



Scenario's voor de ontwikkeling van de materiaalvoorraad, instroom en uitstroom van het Nederlandse elektriciteitssysteem

Janneke van Oorschoot

Bas M. Roelofs

Judith van der Horst Verschelling

Ester van der Voet

Inhoudsopgave

1. Introductie	3
2. Scenario's ontwikkeling elektriciteitsvoorziening	3
3. Methode & Data	6
3.1 Ontwikkeling opgesteld elektrisch vermogen en elektriciteitsmix	6
3.1. Inventarisatie dynamiek elektriciteitssysteem	8
3.2. Bestemming afgedankte voorraden & herbruikbaarheid	17
4. Resultaten	19
4.1 Uitkomsten totalen voor scenario's Hoog, Midden en Laag	19
4.2 Resultaten per subgroep	21
4.3 Hergebruik en recycling van uitstromen	31
6. Discussie, conclusie & aanbevelingen	36
6.1. Discussie & conclusie	36
6.2. Aanbevelingen ter bevordering van circulariteit	38
6.3. Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek	39
Bronnenlijst	41
Bijlagen	44
A) Overzicht materiaalintensiteiten	44
B) Resultaten ontwikkeling materiaalvoorraad, instroom en uitstroom	44

1. Introductie

In de rapportage *Vorraden in de Maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie* is een inventarisatie gemaakt van een aantal voorraadgroepen, waaronder het Nederlandse elektriciteitssysteem. Dit systeem is zeer relevant vanuit een circulaire economie (CE) perspectief, omdat het onderhevig is aan grote veranderingen ten gevolge van de energietransitie. In deze vervolgstudie is een analyse uitgevoerd naar de dynamiek van het elektriciteitssysteem, op materiaalniveau. Het doel van deze studie is om inzicht te krijgen in de voorraadopbouw van deze voorraadgroep tot 2050, de bijbehorende vraag naar materialen, en de beschikbaarheid van materialen uit de *urban mine*. Deze materialen vormen mogelijk een waardevolle bron voor secundaire productie, en kan zo bijdragen aan het behalen van de Nederlandse CE doeleinden.

Voor elk van de componenten voor elektriciteitsproductie, transport en distributie in Nederland is op basis van relevante overheidsdocumenten, scenariostudies en wetenschappelijke literatuur geschat wat aannemelijk is voor de ontwikkeling tot 2050. Voor het beeld tot 2030 vormen de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) van het PBL (2019b) en het Achtergronddocument effecten ontwerp Klimaatakkoord (PBL, 2019a) een goede ingang voor de ontwikkeling van het opgesteld elektrisch vermogen in Nederland. De KEV geeft een geactualiseerd beeld van onder andere het energiesysteem tot en met 2030, is conform de Klimaatwet uit 2019 en is een opvolging van de eerdere Nationale Energieverkenning (NEV). De toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (CBP/PBL, 2015) geeft een beeld van de energievraag tot 2050 en in het Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019) zijn zowel doelstellingen voor 2030 als voor 2050 geformuleerd.

2. Scenario's ontwikkeling elektriciteitsvoorziening

Er zijn tal van rapportages beschikbaar die scenario's schetsen voor de toekomstige elektriciteitsvoorziening in Nederland. Deze omvatten projecties gemaakt door overheidsinstanties (e.g., PBL, CPB), netbeheerders (e.g., Tennet TSO, GasUnie, Netbeheer NL), adviesbureaus (e.g., Berenschot, CE Delft), en stichtingen (e.g., Urgenda, Natuur & Milieu). Deze rapportages zijn bestudeerd om een beter inzicht te krijgen in de mogelijke ontwikkelingen van de Nederlandse elektriciteitsproductie, en de verwachtingen of mogelijke ontwikkelingen wat betreft totaal geïnstalleerde vermogen en de bijbehorende elektriciteitsmix.

Op basis van de bovengenoemde literatuur definiëren we drie scenario's, die we kortweg karakteriseren als Laag, Midden en Hoog. Deze scenario's hebben niet zozeer betrekking op de elektriciteitsvraag, maar op het aanbod: het geïnstalleerde vermogen. Dat is niet hetzelfde: Het geïnstalleerde vermogen moet groter zijn om de piekvraag te kunnen opvangen, en moet ook bij hernieuwbare energiebronnen groter zijn vanwege het niet-continue aanbod.

Scenario Midden (M), verwijst naar de het voorgenomen Nederlandse beleid, gebaseerd op rapportages van onder andere het PBL. Het minimum, scenario Laag (L), verwijst hier naar een minimale elektrificatie en een minimale inzet van duurzame technologieën voor elektriciteitsproductie. Het maximum, scenario Hoog (H), verwijst naar een hoge mate van elektrificatie en een hoge inzet van duurzame technologieën voor elektriciteitsproductie.

Ten eerste is voor het scenario Midden uitgegaan van projecties voor de ontwikkeling van de elektriciteitssector in een recente studie van het PBL (2019a): *Achtergronddocument effecten ontwerp klimaatakkoord: Elektriciteit*, welke in overeenstemming is met de verwachtingen in de KEV

(PBL, 2019a). Hierbij is uitgegaan van de actuele prijzenvariant, waarin recente inzichten in de brandstof en EU ETS CO₂ prijzen voor 2030 zijn opgenomen.

De meeste analyses uitgevoerd door overheidsinstanties nemen 2030 als uitgangspunt; na 2030 zijn er weinig concrete doelstellingen te vinden in beleidsdocumenten. Voor de periode van 2030 tot 2050 kan wel gekeken worden naar de scenario's in de toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (PBL & CPB, 2015). Hierin wordt op langere termijn naar verschillende scenario's gekeken, op basis van mogelijk beleid, voor de ontwikkeling van de Nederlandse energiehuishouding. In de studie wordt de totale finale energievraag in Peta Joule (PJ) voor elektriciteit besproken, maar niet de invulling daarvan met energiedragers, en evenmin het benodigde geïnstalleerd vermogen. Opvallend is dat in alle scenario's van het PBL & CPB (2015) de benodigde vraag ruim (minimaal 103 PJ) onder die van de geprojecteerde vraag in de scenario's voor finale energievraag in vergelijkbare projecties gemaakt door Berenschot (2020) blijven. Deze verschillen kunnen worden verklaard doordat in de Berenschot scenario's wordt uitgegaan van een lagere mate van elektriciteitsbesparing, en een industrietransitie die relatief sterk met elektrificatie is vormgegeven. Het wel dan niet meenemen van transmissie en distributieverliezen en de inclusie of exclusie van het gebruik van elektriciteit door centrales zelf wordt niet besproken in de Berenschot studie.

Naast de WLO studie kan voor de doelstellingen vanuit beleid voor 2050 ook gekeken worden naar de afspraken in het Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019). Uitgaande van een 4200 laaduren wind op zee (ECN, 2015), 2500 laaduren wind op land (CE Delft & ECN, 2016) en 875 laaduren zon (RVO, 2014), komt dit uit op een totaal van 93 GW benodigd geïnstalleerd vermogen in 2050. Dit is redelijk in lijn met de doorgetrokken trend van het KEV scenario (tot 2030) tot 2050: 96 GW.

Er zijn echter meer bronnen voor elektriciteitsproductie nodig dan zonnepanelen en windturbines om aan de elektriciteitsvraag te kunnen voldoen. Hiertoe kan aan elektriciteit uit groen gas, biomassa en waterstof worden gedacht. Wanneer voor dergelijke technologieën doelstellingen voor het geïnstalleerde vermogen in 2050 zijn geformuleerd zijn deze aangenomen voor het scenario Midden. Wanneer deze gegevens niet voor handen waren is voor het scenario Midden de gemiddelde waarde van scenario Hoog en scenario Laag genomen.

