de assets individueel uitgewerkt. Per asset wordt eerst een korte beschrijving gegeven, inclusief eventuele afbakening naar toepassingen of sectoren, gevolgd door een toelichting op het ingeschatte opgestelde vermogen in 2027. De onderliggende databronnen, aannames en berekeningen zijn opgenomen in Bijlage D.

Voor een subset van de assets wordt daarnaast ingegaan op de randvoorwaarden voor flexibele inzet, als eerste stap richting het technisch potentieel (niveau 2). Welke assets hiervoor zijn geselecteerd, is weergegeven in **Tabel** (paragraaf 3.1). Voor de assets waarvoor een verdiepende analyse is uitgevoerd, worden de belangrijkste randvoorwaarden voor flexibele inzet beschreven. Daarbij wordt, afhankelijk van de relevantie voor de betreffende asset, ingegaan op technische aspecten, gebruikspatronen en barrières voor grootschalige ontsluiting. De volgende structuur wordt aangehouden:

- **Technische aspecten van flexibiliteit**
  - Voornaamste vorm(en) van flexibiliteit (bijvoorbeeld time shifting, hybride inzet, buffering of regelbare opwek)
  - Bron van de flexibiliteit
  - Typisch opgesteld vermogen per bedrijf of locatie
  - Mate van aanstuurbaarheid, waaronder IT-ondersteuning, automatiseringsniveau en typische duur van de flexibele inzet
- **Gebruikspatronen**
  - Type aansluiting en spanningsniveau
  - Archetypische gebruikspatroon in de tijd
  - Relatie met primaire proces
- **Barrières voor grootschalige ontsluiting, zoals:**
  - Operationele, organisatorische en institutionele barrières
  - Veiligheids- of kwaliteitsvereisten die de inzet van flexibiliteit kunnen beperken

4.2.1 Verbruik

Hieronder worden de verbruiksassets individueel uitgewerkt.

4.2.1.1 Gemalen

Een gemaal is een installatie (pomp) die wordt gebruikt om water te verplaatsen en zo het waterpeil in een gebied te regelen. In Nederland worden gemalen vooral ingezet om polders droog te houden door overtollig water af te voeren. Daarnaast kunnen ze, afhankelijk van de situatie, ook water aanvoeren bij droogte om het peil op niveau te houden.

Gemalen verbruiken ongeveer 15% van het totale elektriciteitsverbruik van waterschappen (CE Delft, 2019). De bron van flexibiliteit ontstaat doordat de waterstand binnen bepaalde grenzen van het peilbeheer kan worden gestuurd. Water hoeft niet altijd direct te worden verplaatst, waardoor de inzet van gemalen in de tijd kan worden verschoven zolang het waterpeil binnen de waterstanden van het peilbeheer blijft.

Opgesteld vermogen

Het totale opgestelde vermogen van gemalen in Nederland wordt in dit onderzoek ingeschat op circa 200 MW. Deze inschatting is gebaseerd op het rapport *Slim malen* (STOWA, 2019), waarin met behulp van een scenariomodel van e-Risk Group een pompvermogen van circa 200 MW is gekoppeld aan de beschikbare waterberging.

Randvoorwaarden

Technische aspecten van flexibiliteit
Gemalen kunnen flexibiliteit leveren in de vorm van tijdverschuiving (time shifting): het tijdelijk verhogen of verlagen van het elektriciteitsverbruik van het gemaal. Zoals eerder beschreven, ontstaat de bron van deze flexibiliteit uit de bandbreedtes van het peilbeheer. De bergingscapaciteit van het achterland fungeert hier als een buffer. Gemalen worden flexibel ingezet door tijdelijk te stoppen met malen tijdens congestiemomenten, of juist eerder of langer te malen bij beschikbaarheid van netcapaciteit of bij een (tijdelijk) overschot aan energie (STOWA, 2019). De duur van de flexibiliteit wordt bepaald door deze bandbreedtes: zodra waterstandsgrenzen binnen het peilbesluit worden bereikt, vervalt verdere schuifruimte.

Om deze flexibiliteit in te kunnen zetten, is het nodig dat gemalen, naast waterbeheerdoelstellingen, worden aangestuurd op basis van een flexibiliteitsvraag vanuit het elektriciteitsnet. Gemalen worden momenteel voornamelijk aangestuurd op basis van waterzuiverings- en waterbeheerdoelstellingen, zoals waterstanden, debieten en peilbeheer, en de inzet wordt vooraf ingepland op basis van weersverwachtingen. Dit maakt een zekere mate van voorspelbare planning al mogelijk. Voor het ontsluiten van flexibiliteit is echter aanvullend de integratie van elektriciteitsmarktgegevens in het aansturingssysteem nodig. In de praktijk is flexibel energiegebruik nog slechts bij enkele waterschappen onderdeel van de dagelijkse bedrijfsvoering (STOWA, 2026).

Gebruikspatronen
Het daadwerkelijke gebruik van gemalen varieert sterk in de tijd. Met name neerslagpatronen zijn bepalend: in natte winters draaien gemalen frequenter en langduriger dan in droge zomers. Deze variatie maakt dat de flexibiliteit van gemalen niet constant beschikbaar is, maar fluctueert afhankelijk van weersomstandigheden en hydrologische situatie.

Gemalen zijn vrijwel altijd aangesloten op het distributienet. Ze zouden daarmee dus, afhankelijk van hun locatie ten opzichte van het congestiepunt, kunnen bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie op lagere netvlakken.

Barrières voor grootschalige ontsluiting
Voor grootschalige ontsluiting van flexibiliteit bij gemalen geldt dat altijd moet worden voldaan aan strikte randvoorwaarden vanuit het waterbeheer. Waterstanden moeten te allen tijde binnen de grenzen van het peilbesluit blijven. De beschikbare flexibiliteit wordt mede bepaald door de toegestane peilbandbreedte: hoe groter de bandbreedte, hoe meer ruimte er is om water tijdelijk te bufferen en de inzet van gemalen in de tijd te verschuiven. STOWA (2019) laat op basis van scenarioanalyses en pilots zien dat deze beschikbare buffercapaciteit kan worden benut om de inzet van gemalen in de tijd te verschuiven.

De beschikbare peilruimte vormt daarmee niet alleen een randvoorwaarde, maar ook een belangrijke bepalende factor voor het flexibiliteitspotentieel. Vanuit de Unie van Waterschappen is aangegeven dat veel huidige peilbesluiten dateren van vóór de huidige

congestieproblematiek. Bij toekomstige actualisaties van peilbesluiten kan daarom worden onderzocht in hoeverre flexibiliteitsdoelstellingen kunnen worden meegewogen, zonder afbreuk te doen aan de primaire doelen van het waterbeheer.

Daarnaast kan er in het geval van het peilbeheer sprake zijn van complexere systeemsamenhang: de inzet van een gemaal op een locatie kan gevolgen hebben voor de inzet op andere locaties (CE Delft, 2019)[6].

Een belangrijke belemmering ligt daarnaast in het opbouwen van de juiste competenties bij waterschappen. Flexibiliteitsinzet vraagt om nieuwe vormen van afstemming tussen waterbeheer en energiesysteem, maar ook om kennis van de werking van elektriciteitsmarkten, de flexibiliteitsbehoeften van netbeheerders, contractvormen en operationele consequenties van flexibele inzet.

Hoewel flexibiliteitsontsluiting bij gemalen organisatorisch eenvoudiger kan zijn dan bij RWZI's, doordat de afvalwaterketen mede afhankelijk is van gemeentelijk rioolbeheer en flexibilisering van zuiveringen gevolgen kan hebben voor complexe fysisch-chemische processen en bijbehorende emissies.

Flexibiliteitsontsluiting bij gemalen kan, volgens STOWA (2026), minder complex zijn dan bij RWZI's. In de afvalwaterketen zijn naast waterschappen ook gemeenten als extra stakeholder betrokken, bij het beheer van de riolering. Daarnaast brengt flexibele inzet van RWZI's procesrisico's welke ongewenste effecten kunnen hebben (zoals extra uitstoot van lachgasemissies) (zie paragraaf 4.2.1.2). Echter wijst de complexere systeemafhankelijkheid tussen gemalen erop dat deze niet altijd onafhankelijk per installatie kunnen worden ingezet (CE Delft, 2019). Bovendien is het elektriciteitsverbruik van gemalen aanzienlijk lager dan dat van RWZI's. Waar de afvalwaterketen circa 80% van het totale elektriciteitsverbruik van waterschappen voor haar rekening neemt, bedraagt het aandeel van het operationele waterbeheer ongeveer 15% (CE Delft, 2019).

4.2.1.2 Rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI)

Rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) zijn installaties die afvalwater van huishoudens en industrie zuiveren voordat het wordt teruggeleverd aan het oppervlaktewater. Voor deze zuiveringsprocessen wordt elektriciteit gebruikt, waarbij het grootste gedeelte van het verbruik kan worden toegerekend aan de pomp en beluchter van de RWZI. Bij één op vijf RWZI's wordt aanvullend een biovergister ingezet. Dit verhoogt het elektriciteitsverbruik met circa 5% en leidt tot de productie van biogas, dat vervolgens kan worden ingezet in een WKK.

Het grootste gedeelte (± 80%) van het elektriciteitsverbruik van de waterschappen wordt ingezet bij het zuiveringsproces van RWZI's (CE Delft, 2019). Als het dus gaat om het elektriciteitsgebruik ligt veruit het grootste potentieel in de waterketen bij de zuiveringsactiviteiten van het waterschap.

Rioolwaterzuiveringsinstallaties zijn gedimensioneerd op verschillende weersomstandigheden. Doordat in veel gevallen ook hemelwater wordt verwerkt, is de verwerkingscapaciteit onder droogweercondities relatief groot ten opzichte van de benodigde capaciteit. Hierdoor is

[6] CE Delft (2019) beschrijft dat in het watersysteem sprake is van systeemafhankelijkheid: het waterpeil wordt beïnvloed door de inzet van meerdere gemalen, waardoor de aansturing van één gemaal gevolgen kan hebben voor de benodigde inzet van andere gemalen. Hierdoor kan optimalisatie van het pompgedrag complex zijn.

sprake van overdimensionering, wat ruimte biedt voor om delen van het proces flexibeler in de tijd in te zetten (CE Delft, 2019).

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte totaal opgestelde elektrisch vermogen van rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) in Nederland bedraagt circa 200 MW. Dit vermogen is afgeleid op basis van jaarlijkse gegevens over elektriciteitsverbruik bij RWZI's uit de database van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS, 2025d). Het jaarverbruik is omgerekend naar opgesteld vermogen door het doen van aannames over het aantal vollasturen (zie Bijlage D.1.1 voor de aannames en berekeningsstappen).

Randvoorwaarden

Technische aspecten van flexibiliteit

RWZI's kunnen flexibiliteit bieden door hun elektriciteitsverbruik (gedeeltelijk) in de tijd te verschuiven (time shifting) of tijdelijk in intensiteit aan te passen. Deze flexibiliteit kan op verschillende manieren worden gerealiseerd. Twee belangrijke voorbeelden zijn 1) de flexibele aansturing van de beluchting en 2) de tijdelijke buffering van afvalwater, waardoor de verwerking van influent in de tijd kan worden verschoven. Deze zullen hieronder kort worden beschreven.

Bij flexibele aansturing van de beluchting wordt de beluchting tijdelijk terug geregeld en later gecompenseerd met extra beluchting. De beluchting is het proces met het hoogste elektriciteitsverbruik binnen een RWZI en is verantwoordelijk voor circa 60% van het totale elektriciteitsverbruik. Daarnaast fluctueert het elektriciteitsverbruik van de beluchting sterk gedurende de dag als gevolg van de wisselende belasting van het zuiveringsproces (voor meer details zie volgende stuk over *Gebruikspatronen*) en biedt het dus mogelijkheden om flexibel gestuurd te worden. Hierdoor wordt de beluchting vaak beschouwd als de belangrijkste bron van flexibiliteit binnen RWZI's (CE Delft, 2019).

In het geval van de tweede optie, bij het bufferen van afvalwater, wordt het verwerken van influent tijdelijk uitgesteld, waardoor het elektriciteitsverbruik verschoven kan worden buiten piekmomenten om. De beschikbare buffercapaciteit vormt hierbij een belangrijke randvoorwaarde. In tegenstelling tot RWZI's is in het rioolstelsel vaak wel enige buffercapaciteit aanwezig (CE Delft, 2019). Deze buffercapaciteit is echter niet altijd beschikbaar voor flexibiliteit, omdat een deel ervan nodig is om regenwater op te kunnen vangen. De beschikbare flexibiliteit hangt daardoor sterk samen met de weersomstandigheden en de beschikbare ruimte in het rioolstelsel. Door buffering kan het piekvermogen van RWZI's worden verlaagd. Een case study laat echter wel zien dat het verschuiven van verwerking buiten de avondpiek, mits voldoende buffercapaciteit beschikbaar is, kan leiden tot een piekreductie van circa 28% (Pythia, 2026).

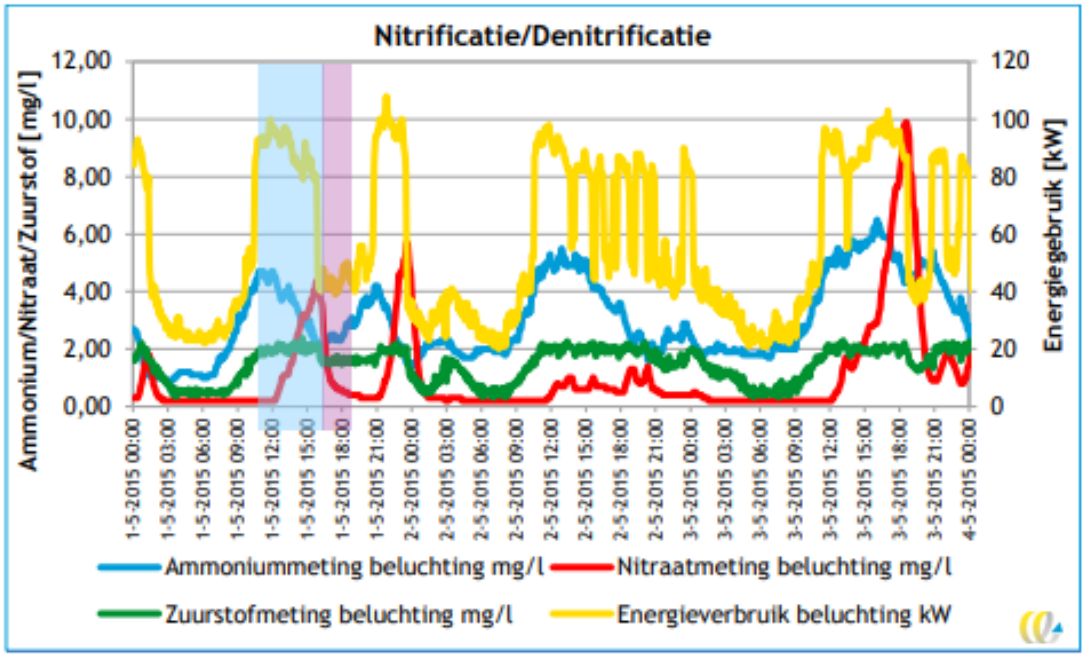
Naast deze voorbeelden worden in de literatuur ook andere flexibiliteitsopties genoemd, zoals slibontwatering in de nacht, batchgewijze nitrificatie en denitrificatie en de flexibele inzet van WKK's (CE Delft, 2019).

Gebruikspatronen

Op geaggregeerd niveau kennen RWZI's een relatief stabiele elektriciteitsvraag. De belastingduurkromme van het totale elektriciteitsverbruik laat een relatief vlak profiel zien: hoge vermogens komen slechts gedurende een beperkt aantal uren voor, terwijl er vrijwel geen perioden zijn met een zeer laag of afwezig elektriciteitsverbruik. Ook de gemiddelde dag- en

jaarprofielen vertonen slechts beperkte variatie. Dit wijst erop dat RWZI's gedurende vrijwel het gehele jaar een continue en relatief voorspelbare elektriciteitsvraag hebben (Pondera, 2021).

Deze relatief vlakke geaggregeerde totale vraag maskeert echter de dynamiek van individuele processen binnen de RWZI. De grootste elektriciteitsverbruiker, de beluchting, kent juist een sterk fluctuerend gebruikspatroon. De beluchting schakelt gedurende de dag meerdere keren op en af als gevolg van de procesregeling, waardoor het vermogen op kwartierbasis sterk varieert. Tijdens regenval nemen deze vermogenspieken verder toe door de hogere hydraulische belasting. Omdat dergelijke regenperioden slechts een beperkt deel van het jaar voorkomen, opereert de RWZI het grootste deel van de tijd onder voorspelbare droge weersomstandigheden, waarin de beluchting flexibiliteit kan leveren.



Figuur 4.2: Voorbeeld van fluctuerend energieverbruik van beluchting (gele lijn) ten opzichte van sturingsparameters (CE Delft, 2019)

Barrières voor grootschalige ontsluiting
De mogelijkheden voor grootschalige ontsluiting van flexibiliteit bij RWZI's worden begrensd door verschillende procesmatige, technische en organisatorische barrières.

Procesmatige barrières
Er gelden een aantal randvoorwaarden die als barrière kunnen optreden. Zo dient de effluentkwaliteit ten alle tijden te voldoen aan wettelijke normen. Daarnaast dient de continuïteit van de fysisch-chemische processen in de zuivering gewaarborgd te blijven. Meer flexibiliteit (bijvoorbeeld variëren in debiet of beluchting) beïnvloedt deze processen in de zuivering en kan leiden tot ongewenste effecten, zoals de productie van lachgasemissies, een broeikasgas dat aanzienlijk sterker is dan CO_2 (STOWA, 2026).

Technische barrières
Het benutten van flexibiliteit vraagt daarnaast om geavanceerde monitoring, automatisering en processturing. Zowel voor de flexibele aansturing van de beluchting als voor het benutten van

buffercapaciteit is geavanceerde sturing nodig. In het geval van de beluchting vraagt het bijvoorbeeld om proactieve sturing, waarbij niet alleen wordt gereageerd op actuele procescondities, maar ook wordt geanticipeerd op verwachte veranderingen in influentaanvoer en zuiveringsbelasting.

Organisatorische barrières
De complexiteit wordt verder vergroot doordat de afvalwaterketen in beheer is van zowel gemeenten als waterschappen. Gemeenten zijn verantwoordelijk voor het gemeentelijke gedeelte van het rioolstelsel. Voor het bufferen van afvalwater is er, in tegenstelling tot de RWZI, in principe wel buffercapaciteit in het riool. Gemeenten staan buffering in het riool veelal niet toe (CE Delft, 2019). Ook kan er een afnameverplichting gelden vanuit gemeenten voor het afvalwater (CE Delft, 2019). In enkele gevallen vindt al verdergaande systeemintegratie plaats, waarbij de sturing van gemeentelijke rioolgemalen wordt overgedragen aan het waterschap. Dit biedt meer mogelijkheden om de afvalwaterketen als geheel flexibel aan te sturen.

Zoals beschreven in de vorige paragraaf (4.2.1.1 Gemalen) is het daarnaast nodig dat de juiste competenties worden opgebouwd bij waterschappen.

4.2.1.3 Gebouwgebonden koeling en verwarming (HVAC)

Gebouwen van bedrijven of instellingen worden verwarmd, gekoeld en geventileerd, de installaties waarmee dit gebeurt worden gezamenlijk ook wel Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) genoemd. Dit rapport beperkt zich tot all-electric warmtepompen en warmtepompen met een back-up- of hybride gasketel. Een warmtepomp onttrekt warmte aan een bron, zoals de buitenlucht, de bodem, grondwater of oppervlaktewater, en brengt deze op een hoger temperatuurniveau voor verwarming van het gebouw. De warmte wordt doorgaans via een watergedragen systeem of via lucht in het gebouw gedistribueerd en afgegeven.

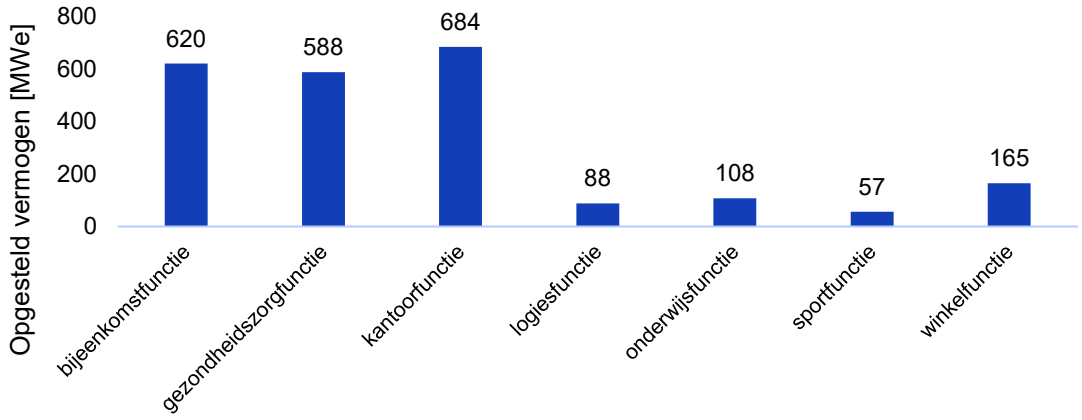
Een deel van de warmtepompen is omkeerbaar en kan ook gebruikt worden om een gebouw te koelen. Bij bedrijven en instellingen zijn buitenlucht-luchtwarmtepompen het meest toegepast. Daarnaast worden buitenlucht-water- en bodem-/waterwarmtepompen toegepast, waarbij de warmte via een watergedragen systeem aan het gebouw wordt afgegeven (CBS, 2026). Warmtepompen voor gebouwacclimatisatie komen in vrijwel alle typen gebouwen voor, zoals kantoren, scholen en winkels, mits het gebouw voldoende geïsoleerd is. Afhankelijk van de gebruikspatronen van deze gebouwen kunnen deze flexibiliteit leveren aan het elektriciteitsnet, door het verschuiven van het elektriciteitsverbruik, door gebruik te maken van het verwarmen of koelen van de gebouwmassa, verminderen van de piekbelasting of door het inzetten van een hybride of back-up warmtepomp. In eerdere studies zijn met name sectoren geïdentificeerd die ’s nachts gesloten zijn, zoals onderwijsinstellingen en kantoren (RVO, 2025); (KWA, CF, EV, 2026). Gebouwdelen met clean rooms, zoals bij laboratoria of een operatiekamer in het ziekenhuis zijn minder geschikt vanwege strikte veiligheidsnormen.

Opgesteld vermogen

Het opgestelde vermogen van HVAC wordt in 2027 op 2300 MW_e. Zoals in de **Figuur 4.3** is te zien, komen deze vooral voor in de gebruiksfuncties[7] kantoren, de gezondheidszorg en bijeenkomst[8]. Het opgestelde vermogen is bepaald door gegevens over individuele panden, te koppelen aan geaggregeerde informatie over warmtepompen uit de energielabeldatabase. Dit

[7] De BAG gebruiksfuncties is het gebruiksdoel van een verblijfsobject zoals in de vergunning is vastgelegd gebruiksdoel | Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) | Kadaster
[8] De BAG gebruiksfunctie bijeenkomst omvat o.a. horeca, kunst, cultuur, kinderopvang, buurtcentra bijeenkomstfunctie | Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) | Kadaster

is omgerekend naar het opgestelde vermogen per pand in de Verrijkte BAG en geëxtrapoleerd aan de hand van de trend in de verkoop van warmtepompen (TNO, 2025d; CBS, 2025a). Voor het opgestelde vermogen van HVAC is een pragmatische inschatting gemaakt van het opgestelde vermogens voor het verwarmen van gebouwen met een warmtepomp. Voor kantoren is er geen harde bovengrens voor het koelvermogen, in moderne[9] of intern-belaste kantoren kan het koelvermogen per m² gelijk zijn aan of groter zijn dan het verwarmingsvermogen. Het vermogen voor ventilatie is niet ingeschat, dit is beperkt aanstuurbaar vanwege luchtkwaliteitseisen[10] over het binnenklimaat, maar het energieverbruik van de ventilatie verandert wanneer de warmtepomp flexibel wordt ingezet. In de Bijlage D zijn de berekeningstappen verder uitgewerkt.



Figuur 4.3: Opgesteld vermogen warmtepompen per gebruiksfunctie in 2027.

Ook is de energielabeldatabase geanalyseerd om inzicht te krijgen in de toepassing van hybride en back-upinstallaties naast warmtepompen. Bij een hybride opstelling levert de warmtepomp doorgaans de basislast en wordt aanvullende warmteproductie ingezet om pieken in de warmtevraag op te vangen. Een back-upinstallatie wordt primair ingezet bij uitval of wanneer de warmtepomp onvoldoende capaciteit kan leveren. Uit de analyse blijkt dat veel utiliteitsgebouwen over dergelijke aanvullende capaciteit beschikken; bij kantoren gaat het om ten minste 40% van de gevallen. Het werkelijke aandeel ligt waarschijnlijk hoger. Deze installaties bieden mogelijkheden voor flexibel elektriciteitsgebruik, zowel door tijdelijk gebruik te maken van aanvullende warmtecapaciteit als door warmte- en koudevraag in de tijd te verschuiven, bijvoorbeeld via de thermische massa van het gebouw of aanwezige warmte- en koudeopslag.

Randvoorwaarden

De flexibiliteit van warmtepompsystemen komt vooral voort uit het verschuiven van de warmte- en koudevraag in de tijd en, bij hybride systemen, uit het tijdelijk inzetten van een alternatieve warmtebron. Bij het verschuiven van de vraag wordt gebruikgemaakt van de thermische massa van het gebouw. Door het gebouw vooraf te verwarmen of te koelen kan de warmtepomp op een later moment tijdelijk minder vermogen leveren of zelfs worden uitgeschakeld.

Zo kan tijdens een warme periode ’s nachts extra worden voorgekoeld, waardoor de koelvraag gedurende de daaropvolgende uren sterk kan worden gereduceerd en in sommige perioden

[9] De koelvraag is hoger bij kantoren met veel glas, een hoge interne warmtelast of luchtgebonden koeling.
[10] Afhankelijk van de type werkzaamheden, de adviezen voor luchtverversing zijn te vinden op Luchtverversing | Arboportaal

zelfs tot vrijwel nul kan dalen. Hetzelfde principe kan tijdens koude perioden worden toegepast door het gebouw vooraf te verwarmen. Naast het verlagen van de ochtendpieken kan ook gedurende de dag worden geanticipeerd op netcongestie door vooraf te verwarmen/koelen. Hoe lang en in welke mate de warmte- of koudevraag kan worden verschoven, hangt onder meer af van de buitentemperatuur, de gewenste binnentemperatuur en de interne warmtelast, maar vooral van de combinatie van de isolerende kwaliteit van de gebouwschil en de beschikbare interne thermische massa. Een goed geïsoleerd gebouw met voldoende thermische massa kan de opgeslagen warmte of koude langer vasthouden. Bij hybride opstellingen kan daarnaast de elektrische piekvraag worden beperkt door tijdelijk aanvullende warmtecapaciteit, bijvoorbeeld een gasgestookte cv-ketel, in te zetten.

Een all-electric warmtepomp kan flexibel worden ingezet wanneer deze zowel meerdere setpoints als een uitgebreid gebouwautomatiserings- en controlesysteem (GACS) heeft. Vooral de oudere warmtepompen hebben enkel een aan-uit functie, de recente warmtepompen kunnen vaak ingesteld worden op 25/50/75/100% (Deerns, 2026; CE Delft, 2026; CE Delft, 2026; CE Delft, 2026; CE Delft, 2026). De richtlijn voor energieprestatie van gebouwen (EPBV IV) verplicht een Gebouwautomatiserings- en Controlesysteem (GACS) vanaf 2026 voor gebouwen met verwarmings- of airconditioningsystemen met een nominaal vermogen boven 290 kW. Vanaf 2030 geldt deze verplichting ook voor systemen vanaf 70 kW (RVO, 2026). Onder MKB-bedrijven wordt energiemanagement nog maar beperkt toegepast. In grotere utiliteitsgebouwen worden klimaatinstallaties vaak aangestuurd via gebouwbeheer- of gebouwautomatiseringssystemen. Deze systemen zijn traditioneel gericht op comfort, energie-efficiëntie en, in toenemende mate, energiekosten. In sommige gevallen wordt sturing toegepast om binnen de maximale aansluitcapaciteit te blijven van een bedrijf. Expliciete sturing op flexibiliteit, bijvoorbeeld door warmte- en koudevraag te verschuiven om de belasting tijdens congestie-uren te verminderen, wordt in Nederland nog zeer beperkt toegepast. Een belangrijke voorwaarde voor dergelijke flexibiliteitssturing is voldoende inzicht in het energiegebruik. Energiemeting kan uitsluitend op het niveau van de hoofdaansluiting plaatsvinden, maar kan ook worden uitgesplitst naar afzonderlijke installaties, zoals warmtepompen, koelinstallaties en laadvoorzieningen. Bemetering op installatieniveau maakt het beter mogelijk om beschikbare flexibiliteit te identificeren, te kwantificeren en gericht aan te sturen.

De gebruikers van warmtepompen hebben zowel klein- als grootverbruiksaansluitingen. Met name in de utiliteitsbouw is de beschikbare flexibiliteit verdeeld over een groot aantal gebouwen met relatief beperkte individuele vermogens. Ook deze kleinere vermogens kunnen voor congestiemanagement worden ingezet. Voor individuele deelname wordt in de praktijk voor diverse diensten de grens van 1 MW gehanteerd, voor gebundelde deelname geldt geen algemene ondergrens. Afhankelijk van het congestieproduct en de netbeheerder kunnen ook kleinere flexibele vermogens worden ingezet. Door flexibiliteit van warmtepompen, koelinstallaties en andere gebouwinstallaties te bundelen, kunnen ook relatief kleine vermogens gezamenlijk een relevante bijdrage leveren aan congestiemanagement.