Voor het scenario Hoog en Laag is tot 2050 grotendeels uitgegaan van een recente studie van Berenschot (2020), die in samenwerking met de netbeheerders scenario's voor de ontwikkeling van het elektriciteitssysteem tot 2050 hebben geformuleerd. Deze studie is een vervolg op een studie van CE Delft (2018). De scenario's in beide studies zijn aanbodscenario's en specificeren zowel het geïnstalleerd vermogen als de benodigde elektriciteitsinfrastructuur.

De Berenschot studie onderscheidt 4 scenario's: Regionale sturing, Nationale sturing, Europese sturing en Internationale sturing. In de regionale sturing wordt de energietransitie vooral vanuit regionale overheidsorganen geleid; de ambitie is om volledig te verduurzamen en zelfvoorzienend te worden. Bedrijven en burgers zijn betrokken bij projecten, zoals bijvoorbeeld zonnepanelen en warmtenetten. Circulariteit is een belangrijk speerpunt, importen zijn minimaal, de elektrificatie is fors en warmtenetten worden uitgebreid. Nederland is in 2050 zelfvoorzienend in energie, en het geïnstalleerd vermogen van elektriciteit uit zon en wind is sterkt toegenomen. Er wordt voor de piekvoorzieningen gebruik gemaakt van gas uit biomassa en waterstof verkregen uit elektrolyse op basis van zon en wind.

In de nationale sturing wordt de energievoorziening grotendeels vanuit de nationale overheid geregeld. De overheid streeft ernaar om zelfvoorzienend, duurzaam en circulair te zijn en doet dit met grootschalige projecten zoals windparken op zee. Ten opzichte van het regionale scenario resulteert dit in minder kleinschalige initiatieven van burgers en bedrijven, en een lagere inzet van

warmtenetten. Echter is de elektrificatie hoger. Er is een hoge mate van zelfvoorziening en de importen zijn laag. In dit scenario is het aandeel elektriciteit uit wind het grootst van de vier scenario's. Ook wordt groen gas en (groene) waterstof grootschalig als back-up voorziening voor elektriciteit ingezet. Ten slotte is ook Circulariteit in dit scenario belangrijk.

In de Europese sturing neemt de overheid minder initiatief en gebeurt meer vanuit Europees beleid. Op dit niveau wordt een algemene CO₂-belasting ingevoerd. Deze heffing gaat verder dan de huidige ETS (deze geldt alleen voor energie-intensieve industrie en elektriciteitsproducenten) en neemt jaarlijks toe, waardoor CO₂ intensieve processen onaantrekkelijk worden. Er is een grote inzet van groen gas in verschillende sectoren. De import van groen gas en waterstof (zowel uit hernieuwbare (groene) als uit fossiele (grijze) bronnen) is groot, en gas blijft een rol spelen in de energievoorziening. Ten slotte is er veel ruimte voor CO₂ afvang- en opslag (CCS).

De internationale sturing gaat uit van een internationale markt op mondiaal niveau en een sterk mondiaal klimaatbeleid. Dit resulteert in het ontbreken van invoertarieven, quota's of andere maatregelen. Nederland blijft in dit scenario afhankelijk van energie import, met name van de energiedragers waterstof, biomassa en biobrandstof. Waterstof wordt deels geïmporteerd en vormt een belangrijke back-up; door de import is een lager geïnstalleerd vermogen van windturbines en zonnepanelen nodig. Ook is er veel ruimte voor CCS. In dit scenario is de nationale duurzame elektriciteitsproductie lager dan in de regionale, nationale en Europese scenario's .

Als uitgangspunt zijn hier het scenario voor de laagste mate van elektrificatie en de laagste inzet van duurzame elektriciteitsproductie gekozen voor het scenario Laag: de internationale sturing. Voor het scenario Hoog is gekozen voor het scenario met de hoogste mate van elektrificatie en de grootste inzet van windturbines en zonnepanelen: de nationale sturing. Deze scenario's geven een beeld van de bandbreedte van zowel de mate van elektrificatie tot 2050, als de invulling daarvan met technologieën voor elektriciteitsproductie-

De dynamiek van het elektriciteit transport- en distributienetwerk (elektriciteitskabels en lijnen) is niet aan de hand van geïnstalleerd vermogen berekend, maar op basis van de verwachte overbelasting van het net. Hiertoe zijn scenario's gebruikt die in lijn zijn met het werk van Berenschot (2020) en CE Delft (2016). Aan de hand van deze scenario's is het percentage overbelasting op het net berekend (Leguijt et al., 2019; Niet et al., 2019), wat weer als basis genomen kan worden voor de benodigde uitbreiding van het net. Hierbij zijn de scenario's nationale sturing en generieke sturing genomen als scenario Hoog en Laag respectievelijk, en is het gemiddelde van deze scenario's voor het scenario Midden genomen. Deze scenario's zijn vergelijkbaar met de scenario's nationaal en internationaal in de opvolgende studie van Berenschot (2020).

3. Methode & Data

3.1 Ontwikkeling opgesteld elektrisch vermogen en elektriciteitsmix

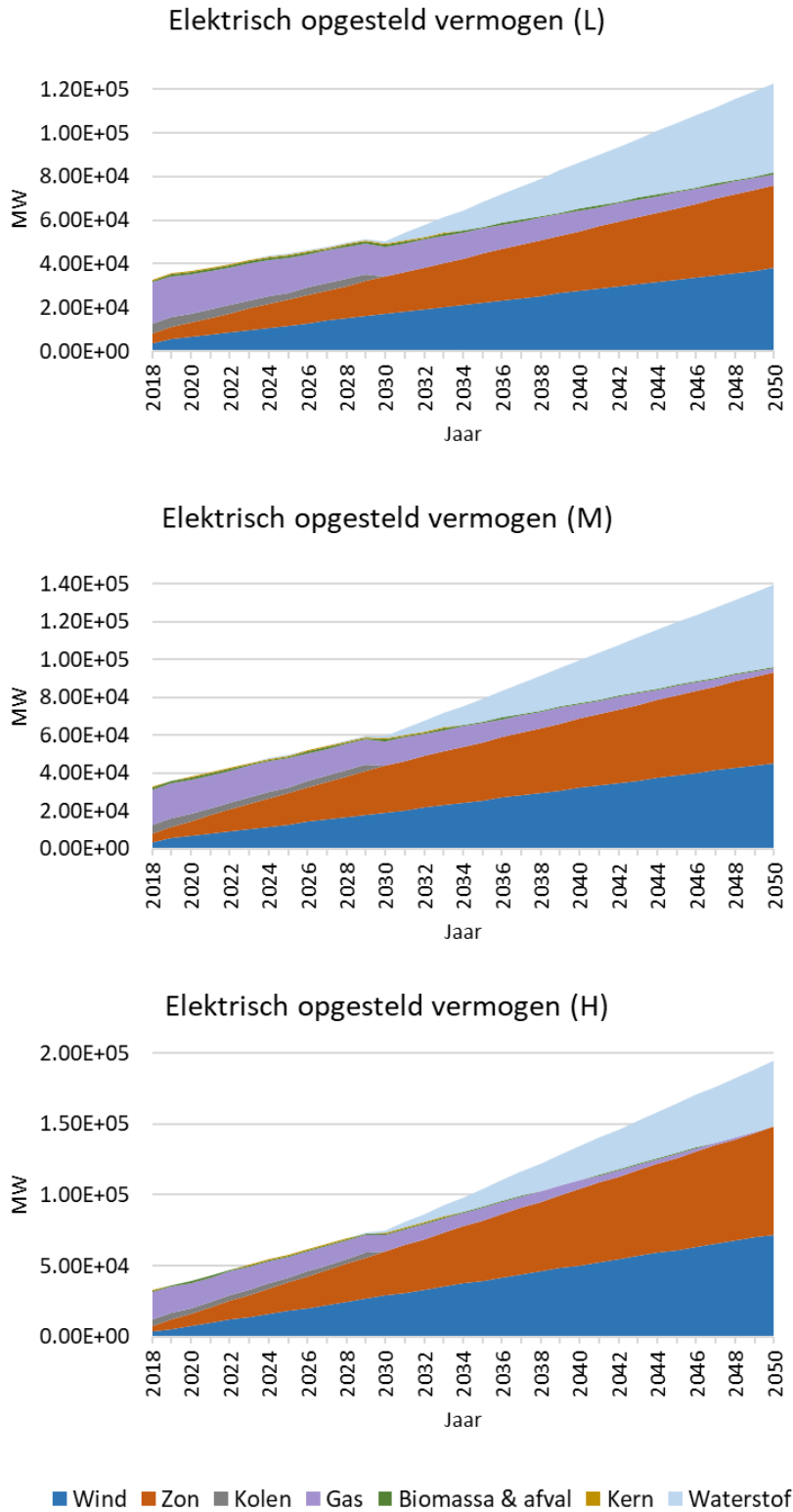
De ontwikkeling van het elektrisch vermogen vormt een belangrijke bron voor het inventariseren van de ontwikkeling van de materiaalvoorraad en stromen in het elektriciteitssysteem. Hiertoe zijn de scenario's geformuleerd in het vorige hoofdstuk gehanteerd. Tabel 1 laat het huidige geïnstalleerd vermogen aan elektriciteitsproductie zien (uitgaande van 2018), en de vermogens voor het scenario Laag (lage mate van elektrificatie en lage inzet van hernieuwbare energiebronnen), Midden (beoogd beleid), en Hoog (hoge mate van elektrificatie en hoge inzet van hernieuwbare energiebronnen), voor het jaar 2030 en 2050.