Kleinere vermogens kunnen afzonderlijk of gebundeld worden ontsloten via een Congestion Service Provider (CSP). Voor redispatch (tegen vergoeding tijdelijk meer of minder stroom gebruiken om lokale netcongestie op te lossen) gelden daarbij specifieke marktregels. Wanneer een CSP aansluitingen met een productie- of verbruiksinstallatie kleiner dan 1 MW in één groep bundelt, schrijft de Netcode voor dat voor deze aansluitingen dezelfde Balance Responsible Party (BRP) geregistreerd moet zijn. Een BRP is de marktpartij die verantwoordelijk is voor de balans tussen de voorspelde en werkelijke afname en invoeding van elektriciteit. Deze rol wordt in de praktijk vaak vervuld door of namens een

energieleverancier. Voor individuele aansluitingen met een vermogen van 1 MW of groter geldt deze specifieke eis van één gezamenlijke BRP voor de groep niet.
Voor het ontsluiten van flexibiliteit uit veel kleinere utiliteitsgebouwen is daarom samenwerking tussen gebouweigenaar, CSP en BRP/energieleverancier van belang. In de praktijk kunnen deze rollen deels door dezelfde marktpartij worden vervuld, bijvoorbeeld wanneer een energieleverancier tevens BRP en/of CSP is.

Gebruikspatronen
Het gebruikspatroon in de tijd van de warmtepomp varieert door de seizoenen. In oude gebouwen wordt er 's winters meer energie verbruikt voor gebouwklimatisering dan in de zomer. Op weekbasis is het afhankelijk van de gebruiksfunctie hoe het gebouw gebruikt wordt. Kantoren, winkels en veel curatieve zorginstellingen worden gedurende dag gebruikt en zijn 's nachts en/of in het weekend gesloten, daardoor zijn er meer mogelijkheden voor vooraf koelen en verwarmen. Gebruiksfuncties zoals care zorginstellingen, winkels en bijeenkomst hebben andere gebruikspatronen waarbinnen mogelijk geschoven kan worden.

Barrières voor grootschalige ontsluiting
De barrières voor grootschalige ontsluiting van flexibiliteit zijn op te splitsen in mogelijk nadelige consequenties en andere barrières.
Het productie- of dienstenproces van de meeste bedrijven en instellingen wordt niet verstoord door flexibele inzet van de warmtepomp. Maar, het is belangrijk op te merken dat voor veel van deze gebruiksfuncties het primaire bedrijfsproces diensten zijn, waardoor het klimatiseren van het gebouw als onderdeel van het primaire proces kan worden gezien, zoals winkels, kantoren, scholen en zorggebouwen. Gebouweigenaren en gebruikers kunnen terughoudend zijn omdat zij vrezen dat flexibiliteitssturing ten koste gaat van het binnenklimaat of de bedrijfsvoering. Flexibiliteitssturing hoeft echter niet noodzakelijk tot comfortverlies te leiden. Door gebruik te maken van de thermische massa van het gebouw en binnen vooraf vastgestelde comfortgrenzen te sturen[11], kan de warmte- en koudevraag gedurende bepaalde perioden worden verschoven zonder dat gebruikers dit merkbaar ervaren.

Een ander mogelijk nadeel van het inzetten van hybride of back-upcapaciteit voor flexibiliteit is dat hierdoor vaker een gasgestookte ketel wordt ingezet. Hoewel daarmee de elektrische piekvraag kan worden verminderd, kan het hogere gasverbruik conflicteren met de verduurzamingsdoelstellingen van een organisatie.

Een verdere groei van het aantal warmtepompen in de utiliteitsbouw wordt verwacht. De energiebesparingsplicht draagt hieraan bij: bedrijven en instellingen die onder deze verplichting vallen[12] moeten energiebesparende maatregelen met een terugverdientijd van vijf jaar of minder uitvoeren. De Erkende Maatregelenlijst bevat onder voorwaarden ook de toepassing van een hybride warmtepomp.

Netcongestie kan de verdere elektrificatie van de warmtevoorziening echter beperken wanneer voor een warmtepomp uitbreiding van het gecontracteerde transportvermogen nodig is. Of een utiliteitsgebouw bij schaarse netcapaciteit voor prioriteit in aanmerking komt, hangt sinds 2026 af van de functie die het gebouw vervult binnen het ACM-prioriteringskader. Onder meer onderwijs en bepaalde veiligheids- en maatschappelijke functies kunnen prioriteit krijgen; reguliere kantoren en winkels vallen daar niet automatisch onder.

[11] Het Arbobesluit schrijft voor dat de binnentemperatuur tussen de minimale (15 °C) en maximale (25 °C) grenzen moet blijven (ArboNed, 2024).
[12] De energiebesparingsplicht geldt voor locaties met een jaarlijks energiegebruik vanaf 50.000 kWh elektriciteit of 25.000 m³ aardgas(equivalent). De EML bevat erkende maatregelen waarmee aan deze verplichting kan worden voldaan; onder voorwaarden zijn gelijkwaardige alternatieven toegestaan.

Het energieverbruik zomers kan afnemen door vooraf te koelen omdat er ’s nachts met een hogere efficiëntie gekoeld kan worden. Dit komt doordat het temperatuurverschil kleiner is. De gekoelde massa in het gebouw in een pilot leidde tot voldoende thermisch comfort in de zomer. In de winter is de efficiëntie mogelijk lager en zal flexibel inzetten van een warmtepomp tot een hoger energieverbruik kunnen leiden. De mate waarin er comfort verlies optreedt in de zomer en winter hangt sterk af van het warmteverlies van het gebouw.

Een belangrijke barrière voor grootschalige ontsluiting van flexibiliteit is dat bedrijven en instellingen nog beperkt inzicht hebben in waar, wanneer en hoeveel flexibel vermogen binnen hun gebouw beschikbaar is en wat de kosten en baten van de inzet daarvan zijn (KWA, CF, EV, 2026). De verplichting van de GACS zal bijdragen om deze kennis te vergroten. Kennis over hoeveel vermogen kan worden verschoven, gedurende welke periode en onder welke randvoorwaarden is een toenemende mate aanwezig onder energie management bedrijven, maar is nog niet wijd verspreid in de sector.

Een andere barrière is dat de financiële waarde van flexibiliteit voor gebouweigenaren nog vaak beperkt of onvoldoende voorspelbaar is (KWA, CF, EV, 2026). Daarbij speelt niet alleen de hoogte van de vergoeding een rol, maar ook het financiële en operationele risico van het aangaan van flexibiliteitscontracten. Bij een capaciteitsbeperkingscontract (CBC) ontvangt een gebouweigenaar een vergoeding voor het beschikbaar stellen of daadwerkelijk beperken van vermogen, maar verplicht hij zich tegelijkertijd om bij een afroep binnen de afgesproken grenzen te blijven. Wanneer niet aan die verplichting wordt voldaan, kan de vergoeding voor de betreffende periode vervallen en kan bij toerekenbare niet-nakoming aansprakelijkheid voor schade ontstaan. Ook kunnen vooraf investeringen nodig zijn in bemetering, regeltechniek, een EMS of dienstverlening door bijvoorbeeld een CSP, terwijl de toekomstige opbrengsten en het aantal afroepen niet altijd goed voorspelbaar zijn.

Daarnaast is het flexibele vermogen van één individueel utiliteitsgebouw vaak relatief beperkt. Om een substantieel vermogen te ontsluiten moeten daarom meerdere gebouwen worden samengebracht en zijn afspraken nodig tussen meerdere partijen, zoals gebouweigenaren, installateurs of gebouwbeheerders, energieleveranciers/BRP's, CSP's en netbeheerders. Aggregatie kan daarbij een belangrijke rol spelen, maar vergroot tegelijkertijd de organisatorische en contractuele complexiteit.

Bovenstaande barrières voor grootschalige implementatie kunnen worden meegenomen in het vormgeven van beleid. De analyse laat zien dat in de sectoren kantoren, bijeenkomst en gezondheidszorg relatief veel opgesteld vermogen aanwezig is. De bijeenkomstsector is echter zeer divers qua gebouwtypen en gebruik. Voor gericht (sectoraal) beleid lijken de gezondheidszorg- en kantorensector daarom kansrijker. Voor gezondheidszorg zijn aanvullende mogelijkheden om aan te sluiten bij bestaande subsidieregelingen zoals de subsidie voor duurzaam maatschappelijk vastgoed (DUMAVA)[13]. Daarnaast kan ook in andere subsidieregelingen aandacht worden besteed aan aspecten die flexibiliteit bevorderen, denk aan de bemetering van installaties en het aantal setpoints van een warmtepomp. Ook is een kennis vergroten binnen de sector over energiemanagement een aandachtspunt.

4.2.1.4 Datacenter

Een datacenter is een fysieke locatie met IT-infrastructuur (servers, opslag en netwerken) die data opslaat en rekenkracht levert voor digitale processen van bedrijven, overheden en organisaties. De sector is de afgelopen jaren gegroeid en zal naar verwachting de komende

[13] Subsidieregeling duurzaam maatschappelijk vastgoed (DUMAVA) | RVO.nl

jaren verder groeien. Er zijn verschillende typen datacenters: hyperscales, enterprises, colocaties en scale locatie. In een single-tenant datacenters (*enterprise*), gaat het om servers van bedrijven/instellingen voor eigen gebruik. Dit zijn vaak kleine datacenters (minder dan 0,5 MW IT), maar in aantallen gaat het om ruim 300 datacenters (Dutch Data Center Association, 2025; KWA, CF, EV, 2026). Bij multi-tenant (*colocaties*), gaat het om serverruimte voor meerdere partijen, waar de beheerder faciliteert en de partijen hun rekenopdrachten beheren. Hiervan zijn er bijna 200 in Nederland (idem). Ook zijn er multi-tenant *scale locaties*. Dit zijn grote colocaties, typisch 20-80 MW (Dutch Data Center Association, 2025). Er zijn drie *hyperscale* datacenters, dit zijn single-tenant datacenters van tenminste 50 MW IT-vermogen (Dialogic, Entrance, Pb7, 2024). AI training vindt plaats in wholesale colocation en hyperscales (Dutch Data Center Association, 2025).

Opgesteld vermogen

Het energieverbruik in datacenters is afkomstig uit IT-apparatuur en het koelen van de IT-apparatuur. Het IT-vermogen van datacenters wordt gerapporteerd door de branchevereniging van datacenters. Het opgestelde vermogen begin 2025 is 2 GW_e (Dutch Data Center Association, 2025). Colocaties zijn ongeveer de helft van het totale vermogen, zie Tabel 4.2**.** De verwachting is dat begin 2027 dit vermogen is gegroeid naar 2,2 GW_e. Het elektrisch vermogen is berekend door de IT kracht om te rekenen naar totaal elektrisch vermogen (KWA, CF, EV, 2026). In de Bijlage D zijn de berekeningstappen verder uitgewerkt.

Tabel 4.2: Opgesteld vermogen datacenters (bewerking op (Dutch Data Center Association, 2025).

Type datacenter	Opgesteld vermogen [MW]
Totaal	**2220**
Hyperscale	640
Enterprises	160
Colocatie	870
Scale locatie	550

Randvoorwaarden

Er zijn verschillende vormen geïdentificeerd waarin datacenters flexibiliteit kunnen leveren. Ook voor datacenters zelf is het van belang, omdat de sector groeit maar geremd wordt omdat zij op wachtlijst komen voor de transportcapaciteit (bijvoorbeeld bij nieuwe aansluit- en transportovereenkomsten (ATO's)). De recente studies die het potentieel voor afnameflexibiliteit verkennen, schetsen op de korte termijn een beperkt realiseerbaar potentieel (KWA, CF, EV, 2026; Dialogic, Entrance, Pb7, 2024; Magnus, 2026; Deloitte & Agora Energiewende, 2026).

Datacenters kunnen verschillende vormen van flexibiliteit leveren, middels time shifting, geografische shifting en buffering/opwek. Flexibiliteit in datacenters kan worden ontsloten via zowel fysieke assets als aansturing van IT-processen. Aan de fysieke kant spelen met name koelsystemen, UPS/batterijen en back-upgeneratoren een rol. Door vooraf extra te koelen kan gebruik worden gemaakt van de thermische massa van het gebouw en de installaties, waarna het koelvermogen gedurende een bepaalde periode kan worden gereduceerd. De omvang en duur van deze flexibiliteit zijn afhankelijk van onder meer het type koelsysteem, de buitentemperatuur en de toegestane temperatuurbandbreedtes en zijn doorgaans beperkt.

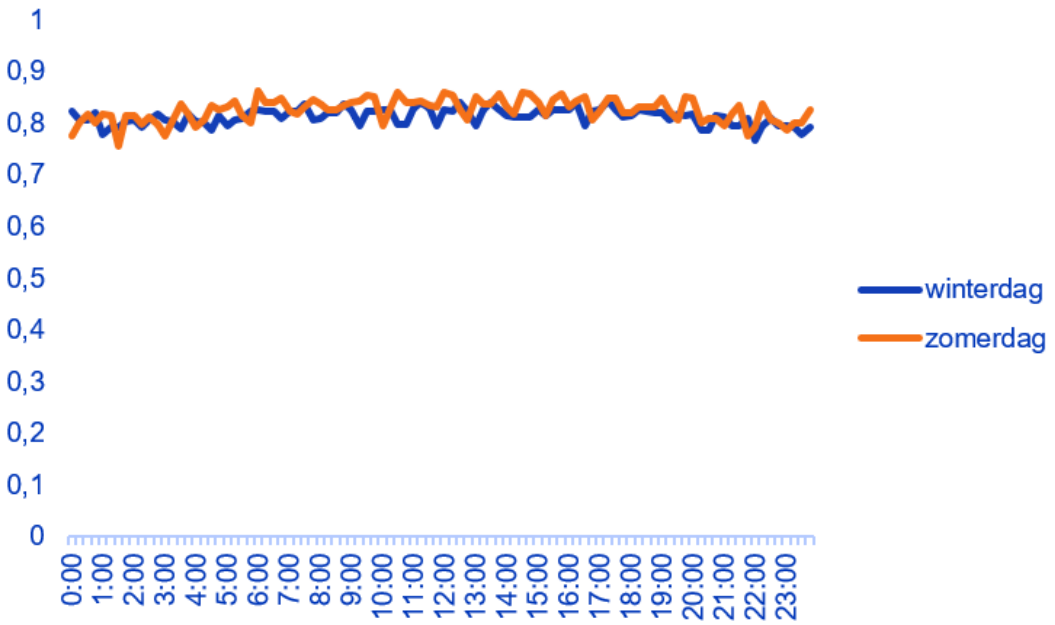
(KWA, CF, EV, 2026). Het potentieel kan vergroot worden als er een koudebuffer aanwezig[14] is (Dialogic, Entrance, Pb7, 2024).

Daarnaast vormen UPS-systemen (batterijen), (noodstroom)aggregaten of batterijen een mogelijke bron van flexibiliteit, zie een verdere toelichting op deze assets in de paragrafen over opwek (0) en opslag (4.2.3). De UPS-capaciteit is primair bedoeld om de continuïteit van de elektriciteitsvoorziening van het datacenter te waarborgen. Het zou met name geschikt zijn voor snelle diensten zoals frequentierespons, dit is in deze studie buiten scope (Hoeffnagel, 2021).
Aan de IT-kant ligt flexibiliteit vooral in het sturen van rekenopdrachten (workload management)[15]. Hierbij zijn twee vormen relevant, time shifting en geografische shifting. Bij time shifting worden niet-tijdkritische taken zoals AI-training of batchprocessen uitgesteld of vervroegd (Hasegawa & Mehra, 2023; Dialogic, Entrance, Pb7, 2024). Dit wordt beperkt toegepast in Nederland en lijkt vooral kansrijk voor grotere enterprise datacenters en hyperscales (KWA, CF, EV, 2026). Een andere mogelijkheid is geografische shifting: het verplaatsen van workloads tussen datacenters binnen Nederland en over de grens (Deloitte; Agora, 2026). Dit is beperkt toegepast en vooral kansrijk voor hyperscales (Dialogic, Entrance, Pb7, 2024).

Vrijwel alle colocatie datacenters zijn grootverbruikers en alle hyperscales zijn grootverbruikers (Dialogic, Entrance, Pb7, 2024). De colocaties zijn doorgaans aangesloten op het middenspanningsnet, een aantal hyperscales zijn aangesloten op het hoogspanningsnet (Dialogic, Entrance, Pb7, 2024). De aansturing van de IT-architectuur maakt typisch gebruik van een SCADA[16]-systeem om installaties centraal te monitoren en aan te sturen, in combinatie met lokale besturingscomponenten. In een SCADA-systeem worden de processen gemonitord, zoals energie, temperatuur en luchtvochtigheid (SCADA, n.d.). De IT-control regelt de daadwerkelijke rekenvraag. Deze architectuur is nog ontoereikend om het flexibel aan te kunnen sturen (KWA, CF, EV, 2026). De spreiding door Nederland is beperkt, metropoolregio Amsterdam is een grote hub, verder zijn de datacenters beperkt verspreid door Nederland (KWA, CF, EV, 2026).

Gebruikspatronen
De datacenters typeren zich als baseload verbruiker (Magnus, 2026). Ook kenmerkt het energieprofiel zich door een hoge load factor, een groot deel van hun maximale vermogen wordt constant gebruikt, zoals ook te zien is in **Figuur 4.4**. Ook de fluctuatie over de seizoenen is beperkt, wel is de koelvraag in de zomer hoger dan in de winter. De energie die gebruikt wordt in het datacenter wordt ingezet voor het primaire proces. De datacenters zijn aangesloten op regionale laag- en middenspanningsnetten en hyperscales vanaf 100 MW op de landelijk hoogspanningsnet (Dialogic, Entrance, Pb7, 2024).

[14] Een handvol datacenter in Nederland past een WKO of waterbuffertank toe, bijvoorbeeld: Equinix en stadhuistoren Eindhoven
[15] Zie bijvoorbeeld Google's pilot: Using demand response to reduce data center power consumption | Google Cloud Blog
[16] SCADA staat voor Supervisory Control and Data Acquisition.



Figuur 4.4: Geaggregeerd elektriciteitsprofiel datacenter. Bewerking op (Liander, 2025).

Barrières voor grootschalige ontsluiting

Technisch zijn er enkele vormen van flexibiliteit mogelijk, maar de barrières voor flexibiliteit die centraal staan voor datacenters zijn de het grote belang van primaire proces, de hoogwaardige dienstverlening; continue dienstverlening, hoge betrouwbaarheid en voor een deel van de toepassingen, een lage netwerkvertraging (latency). Bij colocaties vormt de eigendomsvorm een aanvullende barrière. In een colocatie zijn prestatieafspraken vastgelegd in een Service Level Agreements (SLAs) en beheert de datacenter-eigenaar niet de rekenopdrachten. Bij dit type datacenter lijken weinig mogelijkheden voor time shifting. Flexibel koelen zou technisch wel mogelijk kunnen zijn omdat dit wel door de datacenterexploitant wordt beheerd.

De elektriciteitsvraag voor koeling kan binnen de toegestane temperatuurgrenzen in de tijd worden verschoven, bijvoorbeeld door vooraf extra te koelen en het koelvermogen tijdens een congestieperiode tijdelijk te reduceren. De beschikbare flexibiliteit is daarbij afhankelijk van het koelsysteem, de thermische buffer en de toegestane bedrijfstemperaturen. Energiebesparing en flexibiliteit kunnen hierbij met elkaar interacteren. Een hogere koeltemperatuur en efficiëntere koeltechnieken, zoals vrije koeling, scheiding van warme en koude luchtstromen en toerengeregelde ventilatoren, verminderen structureel de elektriciteitsvraag van het datacenter. Time shifting door flexibel koelen wordt ontmoedigd door één van de maatregelen van de energiebesparingsplicht; daarin wordt een setpoint voorgeschreven van minimaal 27 °C, om energie te besparen. Dit is aan de bovenkant van de gewenste temperatuurrange en beperkt de mogelijkheid voor flexibele koeling (KWA, CF, EV, 2026). Time shifting bij enterprises en hyperscales van koelen heeft beperkt flexibiliteitspotentieel, met name door de korte duur waarin dit kan worden toegepast (KWA, CF, EV, 2026). Bij enterprise- en hyperscale-datacenters kan daarnaast flexibiliteit worden gerealiseerd door niet-tijdkritische rekenopdrachten in de tijd te verschuiven. De mogelijkheden voor het plannen van AI trainingen wordt met name als kansrijker gezien (Deloitte & Agora Energiewende, 2026; KWA, CF, EV, 2026). Met de verwachte groei van AI-rekencapaciteit kan het potentieel voor deze vorm van flexibiliteit toenemen. Hoe groot dit potentieel voor Nederlandse datacenters daadwerkelijk is, zal in de praktijk nader moeten worden vastgesteld.

Bij geografisch shifting kunnen workloads tussen datacenters worden uitgewisseld. Dit wordt in beperkte mate reeds toegepast (datacenters van Google (Miller, 2021)). Om dit op grotere schaal uit te kunnen wisselen zijn er een aantal barrières. Zo vormen latency-eisen en juridische voorwaarden een barrière. Dit kunnen bijvoorbeeld juridische eisen zijn om (kritieke) rekenopdrachten in Nederland uit te moeten voeren (KWA, CF, EV, 2026). Een andere voorwaarden is dat de IT-capaciteit en elektriciteitsbeschikbaarheid op een andere plek redundant moet zijn (KWA, CF, EV, 2026). In een open-EU flexibility scenario ziet (Deloitte; Agora, 2026) mogelijkheid voor 20% load flexibiliteit. Andere mogelijke bronnen van flexibiliteit bij datacenters zijn de noodstroomaggregaten en UPS-systemen. Deze assets staan in aparte hoofdstukken beschreven (respectievelijk 4.2.2.3 en 4.2.3.1).

Uit de verschillende studies blijkt dat beperkte flexibiliteit op korte termijn gerealiseerd kan worden in de bestaande datacenters. Dit zou kunnen door koudebuffers te gebruiken die bij enkele datacenters staan of time shifting toe passen op de koeling. Op langere termijn zijn er meer mogelijkheden, zoals geografische shifting of niet-tijdkritische rekenopdrachten in de tijd verschuiven, maar daarvoor moeten de barrières worden weggenomen. Voor datacenters die in de komende jaren worden gerealiseerd, is het van belang om reeds in de ontwerpfase rekening te houden met maatregelen die flexibiliteit in het energiegebruik mogelijk maken.

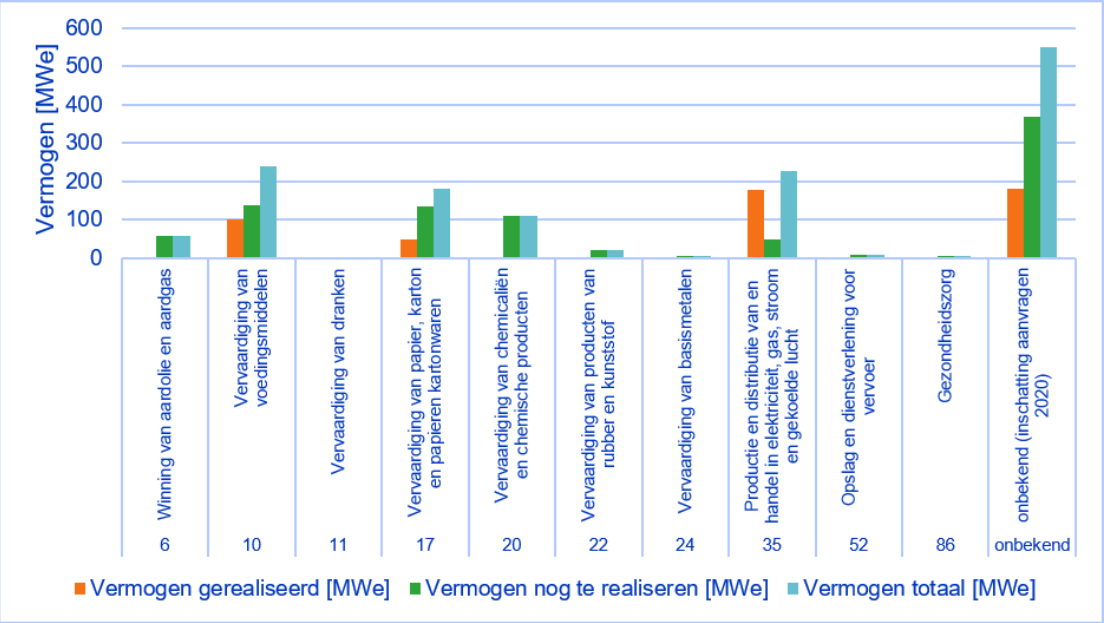
4.2.1.5 Industriële e-boiler

De industriële elektrische boiler wordt gebruikt voor het produceren van stoom en heet water, of thermische olie (Maruf, Morales-Espana, Sijm, Helistö, & Kiviluoma, 2022). Deze wordt ingezet als elektrisch of hybride alternatief voor ketels of WKK's (PBL, 2021). Twee typen e-boilers zijn veel voorkomend; warmteopwekking via elektroden of via weerstanden[17]. Weerstandsverwarming is doorgaans aangesloten op laagspanning en dit betreft vaak lagere vermogens (idem; (RVO, 2023). De elektroden boilers zijn aangesloten op middenspanning en zijn doorgaans geschikt voor hogere vermogen (RVO, 2023). De sectoren waar e-boilers voornamelijk worden toegepast in Nederland zijn de warmtenetten en voedingsmiddelenindustrie. Ook voor veel andere sectoren is een e-boiler geschikt, zoals, papier- en kartonindustrie, chemische industrie, vervaardiging van rubber en kunststof (RVO, 2025).

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte totaal opgestelde elektrisch vermogen voor e-boilers in 2027 bedraagt circa 600 MW_e. Dit concentreert zich in de voedingsmiddelenindustrie (SBI 10), energielevering (SBI 35) en papierindustrie (SBI 17), zie **Figuur 4.5**. Het ingeschatte opgestelde vermogen is bepaald aan de hand van de subsidieaanvragen van de SDE++ subsidie, de sector en de status van het project is aangevuld. Om het ingeschatte vermogen van 2027 te bepalen is aangenomen dat een kwart van het nog te realiseren vermogen in 2027 is gerealiseerd. Het ingeschatte vermogen van 2027 is dus bepaald door het reeds gerealiseerde vermogen aan te vullen met deze inschatting van de realisatie van het nog te realiseren vermogen. Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

[17] Elektrische weerstandsboilers gebruiken een elektrisch verwarmingselement dat als weerstand fungeert. Elektrodeboilers maken gebruik van de geleidende en resistieve eigenschappen van water.(Maruf et al., 2022)



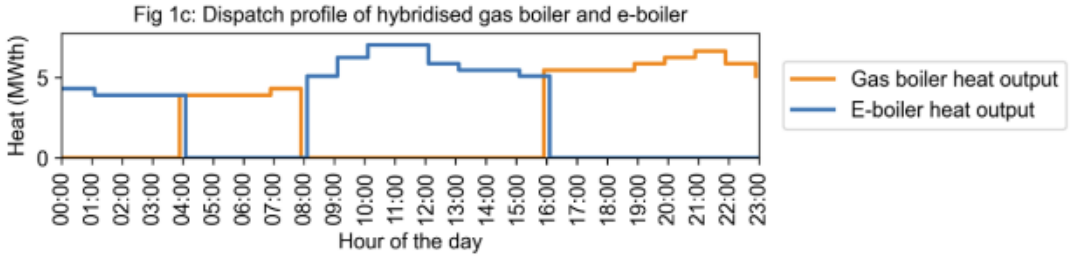
Figuur 4.5: SDE++ aanvragen e-boilers naar sector. Bewerking op (RVO, 2025).

Randvoorwaarden

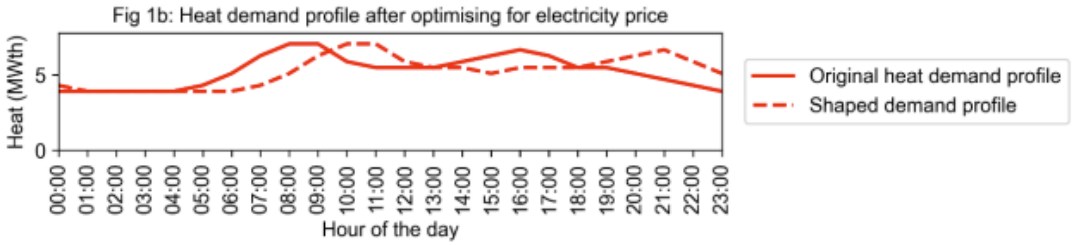
De voornaamste vorm van flexibiliteit die een e-boiler kan leveren is time shifting en/of bij een hybride uitvoering. De bron van flexibiliteit is in het geval van een hybride uitvoering de gasgestookte boiler. Een andere bron is het bufferen van warmte die opgewekt is met de e-boiler en deze gebruiken op congestiemomenten. Verder kan de warmteopwekking worden uitgesteld of verplaatst. In veel gevallen wordt een combinatie van deze verschillende vormen toegepast. De e-boiler heeft een korte ramp-up/down tijd en wordt daarom ook ingezet voor peak shaving voor de onbalans markt, dit is echter buiten scope van deze studie (TNO, 2026c). Andere relevante technische aspecten zijn het opgestelde vermogen per bedrijf, de mate van IT aansturing en het type aansluiting. De IT aansturing van de bedrijven is doorgaans geregeld door een SCADA systeem, hierin is real time informatie te vinden over de productie. Ook zijn deze op afstand bestuurbaar. De e-boilers worden vaak al flexibel aangestuurd. Veelal zijn de e-boilers geplaatst bij grootverbruikers, aangesloten op het middenspanningsnet.