Figuur 1 laat de ontwikkeling van het vermogen van 2018 tot 2050 zien. Het opgesteld vermogen in 2050 groeit substantieel harder groeit in het scenario Hoog dan het scenario Midden en Laag, en de scenario's Laag en Midden zijn redelijk vergelijkbaar. Zonnepanelen, windturbines (onshore en offshore) en waterstofcentrales vormen, met name richting het jaar 2050, het grootste aandeel, en blijven groeien tot 2050. Het vermogen gascentrales is nu nog substantieel, maar neemt volgens onze scenario's de komende decennia sterk af.

Voor zowel biomassa- en afvalcentrales, waterstofcentrales en gascentrales is bij gebrek aan concrete datapunten het gemiddelde genomen van scenario Hoog en Laag. Voor 2030 zijn voor het scenario Midden de doelstellingen uit het Klimaatakkoord (PBL, 2019a) gehanteerd.

Tabel 1. Totaal geïnstalleerd elektrisch vermogen, huidig (2018), en totalen voor 2030 en 2050 voor de scenario's Laag (L), Midden (M) en Hoog (H).

Scenario		L	M	H	L	M	H
Jaar	2018	2030	2030	2030	2050	2050	2050
	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
Wind	3.44E+03	1.70E+04	1.91E+04	2.89E+04	3.80E+04	4.53E+04	7.20E+04
Zon	4.52E+03	1.71E+04	2.50E+04	3.13E+04	3.80E+04	4.80E+04	7.60E+04
Kolen	4.51E+03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Gas	1.90E+04	1.38E+04	1.28E+04	1.19E+04	5.00E+03	2.50E+03	0.00E+00
Biomassa & afval	9.29E+02	8.43E+02	7.87E+02	7.31E+02	7.00E+02	5.50E+02	4.00E+02
Kernenergie	5.10E+02	5.10E+02	5.10E+02	5.10E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Waterstof	0.00E+00	1.32E+03	1.32E+03	1.32E+03	4.10E+04	4.35E+04	4.60E+04
Totaal	3.29E+04	5.05E+04	5.95E+04	7.46E+04	1.23E+05	1.40E+05	1.94E+05



Figuur 1. Ontwikkeling van het opgesteld elektrisch vermogen voor het scenario Laag (L), Midden (M) en Hoog (H).

3.1. Inventarisatie dynamiek elektriciteitssysteem

In deze sectie is per subgroep besproken hoe de materiaalvoorraden en stromen zijn berekend en welke data hierbij gebruikt is. Dit is grotendeels gedaan aan de hand van ontwikkelingen van het totaal geïnstalleerde vermogen van de technologieën (MW), de bijbehorende materiaalintensiteit (ton/MW) en de verwachte levensduur. Voor een aantal technologieën is een andere benadering gebruikt, omdat materiaalintensiteit specifiek per geïnstalleerd vermogen geen geschikte indicator was. Hiertoe behoren elektriciteitskabels- en lijnen. Voor windturbines is naast vermogen ook gekeken naar locatie (op land of op zee), producent en de hoogte van de turbine. Voor zowel elektriciteitskabels en lijnen, zonnepanelen als windturbines zijn ontwikkelingen in de technologie die van invloed zijn op de materiaalcompositie meegenomen.

Voor een aantal technologieën is een *dynamisch stock model* toegepast. In een dergelijk model wordt op basis van de voorraadontwikkeling in het verleden en projecties voor de toekomst in combinatie met een bijbehorende levensduur van de producten de toekomstige vraag naar en het aanbod van materialen uit de *urban mine* berekend. Deze methode was niet voor alle technologieën geschikt, omdat de afdanking van een aantal technologieën sterk afhankelijk was van wetgeving en de voorraad weinig dynamisch was. Deze omvatten kolencentrales, kerncentrales, (groene) gascentrales, afvalverbrandingsinstallaties en biomassacentrales. Voor deze technologieën is aan de hand van beleidsplannen een inschatting gemaakt van de in- en uitstromen.

Bij de volgende voorraadgroepen is wel gebruik gemaakt van een dynamisch stock model: windturbines, zonnepanelen en elektriciteitskabels- en lijnen. Op basis van de groei van de voorraden (*stock driven dynamic MFA*) of instroom (*inflow driven dynamic MFA*) in geïnstalleerd vermogen (MW), de gemiddelde levensduur en levensduurverdeling is met het dynamisch MFA model *ODYM* (Pauliuk & Heeren, 2020) in Python een inventarisatie gemaakt van de ontwikkelingen in de omvang van de voorraad, de instroom en de uitstroom tot 2050. Vervolgens zijn de waarden (in MW) vermenigvuldigd met de materiaalintensiteiten (ton/MW). De keuze voor het *stock driven* ofwel *inflow driven* model was afhankelijk van de beschikbaarheid en kwaliteit van de data.

In de volgende paragrafen gaan we dieper in op de gehanteerde aanpak en gebruikte data per technologie.

3.1.1. Infrastructuur voor elektriciteitstransport- en distributie

Ontwikkeling omvang voorraad

Ten eerste bespreken wij de ontwikkeling van de voorraden, in- en uitstromen in elektriciteitskabels- en lijnen. Voor een volledig overzicht van de resultaten kan de studie van Verschelling (2020) worden geraadpleegd. De dynamiek van deze voorraadgroep is bepaald aan de hand van ontwikkeling in de vraag naar elektriciteit en de bijbehorende overbelasting van de kabels, de levensduur en de materiaalsamenstelling van de elektriciteitskabels- en lijnen.

Voor de ontwikkeling van de voorraad in het verleden kan voor (extra) hoogspanningskabels (HS-kabels) gebruik worden gemaakt van data van Tennet (2019). Deze gegevens zijn echter niet beschikbaar voor offshore kabels. Voor het laatste is gebruik gemaakt van data van het RVO (2020).

Hierin staan gegevens over het jaar van installatie van offshore windturbines, en de afstand van zee. Aangenomen is dat alle offshore kabels aan dergelijke windparken gekoppeld zijn (2 kabels per windpark). Op basis van deze gegevens kon zo de totale lengte van offshore kabels per jaar worden ingeschat.

Voor de historische aanleg van midden- en laagspanningskabels (MS en LS kabels) was niet direct data beschikbaar. Aangenomen is dat het MS en LS net in eenzelfde verhouding is ontwikkeld als het HS net. Waarschijnlijk is deze aanname plausibel, omdat het elektriciteitsnet als een distributienet (HS naar MS naar LS) aan elkaar gekoppeld is, en daarom met elkaar in verhouding dient te zijn (Verschelling, 2020).

Voor de ontwikkeling van de voorraad tot 2050 vormt de studie van CE Delft (2016) een belangrijke bron. Aan de hand van de scenario's in deze studie analyseren Leguijt et al. (2019) en Niet et al. (2019) de ontwikkeling van het elektriciteitssysteem op het elektriciteitsnet. Hiertoe is het percentage overbelasting op het net brekend, specifiek voor de provincies Groningen, Drenthe en Noord Holland, met het jaar 2050 als uitgangspunt. Het gemiddelde percentage overbelasting voor elk van de vier scenario's kan worden aangenomen als percentage benodigde uitbreiding van het (HS) net.

In dit werk is aangenomen dat het scenario *nationale sturing* uit CE Delft (2016) overeenkomt met het scenario *nationaal* in Berenschot, wat het scenario Hoog vormt in dit werk. Verder is aangenomen dat de *generieke sturing* uit CE Delft (2016) overeenkomt met de *internationale sturing* uit Berenschot, wat het scenario Laag vormt in dit werk. Ten slotte is voor het beoogde scenario (Midden), het gemiddelde van de waarden voor de nationale sturing en de generieke sturing genomen.

De cijfers van Leguijt et al. (2019) en Niet et al. (2019) zijn helaas niet beschikbaar voor het MS en LS net. Het percentage uitbreiding van deze netten is berekend door het % kabel dat in een onbekende mate wordt overbelast (deze informatie was wel beschikbaar in voorgenoemde studies), te vermenigvuldigen met 200%, wat is aangenomen als percentage overbelasting (Verschelling, 2020).

Voor offshore kabels is gebruik gemaakt van de plannen voor het uitbreiden van offshore windparken tot 2030 van het RVO (2020). Op basis van het geïnstalleerde vermogen uit de studie van RVO en de scenario's van CE Delft (2016) en de afstand tot land om de uitbreiden van de offshore kabels te berekenen.

Materiaalsamenstelling

De materiaalcompositie van de kabels was in de voorgaande studie bepaald (van Oorschot et al., 2020). Hier is de nadruk gelegd op de metalen. De plastic omhulsels (en in oudere kabels papier, lood en olie), zijn in deze analyse niet meegenomen. Er moet echter rekening mee worden gehouden dat de samenstelling van elektriciteitskabels over de tijd is veranderd (Tabel 2). Tot ongeveer 1970 werden in MS en LS kabels vooral met papier geïsoleerde loodkabels gebruikt, later werd dit materiaal door plastic vervangen (Soepboer, 2019). In de MS en LS kabels werd in het verleden vaak koper als geleidingsmateriaal toegepast, terwijl tegenwoordig vooral aluminium wordt gebruikt. Een uitzondering op deze trend zijn offshore kabels; door de hogere technische eisen hebben koperen geleiders hier nog de voorkeur.

Tabel 2. Aangenomen aandeel koper en aluminium in elektriciteitskabels- en lijnen.

Hoogspanningslijnen	Tijdsperiode	1933-2050		
	Koper	0%		
	Aluminium	100%		
Hoogspanningskabels	Tijdsperiode	1933-2016	2017-2050	
	Koper	100%	0%	
	Aluminium	0%	100%	
Middenspanningskabels	Tijdsperiode	1933-1970	1971-2009	2010-2050
	Koper	65%	7%	0%
	Aluminium	35%	93%	100%
Laagspanningskabels	Tijdsperiode	1933-1970	1971-2009	2010-2050
	Koper	96%	28%	0%
	Aluminium	4%	72%	100%
Offshore kabels	Tijdsperiode	1933-2050		
	Koper	100%		
	Aluminium	0%		

Levensduur

Op basis van de literatuur en expert interviews is een gemiddelde levensduur van de kabels aangenomen van 50 jaar (Li et al., 2020; persoonlijke communicatie, 20 Januari 2020). Verder is een normaalverdeling aangenomen voor de levensduur, met een standaard deviatie van 8 jaar (Li et al., 2020). Echter blijft een groot deel van de kabels nadat deze uit werking is getreden onder de grond liggen en betreedt de *hibernating stock*. Er is weinig informatie beschikbaar over het omvang van deze voorraad. Verschelling et al. (2020) schat op basis van expert interviews het percentage uit werking getreden kabels dat in *hibernation* gaat op 75%.

3.1.2. Windturbines

Ontwikkeling omvang voorraad

Ook voor de ontwikkeling van de voorraad, instroom en uitstroom van windturbines is een dynamisch stock model gehanteerd. Voor meer details over de methode, gebruikte aannames, en resultaten kan de studie van Roelofs (2020) worden geraadpleegd.