De gebruikspatronen van de e-boiler zijn afhankelijk van de sector. Vaak wordt de e-boiler ingezet als flexibele last en niet als basislast (PBL, 2021). Dit komt doordat de investering (CAPEX) relatief lager is dan warmtepomp, maar de operationele kosten (OPEX) hoger zijn omdat de e-boiler minder efficiënt is dan een warmtepomp. Een industriële warmtepomp gebruikt doorgaans circa drie tot vier keer minder elektriciteit voor dezelfde warmtelevering dan een e-boiler. Om warmte op te wekken wordt daarom gekozen voor inzet met lage elektriciteitsprijzen. Zo wordt o.a. bij warmtenetten de e-boiler ingezet om warmte te produceren bij lage elektriciteitsprijzen, waarna de warmte gebufferd wordt in een vat (Weijer, 2026). Ook in andere sectoren wordt de e-boiler vaak flexibel ingezet naast gasketels en in combinatie met een buffervat. In de chemische industrie is uitstellen of verplaatsen van productie in batchprocessen mogelijk door de productie te verplaatsen naar uren buiten de vraagpieken of in het geval van continue productie af te schalen (KWA, CF, EV, 2026). De toepasbaarheid hiervan hangt af van de impact op het primaire proces.

In onderstaande figuur zijn verschillende scenario's gevisualiseerd voor de flexibele inzet van een e-boiler.



Figuur 4.6: Dispatch profile van hybride gasboiler en e-boiler toepassing (Oxenaar & Butler, 2026).



Figuur 4.7: Optimaliseren warmtevraag naar elektriciteitsprijs (Oxenaar & Butler, 2026).

Barrières voor grootschalige ontsluiting

De barrières voor grootschalige ontsluiting verschillen per sector en per type flexibiliteit. Zo zijn er in de chemische en voedingsmiddelensector veiligheidsvoorschriften en voedselveiligheids-normen die gehonoreerd moeten worden (TNO, 2026a). In de voedingsmiddelensector komt daarbij dat sommige bedrijven werken met campagneproductie en te maken hebben met beperkte verwerkingstijden van producten. Bij sommige bedrijven zijn er wel mogelijkheden om tussenproducten op te slaan.

Daarnaast kunnen er barrières zijn op organisatorisch, technisch en financieel vlak. Het gebrek aan kennis over de verschillende elektriciteitsmarkten vormt voor veel bedrijven een drempel (TNO, 2026a), net als het wantrouwen richting externe partijen die flexibiliteit faciliteren. Bovendien zijn productieprocessen doorgaans geoptimaliseerd voor productiedoelen en niet voor energiekostenoptimalisatie, waarbij rekening wordt gehouden met de (toekomstige) waarde van flexibiliteit. Inkomsten uit systeemdiensten vormen op dit moment nog een belangrijke bron van opbrengsten. In Nederland bestaat echter de verwachting dat deze inkomsten de komende jaren afnemen, onder meer door toenemende marktverzadiging met batterijopslag (BESS).

Voor e-boilers geldt ook dat vanuit de overgang van aardgas naar CO_2-arme warmte, adoptie wordt aangemoedigd. Tegelijkertijd zijn er belangrijke beperkende factoren in deze overgang, namelijk netcongestie en relatief hoge elektriciteitsprijzen, waarbij een deel van de netkosten capaciteitsafhankelijk is, (E-bridge, 2024; TNO, 2026a). En de toenemende en tijdsafhankelijke transporttarieven[18] (TNO, 2026a) kunnen een kans bieden om in tijden van veel hernieuwbare elektriciteitsproductie deze te benutten. Om dat te kunnen doen moeten bedrijven deze ruimte in het transportcontract krijgen.

Een trend is steam-as-a-service, waarbij bedrijven stoom afnemen, maar de e-boiler niet in beheer hebben (Eneco, 2025)). Dit kan invloed hebben in de mate waarin de e-boiler flexibel

[18] Tijdsafhankelijke transporttarieven gaan in per 2028 voor regionale grootverbruikklanten en voor grootverbruikers op het hoogspanningsnet geldt dit sinds 2025

kan worden ingezet. Mits geborgd in contractafspraken kan flexibele inzet worden bevordert doordat de exploitant profiteert van schaalvoordelen, zoals expertise en portfolio optimalisatie.

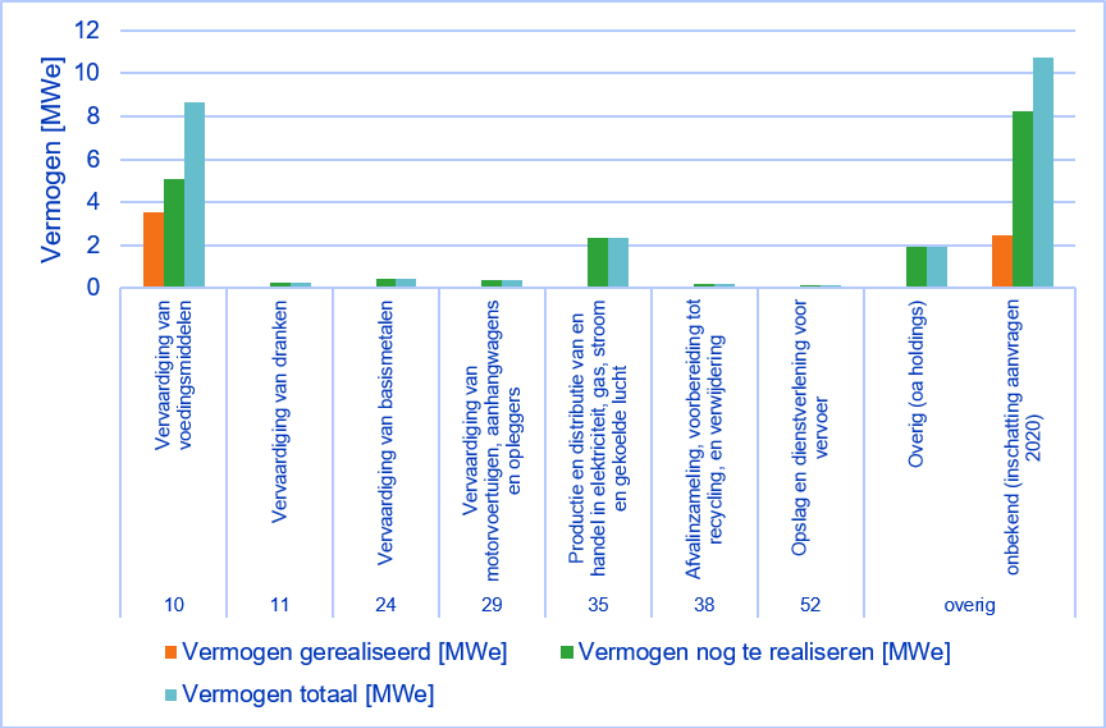
4.2.1.6 Industriële warmtepomp

De elektrische industriële warmtepomp wordt toegepast voor het produceren van warm water en stoom (Berenschot, 2017). Een industriële warmtepomp wordt ingezet binnen het productieproces, bijvoorbeeld bij toepassingen zoals het drogen en concentreren van vloeibare productstromen in de papier-, voedingsmiddelen- en zoutindustrie en bij processen als destillatie of scheiding van vloeistoffen in de petrochemische industrie en raffinage (RVO, 2022); (RVO ism TNO, 2026). Daarnaast kan deze warmtepomp ook worden toegepast in de ondersteunende systemen, zoals het verwarmen van tapwater en ruimteverwarming op industriële schaal (RVO, 2022).

Het verschil met een gebouwgebonden warmtepomp is met name het temperatuurniveau en het vermogen, wat bepalend is voor de kosten. De warmtepomp kan commercieel worden ingezet voor temperaturen tot 120°C en bijna commercieel tot 160 °C (RVO ism TNO, 2026), waarbij de beschikbaarheid van restwarmte en benodigde temperatuurlift bepalend zijn voor de efficiëntie. Een industriële warmtepomp is een vervanging van ketels zoals conventionele gasgestookte stoomketels (RVO, 2022). Zowel een open- als gesloten systeem warmtepomp wordt toegepast. Waar een gesloten warmtepomp gebruik maakt van een tussenmedium (koudemiddel) om warmte in temperatuur te verhogen en over te hevelen van het ene naar het andere proces, wordt in een open warmtepomp de damp die vrijkomt in het proces zèlf (veelal in de vorm van stoom) als overdrachtsmedium gebruikt om de inkomende processtroom op te warmen. De meest toegepaste vorm van een elektrische gesloten warmtepomp is een mechanische compressiewarmtepomp, terwijl een elektrische open warmtepomp ook wel bekend staat als MDR (mechanische damprecompressie). De toepassing van de verschillende typen verschilt. Een MDR is geschikt voor stoom, destillatie en droogprocessen (dus processen waar een belangrijke dampstroom bij vrijkomt) (Berenschot, 2017). De huidige toepassing van de compressie warmtepomp is voornamelijk in de industriële stoomsystemen in de voedingsmiddelindustrie. Daarnaast is er een potentieel bij de papierindustrie en destillatieprocessen in de (petro)chemie.

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte totaal opgestelde elektrisch vermogen voor industriële warmtepompen in 2027 bedraagt circa 9 MW_e. Dit concentreert zich in de sector vervaardiging van voedingsmiddelen (SBI 10). Deze inschatting is gemaakt aan de hand van de SDE++ subsidieaanvragen. De sector en de status van het project is aangevuld. Om het ingeschatte vermogen van 2027 te bepalen is aangenomen dat een kwart van het nog te realiseren vermogen in 2027 is gerealiseerd. Het ingeschatte vermogen van 2027 is dus bepaald door het reeds gerealiseerde vermogen aan te vullen met deze inschatting van de realisatie van het nog te realiseren vermogen. Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.



Figuur 4.8: Opgesteld vermogen naar aanvraag SDE++ subsidie industriële warmtepomp naar sector (RVO, 2025).

“Vermogen buiten scope”

- Het vermogen optellen van 9 MW_{th} gerealiseerd vermogen van warmtepompen in gesloten systeem en restwarmte met warmtepomp uit SDE++ subsidies.
- Warmtepompen in glastuinbouw, dit wordt in beperkte mate toegepast maar cijfers over nationaal opgesteld vermogen ontbreken.

Randvoorwaarden

De mate waarin industriële warmtepompen flexibel kunnen worden ingezet, wordt bepaald door een aantal technische en operationele randvoorwaarden. De belangrijkste vormen van flexibiliteit zijn *time shifting* (het verplaatsen van warmtevraag in de tijd), *load shifting* en hybride opereren. De mate waarin dit mogelijk is, is deels afhankelijk van de rol van de warmtepomp in het productieproces. Wanneer de warmtepomp onderdeel is van het primaire productieproces, zijn de mogelijkheden beperkter, omdat ingrepen direct invloed hebben op de productie. In ondersteunende processen (utilities) is doorgaans meer flexibiliteit mogelijk. Ook bepaalt het type productieproces in hoeverre time shifting toepasbaar is; bij sterke procesintegratie kan flexibiliteit leiden tot verstoring van de productie. Door de hoge efficiëntie (en daarmee lage OPEX) en hoge CAPEX van de warmtepomp wordt deze veelal ingezet voor baseload warmteproductie (RVO, 2023). In hybride configuraties wordt flexibiliteit voornamelijk geleverd door een alternatieve warmtebron, zoals een gasgestookte ketel of boiler. Deze wordt ingezet om pieken op te vangen en/of wanneer de elektriciteitsprijzen hoog zijn. Daarnaast kan flexibiliteit worden gerealiseerd door: warmteopslag (buffering van warmte in bijvoorbeeld stoomaccumulatoren of (tussentijdse) producten in vaten) om vraag en aanbod te ontkoppelen of tijdelijk verhogen of verlagen van productie (load shifting of time shifting). Dit is alleen mogelijk als de transportcapaciteit op het elektriciteitsnet dat toelaat.

Andere relevante technische aspecten zijn het opgestelde vermogen per bedrijf, de mate van IT-aansturing en het type aansluiting. De IT-aansturing van de bedrijven is doorgaans geregeld door een SCADA systeem, hierin is real time informatie te vinden over de productie. Ook zijn

deze op afstand bestuurbaar. Veelal zijn de industriële warmtepompen geplaatst bij grootverbruikers, aangesloten op het middenspanningsnet.

Barrières voor grootschalige ontsluiting
In verschillende sectoren spelen barrières voor grootschalige ontsluiting. Randvoorwaarden rondom voedselveiligheid in voedingssector vraagt een korte verwerkingstijd (TNO, 2026a). Dit kan de mogelijkheden tot flexibele inzet beperken. Het verstoren van het (primaire) productieproces is een veel genoemde barrière, in het hoofdstuk over de e-boiler is toegelicht hoe dit kan verschillen tussen de verschillende typen productieprocessen.

Daarnaast spelen ook andere barrières. Zo vraagt de hoge upfront investering om veel draaiuren te maken om de investering terug te verdienen, dit kan in sommige gevallen conflicteren met flexibiliteit. Daarnaast zijn er zeer weinig praktijkvoorbeelden van adoptie, en van flexibele inzet. En wachten sommige sectoren op warmtepompen met hogere temperaturen 150-200 ºC (TNO, 2026a). De risicoperceptie van de adoptie van deze technologie is daardoor hoger onder bedrijven (TNO, 2026b). Bedrijven hebben ook beperkte kennis van de verschillende elektriciteitsmarkten en zijn onzeker over de financiële baten (TNO, 2026a). Ook kan het productieproces energie-inefficiënter worden door flexibele inzet, bijvoorbeeld wanneer bij warmteopslag warmte verloren gaat (TNO, 2026a). Het grootschalig flexibel opereren kan ook vragen om een flexibelere inzet van personeel, bijvoorbeeld door meer nachtdiensten, wat barrières met zich meebrengt (TNO, 2026a).

Meerdere factoren beperken de adoptie van industriële warmtepompen, terwijl deze door de hoge efficiëntie de energievraag terugbrengt (Topsector Energie, 2022). Omdat de warmtepomp aardgas vervangt is verdere uitrol van belang, dit wordt ook belemmerd door netcongestie. Om verdere uitrol te stimuleren is ook het bevorderen van niet technische factoren van belang, zoals samenwerkingen in de keten en het verminderen van de risicoperceptie (TNO, 2026b).

4.2.1.7 Walstroom voor zeevaart

Walstroom voor zeevaart betreft de elektriciteitsvoorziening voor zeeschepen wanneer zij aan de kade liggen, bijvoorbeeld in zeehavens. In plaats van het gebruik van dieselgeneratoren aan boord, worden schepen aangesloten op het elektriciteitsnet. Walstroom is daarmee een onderdeel van de elektrificatie van de scheepvaart, en draagt bij aan het verminderen van lokale emissies en geluidsoverlast. Deze walstroomvoorzieningen bevinden zich bij ligplaatsen in grote havens.

De vraag naar elektriciteit voor walstroom wordt voornamelijk bepaald door het aantal en type schepen dat op een bepaald moment is aangesloten. In Europese regelgeving (FuelEU Maritime), is vastgesteld dat vanaf 2030 alle containerschepen en passagiersschepen (zoals cruiseschepen en ferries) gebruik moeten maken van walstroom voor het voorzien van hun volledige elektriciteitsvraag. De afname van walstroom aan de kade hangt af van het type schip, maar kan ook afhangen van andere elementen. Bij containerscheepvaart kan er bijvoorbeeld een enorm verschil zijn in de vraag naar walstroom die samenhangt met het aantal gekoelde containers aan boord. Dit maakt het lastig om een goede inschatting te maken wat voor capaciteit er nodig is aan de kade, wat eraan bijdraagt dat veel walstroominstallaties overgedimensioneerd zijn.

Voor flexibele inzet kunnen twee vormen worden onderscheiden: 1) het verschuiven van de elektriciteitsafname in de tijd (time shifting) en 2) een hybride inzet waarbij wordt geschakeld tussen walstroom en elektriciteitsopwekking aan boord. In de praktijk is de ruimte voor time shifting echter beperkt, omdat de inzet van walstroom sterk samenhangt met de logistieke planning.

De verdere uitrol van walstroom vergroot de elektriciteitsvraag vanuit deze sector en kan afnamecongestie verergeren. Het risico bestaat dat wanneer walstroom niet flexibel wordt ingericht, het niet zal lukken om een transportovereenkomst te verkrijgen. Daarom kan worden overwogen om walstroompunten tot 2030 hybride aan te sluiten, waarbij kan worden teruggevallen op de fossiele elektriciteitsvoorziening aan boord tijdens congestiemomenten. Hierbij zijn wel duidelijke afspraken met havens nodig, mede vanwege de eisen vanuit FuelEU Maritime vanaf 2030.

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte totaal opgestelde vermogen voor walstroomvoorzieningen voor zeevaart in Nederland in 2027 bedraagt 265 MW. Deze inschatting is gebaseerd op de walstroominventarisatie van Royal HaskoningDHV (2024) en een prognose van Netbeheer Nederland (2025) voor het benodigde walstroomvermogen in Nederlandse zeehavens in 2030.

De walstroominventarisatie van Royal HaskoningDHV (2024) biedt een representatief overzicht van de destijds aanwezige en geplande walstroominstallaties in Nederlandse zeehavens. Daarmee geeft de studie een beeld van de beschikbare walstroomcapaciteit in 2023.

Aangezien de inventarisatie enkele jaren oud is, is het opgesteld vermogen voor 2027 geïnterpoleerd tussen de geïnventariseerde situatie in 2023 en de prognose voor 2030. Netbeheer Nederland (2025) heeft een prognose gemaakt van het benodigde walstroomvermogen in Nederlandse zeehavens in 2030. Deze inschatting bedraagt 379 MW in 2030. Uitgaande van een gefaseerde, jaarlijkse groei van walstroomvermogen tussen de geïnventariseerde situatie in 2023 en de benodigde capaciteit in 2030, wordt het opgesteld vermogen in 2027 ingeschat op circa 265 MW.

Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

4.2.1.8 Walstroom voor binnenvaart

Walstroom voor de binnenvaart betreft de elektriciteitsvoorziening voor binnenvaartschepen wanneer zij aan de kade liggen, bijvoorbeeld in stedelijke havens en langs vaarwegen. Net als bij walstroom voor zeevaart worden dieselgeneratoren aan boord uitgezet en wordt deze elektriciteit geleverd uit het net, wat leidt tot minder emissies en geluidsoverlast. Het is een onderdeel van de elektrificatie van de scheepvaart, en vergroot de elektriciteitsvraag vanuit deze sector, wat afnamecongestie kan verergeren.

De mogelijkheden tot het leveren van flexibiliteit zijn in theorie vergelijkbaar met die van walstroom voor zeevaart. Daarbij kunnen twee vormen van flexibiliteit worden onderscheiden: 1) het verschuiven van de elektriciteitsafname in de tijd (time shifting) en 2) een hybride inzet waarbij wordt geschakeld tussen walstroom en elektriciteitsopwekking aan boord.

In de praktijk zijn de mogelijkheden om afnamemomenten te verschuiven beperkt, omdat deze sterk samenhangen met de logistieke planning. Een hybride inzet zou haalbaarder zijn, maar leidt tot hogere emissies en doet daarmee afbreuk aan het primaire doel van walstroom. Een hybride aanpak kan tegelijkertijd wel bijdragen aan de realiseerbaarheid van walstroomvoorzieningen. Door walstroom hybride in te zetten, kan gebruik worden gemaakt van een alternatief transportrecht, waardoor de voorziening mogelijk toch aangesloten kan worden.

De potentiële flexibiliteit blijft naar verwachting echter beperkt, gezien het relatief lage vermogen van de aansluitingen voor binnenvaartschepen (zie volgende paragraaf).

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte totaal opgestelde elektrisch vermogen voor walstroomvoorzieningen voor binnenvaart in Nederland in 2027 bedraagt circa 7 MW. Dit wordt afgeleid op basis van een inschatting van het totale elektriciteitsverbruik voor binnenvaartwalstroom in 2030 door ElaadNL (2023). Door beperkte databeschikbaarheid is dit gebaseerd op vereenvoudigde aannames en geeft dit een eerste orde benadering van het opgestelde vermogen.

Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

4.2.1.9 Laadinfrastructuur wegmobiliteit licht (<50kW)

De lichte laadinfrastructuur wordt gebruikt voor het elektrische laden van wegvoertuigen met een vermogen tot 50 kW. Dit gaat voornamelijk om het regulier laden van personenvoervoer. Tijdens het laden kan laadinfrastructuur flexibiliteit bieden voor afnamecongestie door tijdelijk op een lager vermogen te laden, of geheel af te schakelen en daarmee de vraag naar elektriciteit uit te stellen (time shifting). Een vergelijkbare vorm van flexibiliteit kan worden geleverd bij bedrijven. Daar is het mogelijk dat gebruikers van de laadpaal aangeven welk minimaal batterijniveau (ook wel State of Charge (SoC)) zij nodig hebben, waardoor het laadproces in de tijd kan worden geoptimaliseerd (time shifting). Dit wordt al toegepast op semipublieke laadpunten. Een andere vorm van flexibiliteit voor afnamecongestie kan gerealiseerd worden door bidirectionele laadpunten, ook wel Vehicle to Grid (V2G). Bij deze toepassing kan de batterij van het voertuig terugleveren aan het elektriciteitsnet. Momenteel is er één grootschalige V2G-service beschikbaar, waardoor de bijdrage aan het verlichten van netcongestie richting 2027 naar verwachting nog beperkt blijft (Wedrivesolar, n.d.). Er wordt verwacht dat het potentieel van V2G in de komende jaren verder zal toenemen.

Opgesteld vermogen

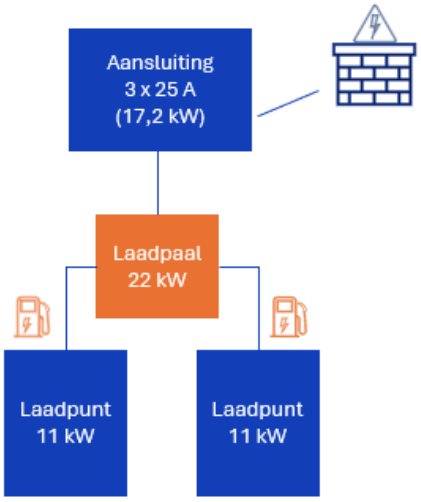
Het opgestelde vermogen is bepaald voor publieke en semipublieke laadpunten. Publieke laadpunten staan in de openbare ruimte[19] en zijn voor iedereen toegankelijk. Semipublieke laadpunten zijn publiek toegankelijk, maar staan niet in de openbare ruimte. Deze kunnen bijvoorbeeld via een hek toegankelijk zijn, zoals bij een bouwmarkt (RVO, 2026). De private laadpunten zijn niet meegenomen.

Het opgestelde vermogen is bepaald met het RVO dashboard van laadinfrastructuur in Nederland (RVO, 2026). In dit dashboard wordt het aantal laadpunten gemonitord en dit is geëxtrapoleerd naar 2027. Voor elke vermogensklasse is het meest voorkomende vermogen aangenomen en zo zijn de aantal laadpunten omgerekend naar vermogen. De inschatting voor het totaal opgestelde elektrische vermogen in 2027 is 3,6 GW. Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

Dit opgesteld vermogen is niet het technisch potentieel voor flexibiliteit. Allereerst omdat de aansluiting vaak een lager vermogen heeft dan waarop de laadpunten zouden kunnen laden, dit kan worden uitgedrukt in een gelijktijdigheidsfactor, zie voor een visualisatie onderstaand figuur (TNO, 2025c). Daarnaast worden de laadpalen niet constant gebruikt. Een Recent studie

[19] De definitie is in 2024 veranderd: “Dit label wordt toegekend op basis van de eigenaar van de grond waar dit laadpunt staat: op publieke grond is de gemeente of andere concessiehouder eigenaar en is het laadpunt publiek” (RVO, 2026)

becijferd dat voor een publiek laadpunt van 11kW dat het gemiddeld om 1,65 kW netbelasting tijdens de piek gaat (CE Delft, 2026). Bij licht vervoer gaat het veelal om laadpalen van twee laadpunten van 11 kW met een kleinverbruik aansluiting van 3x25A, waar 17,2 kW gelijktijdig geladen kan worden.



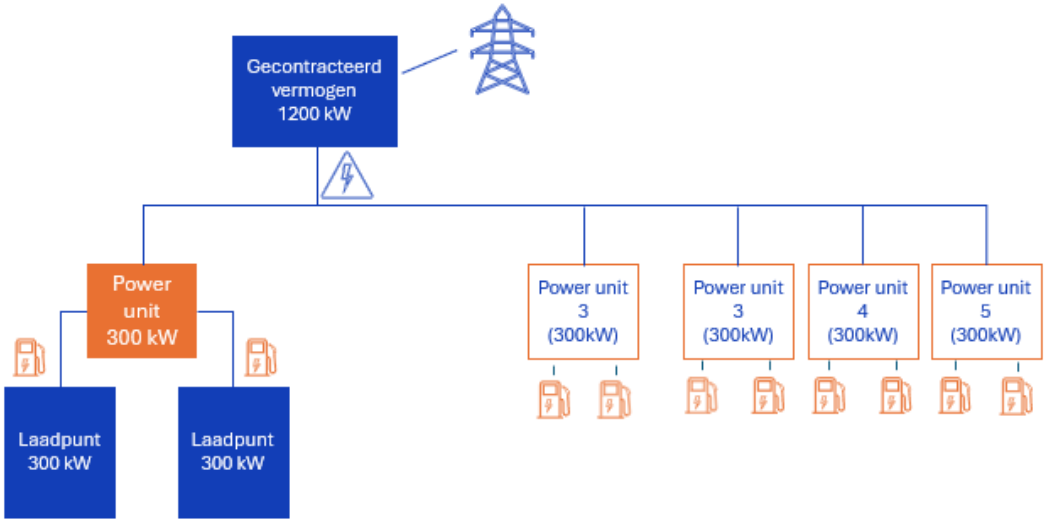
Figuur 4.9: Schematische weergave publieke laadpunten, laadpaal en de aansluiting.

4.2.1.10 Laadinfrastructuur wegmobiliteit middel (50 ≤ P ≤ 150 kW)

De laadinfrastructuur voor wegmobiliteit “middel” heeft een vermogen vanaf 50 tot en met 150 kW. Dit betreft laadinfrastructuur voor zwaar vervoer en het snelladen van auto’s en bestelwagens. De flexibele inzetbaarheid is vergelijkbaar met lichte laadinfrastructuur van time shifting. Een verschil is dat het bij deze laadinfrastructuur om ander type infrastructuur gaat, zoals laden op een afrit (RVO, 2026). Snelladen leent zich minder goed voor flexibele aansturing omdat klanten onderweg zijn en zij dus langer zullen moeten wachten bij het verlagen van het laadvermogen. Een kleiner deel is binnenstedelijk of op een verzorgingsplaats. Depot laden door vrachtvervoer gebeurt deels op privéterrein. Het laadprofiel verschilt per type laadpunt. Zo wordt een depot met name ’s nachts gebruikt, terwijl een verzorgingsplaats juist overdag wordt gebruikt (ElaadNL, 2026).

Opgesteld vermogen

Het opgestelde vermogen is bepaald snellaadpunten voor personen vervoer en voor publiek en semipublieke laadpunten voor zwaar vervoer tussen de 50 en 150 kW. Semipublieke laadpunten kenmerken zich door een groter parkeervak dan voor personenvervoer. Het opgestelde vermogen bestaat grotendeels uit het vermogen van snellaadpunten, slechts een klein deel is het zware vervoer. In **Figuur 4.10** is weergegeven hoe het opgestelde vermogen van een laadpunt samenhangt met de power unit en ook begrensd kan worden door het gecontracteerde vermogen.



Figuur 4.10: Schematische weergave laadplein met laadpunten, power units en gecontracteerd vermogen op (bewerking op laadplein Shell (TNO, 2025c)).

De RVO dashboard van laadinfrastructuur is gebruikt om het aantal laadpunten per vermogensklasse te bepalen (RVO, 2026). Het aantal laadpunten is geëxtrapoleerd naar 2027. Voor elke vermogensklasse is het meest voorkomende vermogen aangenomen. Het gesommeerde elektrische vermogen van de snelladen van licht vervoer en de publieke en semipublieke laadpunten in 2027 is 380 MW, en voor publiek en semipubliek laden zwaar vervoer 20 MW, zie Tabel 4.3**.** Zoals hierboven is gevisualiseerd is een kanttekening dat het vermogen van de laadpunten niet volledig tegelijkertijd benut kan worden doordat het vermogen van de powerunits en het gecontracteerde vermogen bepalend zijn.

Het depot laden is beperkt in te schatten. In een toekomstverkenning door TNO is per bedrijventerrein o.b.v. logistieke toepassing een inschatting van het benodigde vermogen voor laden van bestelwagens, bakwagens en trekker-opleggers gedaan, door te interpoleren tussen de inschattingen voor opgesteld vermogen van 2020 en 2030 (TNO, 2025). Voor 2027 is de inschatting dat het opgestelde vermogen op bedrijventerreinen voor het laden van bestelwagens, bakwagens en trekker-opleggers, 530 MW is.

Het gesommeerde vermogen inclusief de depot laadpunten is 940 MW. Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

Tabel 4.3: Gemiddelde inschatting voor totaal opgesteld vermogen laadinfrastructuur 50 =< P =< 150 kW.

	Totaal 50 =< P =< 150 kW [MW]
Snelladen licht vervoer	380
Publiek & semipubliek zwaar vervoer	20
Depot laden	530
Totaal	**940**

4.2.1.11 Laadinfrastructuur wegmobiliteit zwaar (>150 kW)

De laadinfrastructuur voor wegmobiliteit “zwaar” heeft een vermogen vanaf 150 kW. Dit betreft laadinfrastructuur voor zwaar vervoer en het snelladen van auto’s en bestelwagens. De

flexibiliteit is vergelijkbaar realiseerbaar als van laadinfrastructuur midden. Ook voor dit type laadinfrastructuur verschilt het energieprofiel sterk tussen de verschillende typen laadinfrastructuur.

Opgesteld vermogen

Het opgestelde vermogen is bepaald voor snellaadpunten voor personenvervoer en voor publiek en semipublieke laadpunten voor zwaar vervoer boven de 150 kW. Deze kenmerken zich door een groter parkeervak dan voor personenvervoer. De RVO dashboard van laadinfrastructuur is gebruikt om het aantal laadpunten per vermogensklasse te bepalen (RVO, 2026). Het aantal laadpunten is geëxtrapoleerd naar 2027. Voor elke vermogensklasse is het meest voorkomende vermogen aangenomen. De inschatting voor het totaal opgesteld vermogen van laadinfrastructuur vanaf 150 kW is 2380 MW. Dit bestaat grotendeels uit het vermogen voor snellaadpunten van licht vervoer, zie Tabel 4.4**.** Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

Tabel 4.4: Gemiddelde inschatting totaal opgesteld vermogen laadinfrastructuur > 150 kW.