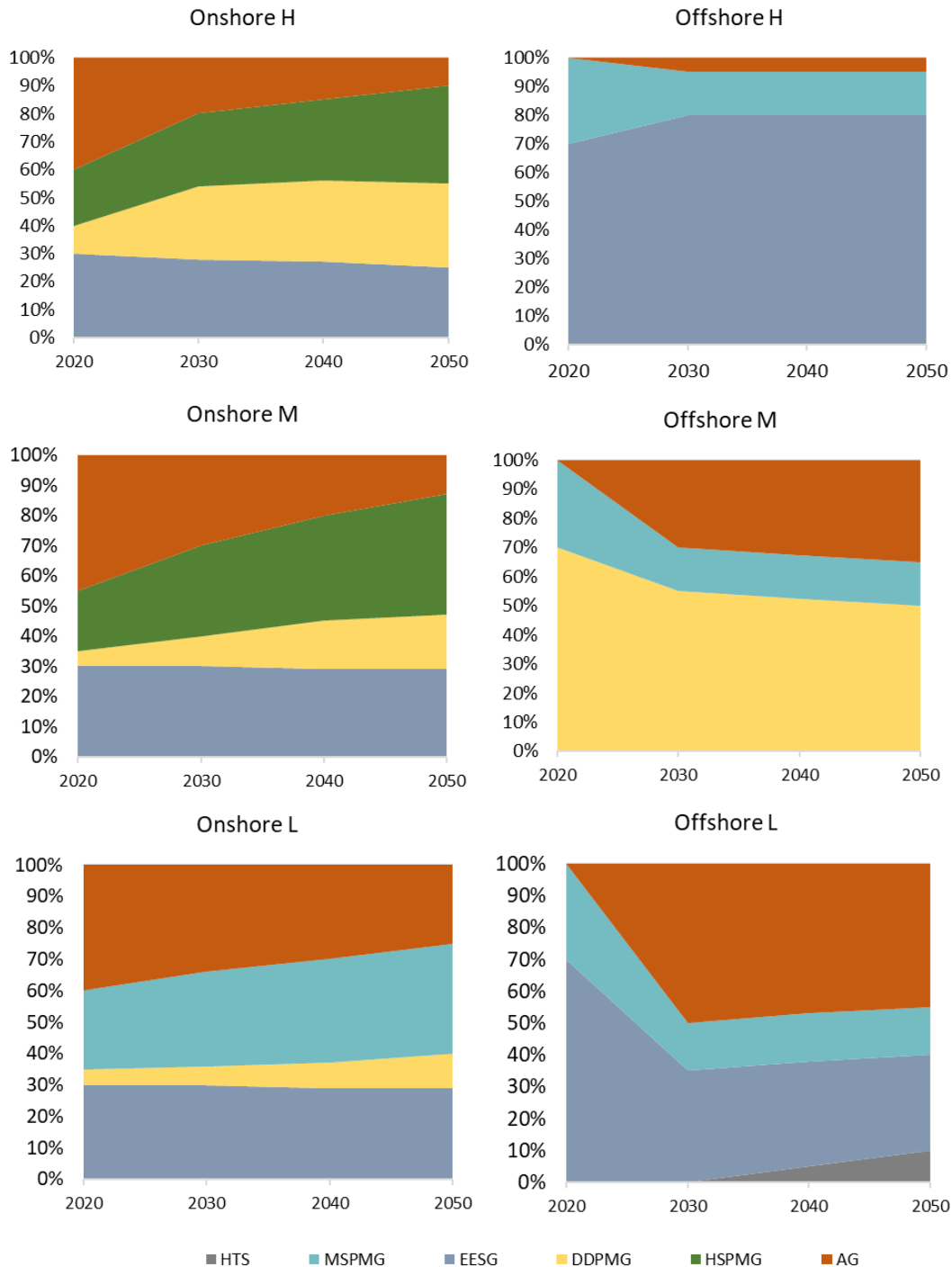
Lineaire en niet-lineaire benaderingen, voornamelijk op basis van geïnstalleerd vermogen en hoogte van de turbine, zijn gebruikt voor de materialisatie. Het historisch geïnstalleerd vermogen is gebaseerd op data van Windstats (2020). Deze bron bevat gegevens over het vermogen van de turbine, de producent, het aantal, de locatie, en de leeftijd. Voor de toekomstprojecties komen de scenario's Laag en Hoog overeen met het scenario nationaal en internationaal, respectievelijk, in de studie van Berenschot (2020). Voor het beoogde scenario (Midden) zijn de doelstellingen uit het klimaatakkoord aangenomen (PBL, 2019a; Rijksoverheid, 2019). Naast ontwikkelingen in de capaciteit is ook gekeken naar technologische ontwikkelingen. Hierbij is toenemende capaciteit van windturbines, toenemende hoogte, aandrijvingsmechanisme technologie en bladmateriaalsamenstelling meegenomen. Ten slotte is een onderscheid gemaakt tussen windturbines op land en op zee. De materiaalsamenstellingen, huidige voorraad en het toekomstig opgesteld vermogen leiden tot de ontwikkeling van de voorraad, instroom en uitstroom van materialen in Nederlandse windenergie.

Materiaalsamenstelling

De materiaalsamenstellingen zijn per onderdeel bepaald, specifiek per bouwcohort. De onderscheiden bouwcohorten zijn hierbij 2020, 2030, 2040 en 2050. Per cohort is voor zowel windturbines op land als op zee

de gemiddelde turbinehoogte (hub-hoogte), capaciteit per turbine, massa per onderdeel, en technologie voor het aandrijvingsmechanisme. Voorgenoemde variabelen zijn ook nog specifiek per scenario (Hoog, Midden, Laag).

De relatie tussen de materiaalmassa van het component en de variabele (e.g., hoogte, vermogen) kon soms lineair worden aangenomen, maar is soms anders gedefinieerd (zie Roelofs, 2020).



Figuur 2. Aandeel technologieën (% van instroom) voor het aandrijvingsmechanisme van windturbines op land (links) en windturbines op zee (rechts), voor de scenario's Laag (L), Midden (M) en Hoog (H). EESG: Electrically Excited Synchronous Generator, DDPMG: Direct Drive Permanent Magnet Generator, HSPMG: High Speed Permanent Magnet Generator, AG: Asynchronous Generator, HTS: High Temperature Superconductor, MSPMG: Medium Speed Permanent Magnet Generator.

Om de hoeveelheid elementen in staallegeringen te bepalen, zijn de betreffende legeringsmassa's vermenigvuldigd met het massapercentage van het element. Zo zijn de massa's voor molybdeen, vanadium, nikkel, mangaan, chroom en silicium ook los berekend. De massapercentages van deze elementen in de staallegeringen waren typisch lager dan 1%. Met name interessante elementen in windturbines zijn de kritische metalen in NdFeB magneten, welke in sommige winturbines worden gebruikt voor de aandrijving van de windturbines. Deze elementen omvatten neodymium, praseodymium, dysprosium en terbium. Neodymium vormt typisch 24% van de legering (München et al., 2018), terwijl de massapercentages van de andere zeldzame metalen lager ligt (Pr: 4,2%, Tb: 0,2%, Dy: 1%). De zeldzame metalen bevinden zich met name in het aandrijvingsmechanisme en is afhankelijk van het type aandrijving. Daarom is in de verschillende scenario's rekening gehouden met de ontwikkeling van de technologie. Voor de drie scenario's zijn de verhoudingen voor aandrijvingsmechanisme in de instroom van windturbines, weergegeven in Figuur 2, aangenomen (Roelofs, 2020). Voor meer details aangaande de onderscheiden aandrijvingen kan het werk van Roelofs (2020) worden bestudeerd.

Naast metalen vormt beton een belangrijk materiaal, met name voor de fundering voor onshore windturbines, en wordt een breed scala aan composieten toegepast, onder andere voor de wieken.

Levensduur

Een uitgebreide analyse naar levensduren van windturbines door Roelofs (2020) laat zien dat de typische levensduur van turbines verschilt voor windturbines op land en op zee. Ook concludeert Roelofs dat de leeftijd van de turbines typisch toeneemt; waar windturbines in het verleden een gemiddelde levensduur van 18 jaar hadden, kan deze voor windturbines op land en op zee toenemen tot gemiddeld 24 en 25 jaar, respectievelijk, in 2050. Verder is het gebruikelijk om een normaal distributie voor de levensduur van windturbines aan te nemen. Roelofs neemt hierbij een standaardafwijking van 4 aan.

3.1.3. Zonnepanelen

Ontwikkeling omvang voorraad

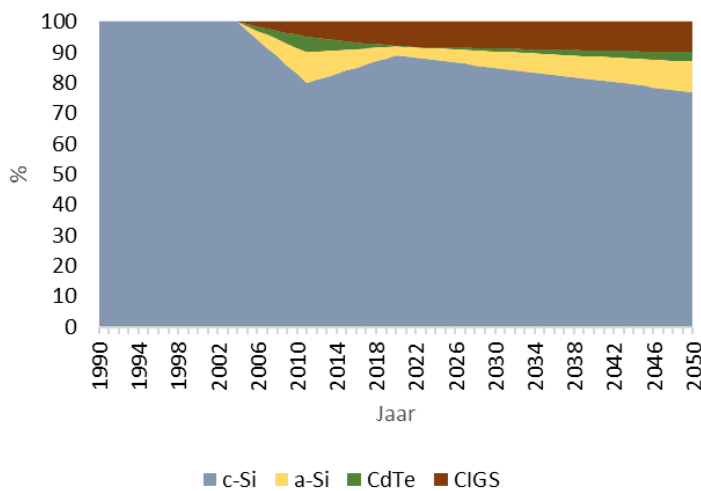
Voor de ontwikkeling van het geïnstalleerd elektrisch vermogen aan zonnepanelen in Nederland is tot 2019 data beschikbaar van het CBS (2020). Voor projecties van het geïnstalleerde vermogen in de toekomst is uitgegaan van de scenario's geformuleerd in hoofdstuk 2. Dit komt neer op 25 GW geïnstalleerd vermogen in 2030 en 48 GW in 2050 volgens het PBL (2019a) en het Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019), 37 GW geïnstalleerd vermogen in 2050 in het scenario Laag en 76 GW geïnstalleerd vermogen in het scenario Hoog.