	Totaal> 150 kW [MW]
Snelladen licht vervoer	1.950
Publiek & semipubliek zwaar vervoer	430
Totaal	**2380**

4.2.1.12 Waterstofelektrolysers

Een waterstofelektrolyser produceert waterstof door middel van elektrolyse, waarbij elektriciteit wordt gebruikt om water te splitsen in waterstof en zuurstof. In deze studie worden uitsluitend waterstofelektrolysers beschouwd; andere industriële elektrolyseprocessen vallen buiten de scope. Elektrolysers worden met name ingezet in de industrie, waar waterstof wordt ingezet als grondstof of energiedrager, en kunnen daarnaast een rol spelen in de integratie van hernieuwbare elektriciteit. Omdat elektrolysers hun elektriciteitsverbruik kunnen op- en afregelen, vormen zij een flexibel elektriciteitsverbruik.

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte totaal nationaal opgestelde vermogen van elektrolysers voor waterstofproductie in Nederland bedraagt circa 220 MW in 2027. Dit vermogen is in dit onderzoek bepaald op basis van de database over waterstofprojecten van het International Energy Agency (IEA, 2025). Deze is aangevuld met aangekondigde projecten die een verwachte ingebruikname van 2027 hebben. Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

4.2.2 Opwek

Hieronder worden de opwekassets individueel uitgewerkt.

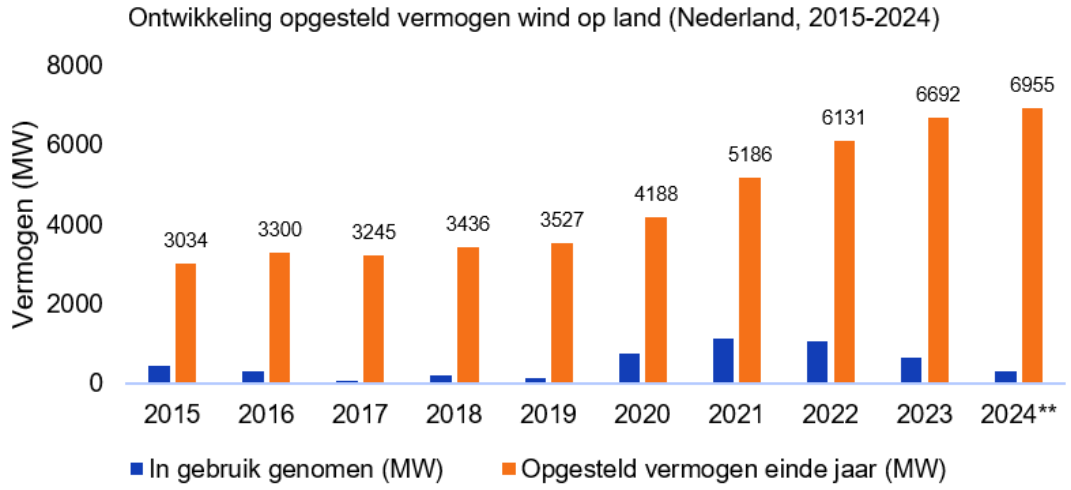
4.2.2.1 Wind op land (> 1 MW)

Wind op land vormt een belangrijke bron van de hernieuwbare opwek in Nederland en vertegenwoordigt een substantieel aandeel in het totale opgestelde vermogen aan de aanbodzijde. De bijdrage van wind op land aan beter benutten is niet zozeer vanuit het flexibiliteitspotentieel van de asset zelf, maar zit in de potentiële lokale contractuele koppeling

aan verbruik, bijvoorbeeld via een groepstransportovereenkomst, cable pooling of gesloten systeem.

Opgesteld vermogen

Eind 2024 stond in Nederland 6.955 MW windvermogen op land operationeel. Tussen 2020 en 2023 vond een periode van sterke groei plaats, waarin het opgestelde vermogen toenam van 4.188 MW (2020) tot 6.692 MW (2023). In 2024 viel de groei echter terug tot slechts 127 MW.



Figuur 4.11: Jaarlijks opgesteld vermogen en netto toename wind op land (CBS, 2025c).

Van de 7 GW die eind 2024 operationeel was, kan worden aangenomen dat ~90% afkomstig is van turbines met een vermogen groter dan 1 MW. Dit volgt uit de verdeling naar turbinehoogte: bijna 70% van het turbinevermogen had in 2024 een ashoogte ≥96 meter, wat aangeeft dat het grootste deel van het nationale vermogen wordt geleverd door moderne, grotere turbines in de vermogensklasse 2–5 MW. Daarnaast had 20% een ashoogte van 71-96 m wat ook correspondeert aan een vermogensklasse >1 MW (Regionale Energie Strategie, 2025). Deze twee categorieën samen leiden tot een inschatting van ~6,3 GW wind op land met een vermogen groter dan 1 MW in 2024.

Richting 2027 wordt slechts beperkte groei verwacht tot circa 7,1–7,4 GW totaal opgesteld vermogen. Uitgaande van een vergelijkbare verdeling naar turbinevermogens komt het opgesteld vermogen van wind op land >1 MW uit op circa 6,4–6,7 GW in 2027.

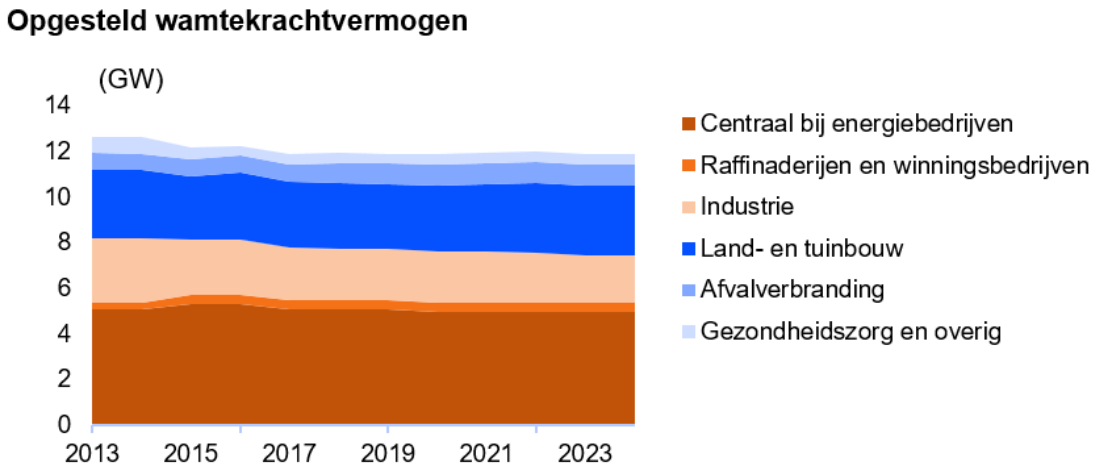
Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

4.2.2.2 WKK

Een warmtekrachtkoppeling (WKK) produceert gelijktijdig elektriciteit en warmte uit een brandstofbron, doorgaans aardgas. WKK's worden met name toegepast in sectoren met een warmtevraag, zoals de glastuinbouw, grote gebouwcomplexen (bijvoorbeeld ziekenhuizen en universiteiten) en delen van de industrie. Afhankelijk van de situatie, wordt de opgewekte elektriciteit (deels) zelf gebruikt of (deels) teruggeleverd aan het net. WKK's zijn regelbare opwek en kunnen daardoor bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie door, indien mogelijk, de elektriciteitsproductie (verder) te verhogen op deze congestiemomenten.

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte nationaal opgestelde vermogen in 2027 van warmtekrachtkoppelingen (WKK's) bedraagt circa 12.000 MW. Dit is gebaseerd op het nationaal opgesteld warmtekrachtvermogen zoals gerapporteerd door het Compendium voor de Leefomgeving (2026). Deze figuur laat zien dat het totale WKK-vermogen in Nederland de afgelopen jaren relatief stabiel is gebleven, waardoor er binnen deze studie voor gekozen is geen extrapolatie naar 2027 toe te passen. Het totale vermogen kan worden uitgesplitst over verschillende sectoren, zie **Figuur 4.12**.



Figuur 4.12: Opgesteld warmtekrachtvermogen (Compendium voor de Leefomgeving, 2026).

Randvoorwaarden

De analyse van randvoorwaarden voor flexibele inzet van WKK's wordt afgebakend op de glastuinbouwsector, aangezien hier een groot deel van het nationale WKK-vermogen is opgesteld en er sprake is van colocatie bij verbruik. Voor industriële WKK's kunnen andere randvoorwaarden gelden.

Technische aspecten van flexibiliteit

WKK's zijn inherent flexibel, aangezien het gaat om regelbaar elektrisch opwekvermogen dat in principe op- en afgeregeld kan worden. Het gaat veelal om installaties met een elektrisch vermogen in de orde van grootte van 1-5 MW. De elektriciteit wordt deels geconsumeerd door het glastuinbouwbedrijf, de rest wordt teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. In de meeste gevallen beschikken WKK's ook over IT-aansturing, aangezien ze veelal al actief worden ingezet op de verschillende elektriciteitsmarkten.

Door lokaal elektriciteit te produceren en terug te leveren aan het net, dragen WKK's bij aan de regionale opwek in het distributienet. Hierdoor kan op momenten van teruglevering door WKK's de netto afname van elektriciteit in de regio worden verminderd. Dit kan bijdragen aan het beperken van afnamecongestie.

Gebruikspatronen

De gemiddelde WKK in de glastuinbouw draaide in 2022 ongeveer 4.000 vollasturen (Trinomics & BlueTerra, 2024). Deze installaties draaien dus niet op hun volledige capaciteit, wat suggereert dat er ruimte is voor flexibele inzet.

De inzet van een WKK in de glastuinbouw wordt niet uitsluitend bepaald door de vraag naar elektriciteit (zowel binnen het bedrijf als in het systeem). Een WKK vervult een belangrijke rol in het bedrijfsproces van tuinbouwers door gelijktijdig warmte, elektriciteit en CO_2 te produceren. De warmte wordt gebruikt voor de verwarming van de kas en CO_2 wordt tijdens het groeiseizoen ingezet als voedingsstof voor gewassen. Hierdoor hangt de inzet van de WKK af van de behoefte aan warmte en CO_2.

De flexibiliteit van een WKK wordt bepaald door de mate waarin de elektriciteitsproductie kan worden losgekoppeld van de warmtevraag en CO_2-behoefte. CO_2 wordt nog niet gebufferd. De CO_2-vraag hangt samen met de zoninstraling. Hierdoor is de inzet van WKK's deels gekoppeld aan momenten waarop CO_2 in de kas benut kan worden, namelijk overdag. Daarnaast wordt de inzet van de resterende capaciteit van de WKK steeds vaker economisch gestuurd op basis van elektriciteitsprijzen, naast de onderliggende warmtevraag en CO_2-behoefte. Hierbij spelen warmtebuffers een belangrijke rol: deze maken het mogelijk om warmte tijdelijk op te slaan, waardoor productie en warmtevraag gedeeltelijk kunnen worden ontkoppeld.

Hierdoor kan de WKK op momenten met hoge elektriciteitsprijzen worden ingezet, ook wanneer de directe warmtevraag beperkt is. In dat geval wordt de warmte niet direct benut, maar opgeslagen in buffers of wordt de warmtevraag op andere momenten ingevuld. Tot slot is er een groot verschil tussen belichtende en niet-belichtende tuinders. Belichtende tuinders gebruiken in het winterseizoen een groot deel van de opgewekte elektriciteit zelf. Men werkt met dagelijkse benodigde hoeveelheid licht voor het gewas, waarbij de lampen het zonlicht aanvullen tot de benodigde hoeveelheid. Bij deze tuinders is er minder flexibiliteit.

Barrières voor grootschalige inzet
De inzet van WKK's wordt mede bepaald door economische prikkels. Naast productie voor eigen consumptie, wordt de inzet van WKK's bepaald door prikkels uit de elektriciteitsmarkt. Prikkels voor het reduceren van afnamecongestie kunnen concurreren met inzet op day-ahead- en intradaymarkten, en markten voor reserve- en regelvermogen (FCR en AFRR) (KWA, CF, EV, 2026). Omdat afnamecongestie zich momenteel vaak voordoet tijdens de avondpiek, wanneer elektriciteitsprijzen op de day-aheadmarkt relatief hoog zijn, kan de inzet van WKK's op deze momenten bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie. Gegeven de concurrentie tussen verschillende prikkels, hangt de mate waarin dit daadwerkelijk gebeurt af van economische afwegingen.

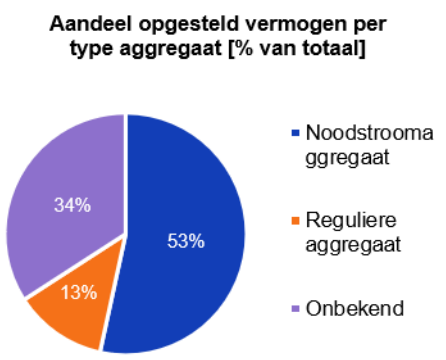
Daarnaast is de extra inzet van een WKK niet altijd kostenefficiënt wanneer de geproduceerde warmte niet kan worden benut. Het rendement daalt hierdoor, waardoor de kosten voor elektriciteitsproductie toenemen (KWA, CF, EV, 2026).

Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

4.2.2.3 (Noodstroom)aggregaten (> 1 MW)

Aggregaten wekken elektriciteit op door een generator, waarbij een verbrandingsmotor (voornamelijk diesel) mechanische energie levert die een generator aandrijft waar de mechanische energie in elektriciteit wordt omgezet.

Een noodstroomaggregaat is een specifiek type aggregaat dat primair bedoeld is als back-upvoorziening bij uitval van de primaire elektriciteitsvoorziening. Deze installaties worden bijvoorbeeld toegepast bij ziekenhuizen, datacenters en industrie. Noodstroomaggregaten worden alleen ingezet tijdens een beperkt aantal uren per jaar, bijvoorbeeld, zoals de naam al suggereert, tijdens noodsituaties. Op basis van Europese emissieregelgeving geldt voor bepaalde noodstroomaggregaten onder specifieke voorwaarden de zogenoemde 500-urenregeling. Deze regeling maakt het mogelijk om deze installaties tot 500 uur per jaar te laten draaien zonder te hoeven voldoen aan de reguliere emissiegrenswaarden en is in Nederland geïmplementeerd in het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal). Daarbij geldt dat inzet, afgezien van geplande testmomenten, niet mag plaatsvinden wanneer het openbare elektriciteitsnet beschikbaar is.



Figuur 4.13: Aandeel opgesteld vermogen per type aggregaat [% van totaal].

Net als WKK's zijn (noodstroom)aggregaten regelbare opwek. In theorie kunnen zij bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie door extra opwekvermogen beschikbaar te stellen tijdens congestiemomenten. Voor reguliere aggregaten[20] kan dit door het aanpassen van de productie. Noodstroomaggregaten worden daarentegen ingezet als back-upvoorziening. Wanneer zij onder de 500-urenregeling vallen, mogen zij alleen worden ingezet wanneer het openbare elektriciteitsnet niet beschikbaar is. Zij kunnen onder deze regeling dus niet worden ingezet om afnamecongestie op het net te verminderen.

Inzet van reguliere aggregaten voor het verminderen van congestie heeft wel een duidelijk nadeel: het leidt tot extra emissies, omdat deze installaties doorgaans op diesel draaien. Volgens Dialogic, ENTRANCE en Pb7 (2024) is inzet van reguliere dieselgeneratoren voor mFRR vanwege emissienormen niet mogelijk. Enkele Nederlandse datacenters met generatoren op HVO leveren dergelijke diensten wel. Het potentieel van noodstroomaggregaten voor flexibiliteit is daarom sterk afhankelijk van het type installatie, de gebruikte brandstof en de geldende vergunning.

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte nationaal totaal opgestelde elektrisch vermogen in 2027 van (noodstroom)aggregaten (met een vermogen > 1 MW) in Nederland bedraagt circa 4.000 MW. Uit de registratiegegevens van SCIOS volgt dat de in dit onderzoek meegenomen aggregaten uitsluitend dieselaggregaten betreffen[21]. Het omvat zowel noodstroom- als reguliere aggregaten. Hiervan bestaat 2142 MW (53%) uit noodstroom-aggregaten en 500 MW (13%) reguliere aggregaten. Voor het resterende deel (1369 MW; 34%) is op basis van de beschikbare gegevens niet vast te stellen of het om noodstroom- of reguliere aggregaten gaat. Het totaal (4.000 MW) is afgerond.

[20] Met reguliere aggregaten wordt gedoeld op aggregaten die niet als noodstroomaggregaat worden ingezet. Deze vallen onder de reguliere emissie-eisen en niet onder de 500-urenregeling.
[21] Er bestaan ook aggregaten op gas, maar die komen in Nederland niet veel voor (gesprek SCIOS)

Dit vermogen is in dit onderzoek bepaald op basis van registratiegegevens van Stichting SCIOS[22]. De schatting van het totale opgestelde vermogen van dieselaggregaten kent een aanzienlijke onzekerheidsmarge, mede door onvolledige registratie. Het werkelijke vermogen ligt naar verwachting binnen een bandbreedte van circa 50%.

Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

4.2.3 Opslag

Hieronder wordt de batterij (BESS) uitgewerkt. Andere vormen van opslag, zoals opslag van warmte of moleculen, zijn niet los onderzocht en vallen buiten de scope van deze studie. De rol van warmteopslag wordt wel besproken bij de assets industriële e-boiler, industriële warmtepomp en WKK.

4.2.3.1 Batterij (BESS)

Batterij-energieopslagsystemen (ook wel gerefereerd als Battery Energy Storage System, ofwel BESS) nemen sterk toe in opgesteld vermogen en bieden flexibiliteit door elektriciteit tijdelijk op te slaan en op een later moment weer te leveren. Deze flexibiliteit is inherent aanwezig door hoe de technologie werkt, omdat het moment van laden en ontladen onafhankelijk van elkaar kan worden gestuurd. De hoeveelheid flexibiliteit die een batterij kan leveren wordt echter niet alleen bepaald door het vermogen (MW), maar ook door de energie-inhoud (MWh), de state-of-charge, de netaansluiting en de operationele strategie. Daardoor kunnen batterijen met hetzelfde vermogen sterk verschillen in hun hoeveel flexibiliteit ze kunnen leveren.

Opgesteld vermogen

Volgens het trendrapport *Storage & Solar* door DNE Research (2025) bedraagt de verwachte totale opgestelde batterijopslagcapaciteit in het bedrijfsleven (exclusief residentieel[23]) 1,6 GWh in 2025, waarvan 620 MWh commercieel en 980 MWh utiliteit.

Op basis van de projecties van DNE Research (2025) groeit de opslagcapaciteit in het bedrijfsleven – commercieel en utiliteit, exclusief residentieel – naar 5,3 GWh in 2027. Afhankelijk van de aangenomen opslagduur (1-4 uur) correspondeert dit met een opgesteld vermogen van circa 1,3–5,3 GW. De aangenomen ruime bandbreedte van opslagduur sluit aan bij de vooruitzichten uit de European Market Monitor on Energy Storage (EMMES 10.0), waaruit blijkt dat de opslagduur van batterijen naar verwachting verder zal toenemen. Energy Storage NL (2026) duidt deze ontwikkeling als een verschuiving van 2-3 uur naar 3-4 uur opslagduur richting 2030.

De relatief grote bandbreedte in het opgestelde vermogen (1,3-5,3 GW) weerspiegelt de onzekerheid rondom de ontwikkeling in de groei in batterijvermogen. De ondergrens is naar verwachting conservatief, omdat niet alle batterijen een opslagduur van vier uur zullen hebben en de gemiddelde opslagduur waarschijnlijk lager ligt.

De Monitor Voorzieningszekerheid van TenneT (2026) schat dat in 2028 circa 4,5 GW aan batterijvermogen zal zijn opgesteld in de commerciële sector (exclusief huishoudens en

[22] Stichting SCIOS registreert stookinstallaties zoals noodstroomaggregaten in het kader van inspectie- en certificeringsverplichtingen, waarbij onder andere technische kenmerken zoals het thermische vermogen worden vastgelegd.

[23] DNE Research (2025) rapporteert ook cijfers voor residentiële batterijen. Conform de scope van dit onderzoek worden alleen commerciële en utiliteitsbatterijen meegenomen; residentiële batterijen blijven buiten beschouwing.

vehicle-to-grid). Deze inschatting bevindt zich aan de bovenzijde van de bandbreedte aan opgesteld vermogen in deze studie, wat erop wijst dat de ondergrens in deze studie waarschijnlijk conservatief is.

Uninterruptible Power Supply (UPS)-systeem
Naast batterij-energieopslagsystemen (BESS) worden batterijen ook toegepast in UPS-systemen (Uninterruptible Power Supply). UPS systemen worden in verschillende sectoren toegepast om elektriciteit te garanderen in noodsituaties, zoals datacenters, gezondheidszorg, industrie/productie en telecommunicatie. Voor de toepassing van peak shaving moet er echter voldoende reservecapaciteit beschikbaar blijven voor deze bedrijven in noodsituaties. Een mogelijke flexibiliteitstoepassing, indien een interactieve UPS geplaatst staat, is het net balanceren, dit valt daardoor buiten de scope van deze studie (BloombergNEF; Statskraft; AETON, 2021; Dialogic, Entrance, Pb7, 2024).

Zie Bijlage D voor de verdere details en berekeningen voor deze asset.

4.3 Conclusie

Opgesteld vermogen brengt de fysieke bovengrens van het flexibiliteitspotentieel in beeld, maar laat niet zien in welke mate deze flexibiliteit daadwerkelijk realiseerbaar is. Het flexibiliteitspotentieel (niveau 2 en verder) wordt in belangrijke mate bepaald door technische, operationele en organisatorische randvoorwaarden.

De opgestelde vermogens van de vraagassets zijn diffuser verdeeld dan de opwekassets, maar enkele assets springen wel duidelijk eruit: HVAC-systemen, datacenters en laadinfrastructuur onder 50kW en boven de 150 kW (>1 GW). Aan de opwek- en opslagzijde is het opgestelde vermogen veel meer geconcentreerd in een beperkt aantal assetcategorieën, met alle assets meerdere gigawatten aan vermogen.

Het opgesteld vermogen (niveau 1) is in beeld gebracht voor 16 assets. Het overzicht is te vinden in **Figuur 4.1**. Voor deze assets is ook bepaald wat de bron van flexibiliteit is. Dit is samengevat in Tabel 4.5**.** Een groot deel van de assets zouden door time shifting mogelijk flexibiliteit bieden. Hierbij zijn echter wel een aantal belangrijke kanttekeningen bij te plaatsen. Zo geldt dat voor de walstroom en het snelladen middels laadinfrastructuur voor wegmobiliteit het potentieel laag zal zijn omdat het gebruik veelal tijdsgebonden is. Voor lichte laadinfrastructuur is Vehicle-to-Grid (V2G) een ontwikkeling die additionele flexibiliteit kan opleveren. Een aantal assets kunnen gebruik maken van hybride of back-up aardgasgedreven assets waardoor het elektriciteitsgebruik kan worden verminderd.

Tabel 4.5: Bron van flexibiliteit per asset.

Assets		Bron van flexibiliteit
Vraag	HVAC	Time shifter / hybride
	RWZI	Time shifter
	Gemaal	Time shifter
	Industriële e-boiler	Time shifter / hybride
	Industriële warmtepomp	Time shifter / hybride
	Datacenter	Time shifter / geografische shifter
	Walstroom voor zeevaart	Time shifter / hybride
	Walstroom voor binnenvaart	Time shifter / hybride
	Laadinfrastructuur licht	Time shifter en V2G
	Laadinfrastructuur middel	Time shifter
	Laadinfrastructuur zwaar	Time shifter
	Waterstofelektrolyser	Time shifter
Opwek	WKK	Regelbare opwek
	Wind op land	Lokale opwek
	(Noodstroom)aggregaat	Regelbare opwek
Opslag	Batterij (BESS)	Opslag

Voor de assets waar geen data beschikbaar kwam tijdens de studie voor het bepalen van het opgestelde vermogen (zie paragraaf 3.2), namelijk de assets elektrische aandrijfsystemen, overige commerciële power-to-heat (P2H) en vrieshallen, zijn inzichten opgehaald over mogelijke flexibele inzet. De elektrische aandrijfsystemen kunnen flexibiliteit bieden indien er een loskoppeling van het primaire proces of tussentijdse opslag mogelijk is. Voor overige commerciële power-to-heat is time shifting of hybride toepassing een mogelijke bron van flexibiliteit. Ook hier is de rol in het primaire proces en opslag een bepalende factor. Voor vrieshallen is time shifting mogelijk indien productkwaliteit en veiligheid gewaarborgd wordt. Zie Bijlage D.4 voor een verdere toelichting op deze assets.

Om een eerste stap van opgesteld vermogen naar technisch potentieel (niveau 2) te kunnen maken, zijn voor een selectie van zeven assets ook de technische, operationele en organisatorische randvoorwaarden onderzocht. Dit zijn de assets: HVAC-systemen, datacenters, gemalen, RWZI's, e-boilers, industriële warmtepompen en WKK's.

Assets met een substantieel opgesteld vermogen én gunstige randvoorwaarden door een beperkte koppeling met het primaire proces lijken op korte termijn het meest kansrijk voor verdere technische flexibiliteitsontsluiting.

Binnen de onderzochte subset komen HVAC-systemen op basis van de kwalitatief onderzochte randvoorwaarden als bijzonder kansrijk naar voren voor verdere technische flexibiliteitsontsluiting op korte termijn. Dit komt door een combinatie van verschillende factoren:

- Hoog opgesteld vermogen
- Relatief beperkte impact op bedrijfsproces
- Inherente buffer aanwezig in de vorm van thermische massa van gebouwen

- Veel voorkomende hybride of back-up toepassing
- Toenemende mogelijkheden voor aansturing, onder andere door verplichting van gebouwautomatisering en -controlesystemen (GACS) voor grotere utiliteitsgebouwen vanaf 2026

Deze flexibiliteit wordt echter niet automatisch ontsloten. Voor de daadwerkelijke flexibele inzet zijn, naast GACS, vaak aanvullende energiemanagement- en sturingssystemen nodig. Daarnaast beperken gebruikspatronen, een beperkte regelbandbreedte en de nog beperkte uitrol van GACS het technisch potentieel. Ook kunnen praktische aspecten, zoals schaalgrootte en toegang tot flexibiliteitsmarkten, een rol spelen. Voor kleinere gebouwen en bedrijven is individuele marktdeelname vaak beperkt mogelijk en zal flexibiliteit veelal via een aggregator of Congestion Service Provider (CSP) worden ontsloten. Het vermogen concentreert zich in de gebruiksfuncties kantoren, bijeenkomst en gezondheidszorg. Een eigenschap van deze doelgroepen is dat het om veel pandeigenaar/gebruikers gaat verdeeld over verschillende sectoren.

Daarna vormen ook gemalen en RWZI's een interessante optie. Hoewel de opgestelde vermogens beperkter zijn dan bij HVAC-systemen, hebben deze assets een relatief uniforme toepassing en bevinden ze zich alleen in de waterbeheer-sector. Daarnaast heeft eerder onderzoek laten zien dat flexibiliteitsinzet binnen deze assets technisch mogelijk is en zijn hiervoor verschillende praktijkcases en doorrekeningen uitgevoerd. Ook e-boilers beschikken over een relatief groot technisch potentieel, maar worden vaak elektriciteitsprijs-gestuurd ingezet, waardoor het aanvullende flexibiliteitspotentieel beperkter is.

Tegenover de hiervoor genoemde assets staan assets die sterk verweven zijn met het primaire proces, zoals datacenters. Hoewel datacenters een groot opgesteld vermogen hebben, wordt de flexibiliteitsontsluiting gelimiteerd door beschikbaarheids-, betrouwbaarheids- en continuïteitseisen. Deze randvoorwaarden zijn beperkend voor het realiseerbaar potentieel op korte termijn.

Aan de opwek- en opslagzijde is het opgestelde vermogen veel meer geconcentreerd in een beperkt aantal assetcategorieën. Met name batterijopslag (BESS) en WKK-installaties bieden mogelijkheden voor flexibele inzet, maar worden in de praktijk ook al ingezet op elektriciteits-markten, waarbij concurrentie ontstaat tussen verschillende prikkels.

Tabel 4.6: Syntheseoverzicht van resultaten van de assets in scope voor de randvoorwaarden-analyse.

Assets		Nationaal opgesteld vermogen	Effect van randvoorwaarden	Horizon	Indicatie kansrijkheid technische flexibiliteits-ontsluiting*
Vraag	**HVAC**	Hoog	Thermische buffers aanwezig, beperkte koppeling met primaire functie, toenemende GACS-uitrol.	Kort	Hoog
	RWZI's	Middel	Beluchting heeft grootste elektriciteitsverbruik met een sterk fluctuerende vraag en eerder onderzoek toont flexibiliteitspotentieel aan; daarnaast een relatief uniforme sector en processen	Kort	Middel
	Gemalen	Middel	Flexibiliteit afhankelijk van peilbeheer, waterveiligheid en lokale omstandigheden. Complexe systeemafhankelijk-heden tussen gemalen.	Kort	Middel
	E-boilers	Middel	Afhankelijk van warmtebuffering en procesvoering; sluit goed aan op prijssturing.	Beide	Hoog**
	Industriële warmtepompen	Laag	Afhankelijk van procesintegratie en hybride toepassing, warmtebuffers.	Beide	Laag
	Datacenters	Hoog	Strikte beschikbaarheids-, betrouwbaarheids- en continuïteitseisen.	Lang	Laag
Opwek	**WKK*** **	Hoog	Koppeling met warmte-/CO_2-vraag en concurrentie met andere marktprikkels.	Beide	Hoog**

* Kwalitatieve indicatie op basis van opgesteld vermogen en onderzochte randvoorwaarden; geen kwantificering van het technisch potentieel. ** Mogelijk wordt een deel van het potentieel al benut. *** Voor de verdiepende analyse omtrent randvoorwaarden voor flexibele inzet van WKK's is de scope uitsluitend de glastuinbouwsector.

5 Conclusie en aanbevelingen

Dit hoofdstuk is opgedeeld in vier delen: paragraaf 5.1 geeft de algemene conclusie van het onderzoek, paragraaf 5.2 presenteert de kansrijke assets, de conclusies en aanbevelingen van de onderzochte assets. Afsluitend presenteert paragraaf 5.3 de dilemma's die ontstaan rondom flexibiliteitsontsluiting en paragraaf 5.4 sluit af met de algemene aanbevelingen volgend vanuit het onderzoek.

5.1 Algemene conclusie

In deze rapportage wordt het flexibiliteitspotentieel bij bedrijven en instellingen voor het verminderen van afnamecongestie verkend op basis van de huidige assetbase. Tegen de achtergrond van de groei van hernieuwbare opwek en toenemende netcongestie door elektrificatie, is inzicht nodig in welke assets flexibiliteit kunnen leveren, hoe groot dit potentieel is en onder welke voorwaarden dit kan worden ingezet.

Dit onderzoek adresseert deze behoefte door het flexibiliteitspotentieel bij bedrijven en instellingen systematisch in kaart te brengen. Vanwege de omvang en diversiteit van de Nederlandse assetbase is daarbij een beperkte selectie van assets onderzocht. Daarbij wordt flexibiliteit benaderd vanuit de bestaande assetbase, met focus op de huidige situatie en de korte termijn (zichtjaar 2027). Daarbij worden drie doelen nagestreefd:

1. **Methode presenteren om een flexibiliteitspotentieel te duiden;** *Hoe kun je verschillende MW'en onderling met elkaar vergelijken?*

<u>En voor een relevante selectie van assets:</u>
2. **Inzicht verkrijgen in geïnstalleerde assetbase**; *Hoeveel MW staat er?*
3. **Inzicht verkrijgen in het technische flexibiliteitspotentieel van deze assetbase voor het verminderen van afnamecongestie**; *Hoeveel MW is er technisch inzetbaar?*

Het onderzoek bevestigt een onderliggende uitdaging: er bestaat momenteel geen integraal nationaal beeld van de assetbase en het bijbehorende flexibiliteitspotentieel van assets. **Met name van elektriciteitsverbruikende assets is beperkt informatie centraal beschikbaar.** Deze informatie over assets en flexibiliteitskenmerken is verspreid over verschillende databronnen en een integraal nationaal overzicht ontbreekt. Het verkrijgen van beleidsrelevante inzichten, zoals in dit onderzoek, vraagt daardoor om het combineren van meerdere bronnen, aannames en expertkennis.

Hoewel een nationaal overzicht ontbreekt, zet dit onderzoek een aantal stappen in het identificeren van de huidige assetbase en het bijbehorende flexibiliteitspotentieel van de geselecteerde assets. **De gehanteerde indeling in vier niveaus van flexibiliteitspotentieel biedt een systematisch kader om verschillen tussen assets inzichtelijk te maken en technische mogelijkheden te onderscheiden van realiseerbaar potentieel.**

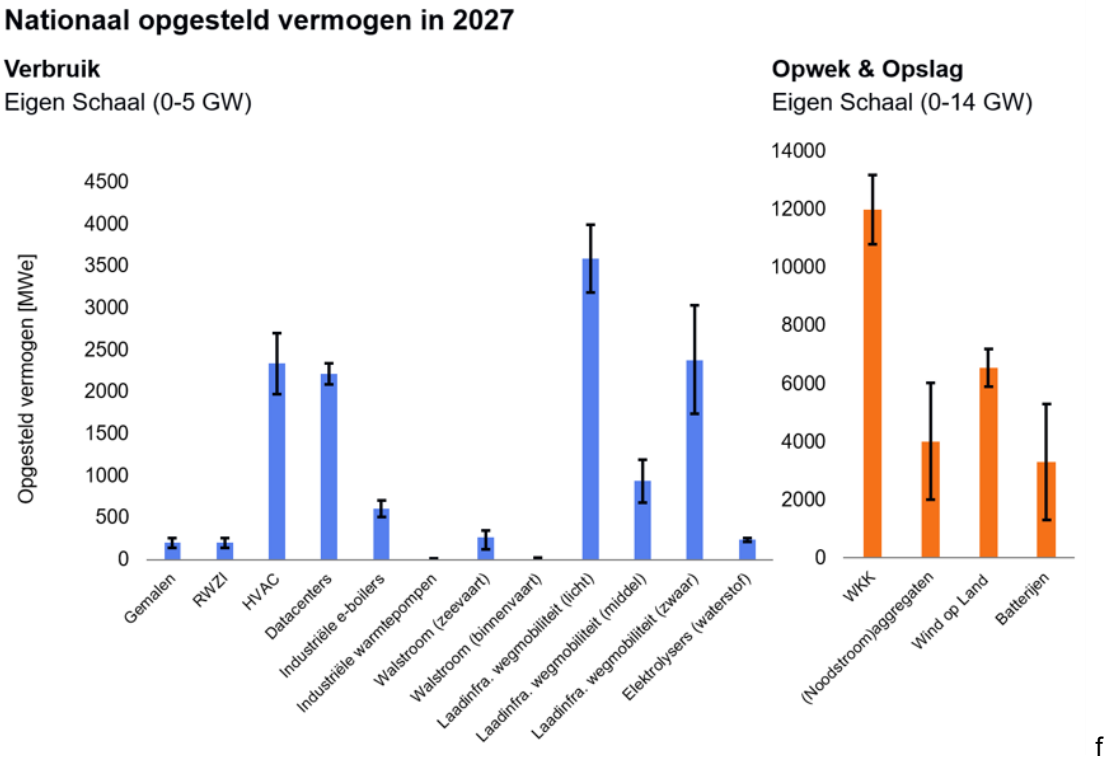
Uit de analyse blijkt dat het technisch potentieel sterk afhankelijk is van asset-specifieke randvoorwaarden. Voor de assets waarvoor binnen deze studie deze randvoorwaarden zijn onderzocht, lijken met name assets met zowel een substantieel opgesteld vermogen als een

beperkte koppeling met hun primaire functie het meest kansrijk voor flexibiliteitsontsluiting op korte termijn.

De centrale conclusie van dit onderzoek is dat bedrijven en instellingen beschikken over een omvangrijke flexibiliteitsrelevante assetbase, maar dat de daadwerkelijk inzetbare flexibiliteit sterk wordt bepaald door technische, operationele en organisatorische randvoorwaarden. Effectieve ontsluiting vraagt daarom niet alleen om passende markt- en beleidsinstrumenten, maar ook om beter inzicht in de aanwezige assets en de voorwaarden waaronder deze flexibiliteit kunnen leveren.

5.2 Kansrijke assets voor verlichten congestie

Dit onderzoek beperkt zich tot zestien assets die zijn geselecteerd op basis van een set van criteria, zoals besproken in hoofdstuk 3. Van deze zestien assets is een inschatting gemaakt van het opgestelde vermogen (niveau 1), zie **Figuur 5.1**. Het opgestelde vermogen bepaalt de fysieke bovengrens van het flexibiliteitspotentieel, maar zegt op zichzelf weinig over de mate waarin flexibiliteit daadwerkelijk ontsloten kan worden. Als eerste stap richting het bepalen van het technisch potentieel (niveau 2) zijn voor zeven van de zestien assets de bepalende technische en operationele randvoorwaarden kwalitatief verkend. Dit technisch potentieel wordt in sterke mate bepaald door randvoorwaarden zoals procesafhankelijkheid, buffercapaciteit, aanstuurbaarheid en gebruikspatronen.



f

Disclaimer: Deze figuur toont het opgestelde vermogen van assets. Dit vermogen vormt een fysieke bovengrens voor de flexibiliteit die beschikbaar is. Dit mag **niet** worden geïnterpreteerd als flexibiliteitspotentie. In de praktijk is slechts een deel van dit vermogen daadwerkelijk flexibel inzetbaar.

Figuur 5.1: Inschatting van nationaal opgesteld vermogen in 2027 voor de onderzochte assetbase. De y-assen zijn bewust niet gelijk geschaald: verbruiksassets variëren tussen 0-5 GW, opwek- & opslagassets tussen 0-14 GW. Aparte schalen zijn gekozen om de interne variatie binnen deze groepen goed zichtbaar te houden. De zwarte balken geven de onzekerheidsmarge weer.

De analyse laat zien dat de bijdrage van flexibiliteit aan het verminderen van afnamecongestie sterk verschilt per assettype. Niet alleen de omvang van het opgestelde vermogen is bepalend, maar vooral de mate van proceskoppeling, aanwezige buffers, aanstuurbaarheid en organisatorische complexiteit. Hierdoor ontstaat een duidelijke prioritering tussen assets die op korte termijn flexibiliteit kunnen leveren en assets waarvan het potentieel vooral op langere termijn ontsloten kan worden.

HVAC-systemen: grootste kansrijke categorie voor korte-termijnbeleid
Gebouwgebonden koeling en verwarming, oftewel Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)-systemen, combineren een groot nationaal opgesteld vermogen met aanwezige thermische buffers (namelijk de gebouwen), goede spreiding en een toenemende digitaliseringsgraad. Hierdoor komen zij binnen de onderzochte subset als bijzonder kansrijk naar voren voor verdere technische flexibiliteitsontsluiting op korte termijn.

Aanbevolen wordt om beleidsmatig in eerste instantie te focussen op grotere utiliteitsgebouwen binnen de kantoor- en zorgsector. Daarbij kunnen bestaande instrumenten voor verduurzaming en gebouwbeheer worden benut om flexibiliteit expliciet mee te nemen bij investeringen in warmtepompen, energiemanagementsystemen en gebouwbeheersystemen. Ook kan worden onderzocht hoe de implementatie van GACS-systemen kan worden benut voor flexibiliteitsdoeleinden.

RWZI's en gemalen: sectorgerichte aanpak biedt kansen
RWZI's en gemalen beschikken over een beperkter opgesteld vermogen, maar onderscheiden zich door hun uniforme processen, publieke eigendom en landelijke spreiding. Flexibiliteitsontsluiting kan hierdoor relatief gericht worden georganiseerd via een beperkt aantal stakeholders, met name de waterschappen. Voor RWZI's geldt daarbij dat met name het beluchtingsproces een groot aandeel heeft in het elektriciteitsverbruik en een fluctuerende vermogensvraag kent, en eerder onderzoek flexibiliteitspotentieel heeft aangetoond.

Aanbevolen wordt om voort te borduren op de bestaande initiatieven van STOWA en de Unie van Waterschappen rond flexibel malen en flexibiliteit bij waterschappen. Onderzoek het realiseerbaar potentieel en vertaal de bestaande initiatieven naar een sectorbrede aanpak voor het ontsluiten van dit realiseerbaar flexibiliteitspotentieel van gemalen en RWZI's voor congestieverlichting. Hierbij verdienen met name de stap van technisch potentieel naar realiseerbaar potentieel, de rol van netbeheerders, bestuurlijke randvoorwaarden en praktijkopschaling verdere aandacht. Daarbij kan flexibiliteit een expliciete plaats krijgen in toekomstige actualisaties van peilbesluiten, investeringen in procesautomatisering en energiemanagement. Tevens is verdere praktijkvalidatie wenselijk om het technisch potentieel van RWZI-beluchting, buffering en slim malen kwantitatief te onderbouwen.

E-boilers: flexibiliteit integreren in verdere elektrificatie
E-boilers beschikken over gunstige technische kenmerken voor flexibiliteitsontsluiting, waaronder snelle regelbaarheid, warmtebuffering en hybride inzet. Tegelijkertijd worden veel e-boilers reeds gestuurd op elektriciteitsprijzen, waardoor een deel van het potentieel mogelijk al wordt benut. Voor deze assetcategorie lijkt de grootste beleidsopgave niet het ontsluiten van bestaande flexibiliteit, maar het borgen van flexibiliteit bij verdere uitrol.

Aanbevolen wordt om flexibiliteit expliciet mee te nemen in ondersteunende instrumenten voor industriële elektrificatie, bijvoorbeeld via eisen aan warmtebuffering, meetinfrastructuur en flexibiliteitsdiensten.

Datacenters: focus op ontwerpkeuzes voor toekomstige groei

Datacenters beschikken over een groot opgesteld vermogen, maar het potentieel voor flexibiliteitsontsluiting wordt op korte termijn beperkt door strikte eisen ten aanzien van beschikbaarheid, betrouwbaarheid en continuïteit van dienstverlening. De meeste kansen lijken daarom niet te liggen bij bestaande datacenters, maar bij toekomstige uitbreidingen.

Aanbevolen wordt om bij nieuwe datacenterontwikkelingen aandacht te besteden aan prikkels te onderzoeken voor matching met lokale en/of hernieuwbare opwek, flexibiliteitsopties zoals thermische buffering, energieopslag, flexibiliteit van AI-werklast en geografische werklastverschuiving. Daarmee kan worden voorkomen dat toekomstige groei volledig inflexibel wordt ontworpen.

WKK's: bestaand vermogen beter benutten
WKK's vertegenwoordigen verreweg het grootste regelbare opgestelde vermogen binnen de onderzochte assets. Het potentieel wordt echter begrensd door de koppeling met warmte- en CO_2-vraag en doordat veel installaties reeds actief zijn op elektriciteitsmarkten, waar concurrerende marktprikkels bepalend zijn voor hun inzet.

Aanbevolen wordt om nader te onderzoeken in welke mate WKK's op locaties met afnamecongestie additioneel kunnen bijdragen aan netontlasting, bovenop hun huidige economische inzet. Hierbij verdienen vooral WKK's in de industrie aandacht, omdat die in deze studie slechts beperkt zijn onderzocht.

Laadinfrastructuur en walstroom: flexibiliteit standaard onderdeel maken van uitrol
Voor laadinfrastructuur ligt het grootste potentieel bij regulier laden van personen- en vrachtvervoer waarbij laadmomenten in de tijd verschoven kunnen worden.

Wanneer schepen eigen opwek aan boord hebben, kan de levering van elektriciteit aan het schip via walstroom op momenten van congestie beperkt worden, voor zover dit wenselijk is gegeven de additionele emissies en geluidsoverlast, en regelgeving dit toelaat[24]. Wanneer schepen echter geen eigen opwek aan boord hebben of deze niet mogen gebruiken, lijken de mogelijkheden voor flexibiliteit van walstroom beperkt vanwege de sterke koppeling aan logistieke planning.

Aanbevolen wordt om de realiseerbare potentie van V2G (Vehicle-2-Grid) voor alle vormen van mobiliteit te onderzoeken. Verder wordt aanbevolen om flexibiliteit als standaard ontwerpcriterium op te nemen bij nieuwe laadpleinen, logistieke hubs en walstroomprojecten, zodat congestieverzachtende sturing direct wordt geïntegreerd.

5.3 Beleidsdilemma's rondom flexibiliteit

Hoewel verschillende assets technisch kunnen bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie, laat dit onderzoek zien dat flexibiliteitsontsluiting niet altijd zonder neveneffecten plaatsvindt. Bij veel assets ontstaat een afweging tussen netontlasting en andere publieke of private belangen. Deze afwegingen verdienen expliciete aandacht in vervolgonderzoek en beleidsontwikkeling.

Emissies versus congestievermindering

[24] In Europese regelgeving (FuelEU Maritime), is vastgesteld dat vanaf 2030 alle containerschepen en passagiersschepen (zoals cruiseschepen en ferries) gebruik moeten maken van walstroom voor het voorzien van hun volledige elektriciteitsvraag.

Bij verschillende vormen van regelbare opwek ontstaat een spanning tussen congestieverlichting en emissiereductie. Assets zoals WKK's, noodstroomaggregaten en scheepsmotoren (via walstroom punten) kunnen technisch bijdragen aan het verlagen van de netto elektriciteitsafname, maar gaan gepaard met additionele emissies. Hierdoor ontstaat een afweging tussen korte termijn netontlasting en bredere klimaat- en milieudoelstellingen.

Flexibiliteit versus primaire procesvoering
Assets met een sterke koppeling aan het primaire proces beschikken niet automatisch over een hoog realiseerbaar potentieel. Datacenters, industriële warmtepompen en delen van de procesindustrie illustreren dat technische flexibiliteit aanwezig kan zijn, maar dat beschikbaarheids-, kwaliteits-, veiligheids- of productie-eisen de praktische inzet sterk beperken. Hierdoor betekent een groot opgesteld vermogen niet noodzakelijk dat ook een groot deel daarvan beschikbaar komt voor congestievermindering.

Bestaande marktinzet versus congestieoplossing
Een deel van de flexibiliteit van assets zoals WKK's, batterijen en e-boilers wordt reeds ingezet op bestaande elektriciteits- en flexibiliteitsmarkten. Extra stimulering van congestieverlichting leidt daarom niet automatisch tot additioneel beschikbaar vermogen. In sommige gevallen kan vooral sprake zijn van een verschuiving van flexibiliteit tussen verschillende markten en toepassingen. Voor effectief beleid is daarom inzicht nodig in de mate waarin flexibiliteit reeds wordt benut en welk deel aanvullend beschikbaar gemaakt kan worden voor congestieverlichting.

Huidige assetbase versus toekomstige assetbase
De resultaten van dit onderzoek zijn gebaseerd op de verwachte assetbase in 2027. Ontwikkelingen zoals verdere elektrificatie, groei van datacenters, elektrolysers, batterijen en laadinfrastructuur kunnen de relatieve bijdrage van assetcategorieën in de toekomst veranderen. Dit betekent dat de prioritering van kansrijke assets periodiek herijkt zal moeten worden.

Voor de daadwerkelijke bijdrage aan afnamecongestie is uiteindelijk niet het nationale flexibiliteitspotentieel bepalend, maar de ruimtelijke en temporele match tussen beschikbare flexibiliteit en specifieke congestiepunten en -momenten. Deze match is in deze studie niet kwantitatief onderzocht.

5.4 Aanbevelingen

Dit onderzoek heeft een eerste systematische inventarisatie gemaakt van de flexibiliteitsrelevante assetbase bij bedrijven en instellingen en de relatie tussen deze assetbase en het technisch flexibiliteitspotentieel. Daarbij is voor zestien assets het opgestelde vermogen in kaart gebracht en is voor zeven assets verkend onder welke technische en operationele randvoorwaarden flexibiliteit kan worden ingezet. De resultaten laten zien dat het opgestelde vermogen een noodzakelijke eerste stap vormt, maar slechts beperkt inzicht geeft in de flexibiliteit die daadwerkelijk beschikbaar kan komen voor het verminderen van afnamecongestie.

Een belangrijke conclusie van dit onderzoek is dat de grootste kennislacunes niet langer liggen bij de aanwezigheid van flexibiliteit, maar bij de vraag onder welke voorwaarden deze flexibiliteit daadwerkelijk kan worden ontsloten. Voor veel assets is het technisch potentieel (niveau 2) slechts gedeeltelijk onderzocht en ontbreekt nog inzicht in het economisch potentieel (niveau 3) en het realiseerbaar potentieel (niveau 4). Daarmee ontbreekt ook zicht op de mate

waarin aanvullend beleid daadwerkelijk kan bijdragen aan het versnellen van flexibiliteits-ontsluiting.

Tegen deze achtergrond worden zes overkoepelende aanbevelingen gedaan.

1. Verdiep het inzicht in economisch en realiseerbaar potentieel
Deze studie heeft zich primair gericht op niveau 1 (opgesteld vermogen) en deels niveau 2 (technisch potentieel). Voor de meest kansrijke assets uit deze studie ligt de volgende stap daarom bij het kwantificeren van het technisch potentieel en vervolgens het economisch potentieel en realiseerbaar potentieel. Daarbij verdienen aspecten zoals investeringskosten, marktprikkels, organisatorische barrières, contractvorming, digitalisering, aggregatie en toegang tot congestiemarkten nadrukkelijk aandacht. Mede op basis van die inzichten kan vervolgens worden bepaald welke beleidsinterventies het meest effectief zijn om flexibiliteit daadwerkelijk beschikbaar te maken.

2. Ontwikkel een structurele kennisbasis over de Nederlandse assetbase
Het ontbreken van een integraal overzicht van flexibiliteitsrelevante assets vormt een belangrijke belemmering voor beleidsontwikkeling, monitoring en prioritering van flexibiliteitsmaatregelen. Met name voor elektriciteit verbruikende assets ontbreekt een integraal nationaal overzicht. Aanbevolen wordt om een structurele nationale kennisbasis te ontwikkelen waarin informatie over de omvang, locaties, kenmerken en ontwikkeling van flexibiliteitsrelevante assets wordt samengebracht. Gezien het publieke belang van deze informatie ligt een regierol bij de rijksoverheid voor de hand. De feitelijke invulling kan plaatsvinden in samenwerking met partijen die reeds beschikken over relevante data- en kennisbronnen, zoals netbeheerders, CBS, RVO, installateurs, technisch dienstverleners en kennisinstellingen.

Daarbij kan worden verkend of de Ministeriële Regeling Gegevensuitwisseling Energiewet of vergelijkbare instrumenten kunnen worden benut om informatie over relevante verbruiksassets structureler beschikbaar te maken, vergelijkbaar met de wijze waarop gegevens over opwek- en opslagassets reeds beschikbaar zijn.

3. Breid de analyse uit naar aanvullende assets en flexibiliteitsbronnen
Vanwege beperkingen in databeschikbaarheid en doorlooptijd heeft deze studie zich moeten beperken tot een selectie van assets. Daarnaast konden voor enkele geselecteerde assetcategorieën geen betrouwbare nationale vermogens worden bepaald. Vervolgonderzoek naar onder andere elektrische aandrijfsystemen, vrieshuizen, overige commerciële power-to-heat toepassingen en andere vormen van opslag kan bijdragen aan een completer beeld van het nationale flexibiliteitspotentieel. Ook verdient verdere verbreding van de analyse naar warmtebuffers, moleculaire opslag en aanvullende vormen van regelbare opwek aandacht, omdat deze in specifieke situaties relevant kunnen zijn voor congestievermindering.

4. Ontwikkel een uniforme methodiek voor flexibiliteitspotentiëlen
Uit zowel de literatuurstudie als het uitgevoerde onderzoek blijkt dat bestaande flexibiliteitsstudies verschillende definities, uitgangspunten en niveaus van potentieel hanteren. Hierdoor zijn resultaten vaak lastig vergelijkbaar en ontstaat geen consistent nationaal beeld. De in dit rapport gehanteerde indeling in opgesteld vermogen, technisch potentieel, economisch potentieel en realiseerbaar potentieel biedt een eerste basis voor verdere standaardisatie. Verdere uitwerking van een uniforme methodiek kan bijdragen aan betere vergelijkbaarheid tussen studies en een meer consistente onderbouwing van beleidskeuzes.

5. Veranker flexibiliteit in toekomstige investerings- en elektrificatiebeslissingen

Een belangrijk deel van het toekomstige flexibiliteitspotentieel wordt bepaald door investeringskeuzes die vandaag worden gemaakt. Voor groeiende assetcategorieën zoals datacenters, elektrolysers, laadinfrastructuur, e-boilers en industriële warmtepompen wordt aanbevolen om flexibiliteit expliciet mee te nemen in ontwerp- en investeringsbeslissingen. Daarbij gaat het onder meer om aspecten zoals buffering, digitale aanstuurbaarheid, energiemanagement, lokale matching van opwek en verbruik en de mogelijkheid om op toekomstige flexibiliteitsdiensten aan te sluiten. Hierdoor kan worden voorkomen dat nieuwe vermogens worden gerealiseerd zonder rekening te houden met toekomstige congestie-opgaven en flexibiliteitsbehoeften.

De analyse laat zien dat warmtebuffering een cruciale randvoorwaarde vormt voor flexibiliteitsontsluiting binnen verschillende power-to-heat toepassingen. Het verdient daarom aanbeveling om bij toekomstige elektrificatie van industriële warmte expliciet aandacht te besteden aan warmtebuffering en thermische opslag.

6. Ontwikkel een asset- en contextgerichte benadering voor congestiebeleid
Tot slot laat dit onderzoek zien dat flexibiliteit van bedrijfsleven uiteindelijk wordt geleverd door concrete assets achter de meter. Tegelijkertijd zijn veel analyses en beleidsinstrumenten vandaag nog georganiseerd rond sectoren, contractvormen of marktproducten. Een meer assetgeoriënteerde benadering kan helpen om beter inzicht te krijgen in welke assets daadwerkelijk aanwezig zijn binnen congestiegebieden, welke flexibiliteitskenmerken zij hebben en waar beleidsinspanningen het meeste effect kunnen sorteren. Dit biedt de mogelijkheid om congestiebeleid sterker te verbinden aan de fysieke realiteit van het energiesysteem en daarmee gerichter te sturen op de assets die daadwerkelijk kunnen bijdragen aan congestievermindering.

Bijlage A

Betrokken partijen en personen

A.1 Betrokken partijen

We zijn zeer dankbaar voor het meedenken en de review door de volgende externe partijen:

Assetcategorie	Organisatie	Onderwerp
(Noodstroom)aggregaten	Stichting SCIOS	Bron van data en review
Gemalen en RWZI's	Unie van Waterschappen	Validatie aannames en review
	KienIA	Praktijkervaring met industriële automatisering
HVAC	Deerns	Technische randvoorwaarden voor flexibiliteit
E-boilers	S. Oxenaar en T. Butler	Randvoorwaarden voor flexibiliteit

A.2 Betrokken TNO Experts

We zijn zeer dankbaar voor het meedenken en de review door de volgende TNO experts:

Assetcategorie	Personen
Algemeen	Sebastiaan Hers, Aliene van der Veen, Rebecca Dowling
Walstroom	Jorrit Harmsen
WKK	Egon Janssen
Datacenters	Mente Konsman
Industriële warmtepompen en e-boilers	Herbert Zondag
Batterijen	Floris Uleman
Laadinfrastructuur	Maarten Verbeek
HVAC	Wouter Borsboom, Maarten van Schie
Elektrische aandrijfsystemen (andere assets)	Tim Speelman

Bijlage B

Framework literatuur

B.1 Onderbouwing van de gehanteerde niveaus van flexibiliteitspotentieel

Het begrip flexibiliteitspotentieel wordt in de literatuur op uiteenlopende manieren gebruikt. Daardoor zijn schattingen van flexibiliteit vaak moeilijk met elkaar te vergelijken. Een belangrijk inzicht uit de wetenschappelijke literatuur is dat potentieel niet uit één enkel getal bestaat, maar uit een opeenvolging van niveaus waarbij technische, operationele, economische en maatschappelijke beperkingen stapsgewijs worden meegenomen.

Voor vraagrespons (ook wel Demand Side Response, DSR) wordt deze gelaagdheid beschreven door Connolly et al. (2020), die onderscheid maken tussen verschillende categorieën van flexibiliteitspotentieel. Een vergelijkbare benadering komt terug in studies naar hernieuwbare energiepotentiëlen en energie-efficiëntie, waar doorgaans onderscheid wordt gemaakt tussen technisch, economisch en realiseerbaar potentieel. Deze studies benadrukken dat het technisch aanwezige potentieel slechts gedeeltelijk daadwerkelijk wordt benut omdat verschillende randvoorwaarden het praktisch inzetbare potentieel beperken.

In dit onderzoek wordt aangesloten bij deze internationaal gangbare benadering. Tegelijkertijd wordt het raamwerk aangepast aan de assetgeoriënteerde aanpak van dit onderzoek. Omdat de analyse start vanuit daadwerkelijk aanwezige installaties achter de meter, wordt het gebruikelijke begrip theoretisch potentieel vervangen door opgesteld vermogen. Daarmee ontstaat een hiërarchie die beter aansluit bij de beleidsvraag rond het ontsluiten van bestaande flexibiliteit in het Nederlandse bedrijfsleven.

B.1.1 Vier niveaus van flexibiliteit

Het flexibiliteitspotentieel wordt onderscheiden in vier opeenvolgende niveaus (**Figuur B.1**).

1. **Opgesteld vermogen**
   Het opgesteld vermogen betreft het totale geïnstalleerde elektrische vermogen van assets. Dit niveau vormt de fysieke bovengrens van het flexibiliteitspotentieel. Het zegt uitsluitend iets over de omvang van de aanwezige assetbase en nog niets over de feitelijke flexibiliteit. Niet iedere MW opgesteld vermogen is immers daadwerkelijk flexibel inzetbaar.

   Het opgesteld vermogen vervult in dit onderzoek dezelfde rol als het theoretisch potentieel in veel internationale potentieelstudies, maar is direct gekoppeld aan de daadwerkelijk aanwezige assetbase.

2. **Technisch potentieel**
   Het technisch potentieel betreft het deel van het opgestelde vermogen dat technisch en operationeel flexibel inzetbaar is. Bij de overgang van opgesteld vermogen naar technisch potentieel worden fysieke en operationele beperkingen meegenomen. Voorbeelden:

- een warmtepomp kan alleen worden afgeschakeld zolang het thermisch comfort behouden blijft;
- een RWZI moet blijven voldoen aan waterkwaliteitsnormen;
- een datacenter moet blijven voldoen aan beschikbaarheids- en betrouwbaarheidseisen;
- een e-boiler kan alleen flexibel opereren als voldoende warmtebuffering aanwezig is.

Het technisch potentieel wordt daarmee bepaald door eigenschappen van de asset zelf en de context waarin deze functioneert.

3. **Economisch potentieel**
   Het economisch potentieel betreft het deel van het technisch potentieel dat rendabel kan worden ontsloten onder gegeven marktcondities. Hierbij wordt rekening gehouden met:
   - investeringskosten;
   - operationele kosten;
   - inkomsten uit flexibiliteitsmarkten;
   - elektriciteitsprijzen;
   - nettarieven;
   - kosten van productieverstoring;
   - kosten van aanvullende automatisering en sturing.

   Een asset kan technisch volledig flexibel zijn, maar economisch niet aantrekkelijk om in te zetten.