Vervolgens is een inschatting gemaakt van het aandeel per technologie (Figuur 3). In overeenstemming met de classificaties in de vorige rapportage, zijn hierbij kristallijn varianten (c-Si) en drie typen dunne film (a-Si, CdTe en CIGS) onderscheiden. Polykristallijne zonnecellen kunnen worden gezien als de traditionele keuze. Tot 2005 kan worden aangenomen dat vooral kristallijne typen het marktaanbod vormen (Berenschot, 2011). Gebaseerd op het werk van Moss et al. (2011) neemt het Europese marktaandeel in dunne film vervolgens toe tot ongeveer 20% in 2011.

De populariteit van dunne film zonnepanelen loopt tot 2020 weer terug (Jäger-Waldau, 2018). Cijfers aangaande de ontwikkeling van het marktaandeel verschillen echter per studie (Berenschot, 2011; Jäger-Waldau, 2018; Viebahn et al., 2015). Wij nemen hier een afname aan tot 11% (8% CIGS, 3% a-Si, 0% CdTe) van het marktaandeel van dunne film technologieën in 2020, in overeenstemming met het werk van Viebahn et al. (2015).

Hoe de technologiemix zich tot 2050 zal ontwikkelen is nog onzeker. Viebahn et al. (2015) formuleren een 'Continuity' scenario, waarin kristallijne zonnecellen het meest prominent blijven, en een 'Thin

film revolution' scenario, waarin het aandeel dunne film technologieën steeds prominenter wordt. Het laatste scenario is waarschijnlijk aannemelijk wanneer het aandeel dak- of grond gemonteerde zonneparken toeneemt. Een dergelijke trend is in Nederland al zichtbaar (Strauver, 2019). Echter is de toename tot 42% dunne film in 2050 substantieel hoger dan het *high demand scenario* geformuleerd in het werk van Carrara et al. (2020). Hierin wordt een toename tot 23% geschetst (10% CdTe, 10% CIGS, en 3% a-Si) voor 2050, terwijl in het *medium* en *low demand scenario* deze percentages onder de 10% blijven. Wij hebben gekozen voor een middenweg omdat de studie van Viebahn et al. (2015) gebaseerd is op het Duitse marktaandeel, wat waarschijnlijk vergelijkbaar is met die van Nederland, en het werk van Carrera et al. (2020) de meest recent gevonden studie is, uitgevoerd door Het Europese *Joint Research Centre*, en wij verwachten dat de berekende waarden op de meest recente technologische ontwikkelingen en trends gebaseerd zijn. Daarom is uitgegaan van het *high demand* scenario in het werk van Carrara et al. (2020), omdat deze het meest in de buurt komen van het *thin film revolution* scenario van Viebahn et al. (2020): 10% CIGS, 10% CdTe, 3% a-Si. Ten slotte geeft dit scenario een kritische blik op de materiaalvraag tot 2050.



Figuur 3. Aangenomen aandeel van technologieën in zonnepanelen (% van instroom).

Materiaalsamenstelling

De materiaalintensiteiten zijn bepaald aan de hand van de literatuur. Hierbij is rekening gehouden met ontwikkelingen in efficiëntie van materiaalgebruik voor de onderscheiden technologieën. Een onderscheid is gemaakt tussen materiaalintensiteiten voor zonnepanelen (instroom) tot 2020, intensiteiten tussen 2020 en 2030, en intensiteiten van 2030 tot 2050 (Bijlage A). Aangenomen is hier, voor het kunnen bewerkstelligen van de berekening, dat tussen deze jaartallen, de materiaalintensiteiten niet veranderen.

De grotere materiaalgroepen die zijn bestudeert omvatten beton, staal, plastic, glas, silicium, aluminium en koper. Naast de grotere materiaalgroepen zijn verschillende elementen bestudeert. Deze omvatten lood, seleen, zink, tin, molybdeen en de kritieke materialen telluur, cadmium, gallium, zilver, indium en germanium.

Levensduur

In de meeste studies wordt een levensduur tussen de 20 en 30 jaar aangenomen (e.g., Carrara et al., 2020; Viebahn et al., 2015; Berger et al. 2010,). Een algemene aanname is een gemiddelde levensduur 25 jaar (ISE, 2019).

Voor zonnepanelen blijkt uit de literatuur dat een Weibull distributie vaak geschikt is (Zimmerman, 2013). De gehanteerde *shape parameter* varieert in de literatuur tussen de 2.6 en 14.41 (Laronde, 2010; Kumar en Sarkin, 2013). Wij gebruiken hier een waarde van 5.3759, omdat deze gebaseerd is op empirische data en test gegevens (Kuitche, 210; Zimmerman, 2013).

3.1.4. Kolencentrales

Ontwikkeling omvang voorraad

De Nederlandse overheid heeft besloten dat uiterlijk in 2030 alle kolencentrales gesloten moeten zijn. In 2025 geldt dit al voor de oudere kolencentrales (Eerste kamer der Staten Generaal, 2019). Eind 2019 is de Hemwegcentrale, met een capaciteit van 630 MW gesloten (van Zoelen, 2019). Het gasgestookte deel blijft nog in gebruik. De Amercentrale (600 MW) moet vanaf 2024 volledig op biomassa draaien (Reijn, 2019). De overige 3280 MW zal uiterlijk eind 2029 uit werking treden. De vraag blijft welk deel van deze centrales beschikbaar komt voor *urban mining* en welk deel een nieuwe gebruiksfunctie krijgt. Een deel zal waarschijnlijk worden ingezet voor de stook van biomassa (PBL, 2019). De functie na afdanking wordt niet verder onderzocht in deze studie.

Materiaalintensiteit

De materiaalintensiteit van kolencentrales was in de voorgaande studie bepaald (van Oorschot et al., 2020). Aangezien er geen nieuwe kolencentrales meer bijkomen, kunnen deze cijfers worden gebruikt voor het berekenen van de in- en uitstromen van materialen tot 2050. De materiaalintensiteiten zijn gerapporteerd in Bijlage A. De meest relevante materialen in deze groep omvatten beton, staal, aluminium en koper. De metalen bevatten mogelijk wel interessante hoeveelheden legeringselementen, waaronder de kritieke materialen niobium, vanadium, titanium en tantalium. Overige legeringselementen omvatten nikkel, lood, mangaan, chroom, tin, wolfram en molybdeen.

3.1.5. Gascentrales

Ontwikkeling omvang voorraad

Het blijkt lastig een inschatting te maken van het opgesteld gasvermogen in de toekomst. Ten eerste omdat een deel van de gascentrales in “de mottenballen” staat (tijdelijk buiten gebruik gesteld), en het nog onzeker is wanneer en welke zullen worden geconserveerd (PBL, 2019a; Tennet TSO, 2017). Het weer in werking brengen van deze gascentrales kost tot enkele jaren tijd, en hier spelen de bijbehorende kosten een rol (Tennet TSO, 2017). In de KEV (PBL, 2019b) wordt een tijdelijke toename verwacht van het centraal gasvermogen na 2020 door de sluiting van kolencentrales en de gunstige Europese concurrentiepositie door de stijging van de CO₂ prijs. Na 2023 wordt een afname verwacht vanwege de groei van het hernieuwbare elektriciteitsvermogen.