   Een voorbeeld is een industriële warmtepomp die technisch flexibiliteit kan leveren, maar waarbij de financiële opbrengst onvoldoende is om eventuele extra operationele kosten of efficiëntieverliezen te compenseren.

4. **Realiseerbaar potentieel**
   Het realiseerbaar potentieel betreft het deel van het economisch potentieel dat in de praktijk daadwerkelijk wordt ontsloten. Naast technische en economische factoren spelen hier aanvullende barrières een rol, zoals:
   - beperkte kennis bij bedrijven;
   - organisatorische belemmeringen;
   - gebrek aan vertrouwen;
   - contractuele beperkingen;
   - beschikbaarheid van dienstverleners;
   - marktrijpheid van oplossingen;
   - regelgeving;
   - transactiekosten.

   Dit niveau komt overeen met wat in de literatuur vaak wordt aangeduid als “*achievable potential”,* “*feasible potential*” of “*market potential*”. Het realiseerbaar potentieel is daarmee het deel van de flexibiliteit dat daadwerkelijk kan bijdragen aan het verminderen van netcongestie.

Literatuurbasis

Deze indeling is gebaseerd op en aangepast uit:

- Connolly et al. (2020), Review and assessment of the different categories of demand response potentials (met name figuur 3);

- Scholz et al. (2025), Methods for analysing renewable energy potentials in energy system modelling: A review;
- NREL/OSTI (2015), Estimating Renewable Energy Economic Potential in the United States;
- Nadel et al. (2004), The Technical, Economic, and Achievable Potential for Energy Efficiency in the United States;
- Brown et al. (2022), The Global Technical, Economic, and Feasible Potential of Renewable Electricity.

De belangrijkste inhoudelijke aanpassing is de vervanging van "theoretisch potentieel" door "opgesteld vermogen", passend bij de assetgeoriënteerde onderzoeksaanpak.

B.2 Positionering van dit onderzoek

Er is in de afgelopen jaren uitgebreid onderzoek gedaan naar flexibiliteit in het elektriciteitssysteem en de rol van bedrijven hierin. Deze studies hebben belangrijke inzichten opgeleverd, maar laten ook zien dat het huidige kennisbeeld gefragmenteerd is.

Nr.	Studie / rapport	Organisatie / jaar	Kernbijdrage	Relevantie voor dit onderzoek
1	Flexibele industrie en elektriciteitsschaarste	DNV (2020)	Inschatting van theoretisch flexibiliteitspotentieel (~3,4 GW) in industrie	Laat omvang potentieel zien (top-down)
2	Onderzoeksroadmap flexibiliteit	Netbeheer Nederland (2021)	Overzicht kennisvragen en onderzoeksagenda flexibiliteit	Positioneert kennislacunes (incl. bedrijvenflex)
3	Whitepaper industriële flexibiliteit	TKI Energie / Topsector Energie (2022)	Verkenning rol industrie bij flexibiliteit en integratie hernieuwbare energie	Inzicht in sectorale potentie en systeemrol
4	Elektrificatie in de Nederlandse industrie	CE Delft / Berenschot (2021–2022)	Analyse elektrificatieopties en implicaties voor flexibiliteit	Belangrijk voor Power-to-Heat en industriële assets
5	Oplossingen voor netcongestie bij bedrijven	CE Delft & Merosch / RVO (2024)	Analyse van concrete maatregelen en potentieel richting 2030	Inzicht in oplossingsrichtingen en beleidsopties
6	Flexibilisering elektriciteitsverbruik bedrijven en instellingen	RVO (2025)	Overzicht huidige status, barrières en beleidsopties	Belangrijkste referentie voor praktijkbarrières
7	Tijdsafhankelijke nettarieven grootverbruikers	CE Delft (2025)	Analyse van prijsprikkels en impact op flexibiliteit	Relevant voor economische ontsluiting flex
8	Potentie verduurzaming bedrijventerreinen	TNO (2024)	Kwantificatie energiegebruik en potentieën op bedrijventerreinen	Basis voor assetgeoriënteerde benadering

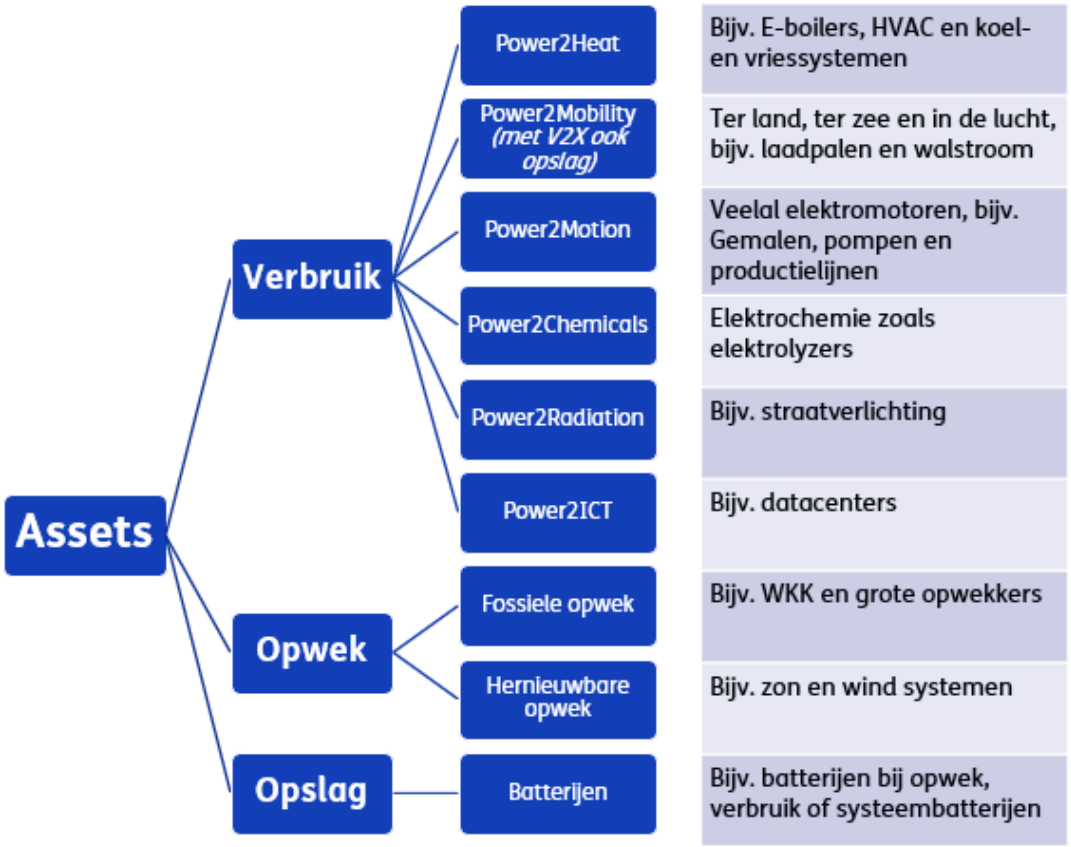
9	Flex Scan bedrijventerreinen (proof-of-concept)	TNO (2023)	Methodiek voor het identificeren van flexibiliteit op assetniveau	Directe methodologische basis voor dit rapport
10	Het ontsluiten van afnameflexibiliteit	Common Futures / KWA / EVC (2026)	Analyse van prikkels, barrières en sectorale verschillen	Actuele inzichten in realiseerbaarheid
11	Zoveel kan met lokale flex!	CE Delft (2026)	Kwantificatie van flexibiliteitspotentieel op lokaal niveau (o.a. bedrijven, mobiliteit en huishoudens) en bijdrage aan congestievermindering	Belangrijk voor inzicht in lokale toepasbaarheid en impact van flexibiliteit, met nadruk op ruimtelijke en temporele inzetbaarheid

Bijlage C

Onderzoek methode & scoping

C.1 Classificatie van assets

Figuur 5.2 geeft de hiërarchie weer die in deze studie wordt gehanteerd voor de classificatie van assets. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de hoofdcategorieën verbruik, opwek en opslag. Binnen deze hoofdcategorieën worden verschillende subcategorieën onderscheiden, waaronder specifieke assettypen vallen. Zo vallen binnen de hoofdcategorie verbruik onder meer de subcategorieën Power2Heat, Power2Mobility, Power2Motion, Power2Chemicals, Power2Radiation en Power2ICT. Onder de subcategorie Power2Heat vallen in deze studie bijvoorbeeld industriële e-boilers, warmtepompen, HVAC-systemen en koel- en vriessystemen. De figuur dient als conceptueel raamwerk voor de analyse en vormt geen uitputtend overzicht van alle mogelijke assettypen.



Figuur 5.2: Classificatie van assets binnen dit onderzoek, met hoofdcategorieën: verbruik, opwek en opslag.

C.2 Selectie van assets

Zoals beschreven in paragraaf 3.1, wordt in deze bijlage de motivatie voor selectie per asset toegelicht.

Gemalen
Gemalen zijn geselecteerd vanwege hun sterke concentratie binnen één sector, namelijk de waterschappen, en hun landelijke spreiding, waardoor zij een relatief homogene en sectorgebonden toepassing vormen. Dit maakt het mogelijk om flexibiliteitspotentieel beter en consistenter in te schatten, doordat de assets binnen één duidelijk afgebakend domein vallen. Daarnaast vertegenwoordigen gemalen gezamenlijk een relatief gemiddeld opgestelde vermogen op nationaal niveau.

RWZI
RWZI's zijn geselecteerd vanwege hun rol als zelfstandig aanstuurbare assets met een duidelijk en relatief afgebakend proces. Net als gemalen zijn ze geconcentreerd binnen waterschappen, wat een gerichte analyse mogelijk maakt, terwijl het gemiddelde opgesteld vermogen voldoende is om relevant flexibiliteitspotentieel te onderzoeken.

Vriessystemen
Vriessystemen zijn opgenomen vanwege hun brede toepassing en goede landelijke spreiding. Daarnaast is flexibiliteit inherent aan het systeem door de thermische inertie, waardoor elektriciteitsvraag in de tijd kan worden verschoven zonder directe impact op de primaire functie.

HVAC-systemen
HVAC-systemen zijn geselecteerd vanwege hun brede aanwezigheid in zowel utiliteitsbouw als industrie en hun significante aandeel in het elektriciteitsverbruik. Door de thermische massa van gebouwen bieden deze systemen mogelijkheden voor vraagflexibiliteit via tijdelijke verschuiving van verwarmings- en koelvraag.

Datacenters
Deze asset is geselecteerd omdat verwacht wordt dat het opgesteld vermogen van datacenters de komende jaren verder (sterk) zal toenemen. Daardoor is het relevant om te analyseren in hoeverre deze asset flexibel ingezet kan worden.

Datacenters bieden beperkte maar relevante flexibiliteit in met name de koeling en, in beperkte mate, de IT-belasting, waardoor binnen strikte operationele randvoorwaarden enige verschuiving in elektriciteitsverbruik mogelijk is.

De colocatie met andere interessante assets (batterijen en opwek) wordt los behandeld.

E-boilers
E-boilers zijn geselecteerd vanwege de verwachte sterke groei in toepassing en hun flexibiliteit in elektriciteitsverbruik voor warmteproductie. Het elektriciteitsverbruik is relatief goed stuurbaar, waardoor op- en afregelen mogelijk is zonder directe impact op de warmtelevering, mits er voldoende buffercapaciteit of alternatieve warmtevoorziening aanwezig is.

In de praktijk worden e-boilers vaak hybride toegepast, bijvoorbeeld in combinatie met gasketels, restwarmte of warmtebuffers. Hierdoor kan de elektriciteitsafname flexibel worden ingezet zonder de continuïteit van de warmtelevering te beperken. Daarnaast vormen e-boilers

een representatief voorbeeld van de elektrificatie van industriële en utiliteitswarmte, met een verwachte sterke groei in de komende jaren.

Industriële warmtepompen
Warmtepompen zijn opgenomen vanwege de verwachte groei in de energietransitie en hun rol in elektrificatie van warmte. In combinatie met warmtebuffers bieden ze mogelijkheden voor flexibiliteit door het verschuiven van elektriciteitsvraag in de tijd.

Walstroom zeevaart
Walstroom voor zeevaart is geselecteerd vanwege het hoge aansluitvermogen per individuele scheepsaansluiting, waardoor per aansluiting een relatief grote en geconcentreerde elektriciteitsvraag kan ontstaan binnen havengebieden. Daarnaast is sprake van een verwachte verdere uitrol en groei in opgesteld vermogen van walstroompunten.

Walstroom binnenvaart
Walstroom voor binnenvaart is opgenomen vanwege de groeiende uitrol en de vergelijkbare maar kleinschaligere toepassing ten opzichte van zeevaart. Daarnaast hebben deze assets een grotere spreiding dan walstroom voor zeevaart.

Laadinfrastructuur
Laadinfrastructuur is geselecteerd vanwege het zeer hoge (en groeiende) opgesteld vermogen. Door het sturen van laadmomenten en -vermogen kan de vraag aanzienlijk worden verschoven in de tijd, waarmee deze asset een relatief grote potentie heeft om flexibel ingezet te worden.

Waterstofelektrolysers
Elektrolysers zijn opgenomen vanwege hun potentieel om elektriciteitsverbruik flexibel in de tijd te sturen. Hierdoor kunnen zij bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie en het benutten van momenten met een groot aanbod van elektriciteit. Door de verwachte sterke groei van elektrolysecapaciteit neemt de relevantie van deze assetcategorie de komende jaren verder toe.

Aandrijving productielijnen
Aandrijfsystemen in productielijnen zijn geselecteerd vanwege hun dominante aandeel in het elektriciteitsverbruik van de industrie (circa 70%). Daarnaast zijn deze systemen breed aanwezig in uiteenlopende sectoren en is het flexibiliteitspotentieel nog relatief beperkt onderzocht, wat kennisopbouw relevant maakt.

Warmtekrachtkoppelingen (WKKs)
WKK’s zijn geselecteerd vanwege het relatief grote opgestelde vermogen, de regelbare elektriciteitsproductie en de brede geografische spreiding over het land. Aangezien het regelbare opwek betreft, kunnen WKK’s flexibel worden ingezet en onder de juiste prikkels bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie.

Wind op land
Op verschillende locaties in Nederland blijkt wind op land een rol te kunnen spelen in het inpassen van nieuw verbruik, bijvoorbeeld via cable pooling of via een groeptransportovereenkomst (gTO). Daarmee speelt deze asset een andere rol dan de andere assets. Het gaat niet zozeer om afroepbare flexibiliteit, maar om de potentie van het lokaal/regionaal matchen van opwek en verbruik. Wanneer wind op land lokaal contractueel aan verbruik gekoppeld kan worden, dan hoeft dat verbruik niet meer door het elektriciteitsnet geleverd hoeft te worden en zal een dergelijke constructie dus congestieverzachtend werken.

Batterijen

Batterijen zijn opgenomen vanwege hun vermogen om elektriciteit tijdelijk op te slaan en op een later moment weer beschikbaar te maken. Hierdoor vormen zij een directe bron van flexibiliteit voor het elektriciteitssysteem. Daarnaast groeit het opgestelde batterijvermogen in Nederland snel, waardoor de relevantie van deze assetcategorie verder toeneemt.

Bijlage D

Verdere informatie voor geselecteerde assets

Deze bijlage geeft, waar relevant, een nadere toelichting op de gebruikte databronnen, aannames en berekeningsstappen per asset. Waar van toepassing wordt toegelicht hoe resultaten zijn geëxtrapoleerd, hoe bandbreedtes zijn afgeleid en hoe is omgegaan met onzekerheden in de beschikbare data. Voor een deel van de assets zijn deze methodische keuzes al in de hoofdtekst beschreven; deze bijlage bevat daarom alleen aanvullende informatie waar verdere onderbouwing nodig is.

D.1 Verbruik

Hieronder worden de verbruiksassets uitgewerkt.

D.1.1 Rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's)

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte totaal opgestelde elektrisch vermogen van rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) in Nederland bedraagt circa 200 MW. Dit vermogen is afgeleid op basis van jaarlijkse gegevens over energieverbruik bij RWZI's uit de database van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), specifiek de dataset Zuivering van stedelijk afvalwater; energieproductie en energieverbruik (CBS, 2025d). Deze dataset bevat cijfers over het totale elektriciteitsverbruik en de energieproductie van RWZI's die in beheer zijn bij de waterschappen in Nederland.

Het opgestelde vermogen van RWZI's is niet direct beschikbaar en is daarom afgeleid van het totale jaarlijkse elektriciteitsverbruik. Hiervoor is het jaarverbruik omgerekend naar het opgesteld elektrisch vermogen, waarbij aannames zijn gedaan over het aantal vollasturen van RWZI's. Uit de belastingduurkromme van RWZI's volgt dat het piekvermogen circa 2,1 keer het gemiddeld vermogen bedraagt, overeenkomend met ongeveer 4.200 vollasturen per jaar. Dit aantal vollasturen is gebruikt om het jaarlijks elektriciteitsverbruik om te rekenen naar opgesteld vermogen.

Op basis van de historische ontwikkeling in het elektriciteitsverbruik en de bijbehorende trendlijn blijft het opgestelde vermogen in de komende jaren naar verwachting in dezelfde orde van grootte. Ook in 2027 komt dit uit op circa 200 MW.

D.1.2 Gebouwgebonden koeling en verwarming

De volgende stappen in de berekening zijn gezet.

Stap 1: selectie gebruiksfuncties

Alle BAG gebruiksfuncties zijn meegenomen in de inventarisatie, met uitsluitsel van industriehallen, cellencomplexen en overig gebruiksfuncties. Deze gebruiksfuncties worden niet verwarmd voor personen en vallen niet onder de energielabelplicht. Dit betekent dat het veelal om grote gebouwen gaat (minimaal 1000 m^2) waar grotere warmtepompen voor komen.

Stap 2: inschatting van opgestelde vermogen
In de verrijkte BAG (TNO, 2025d) is op pandniveau het benodigde opgestelde vermogen van een warmtepomp bepaald met behulp van de kentallen over de warmtevraag. Deze kentallen worden ook gebruikt in de Startanalyse van PBL en zijn te vinden in onderstaand tabel. Voor de warmtevraag per gebruiksfunctie is gebruikt gemaakt van kentallen voor warmtevraag exclusief tapwater. Een COP van 2,6 is aangenomen (RVO, 2022).

Er is in de inschatting van opgesteld vermogen vanuit gegaan dat het in de situaties met tweede verwarmingstoestel gaat om een gasketel om de pieken op te vangen of een back-up gasketel. Omdat hier geen data over bekend is, is hier niet voor gecorrigeerd.

Tabel D.1: Thermische ruimteverwarming vraag kentallen utiliteitsbouw (TNO, 2025a).

Gebruiksfunctie utiliteit	Ruimteverwarming vraag per oppervlakte (kW/m²)	Warm tapwater vraag per oppervlakte (kW/m²)
Woon	0,03	*
Kantoor	0,06	0,04
Winkel	0,03	0,04
Gezondheidszorg	0,08	0,04
Logies	0,06	0,04
Onderwijs	0,03	0,04
Industrie	0,03	0,04
Bijeenkomst	0,08	0,04
Sport	0,06	0,04
Overig	0,01	0,04
Cel	0,09	0,04

Stap 3: corrigeren voor adoptiegraad van warmtepompen per gebruiksfunctie
De energielabeldatabase[25] geeft informatie over het aandeel warmtepompen in de utiliteitsbouw met peildatum eind 2024, deze data is afkomstig uit achtergrondtabellen van een TNO studie (TNO, 2025b). Ook Panteia rapporteert hier jaarlijks over (Panteia, 2025). De cijfers per gebruikfsunctie uit beide databronnen zijn vergelijkbaar.

Tabel D.2: adoptiegraad warmtepompen per gebruiksfunctie (energielabeldatabase bewerking van (TNO, 2025b).

bijeenkomst	gezondheidszorg	kantoor	logies	onderwijs	sport	winkel
31%	39%	23%	11%	20%	15%	15%

Stap 4: aanname voor groeipercentage voor begin 2027
Tussen 2024 en 2025 zijn er 17% meer warmtepompen verkocht, hetzelfde cijfer is aangenomen voor de groei tussen 2024 en 2025 en tussen 2025 en 2026 (CBS, 2025a).

Stap 5: inschatting minimaal & maximaal geplaatst vermogen

[25] In de energielabeldatabase staat de input data van de energielabels van utiliteitsgebouwen in Nederland

De minimale inschatting is gebaseerd op geen bijplaatsing t.o.v. begin 2025. Voor de maximale inschatting is een groei aangenomen van 17% voor de jaren 2025 en 2026. Gemiddelde is genomen tussen minimum en maximum.

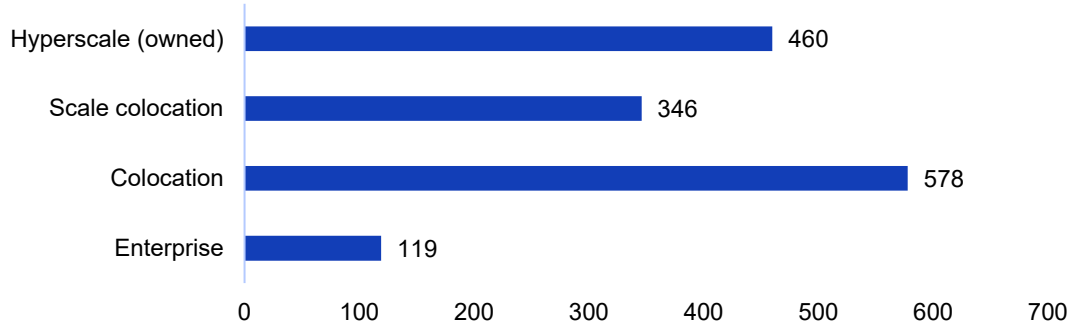
Tabel D.3: Opgesteld vermogen in 2027

	Minimaal	Gemiddeld	Maximaal
Opgesteld vermogen in 2027 [MWe]	1.974	2.338	2.703

Stap 6: validatie
De CBS cijfers zijn de belangrijkste bron voor validatie. Het thermisch opgestelde vermogen van utiliteitsbouw, kassen en stallen is volgens CBS eind-2024, omgerekend naar bijna 2700 MW_e, (CBS, 2026), waarvan circa 20% uit bodem- of waterwarmtepompen. Het CBS maakt geen onderscheid naar gebruiksfuncties. De minimale inschatting is lager dan de CBS cijfers, echter de CBS rapporteert inclusief de kassen en stallen die in deze berekening niet zijn meegenomen. De CBS cijfers zijn dus in lijn met de berekeningen in deze studie.

D.1.3 Datacenter

Stap 1
Het opgesteld vermogen voor IT power supply is de basis, zoals gerapporteerd door de brancheverenigingen (Dutch Data Center Association, 2025). Hier zijn kleine datacenters met minder dan 50 kW IT power Supply niet in meegenomen.



Figuur 5.3: IT Power (MW) volume in Nederland per type datacenter (Dutch Data Center Association, 2025).

Stap 2
Het opgestelde vermogen van 2024 en 2025 en de verwachtingen voor groei van IT power supply zijn te vinden voor hyperscales, colocaties en scale locaties (Dutch Data Center Association, 2025). Het vermogen voor enterprises is aangenomen gelijk te blijven tussen 2025 en 2027. Tussen eind 2025 en eind 2026 is de verwachting dat er een nieuwe hyperscale opent, en dat de colocaties en scale locaties uitbreiden.

Stap 3
Omrekenen van IT power supply naar totaal opgesteld vermogen. De aanname dat ongeveer 20 – 30% van het stroomgebruik in een datacenters ingezet wordt voor koeling (KWA, CF, EV, 2026). Het vermogen en energieverbruik worden met factor 25% omgerekend.

Stap 4
Het opgestelde elektrische vermogen in 2027 wordt ingeschat op minimaal 2.092 MW, maximaal 2.344 MW en gemiddeld 2.218 MW. Waarbij het minimale vermogen refereert naar het vermogen eind 2025 en het maximale is gebaseerd op de geplande uitbreidingen van datacenters zoals beschreven in stap 2. De opsplitsing naar type datacenter is te vinden in **Tabel D.4.**

Tabel D.4: Opgesteld vermogen per type datacenter bewerking op (State of the Dutch Data Centers 2025 - Dutch Data Center Association).

Categorie (aantal centers)	Minimaal (MW)	Maximaal (MW)	Gemiddeld (MW)
Datacenters totaal	**2.092**	**2.344**	**2218**
Hyperscale (3)	613	660	637
Enterprise (338)	159	159	159
Colocatie (178)	827	917	872
Scale colocatie (13)	493	608	551

D.1.4 Industriële e-boiler

Stap 1
Data verzamelen uit SDE++ subsidie aanvragen voor industriële e-boilers (scope open & gesloten systeem) in 2021 t/m 2023 uit (RVO, 2025). Deze cijfers zijn aangevuld met de beschikking uit 2024 (RVO, 2025). Voor 2020 is gebruik gemaakt van de cijfers over het nationale totaal uit de rapportage (RVO ism TNO, 2026). Hierin staat het aangevraagde thermische vermogen, type systeem, jaar van aanvraag en jaar van realisatie per bedrijf. We voeren een handmatige check uit op foutieve waarden en dubbelingen.

Stap 2
Per bedrijf de SBI hoofdsector nagaan in openbare databases.

Stap 3
De informatie over jaar van realisatie loopt vaak achter. Daarom vullen we de informatie aan met nieuwsartikelen over het plaatsen van een e-boiler van de bedrijven middels CoPilot en handmatige controle.

Stap 4
Inschatting van het minimaal vermogen, komt overeen met het huidig geplaats vermogen. De inschatting van het maximale vermogen is het minimale vermogen plus de helft van het nog te realiseren vermogen. Voor het gemiddelde is aangenomen is het minimale vermogen plus een kwart van het te realiseren vermogen wordt geplaatst. Het elektrische vermogen in 2027 wordt ingeschat op minimaal 500 MW, maximaal 700 MW en gemiddeld 600 MW.

Stap 5
Omrekenen van thermisch naar elektrisch vermogen met rendement van 99%, op basis van warmtelevering op 180 tot 210 °C (PBL, 2024).

D.1.5 Industriële warmtepomp

Stap 1
Data verzamelen uit SDE++ subsidie aanvragen voor industriële warmtepompen (scope open & gesloten systeem) in 2021 t/m 2023 uit (RVO, 2025). Deze cijfers zijn aangevuld met de

beschikking uit 2024 (RVO, 2025). Voor 2020 is er beperkt informatie beschikbaar. In de subsidieaanvraag staat het aangevraagde thermische vermogen, type systeem, jaar van aanvraag en jaar van realisatie per bedrijf, Zowel industriële warmtepompen in een open en gesloten systeem worden meegenomen. We voeren een handmatige check uit op foutieve waarden en dubbelingen.

- Note: voor de aanvragen uit 2020 is op basis van de subsidiebedragen (Hezelburcht, 2021) en informatie uit de RVO rapportage (RVO ism TNO, 2026) een inschatting gedaan van het gerealiseerde vermogen. Dit werd namelijk niet gerapporteerd door RVO.

Stap 2
Per bedrijf de SBI hoofdsector nagaan in openbare databases.

Stap 3
De informatie over jaar van realisatie loopt vaak achter. Daarom voeren we een check uit op nieuwsartikelen van de bedrijven met CoPilot en handmatige controle.

Stap 4
Inschatting van minimaal vermogen, komt overeen met het huidig geplaatst vermogen. De inschatting van het maximale vermogen is het minimale vermogen plus de helft van het nog te realiseren vermogen. Voor het gemiddelde is aangenomen is het minimale vermogen plus een kwart van het te realiseren vermogen wordt geplaatst. Het elektrische vermogen in 2027 wordt ingeschat op minimaal 6 MW, maximaal 12,5 MW en gemiddeld 9 MW.

Stap 5
Omrekenen van thermisch naar elektrisch vermogen met een COP van 4,1

D.1.6 Walstroom (zeevaart)

Het ingeschatte totale opgestelde vermogen voor walstroomvoorzieningen voor de zeevaart in Nederland bedraagt circa 265 MW in 2027. Deze inschatting is gebaseerd op:

1. De walstroominventarisatie van Royal HaskoningDHV (2024), die inzicht biedt in het aanwezige en geplande walstroomvermogen in Nederlandse zeehavens in 2023
2. De prognose van Netbeheer Nederland (2025) dat in 2030 circa 379 MW aan walstroomvermogen benodigd zal zijn voor Nederlandse zeehavens

Uit de walstroominventarisatie van Royal HaskoningDHV (2024) volgt een vermogen van circa 116 MW aan bestaande en geplande walstroompunten in Nederlandse zeehavens. Hoewel de inventarisatie niet voor alle operationele walstroompunten een vermogen rapporteert, biedt zij het meest complete beschikbare overzicht van walstroomprojecten in Nederlandse zeehavens. Waar de studie een bandbreedte voor het vermogen van walstroom per terminal geeft, is in deze analyse uitgegaan van het gemiddelde van deze bandbreedte. Deze inventarisatie vormt het beginpunt voor de extrapolatie naar 2027.

Aangezien de inventarisatie enkele jaren oud is, zijn de resultaten geëxtrapoleerd richting 2027. Netbeheer Nederland (2025) heeft een prognose gemaakt van het benodigde walstroomvermogen in Nederlandse zeehavens in 2030. Deze inschatting bedraagt 379 MW in 2030 (**Tabel D.5**).

Uitgaande van een gefaseerde groei van het opgestelde vermogen tussen 2023 en 2030, wordt aangenomen dat jaarlijks een gelijke hoeveelheid vermogen wordt toegevoegd. Het opgestelde vermogen neemt daarbij toe van circa 116 MW in 2023 naar circa 379 MW in 2030. Dit komt

neer op een toename van circa 267 MW over zeven jaar, oftewel ongeveer 38 MW per jaar. Op basis van deze jaarlijkse groei wordt het opgestelde vermogen in 2027 geschat op circa 265 MW.

Tabel D.5: Verwachting walstroomvermogen in 2030 op basis van overslagvolume in Nederlandse zeehavens (Netbeheer Nederland, 2025).