Volgens het actuele prijzen scenario in het *Achtergronddocument Klimaatakkoord* (PBL, 2019a), welke in overeenstemming is met de KEV (2019), is deze waarde 12,6 GW voor 2030. Hierin is geconserveerd vermogen echter nog niet meegenomen. Tennet TSO (2018) rapporteren een totaal van 19 GW opgesteld vermogen in 2018 voor operationeel en geconserveerd samen.

In de nationale sturing van Berenschot (2020) neemt het gasgebruik af tot 0 in 2050. Ook de internationale sturing verdwijnt aardgas in 2050 totaal uit het beeld van elektriciteitsvoorziening, maar is nog wel 5 GW aan elektriciteit capaciteit uit groen gas aanwezig. In de Europese sturing, hier niet meegenomen, is het aandeel (groen) gas het grootst: 45 GW in 2050. Een deel daarvan is aardgas met CCS en een deel groen gas.

Aangenomen is een lineaire afname van het geïnstalleerde vermogen (operationeel + geconserveerd) aan gascentrales tot 2050. Eventueel hergebruik van de installaties voor bijvoorbeeld het produceren van elektriciteit uit waterstof is niet meegenomen. Dit is bijvoorbeeld het plan voor de Magnum centrale in de Eemshaven (Wiersma, n.d.). Aangenomen is dat in alle scenario's, in overeenstemming met het nationale en internationale scenario van Berenschot (2020), het geïnstalleerde vermogen aardgascentrales afneemt tot 0. In het scenario Laag is nog wel 5 GW geïnstalleerd vermogen aan groen gas aanwezig. Omdat groen gas en aardgas hier samen genomen zijn, neemt in dit scenario het geïnstalleerd vermogen gascentrales af tot 5 GW. Deze dient vooral als *back-up* centrale (Berenschot, 2020). In het scenario Midden zijn de gemiddelde waarden van scenario Hoog en Laag genomen. In 2030 komt het geïnstalleerd vermogen dan bijna overeen met de doelstellingen in de PBL studie (2019a).

Wat bovenstaande ontwikkelingen betekenen voor de beschikbaarheid van materialen uit de urban mine is lastiger te bepalen door onduidelijk over mogelijk hergebruik in de vorm van biomassaverbranding en vergassing, of bijvoorbeeld het gebruik voor waterstofproductie. De berekende uitstroom is daarom mogelijk een overschatting van de daadwerkelijke hoeveelheid materiaal die beschikbaar komt voor secundaire productie.

Materiaalintensiteit

De materiaalintensiteit van gascentrales was in de voorgaande studie bepaald. Aangezien er waarschijnlijk geen nieuwe gascentrales bijkomen door de doelstellingen van de energietransitie, kunnen deze cijfers worden gebruikt voor het berekenen van de in- en uitstromen van materialen tot 2050. Relevante materialen omvatten hier ten eerste beton, staal, aluminium en koper, kobalt, chroom en nikkel.

3.1.6. Biomassa- en afvalverbrandingscentrales

Ontwikkeling omvang voorraad

Volgens de projectie van Urgenda (2018) vormt biomassa een belangrijke back-up, en zijn tot 2030 zeker 5 grote biomassa centrales en 13 grote groen-gascentrales nodig. In de scenario's van Berenschot (2020) neemt elektriciteitsproductie uit biomassa echter af tot 0 in 2050. In een verkenning van Tennet TSO (2018) blijven de waarden voor het opgesteld vermogen elektriciteitsproductie uit biomassa en biogas tot 2033 0,5 GW. In het *Achtergronddocument effecten ontwerp Klimaatakkoord: elektriciteit* (PBL, 2019a) is de capaciteit van biomassa en afvalverbranding op 1,6 GW geschat voor 2030 en is net als in de studie van Tennet de verwachting dat het gebruik

van biomassa van 2020 tot 2030 vrijwel constant zal blijven. Het huidig geïnstalleerd vermogen van biomassa- en afvalverbranding was in de vorige studie berekend als 0,9 GW.

In de projecties van Berenschot wordt een afname van het geïnstalleerd vermogen van afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) verwacht, en is in de nationale en internationale scenario's voor 2050 nog een geïnstalleerd vermogens van 0,4 en 0,7 GW respectievelijk aanwezig. In deze scenario's wordt geen biomassa ingezet voor het produceren van elektriciteit, maar wel voor warmteproductie, industrie, mobiliteit en landbouw, vaak door eerst de biomassa om te zetten naar biobrandstoffen of groen gas (buiten scope studie).

Uitgegaan is hier van een geleidelijke afname van het geïnstalleerd vermogen aan biomassa- en afvalverbranding, gebaseerd op de berekende waarde in voorgaande studie voor 2018 (0,9 GW), naar 0,4 GW in het scenario Hoog en 0,7 GW in het scenario Laag. In de PBL studie (2019a) wordt voor 2030 echter nog een geïnstalleerd vermogen van biomassacentrales en AVI's van 1,6 GW geschat; omdat voor 2050 geen concrete doelstellingen vanuit beleid zijn gevonden is voor het scenario Midden een lineaire afname tot 2050 aangenomen tot het gemiddelde van scenario Hoog en Laag (0,55 GW).

Materiaalsamenstelling

De materiaalintensiteit van biomassa- en afvalcentrales was in de vorige studie bepaald (van Oorschot et al., 2020). Omdat we hier uitgaan van een afname van de voorraad, en geen instroom van materialen, is een onveranderde materiaalcompositie aangenomen. Relevante materialen in de biomassa- en afvalverbrandingscentrales zijn ten eerste de bulkmaterialen beton, staal, aluminium en koper. Daarnaast zijn dezelfde intensiteiten van elementen aangenomen als bij kolencentrales, waaronder de kritieke materialen niobium, vanadium, titanium en tantalium. Overige legeringselementen omvatten nikkel, lood, mangaan, chroom, tin, wolfram en molybdeen.

3.4.7. Kernenergie

Ontwikkeling omvang voorraad

Wettelijk is afgesproken dat in 2034 wordt begonnen met de ontmanteling van de enige kerncentrale in Nederland. Dit proces zal naar verwachting 14 jaar duren (EPZ, n.d.) en omvat circa 350.000 ton materiaal. Daarvan is 85% beton en ander bouwafval, 5% is staal dat direct of indirect kan worden hergebruikt en is 10% is radioactief afval.

Materiaalintensiteit

In de voorgaande studie was de materiaalintensiteit van kerncentrales al berekend (Van Oorschot et al., 2020). De hoeveelheid beton en staal zijn hier bijgewerkt naar de cijfers van EPZ (n.d.). Elementen die in de kerncentrale voorkomen omvatten chroom, zink, molybdeen, nikkel, lood, wolfram, tin en de kritieke materialen yttrium, niobium, vanadium, hafnium, zilver, indium en titanium. Echter zal een deel van de materiaaluitstroom radioactief afval omvat, wat niet kan worden hergebruikt. Deze zullen dus niet opnieuw kunnen worden ingezet in de economie, maar op een geschikte manier moeten worden opgeruimd.

3.1.8. Waterstofproductie

Ontwikkeling omvang voorraad

De materialen gerelateerd aan elektriciteitsproductie uit waterstof was nog niet geanalyseerd in de voorgaande rapportage, omdat deze energiebron in het huidige energiesysteem nog niet wordt toegepast voor grootschalige elektriciteitsproductie. De technologie ligt op de grens van elektriciteitsproductie en elektriciteitsopslag; het proces van het produceren en weer verbranden van waterstof is feitelijk vergelijkbaar met een batterij. Het produceren van elektriciteit uit waterstof behoort echter wel tot de elektriciteitsproductie, en hiervoor zullen installaties nodig zijn.