Havengebied	Overslag 2023 (kiloton)	Aandeel (%)	Inschatting walstroomvermogen 2030 (MW)
Groningen Seaports	14.100	2,29	8,67
Amsterdam	63.000	10,24	38,77
Rotterdam	438.800	71,31	270,00
Overige zeehavens	33.500	5,44	20,60
Zeeland Seaports	65.900	10,72	40,59
Totaal	**615.300**	**100**	**378,63**

D.1.7 Walstroom

Op basis van de Quickscan Walstroom (ElaadNL, 2023) wordt voor de binnenvaart uitgegaan van 1.437 schepen die in 2030 dagelijks gebruikmaken van walstroom, met een gemiddeld benodigd vermogen van 5 kW per schip en een gemiddelde bezetting van 8 uur per dag. Dit resulteert in een jaarlijkse elektriciteitsvraag van circa 21 GWh (ElaadNL, 2023). Uitgaande van 2.920 vollasturen per jaar (8 uur per dag) correspondeert dit met een equivalent vermogen van circa 7 MW in 2030.

D.1.8 Laadinfrastructuur wegmobiliteit (<50 kW)

Stap 1
Openbare registraties van aantal laadpunten naar vermogensklasse zijn geraadpleegd. Dit is beschikbaar van 2019 t/m 2025. Het opgestelde vermogen is bepaald met het RVO dashboard van laadinfrastructuur in Nederland (RVO, 2026). In dit dashboard wordt het aantal laadpunten gemonitord en dit is geëxtrapoleerd naar 2027.

Stap 2
Per vermogensklasse meest voorkomende vermogen bepalen, aan de hand van expert inzicht.

Meest voorkomende vermogens per vermogensklasse:

	1 kW - 3.9 kW	4 kW - 11 kW	12 kW - 22 kW	22 kW - 49 kW
Meest voorkomende vermogen	3	11	22	24

Stap 3
Groeipercentage per jaar berekenen van de verschillende vermogensklassen. De aanname dat er een lineaire trend is, is visueel beoordeeld. De volgende groeipercentages zijn aangenomen. Het groeipercentage is toegepast om de groei tussen december 2025 en 2026 te bepalen.

Groeipercentage per jaar:

	1 kW - 3.9 kW	4 kW - 11 kW	12 kW - 22 kW	22 kW - 49 kW
Groeipercentage per jaar	-27%	26%	30%	18%

Stap 4
Totaal aantal laadpunten is berekend en omgerekend naar totaal vermogen per vermogensklasse voor begin 2027. Voor het minimale vermogen is de laatste peildatum aangehouden. Voor het maximale vermogen is de trend van de afgelopen jaren doorgetrokken.

Vermogen per vermogensklasse in kW_e:

	1 kW - 3.9 kW	4 kW - 11 kW	12 kW - 22 kW	22kW - 49 kW	
Totaal vermogen per vermogensklasse (minimaal)	1185	1407934	1770076	8352	
Totaal vermogen per vermogensklasse (maximaal)	929	1.701.816	2.271.533	17.234	

Stap 5: Totalen
Het maximum, minimum en het gemiddelde zijn weergegeven in onderstaand tabel. Het minimale vermogen is het huidige opgestelde vermogen (maart 2026), namelijk 3,2 GW. Het maximale verwachtte vermogen voor 2027 is 4 GW.

Opgesteld vermogen begin 2027:

Indicator	Totaal P < 50 [MW]	Aanname
maximaal	3.992	aanname: doortrekken groei van 2019-2026
minimum	3.188	aanname: laatste peildatum dataverzameling (maart 2026)
gemiddeld	3.590	aanname: gemiddelde minimale en maximale

Stap 5: Validatie
Een validatie bron is monitoring op basis van EcoMovement. Hier gaat het om 2.711.847 kW en om 194,086 aantal AC laadpunten publiek toegankelijk eind 2025 (ZEV transition council, 2025). Deze cijfers voor aantal laadpunten zijn vergelijkbaar in 2025 (194 duizend laadpunten versus 203 duizend laadpunten in deze studie). En 3,1 GW in deze studie versus 2,7 GW uit de EcoMovement cijfers.

D.1.9 Laadinfrastructuur wegmobiliteit (50 =< P =< 150 kW)

Stap 1

Aantal snellaadpunten naar vermogensklasse voor licht vervoer. Beschikbaar van 2019 t/m 2025. Het opgestelde vermogen is bepaald met het RVO dashboard van laadinfrastructuur in Nederland (RVO, 2026).

Stap 2
Meest voorkomende vermogen snellaadpunten en zwaar vervoer, vastgesteld met expert inzicht.

Meest voorkomende vermogens per vermogensklasse voor snellaadpunten:

	50 t/m 100 kW	101 t/m 150 kW
Meest voorkomende vermogen	50	150

Meest voorkomende vermogens per vermogensklasse voor zwaar vervoer:

	t/m 22 kW	23kW - 43 kW	44kW - 100 kW	101kW - 150 kW
Meest voorkomende vermogen	22	24	50	150

Stap 3
Omrekenen naar vermogen en groei doortrekken (obv lineare trend).

	t/m 22 kW	23kW - 43 kW	44kW - 100 kW	101kW - 150 kW
Meest voorkomende vermogen	22	24	50	150

Stap 4: correctie voor minimaal vermogen
Om het minimale vermogen te bepalen is een correctie toegepast omdat niet alle laadpunten tegelijkertijd op vol vermogen kunnen laden, omdat ze beperkt worden door het vermogen van de power units. Een factor van 57% is aangenomen, gebaseerd op het gemiddelde over 6 laadstations in Nederland uit de Living Lab Heavy Duty laadpleinen (TNO, 2025c).

Stap 5: depot laden
Het depot laden bij bedrijventerreinen is separate opgenomen. Er is aangenomen dat al het depot laden plaatsvindt op private laadpunten en dat het vermogen tussen de 50 en 150 kW is. De inschatting zijn gebaseerd op de analyse voor 2020 en 2030 en geïnterpoleerd (TNO, 2025b).

Prognose opgesteld vermogen depot laden op bedrijventerreinen [MW_e]:

	2020	2030	Interpolatie: 2027
Elektrische bestelwagens	3	483	243
Elektrische bakwagens	0	156	78
Elektrische trekker-opleggers	0	711	355,5

Stap 6: sommeren
Het minimaal vermogen is gebaseerd op het gecorrigeerde vermogen voor de grootte van de power unit. Het maximaal vermogen is hier niet voor gecorrigeerd. Daartussen is het gemiddelde genomen.

	Minimaal vermogen 50 =< P =< 150 [MW]	Gemiddeld vermogen 50 =< P =< 150 [MW]	Maximaal vermogen 50 =< P =< 150 [MW]
Snelladen	280	380	490
Publiek & semipubliek zwaar vervoer	10	20	30
Depot laden	390	530	680
Totaal	**680**	**940**	**1.190**

D.1.10 Laadinfrastructuur wegmobiliteit >150 kW

Stap 1: aantal snellaadpunten naar vermogensklasse voor licht vervoer.
Het huidige aantal snellaadpunten is beschikbaar van 2019 t/m 2025, en is bepaald met het RVO dashboard van laadinfrastructuur in Nederland (RVO, 2026).

Stap 2: meest voorkomende vermogen snellaadpunten en zwaar vervoer, vastgesteld met expert inzicht

Meest voorkomende vermogens per vermogensklasse voor snellaadpunten:

	151 t/m 250 kW	251 t/m 350 kW	>= 350kW
Meest voorkomende vermogen	200	325	350

Meest voorkomende vermogens per vermogensklasse voor zwaar vervoer:

	151kW - 250 kW	251kW - 350 kW	351kW - 500 kW	500 kW+
Meest voorkomende vermogen	200	325	350	500

Stap 3: omrekenen naar vermogen en groei doortrekken (obv lineare trend)
De groei is berekend over de periode 2019 t/m 2025, op basis van de RVO dashboard van laadinfrastructuur in Nederland (RVO, 2026).

Vermogens-klasse	151kW - 250 kW	251kW - 350 kW	351kW - 500 kW
Groeipercentage	106%	123%	137%

Stap 4: correctie minimaal vermogen
Om het minimale vermogen te bepalen is een correctie toegepast omdat niet alle laadpunten tegelijkertijd op vol vermogen kunnen laden, omdat ze beperkt worden door het vermogen van de power units. Een factor van 57% is aangenomen, gebaseerd op het gemiddelde over 6 laadstations in Nederland uit de Living Lab Heavy Duty laadpleinen (TNO, 2025c).

Stap 5: sommeren

Het minimaal vermogen is gebaseerd op het gecorrigeerde vermogen voor de grootte van de power unit. Het maximaal vermogen is hier niet voor gecorrigeerd. Daartussen is het gemiddelde genomen.

Voor de minimale inschatting van het opgestelde vermogen is een correctiefactor toegepast om rekening te houden met de beperkingen op het vermogen voor de power units. Voor de maximale inschatting is deze niet toegepast

	Minimaal vermogen > 150 kW [MW]	Gemiddeld vermogen > 150 kW [MW]	Maximaal vermogen > 150 kW [MW]
Snelladen	1.420	1.950	2.480
Publiek & semipubliek zwaar vervoer	320	430	550
Totaal	1.740	2.380	3.030

D.1.11 Waterstofelektrolysers

Berekeningsstappen opgesteld vermogen

Voor het bepalen van het opgestelde vermogen is gebruikgemaakt van de database voor waterstofprojecten van de IEA (2025). Deze database wordt jaarlijks geactualiseerd en bevat een wereldwijd overzicht van waterstofprojecten, inclusief projecten in Nederland, met informatie over onder andere technologie, capaciteit en projectstatus.

Voor de bepaling van het huidige opgestelde vermogen is gefilterd op elektrolyseprojecten met de status operationeel. Om daarnaast een inschatting te maken van het opgestelde vermogen in 2027, is ook een project met een verwachte ingebruikname in 2027 meegenomen. Concreet betreft dit de Holland Hydrogen 1 (200 MW) van Shell (2025), die naar verwachting in 2026 operationeel zal zijn. Door deze projecten te combineren ontstaat een representatief beeld van het (verwachte) opgestelde elektrolyservermogen in Nederland richting 2027. Door deze projecten te combineren ontstaat een totaalbeeld van circa 220 MW opgesteld vermogen in 2027.

D.2 Opwek

Hieronder worden de opwekassets uitgewerkt.

D.2.1 (Noodstroom)aggregaten

Opgesteld vermogen

Het ingeschatte nationaal totaal opgestelde elektrisch vermogen in 2027 van (noodstroom)aggregaten (> 1 MW) in Nederland bedraagt circa 4.000 MW. Dit omvat zowel noodstroomaggregaten als reguliere aggregaten. Hiervan bestaat 2142 MW uit noodstroomaggregaten en 500 MW uit reguliere aggregaten. Voor het resterende deel (1369 MW) is op basis van de beschikbare gegevens niet eenduidig vast te stellen of het om noodstroomaggregaten of reguliere aggregaten gaat.

Dit vermogen is in dit onderzoek bepaald op basis van registratiegegevens van Stichting SCIOS. SCIOS registreert stookinstallaties zoals noodstroomaggregaten in het kader van

inspectie- en certificeringsverplichtingen, waarbij onder andere technische kenmerken zoals het thermische vermogen worden vastgelegd. Voor de bepaling van het totale opgestelde vermogen is gebruikgemaakt van de geregistreerde aggregaten in de SCIOS-database. Hierbij zijn de vermogens van individuele installaties geaggregeerd om tot een nationale schatting van het totale opgestelde vermogen te komen.

In de SCIOS-database wordt het vermogen van stookinstallaties gerapporteerd als het nominale thermische vermogen. Voor deze studie is dit omgerekend naar elektrisch vermogen met behulp van onderstaande formule. Hierbij is uitgegaan van een arbeidsfactor (cos φ) van 0,8 en een motorrendement van 45%. Het asrendement is daarbij verwaarloosd (circa 99%).

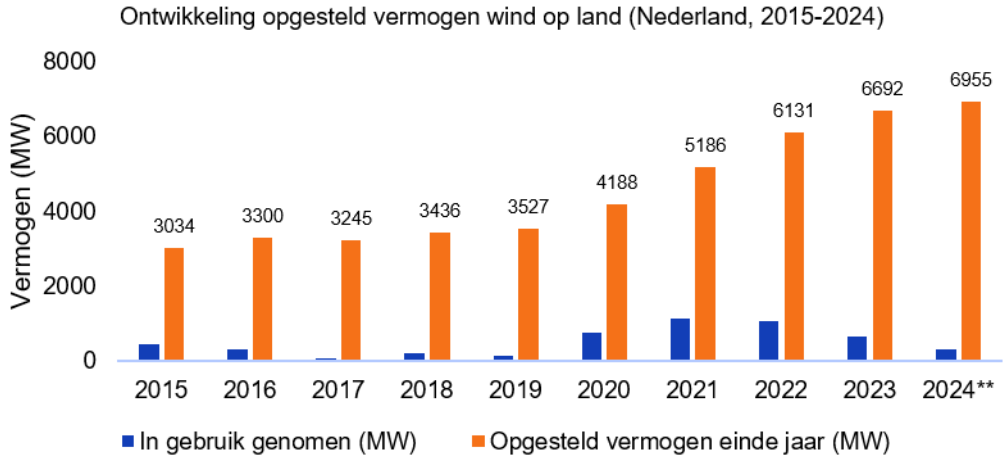
$$kW_e = cos\ phi * asrendement * motorrendement * kW_{th}$$

Uit de registratiegegevens van SCIOS volgt dat de in dit onderzoek meegenomen aggregaten uitsluitend dieselaggregaten betreffen. Het opgegeven vermogen betreft daarom uitsluitend dieselaggregaten. Er bestaan ook aggregaten op gas, maar die komen in Nederland niet veel voor (gesprek SCIOS).

Onzekerheidsmarge
De schatting van het totale opgestelde vermogen van dieselaggregaten kent een significante onzekerheidsmarge. Hoewel registratie van aggregaten in veel gevallen verplicht is, geven de registratiegegevens van de Stichting SCIOS naar verwachting geen volledig beeld van alle aanwezige installaties. Dit kan het gevolg zijn van onvolledige naleving van registratieverplichtingen of vertragingen in het actualiseren van registraties. Hierdoor is het aannemelijk dat het werkelijke totaal opgestelde vermogen hoger ligt dan de hier gerapporteerde waarde. Zo wordt rekening gehouden met een bandbreedte van +-50%.

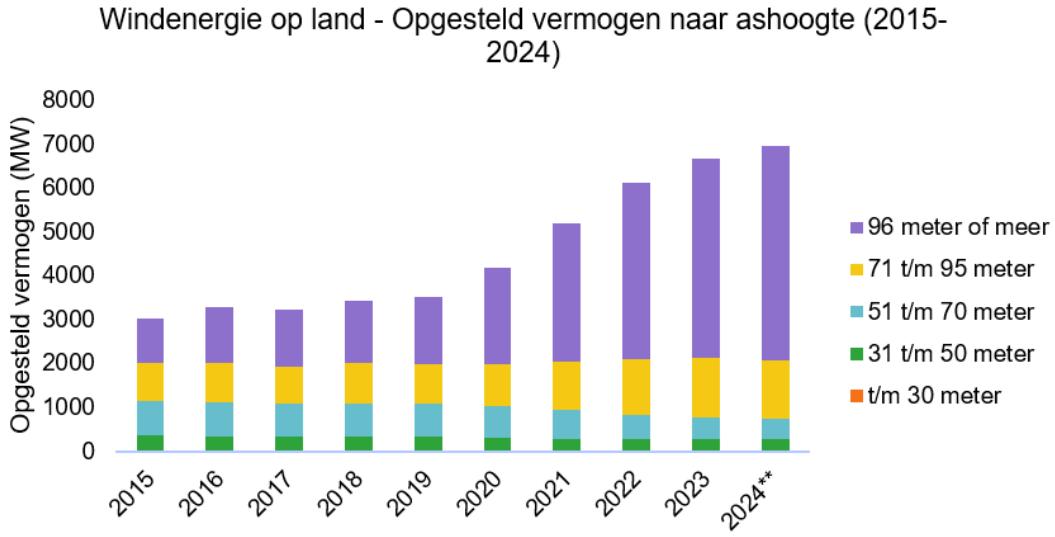
D.2.2 Wind op land (> 1MW)

Opgesteld vermogen
Eind 2024 stond in Nederland 6.955 MW windvermogen op land operationeel. Tussen 2020 en 2023 vond een periode van sterke groei plaats, waarin het opgestelde vermogen toenam van 4.188 MW (2020) tot 6.692 MW (2023). In 2024 viel de groei echter terug tot slechts 127 MW.



Figuur 5.4: Jaarlijks opgesteld vermogen en netto toename wind op land. (CBS, 2025c).

Van de 7 GW die eind 2024 operationeel was, kan worden aangenomen dat ~90% afkomstig is van turbines met een vermogen groter dan 1 MW. Dit volgt uit de verdeling naar turbinehoogte: bijna 70% van het vermogen turbines had in 2024 een ashoogte ≥96 meter, wat aangeeft dat het grootste deel van het nationale vermogen wordt geleverd door moderne, grotere turbines in de vermogensklasse 2–5 MW. Daarnaast had 20% een ashoogte van 71-96 m wat ook correspondeert aan een vermogensklasse >1 MW (Regionale Energie Strategie, 2025). Deze twee categorieën samen leiden tot een inschatting van ~6,3 GW wind op land met een vermogen groter dan 1 MW.



Figuur 5.5: Jaarlijks opgesteld vermogen wind op land, uitgesplitst naar ashoogte van de turbines. (CBS, 2025b).

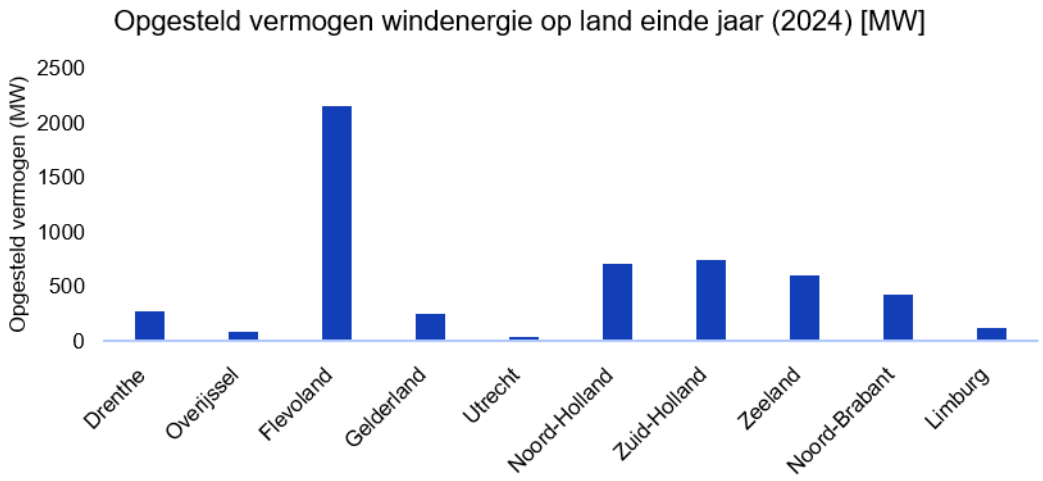
Extrapolatie naar 2027

Het is de verwachting dat de groei van wind op land richting 2027 beperkt en afvlakkend zal blijven (RVO, 2025), vanwege structurele vertragingen zoals het ontbreken van definitieve landelijke milieunormen, langdurige procedures bij de Raad van State, afnemend bestuurlijk draagvlak en de toenemende ruimtevraag van Defensie. De projectpijplijn bevestigt dit beeld: eind 2024 stond slechts 57 MW in *Bouw in opdracht* en 465 MW in *Bouw in voorbereiding*, waarvan maar een deel een onherroepelijke vergunning heeft. Hierdoor zal de groei tot en met 2027 waarschijnlijk niet boven enkele honderden megawatts uitkomen, waardoor het totaal opgestelde vermogen naar verwachting slechts licht stijgt tot ongeveer 7,1 –7,4 GW in 2027. Uitgaande van een vergelijkbare turbine-samenstelling als in 2024 (waarbij circa 90% van het vermogen afkomstig is van turbines >1 MW), kan voor 2027 worden aangenomen dat het grootste deel van de additionele capaciteit eveneens in de vermogensklasse >1 MW valt. Bij een totaal opgesteld vermogen van circa 7,1–7,4 GW in 2027 resulteert dit in een geschat opgesteld vermogen van ongeveer 6,4–6,7 GW wind op land >1 MW.

Geografische verdeling

De geografische verdeling laat een duidelijke concentratie zien in Flevoland, met circa 2,2 GW en daarmee veruit het grootste aandeel. Daarnaast hebben ook de kustprovincies Zuid-Holland, Noord-Holland en Zeeland relatief veel opgesteld vermogen (circa 600–750 MW). Dit

patroon hangt samen met de combinatie van gunstige windcondities, beschikbare ruimte en vroege ontwikkeling van grootschalige windparken[26].



Figuur 5.6: Opgesteld vermogen windenergie op land eind 2024 (CBS, 2025c).

D.3 Opslag

Hieronder wordt de opslagasset (in dit onderzoek alleen batterijen) uitgewerkt.

D.3.1 Batterij (BESS)

Opgesteld vermogen

Volgens het trendrapport Storage & Solar van DNE Research (2025) bedraagt de verwachte opslagcapaciteit van batterijen in het commerciële en utiliteitssegment circa 1,6 GWh in 2025. Hiervan bevindt zich naar verwachting circa 620 MWh in het commerciële segment en 980 MWh in het utiliteitssegment.

Groei richting 2027

Op basis van de projecties van DNE Research (2025) groeit de opslagcapaciteit in het bedrijfsleven – commercieel en utiliteit, exclusief residentieel – naar 5,3 GWh in 2027.

In 2026 neemt de opslagcapaciteit toe met 1.200 MWh, waarvan 650 MWh in het commerciële segment en 550 MWh in het utiliteitssegment. In 2027 volgt naar verwachting nog eens 2.500 MWh additionele opslagcapaciteit, bestaande uit 1.400 MWh in het commerciële segment en 1.100 MWh in het utiliteitssegment.

Dit resulteert in een cumulatieve opslagcapaciteit van circa 5,3 GWh (5.300 MWh) in 2027.

Tabel D.6: Overzicht jaarlijkse toevoeging batterijopslagcapaciteit op basis van (DNE Research, 2025).

Jaar	Commercieel (MWh)	Utiliteit (MWh)	Totale toevoeging (MWh)	Cumulatieve capaciteit eind jaar (MWh)
2025	620	980	-	1.600

[26] Compendium voor de Leefomgeving (2025) Windvermogen in Nederland, 1990-2024. Windvermogen in Nederland, 1990-2024 | Compendium voor de Leefomgeving

2026	650	550	1.200	2.800
2027	1.400	1.100	2.500	5.300

Voor de omzetting naar opgesteld vermogen is voor 2027 uitgegaan van opslagduren tussen 1 en 4 uur. Deze ruime bandbreedte weerspiegelt de onzekerheid over de toekomstige verhouding tussen opslagcapaciteit en vermogen. Enerzijds wordt hiermee rekening gehouden met de huidige markt, waarin opslagduren van circa 1-2 uur gebruikelijk zijn. Anderzijds wordt rekening gehouden met de verwachte ontwikkeling naar batterijen met langere opslagduren. De ruime bandbreedte sluit aan bij de vooruitzichten uit de European Market Monitor on Energy Storage (EMMES 10.0). Energy Storage NL (2026) duidt deze ontwikkeling als een verschuiving van circa 2-3 uur naar 3-4 uur opslagduur.

Toegepast op de ingeschatte opslagcapaciteit van 5.300 MWh resulteert dit in een bandbreedte van 1,3-5,3 GW in 2027. De relatief grote bandbreedte weerspiegelt de onzekerheid in een snelgroeiende batterijmarkt. De ondergrens is naar verwachting conservatief omdat wordt uitgegaan van een opslagduur van vier uur, terwijl de gemiddelde opslagduur waarschijnlijk lager ligt.

De Monitor Voorzieningszekerheid van TenneT (2026) schat dat in 2028 circa 4,5 GW aan batterijvermogen zal zijn opgesteld in de commerciële sector (exclusief huishoudens en vehicle-to-grid). Deze inschatting bevindt zich aan de bovenzijde van de bandbreedte aan opgesteld vermogen in deze studie, wat erop wijst dat de ondergrens waarschijnlijk conservatief is.

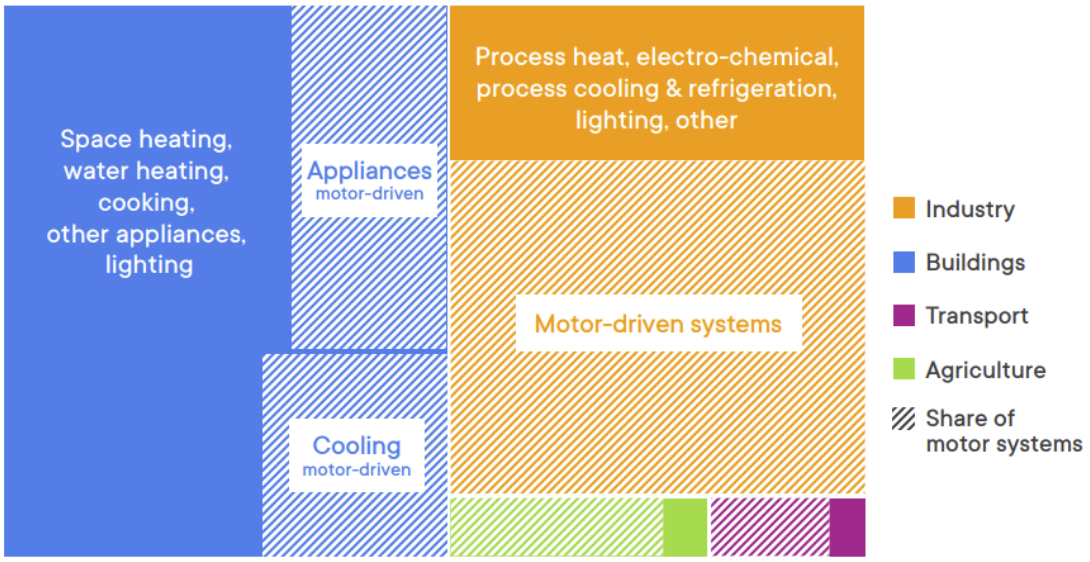
D.4 Andere assets

Voor de assets in deze bijlage kon geen voldoende betrouwbare inschatting van het nationaal opgesteld vermogen worden gemaakt. Zoals beschreven in paragraaf 3.2, hangt dit samen met het feit dat een deel van de benodigde data, waaronder de beoogde koppeling tussen energieverbruiksdata en SBI-subsectorclassificaties, door technische complicaties niet beschikbaar kwam tijdens het onderzoek. De tijdens het onderzoek opgedane inzichten worden desondanks in deze bijlage gepresenteerd.

D.4.1 Elektrisch aandrijfsysteem

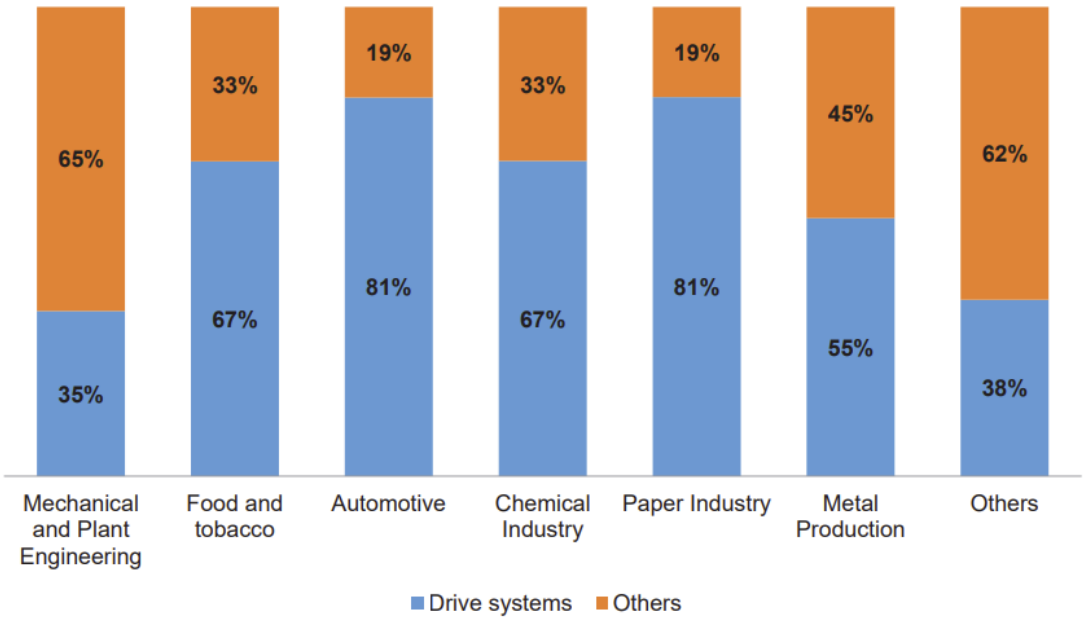
Korte omschrijving

De elektrische aandrijfsystemen zijn motor gedreven apparatuur, dit omvat een groot deel van het totale elektriciteitsverbruik. De IEA heeft voor verschillende sectoren het aandeel motor gedreven elektriciteitsverbruik in beeld gebracht, voor de industrie is dit momenteel zo'n 72% (IEA, 2025).



Figuur 5.7: Wereldwijd elektriciteitsverbruik naar sectoren met een uitsplitsing naar motor aangedreven systemen (IEA, 2025).

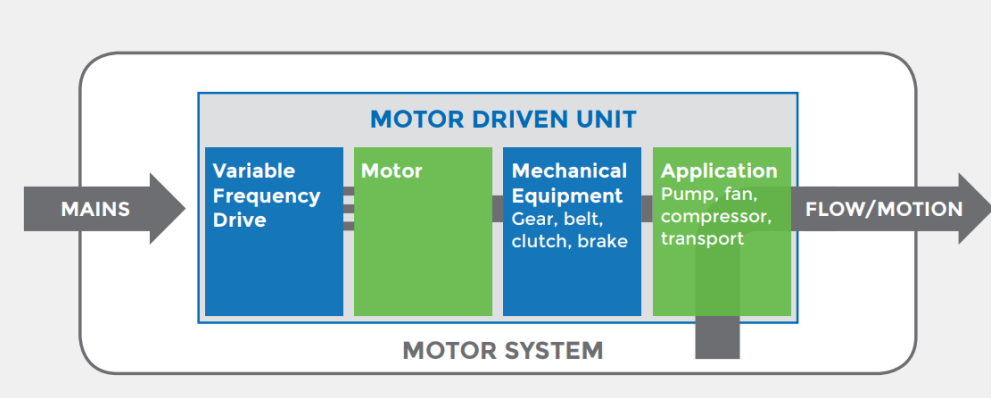
Binnen de industrie en commerciële sectoren gaat een groot deel van het elektriciteitsverbruik naar elektrische aandrijfsystemen. In **Figuur 5.8** is te zien dat de aandelen in de automotieve, papier, voedsel- en tabaks, en chemische industrie.



Figuur 5.8: Aandeel elektrische aandrijfsystemen in totaal elektriciteitsverbruik per sector in Duitsland (Javied, 2016).

De figuur illustreert de opbouw van een motor-systeem, waarin de aansturing (variable frequency drive), motor en mechanische overbrenging gezamenlijk een toepassing aandrijven, zoals schematisch weergegeven in **Figuur 5.9.** Voorbeelden van gedreven apparaten zijn pompen, compressoren, transportbanden, en warmtepompen. De toepassingen zijn op

verschillende manieren te categoriseren. Bijvoorbeeld naar vermogen (U4E, 2017), of naar toepassing in de sectoren (Javied, 2016).



Figuur 5.9: schematische weergave motergedreven systeem (U4E, 2017).

Een opsplitsing naar vermogen en sector levert geeft een beeld van het vermogen van de toepassingen, zie **Tabel D.7**.

Tabel D.7: voorbeelden van motor gedreven toepassing in commerciële en industriële sectoren (U4E, 2017).

Grootte	Commercieel	Industrieel
Klein 0,12 kW – 0,75 kW	Kantoorapparatuur (kopieermachine)	Power tools, machine tools, small fans and pumps
Middel 0,75 – 375 kW	HVAC, water pumps	Ventilator, pompen, compresoor, process machines, conveyors
Groot >375 kW		Idem + exhaust machines

Een toepassingsgerichte indeling is te maken door een onderscheid te maken tussen:

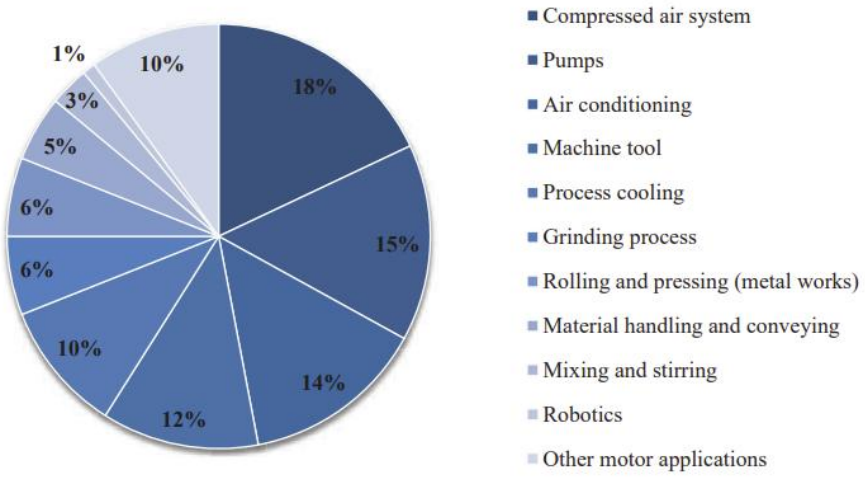
1. (Industriële) Stromingssystemen: pompen ventilatoren en compressoren met verschillende toepassingen
    a. Klimatisering (HVAC): zoals ventilatie, koeling, luchtbehandeling
2. Transport en distributie: zoals transportbanden, rollerbanden, liften
3. Verwerkingsmachines: zoals mengers, mixers, extruders
4. Overig: zoals robotarmen, handgereedschappen

Deze opsplitsing laat zien dat er een overloop is met andere assets in deze rapportage. De Industriële stromingssystemen komen terug in de gemalen, industriële warmtepompen en waterpompen. Ook de HVAC is als aparte asset meegenomen. Transport, distributie en verwerkingsmachines zijn daarom de sub-assets die als focus zijn genomen.

Opgesteld vermogen

Het opgesteld vermogen is in deze studie niet in beeld gebracht door data beperkingen. De informatie over het energieverbruik is wel beschreven. In **Figuur 5.8** is weergegeven wat in verschillende sectoren het aandeel elektriciteitsverbruik is voor elektrische aandrijfsystemen.
Het opgestelde vermogen bij individuele bedrijven is vaak opgedeeld in kleine machines. Uit een studie onder Duitse bedrijven blijkt dat ongeveer 80% van de gebruikte elektrische aandrijvingen in conveyors een vermogen heeft tot maximaal 1 kW (Javied, 2016). Deze studie stelt dat deze kleine assets niet het grootste deel van het energieverbruik opmaken, dat zijn de grote vermogens van elektrische aandrijfsystemen boven de 350 kW (Javied, 2016).

Gemiddeld voor de verschillende Duitse sectoren gaat het grootste deel van het elektriciteitsverbruik binnen de elektrische aandrijfsystemen naar compressoren, pompen en air conditioning, zie **Figuur 5.10**. Ook machine tools en process koeling hebben een groot aandeel in het elektriciteitsverbruik van elektrische aandrijfsystemen. Het elektriciteitsverbruik verschilt echter sterk per sector. Hierover is echter weinig data beschikbaar. Voor een beperkt aantal sectoren in dit illustratief opgenomen.



Figuur 5.10: opdeling energieverbruik naar toepassing elektrische aandrijfsysteem (Javied, 2016).

In de papier industrie gaat het grootste deel naar "*other motor systems*" (44%), "*pumps*" (31%), "*fans*" (20%) en "*compressors*" (5%) (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014). In de zuivel industrie ging 4% van het energieverbruik naar verpakkingen (Oldenhof, 2004).
Papier, zuivel, voedingsmiddelen industrie. Ook in andere voedingsmiddelenindustrie ging het om 5 tot 7% voor verpakken (Alia Ladha-Sabur, 2019).

Randvoorwaarden
Flexibiliteit in het productieproces kan worden bereikt door specifieke processtappen tijdelijk te pauzeren of op te schalen, productiemomenten beter op elkaar af te stemmen, productievolumes doelgericht aan te passen en (tussen)producten te bufferen (RVO, 2025).

De grootste opgestelde vermogens zitten in het primaire productieproces van de bedrijven (Javied, 2016). Als deze worden afgeschakeld of worden beperkt dan valt ook het primaire productieproces stil. Flexibel opereren is heeft vooral potentie wanneer een onderdeel als een losse entiteit kan opereren. Bijvoorbeeld doordat een tussenproduct tussendoor kan worden gebufferd, dit is momenteel beperkt het geval. Een voorbeeld uit de industrie is cryogene separatie van lucht voor de productie van stikstof e.d. (expert). Het gaat vaak om veel elektrische aandrijfsystemen met individueel kleine vermogens. Op korte termijn is voor de netbeheerder een minimum van 100 kW interessant. Veel van de installaties hebben een lager vermogen.

Een belangrijk technisch aspect is de variable speed drive (vsd). Als dit aanwezig is kan het proces variëren. Zo niet, dan gaat het om aan of uit processen (Javied, 2016).

D.4.2 Overige commerciële P2H

Naast e-boilers en industriële warmtepompen worden andere commerciële power-to-heat toepassingen in Nederland gestimuleerd. Veelal worden aardgasgestookte warmteopwekking vervangen door elektrisch gedreven warmteopwekking. Er zijn beperkt assets die al een groot opgesteld vermogen hebben in Nederland waarmee netcongestie verminderd kan worden. Een aantal commerciële toepassingen zijn op een rij gezet. Daaruit blijkt dat de en de structurering van power-to-heat technologieën is opgesteld.
De commerciële toepassingen:

- Elektrische bandovens in de bakkerijsector. Hoewel commercieel beschikbaar wordt dit beperkt toegepast. Uit navraag bij de brancheverenigingblijkt dat dit vooral komt door de beperkte energie-efficientiewinst en de grotere elektriciteitsaansluiting die nodig is (PC NedVerBak). Er is 1 grote elektrische productielijn en enkele hybride industriële ovens (PC Blueterra).
- Elektrische ovens in de ambachtelijke bakkerij sector wordt ook beperkt toegepast (TNO horeca onderzoek). Qua opgestelde vermogens en gebruikspatroon zullen deze beperkt relevant zijn voor vermindering afnamecongestie.
- Elektrische heaters, toepassing van elektrische weerstandsverwarming van lucht. Voorbeeld van toepassing is verhitting van olie voor voedingsmiddelenproductie.
- Hybride glasovens, binnen de SDE++ gesubsidieerde warmte alternatief. Het gaat hierbij om het aandeel dat elektrische is. In een Duitse pilot is dit aandeel van ca. 15 naar 80% gegaan. Voor zover bekend nog geen toepassingen in Nederland.
- Geëlektrificeerde kraakovens; eerste demonstratieproject in Europa.
- Elektromagnetische inductie: Toepassing in metaalgieterij enkele MW opgesteld vermogens in Nederland.
- Electric arc furnaces. Hiervan wordt een groei verwacht omdat Tata steel deze mogelijk gaan neerzetten als onderdeel van hun DRI plannen (na de DRI shaft furnace heb je een electric arc furnace nodig om het staal verder te processen).
- Infrarood verwarming, bijvoorbeeld voor poedercoatovens.
- Doorstroom boilers. Veel toegepast bij douches in bijvoorbeeld sporthallen, zorgcentra voor verwarmen van tapwater (expert).
- Acheson furnaces voor siliciumcarbide (SiC).

D.4.3 Vrieshallen

Binnen deze studie wordt deze asset gescoped op grootschalige industriële vrieshallen zoals in de voedingsmiddelen- of farmaceutische industrie. In deze installaties worden producten opgeslagen bij temperaturen onder het vriespunt (0 °C) om de kwaliteit en houdbaarheid van producten te waarborgen.

De flexibiliteit van vriessystemen komt voort uit de thermische inertie van de opgeslagen producten, de lucht in de opslagruimte en de gebouwmassa. Deze thermische massa fungeert als een vorm van thermische energieopslag, waardoor de temperatuur binnen toegestane bandbreedtes tijdelijk kan fluctueren zonder directe impact op productkwaliteit of veiligheid. Hierdoor kan het elektriciteitsverbruik van vriessystemen in de tijd worden verschoven, buiten congestiemomenten om.

Opgesteld vermogen

Zoals eerder beschreven is het opgesteld vermogen voor deze asset is niet bepaald, omdat de benodigde energieverbruiksdata gedurende het onderzoek niet beschikbaar kwam (paragraaf 3.2). Een eerdere TNO-studie (2025b) naar bedrijventerreinen geeft een prognose van het

opgesteld vermogen van vrieshallen op bedrijventerreinen in 2030, uitkomend op 181 MW, wat in ieder geval een indicatie geeft van de orde van grootte van deze assetcategorie.

Randvoorwaarden

Technische aspecten van flexibiliteit
De flexibiliteit van vriessystemen kan worden geclassificeerd als een vorm van *time shifting*, waarbij het elektriciteitsverbruik in de tijd wordt verschoven. Zoals eerder genoemd is de onderliggende bron van flexibiliteit voor deze assets de thermische inertie van het systeem. Deze fungeert als een opslag. Door tijdelijk extra te koelen (voorkoelen) kan het systeem op een later moment minder of niet draaien. Op deze manier kunnen vrieshuizen hun elektriciteitsverbruik voor enkele uren aanpassen en tijdens deze uren flexibiliteit leveren.

Voor een deel van de vrieshuizen wordt het elektriciteitsverbruik al geautomatiseerd gestuurd op basis van prikkels vanuit de elektriciteitsmarkt. Dit is echter nog niet overal het geval, en kan daarmee een barrière vormen voor de ontsluiting van flexibiliteit van deze asset.

Gebruikspatronen
Het elektriciteitsverbruik van een vriessysteem is cyclisch gedurende de dag, waarbij compressoren aangaan als de temperatuur te hoog dreigt te worden. Tijdens operationele activiteiten (zoals het koelen van nieuwe producten of het openen/sluiten van deuren) ligt het verbruik hoger. Daarnaast varieert het verbruik ook over langere tijdsschalen. In weekenden ligt het verbruik doorgaans lager doordat er minder operationele activiteiten plaatsvinden. In de zomer ligt het verbruik juist hoger vanwege grotere temperatuurverschillen met de externe omgeving, en daarmee een grotere koelvraag.

Het temperatuurbehoud in vriessystemen is planbaar en modelleerbaar. Dit maakt het mogelijk om vooraf extra te koelen, bijvoorbeeld tot een lagere temperatuur binnen de toegestane bandbreedte. Hierdoor kan tijdens momenten van netcongestie het elektriciteitsverbruik tijdelijk worden verlaagd of uitgesteld.

Barrières voor grootschalige ontsluiting
Een belangrijke randvoorwaarde voor flexibiliteit in vriessystemen is het borgen van de productkwaliteit. De ruimte om te sturen is beperkt tot temperatuurmarges waarbinnen de kwaliteit en veiligheid van de opgeslagen producten gewaarborgd blijven. Voor diepgevroren levensmiddelen geldt een producttemperatuur van maximaal -18 °C (Richtlijn 89/108/EEG) (EU, 1989). Het is echter niet voor alle producten duidelijk in welke mate temperatuurfluctuaties onder deze grens de productkwaliteit beïnvloeden.

Daarnaast vormt de beperkte aanwezigheid van IT-aansturing op basis van prikkels uit de elektriciteitsmarkt een belemmering. Hoewel in een deel van de, voornamelijk nieuwere, installaties al gestuurd wordt op elektriciteitsprijzen, is dit nog geen breed gedragen praktijk. Voor grootschalige inzet van flexibiliteit is verdere integratie van elektriciteitsmarktprikkels in aansturingssystemen noodzakelijk. Bij veel bestaande installaties ontbreekt deze mogelijkheid nog.

Tot slot speelt risico-aversie een belangrijke rol, met name bij dienstverlenende vrieshuizen. In veel gevallen zijn de opgeslagen producten eigendom van klanten en niet van het vrieshuis zelf. Hierdoor zijn partijen terughoudend om actief te sturen op temperatuur, aangezien eventuele kwaliteitsrisico's direct impact hebben op de dienstverlening en mogelijke

aansprakelijkheid. Dit vormt een belangrijke barrière voor het ontsluiten van flexibiliteit bij dit type vrieshuizen.

6 Bronnenlijst

Alia Ladha-Sabur, S. B.-Q. (2019). Mapping energy consumption in food manufacturing. *Trends in Food Science & Technology*.

ArboNed. (2024). *Klimaat: gezond werken.* Opgehaald van https://www.arboned.nl/wat-u-moet-weten/arbeidsrisico-s-verminderen/klimaat

Berenschot. (2017). *Electrification in the Dutch process industry.* Opgehaald van https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/3K02_Finalreport_1489735856.pdf

BloombergNEF; Statskraft; AETON. (2021). *Data Centers and Decarbonization.* Opgehaald van https://www.eaton.com/content/dam/eaton/company/news-insights/energy-transition/documents/bnef-eaton-statkraft-data-center-study-en-us.pdf

CBS. (2025a). *Groei aantal warmtepompen neemt af*. Opgehaald van https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2025/19/groei-aantal-warmtepompen-neemt-af

CBS. (2025b). *Windenergie op land; productie en capaciteit naar ashoogte*. Opgehaald van https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/71227ned/table

CBS. (2025c). *Windenergie op land; productie en capaciteit per provincie*. Opgehaald van https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/70960ned/table?ts=1774453206121&fromstatweb=true

CBS. (2025d). *Zuivering van stedelijk afvalwater; energieproductie en energieverbruik.* Opgehaald van https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/83029NED

CBS. (2026). *Warmtepompen; aantallen, thermisch vermogen en energiestromen*. Opgehaald van https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/85523NED

CE Delft. (2019). *Flexibiliteit en het Waterschap.* doi:19.3G34.101

CE Delft. (2026). *Zoveel kan met lokale flex!* Opgehaald van https://ce.nl/publicaties/zoveel-kan-met-lokale-flex/

CE Delft. (2026). *Zoveel kan met lokale flex!* Opgehaald van https://ce.nl/wp-content/uploads/2026/04/CE_Delft_250446_Zoveel_kan_met_lokale_flex_Kernrapport_Def.pdf

Compendium voor de Leefomgeving. (2026). *Opgesteld warmtekrachtvermogen, 1998-2024.* Opgehaald van https://www.clo.nl/indicatoren/nl038727-opgesteld-warmtekrachtvermogen-1998-2024

Deerns, E. (2026).

Deloitte & Agora Energiewende. (2026). *Value and enablers of data centre flexibility in Europe.*

Deloitte; Agora. (2026). *Value and enablers of data centre flexibility in Europe.*

Dialogic, Entrance, Pb7. (2024). *Analyse systeemkansen energie flexibiliteit clouddiensten.*

DNE Research. (2025). *Nationaal Storage & Solar Trendrapport 2025.*

Dutch Data Center Association. (2025). *State of the Dutch Data Centers 2025.* Opgehaald van https://www.dutchdatacenters.nl/en/publications/state-of-the-dutch-data-centers-2025/

E-bridge. (2024). *Electricity cost assessment for large industry in the Netherlands, Belgium, Germany and France.* Opgehaald van https://open.overheid.nl/documenten/73e26e32-ebd3-4f50-86d2-e1a8065e15d4/file

ElaadNL. (2023). *Quickscan Walstroom.*

ElaadNL. (2026). *Charging Profile Generator*. Opgehaald van https://charging.elaad.nl/

Eneco. (2025). *Heineken Nederland introduceert e-boiler in productieproces van bier*. Opgehaald van https://nieuws.eneco.nl/heineken-nederland-introduceert-e-boiler-in-productieproces-van-bier/

Energy Storage NL. (2026). *Europees Marktonderzoek: sterke groei van batterijcapaciteit, Nederland voorloper in achter de meter opslag.* Opgehaald van https://www.energystoragenl.nl/2026/07/02/europees-marktonderzoek-sterke-groei-van-batterijcapaciteit-nederland-voorloper-in-achter-de-meter-opslag/

EU. (1989). *Richtlijn 89/108/EEG van de Raad van 21 december 1988 betreffende de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der Lid-Staten inzake voor menselijke voeding bestemde diepvriesprodukten.*

Hasegawa, R., & Mehra, V. (2023). *Supporting power grids with demand response at Google data centers*. Opgehaald van Google Cloud: https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/using-demand-response-to-reduce-data-center-power-consumption

Hezelburcht. (2021). *SDE++ najaar 2020: € 4,6 miljard SDE++ toegekend aan 3.500 duurzame projecten.* Opgehaald van https://www.hezelburcht.com/nieuws/sde-najaar-2020-e-46-miljard-sde-toegekend-aan-3-500-duurzame-projecten/

Hoeffnagel, W. (2021). *Datacenters kunnen meer flexibiliteit in energienet bieden*. Opgehaald van Dutch IT Channel: https://www.dutchitchannel.nl/news/175129/datacenters-kunnen-meer-flexibiliteit-in-energienet-bieden

IEA. (2025). *Electric motor systems: why are they important?* Opgehaald van https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2025/12/4E-Policy-Brief-EMSA-9-20251218.pdf

IEA. (2025). *Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database.* Opgehaald van https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#overview

Javied, T. R. (2016). A study on electric energy consumption of manufacturing companies in the German industry with the focus on electric drives. *Procedia CIRP*.

Kenter. (n.d.). *Publieke laadpalen*. Opgehaald van https://www.kenter.nu/laadoplossingen/publieke-laadpalen/#:~:text=Wat%20is%20een%20semi%2Dpublieke,bedrijventerrein%20of%20bij%20een%20bouwmarkt.

KWA, CF, EV. (2026). *Op zoek naar prikkels om flexibiliteit te ontsluiten bij bedrijven.* Opgehaald van https://energy-innovation.nl/documents/1764/CF_KWA_EVC_Het_ontsluiten_van_afnameflexibiliteit_feb_2026.pdf

Liander. (2025). *Op zoek naar gegevens over energieverbruik? Wij helpen u op weg met onze open data.* Opgehaald van https://www.liander.nl/over-ons/open-data#verbruiksprofielen-gv-elektriciteit

Magnus. (2026). *Onderzoek naar vraagrespons in het kader van leveringszekerheid.* Opgehaald van https://magnusenergy.com/wp-content/uploads/2026/01/Onderzoek-naar-vraagrespons-in-het-kader-van-leveringszekerheid-2026-Magnus-Energy-Eindrapport.pdf?utm_source=press+release&utm_medium=email&utm_id=KGG

Maruf, M. N., Morales-Espana, G., Sijm, J., Helistö, N., & Kiviluoma, J. (2022). Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*.

Miller, R. (2021). *Google Moving Workloads Between Data Centers to Use Greener Energy*. Opgehaald van https://www.datacenterfrontier.com/cloud/article/11428180/google-moving-workloads-between-data-centers-to-use-greener-energy

Netbeheer Nederland. (2025). *Netbeheer Nederland Scenario's Editie 2025.*

Oldenhof, S. (2004). Uitgebreide Energiestudie Zuivelindustrie.

Oxenaar, S., & Butler, T. (2026). *Flex Machina: Unlocking industrial flexibility's full potential.* Opgehaald van https://www.raponline.org/wp-content/uploads/2026/03/rap-oxenaar-butler-flex-machina-march-2026.pdf

Panteia. (2025). *Renovaties in de Utiliteit.* Opgehaald van https://www.rvo.nl/sites/default/files/2025-12/renovaties-in-de-utiliteit-2025.pdf

PBL. (2021). *Conceptadvies SDE++ 2022 grootschalige elektrische boilers.* Opgehaald van https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2021-conceptadvies-sde-plus-plus-2022-grootschalige-elektrische-boilers-4389.pdf

PBL. (2024). *EINDADVIES BASISBEDRAGEN SDE++ 2024 .* Opgehaald van https://open.overheid.nl/documenten/1057d419-e925-432e-9481-0ceeb2247adc/file

Pondera. (2021). *De rwzi als smart energie-hub.* Unie van Waterschappen.

Port of Rotterdam. (2023). *Ministerie en zeehavens maken werk van uitbreiding walstroom.* Opgehaald van https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/ministerie-en-zeehavens-maken-werk-van-uitbreiding-walstroom

Pythia. (2026). *Flexibiliteit bij waterschappen.*

Regionale Energie Strategie. (2025). *Factsheet Elektriciteit*. Opgehaald van https://www.regionale-energiestrategie.nl/energiesysteem/wind+zon+en+andere+energiebronnen/1654079.aspx

Regionale Energie Strategie. (2025). *Factsheet Elektriciteit*. Opgehaald van https://www.regionale-energiestrategie.nl/energiesysteem/wind+zon+en+andere+energiebronnen/1654079.aspx

Remeha. (n.d.). *Hoe bepaal je het benodigde vermogen van een warmtepomp?* Opgehaald van https://kennisbank.remeha.nl/hoe-bepaal-je-het-benodigde-vermogen-van-een-warmtepomp/

Royal HaskoningDHV. (2024). *Walstroom inventarisatie 2024.*

RVO. (2022). *Best Practice Industriële Warmtepompen.* Opgehaald van https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-12/Elektrificatie%20in%20de%20industrie%20-%20Best%20practice%20Warmtepompen.pdf

RVO. (2022). *Protocol Monitoring Hernieuwbare Energie.* Opgehaald van https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-07/Protocol-Monitoring-Hernieuwbare%20Energie.pdf

RVO. (2023). *RVO Kennisdossier E-Boilers*. Opgehaald van https://www.rvo.nl/sites/default/files/2023-02/Achtergrondinformatie%20e-boilers.pdf

RVO. (2025). Opgehaald van Eindstand SDE++ 2024 (Juli 2025): https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.rvo.nl%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2025-08%2FEindstand-SDE-aanvraagronde-2024.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

RVO. (2025). *Flexibilisering van elektriciteitsverbruik door bedrijven en instellingen*. Opgehaald van https://www.rvo.nl/sites/default/files/2025-03/Rapportage%20Flexibilisering%20Bedrijven%20en%20Instellingen%20Definitief%202.pdf

RVO. (2025). *SCE/SDE projecten*. Opgehaald van https://ez.maps.arcgis.com/apps/dashboards/04077558b37243dbbfda0d9ec694ab12

RVO. (2026). *Aantal laadpunten voor licht vervoer*. Opgehaald van https://laadinfrastructuur.databank.nl/mosaic/en-us/laadinfrastructuur/aantal-laadpunten-voor-licht-vervoer

RVO. (2026). *Aantal snellaadpunten per vermogensklasse per NAL-regio*. Opgehaald van https://duurzamemobiliteit.databank.nl/viewer?presel_code=snl_powercat_regg4_Noord

RVO. (2026). *Softwaresystemen voor energiemanagement.* Opgehaald van https://www.rvo.nl/onderwerpen/energiebesparingsplicht/onderzoeksplicht/energiemanagement/14-vragen/softwaresystemen

RVO ism TNO. (2026). *iTriplEEE Synergie van industriële Elektrificatie en Energie-Efficiëntie verbetering (zomer 2026 publiek).*

SCADA. (n.d.). *SCADA Systems for Data Center Facility: Optimize Monitoring & Control*. Opgehaald van https://c3communications.net/scada-systems-for-data-center-facility-optimize-monitoring-control/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=%28organic%2Freferral%29

Shell. (2025). *Kick-starting the hydrogen economy of the Netherlands: Shell Holland Hydrogen 1.* Opgehaald van https://www.shell.nl/over-ons/wat-wij-doen/waterstof.html

STOWA. (2019). *Slim Malen - Energie besparen?!* Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

STOWA. (2026). *Flexibel Malen.* Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer STOWA.

TenneT. (2026). *Monitor Voorzieningszekerheid .*

TenneT. (n.d.). Opgehaald van Welke aansluiting: https://www.tennet.eu/nl/de-elektriciteitsmarkt/aansluiten-op-het-nederlandse-hoogspanningsnet/welke-aansluiting

TNO. (2024a). *Potentie energiebesparing bedrijventerreinen.* Opgehaald van https://publications.tno.nl/publication/34642259/XJK6ys/TNO-2024-R10511.pdf

TNO. (2024b). *TNO Kennisinbreng Mobiliteit voor Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2024.*

TNO. (2025a). *Achtergrondinformatie Dataset Utiliteitsbouw Wijkaanpak.* Opgehaald van https://www.volkshuisvestingnederland.nl/documenten/2024/06/04/dashboard-utiliteit-in-de-wijnaanpak

TNO. (2025b). *Flexibiliteit en energie assets op bedrijventerreinen: een toekomstverkenning.* Opgehaald van https://publications.tno.nl/publication/34645132/HHfh0Tek/TNO-2025-R11974.pdf

TNO. (2025b). *Flexibiliteit en energie assets op bedrijventerreinen: een toekomstverkenning.*

TNO. (2025b). *Koeling bij utiliteitsgebouwen.* Opgehaald van https://publications.tno.nl/publication/34645071/x99EgsUo/TNO-2025-R12096.pdf

TNO. (2025c). *Living Lab Heavy Duty Laadpleinen.*

TNO. (2025c). *Living Lab Heavy Duty Laadpleinen.*

TNO. (2025d). Opgehaald van Verrijkte BAG 2.0: https://publications.tno.nl/publication/34644427/f6Q3jraF/TNO-2025-R11194.pdf

TNO. (2026a). *KIP Corporate Flexibility (nog niet gepubliceerd).*

TNO. (2026b). *Non-technical barriers for industrial heat pump adoption.* Opgehaald van https://publications.tno.nl/publication/34646448/du2Dl6jv/TNO-2026-16221.pdf

TNO. (2026c). *Verkenning van vraagrespons in de Nederlandse energie-intensieve industrie.* Opgehaald van https://publications.tno.nl/publication/34645565/P4OmwFqj/TNO-2026-R10158.pdf

Topsector Energie. (2022). *Industriële flexibiliteit: de complexe opgave van de flex.* Opgehaald van https://energy-innovation.nl/documents/33/TKI_Energie__Industrie_-_Whitepaper_industriele_flexibiliteit_-_221201.pdf

Trinomics & BlueTerra. (2024). *Onderzoek naar de effecten van de beperking van de inputvrijstelling voor warmtekrachtkoppelingssystemen.* Rotterdam.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. (2014). *Forest products.* Opgehaald van https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/motor_system_usage.pdf

U4E. (2017). *Accelerating the Global Adoption of ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC MOTORS AND MOTOR SYSTEMS.* Opgehaald van https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2017/09/U4E-MotorGuide-201709-Final.pdf

Wedrivesolar. (n.d.). *Renault Group & We Drive Solar introduceren allereerste V2G AC-laden service in Nederland*. Opgehaald van https://www.wedrivesolar.nl/

Weijer, B. v. (2026, april 3). Gas besparen en toch warm douchen: deze reuzenboiler is Vattenfalls flitsbezorger van warmte. *Volkskrant*.

Weijer, B. v. (2026). *Gas besparen en toch warm douchen: deze reuzenboiler is Vattenfalls flitsbezorger van warmte*. Opgehaald van Volkskrant: https://www.volkskrant.nl/economie/gas-besparen-en-toch-warm-douchen-deze-reuzenboiler-is-vattenfalls-flitsbezorger-van-warmte~b95364ef/

ZEV transition council. (2025). *Charging infrastructure statistics*. Opgehaald van https://zevtc.org/tracking-progress/charging-infrastructure-statistics/

ICT, Strategy & Policy

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl

TNO innovation for life