In de gebruikte scenario's van Berenschot ligt het geïnstalleerd vermogen aan waterstofcentrales hoog (> 40 GW). Dit komt doordat in het nationale scenario van Berenschot de nadruk ligt op grootschalige wind- en zonneparken; op dagen dat er weinig zon en wind is moet de elektriciteitsvraag worden opgevangen door waterstofcentrales. In het internationale scenario van Berenschot wordt een groot deel van de elektriciteit geïmporteerd. De piekvraag wordt in dit scenario opgevangen met behulp van waterstofcentrales.

Tot 2030 blijft het geïnstalleerde vermogen van waterstofproductie (in elektriciteitscentrales) in de meeste scenario's 0, met uitzondering van de geleidelijke omschakeling van de Magnum gascentrale naar een waterstofcentrale (Wiersma, n.d.). De groei van elektriciteitsproductie uit waterstof varieert in het nationale en internationale scenario van Berenschot (2020) van 41 tot 46 GW opgesteld vermogen. Voor het scenario Midden is het gemiddelde van de waarden van scenario Hoog en Laag genomen.

Materiaalintensiteit

In de literatuur is geen data gevonden voor de materiaalintensiteit van op waterstof gestookte elektriciteitscentrales. In de toekomst kan deze data mogelijk via energieleveranciers zoals GasUnie en Vattenfall worden verkregen. Omdat de Magnum centrale, een gasgestookte elektriciteitscentrale, wordt omgebouwd tot elektriciteitscentrale, is hier aangenomen dat de benodigde bulkmaterialen voor onder andere de constructie in een gascentrale vergelijkbaar zijn met die van op waterstof gebaseerde elektriciteitscentrales. In werkelijkheid zullen brandstofcellen nodig zijn in plaats van turbines om uit waterstof elektriciteit te produceren. Moss et al. (2013) rapporteren voor brandstofcellen de benodigde kritische metalen, deze zijn gebruikt in deze studie.

Levensduur

Als we uitgaan van een vergelijkbare levensduur van waterstofcentrales met kolen- en gascentrales, welke typisch rond de 30-40 jaar ligt, kunnen we nog geen uitstroom van materialen verwachten. Er is in deze studie daarom alleen uitgegaan van een instroom van materialen.

3.2. Bestemming afgedankte voorraden & herbruikbaarheid

Naast een studie van de dynamiek van het elektriciteitssysteem zijn recycling opties voor de verschillende materialen geanalyseerd. Hiertoe is eerst de huidige bestemming van de afgedankte materialen voor de verschillende producten in het systeem geïnventariseerd op basis van literatuur,

bedrijfsdocumenten en expert interviews. Ook is geïnventariseerd of er sprake is van *hibernation* van de componenten. Hibernation verwijst naar producten die uit werking zijn getreden, maar geen afvalverwerkingsstroom betreden. Een voorbeeld hiervan zijn ondergrondse kabels die, nadat ze uit gebruik zijn getreden, niet worden verwijderd.

Vervolgens is geïnventariseerd waar nog kansen liggen voor een hoogwaardige herbestemming van de uitstromen of hibernating voorraden. In het laatste hoofdstuk formuleren we op basis van de bevindingen een aantal opties ter bevordering van hoogwaardige secundaire productie van de materialen binnen het elektriciteitssysteem.

4. Resultaten

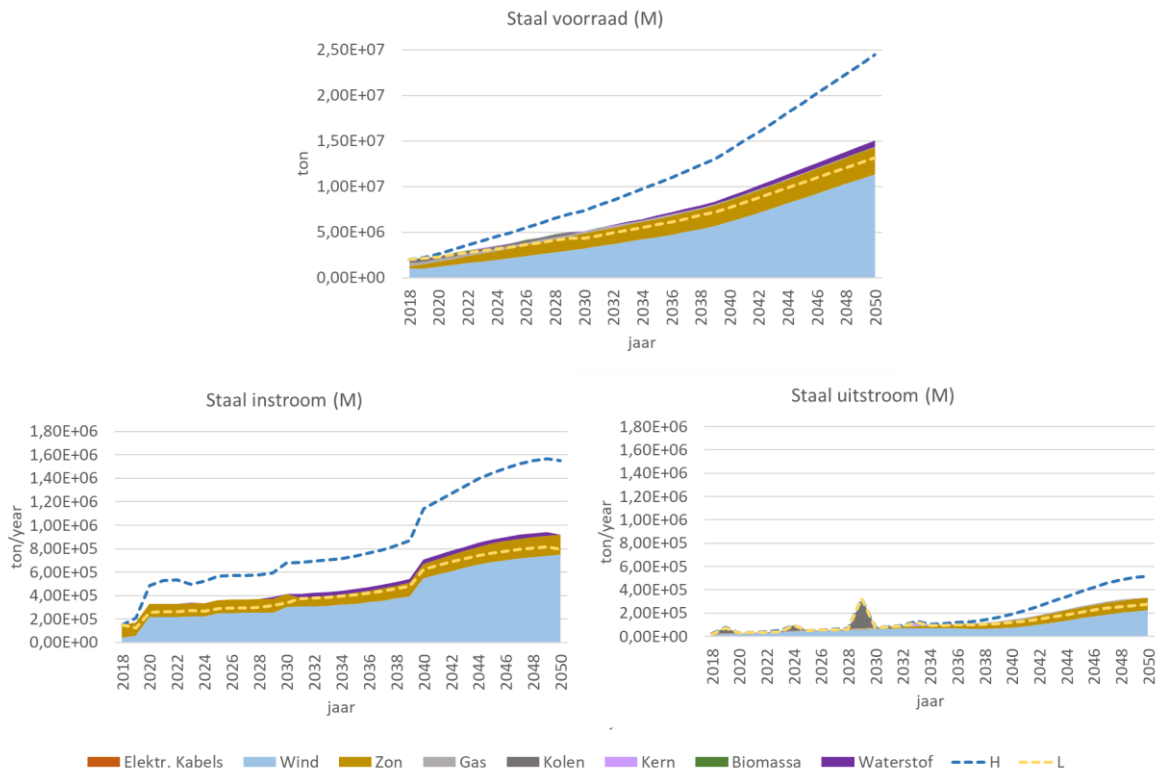
4.1 Uitkomsten totalen voor scenario's Hoog, Midden en Laag

Voor elk van de subgroepen is de ontwikkeling van de materiaal instroom, uitstroom en voorraad berekend voor het scenario Hoog, Midden en Laag. De totalen voor elk materiaal kunnen bij elkaar worden opgeteld om tot een totaalbeeld van de dynamiek van de materialen in het elektriciteitssysteem te komen. Hier lichten wij de totalen toe voor staal en aluminium, omdat deze in alle voorraadgroepen voorkomen en de materiaalvoorraden verschillend zijn in dynamiek en compositie van de producten. De resultaten geven een beeld van de verschillen in omvang van de voorraadgroepen. De andere materiaalgroepen worden in meer detail besproken in de volgende sectie, specifiek per productgroep. Dit is gedaan omdat veel elementen specifiek zijn voor bepaalde productgroepen. Bijvoorbeeld, neodymium komt voornamelijk in permanente magneten van windturbines voor, en indium bevindt zich voornamelijk in zonnepanelen. Tabellen met de totalen voor elk materiaal, specifiek per productgroep, zijn te vinden in bijlage B.

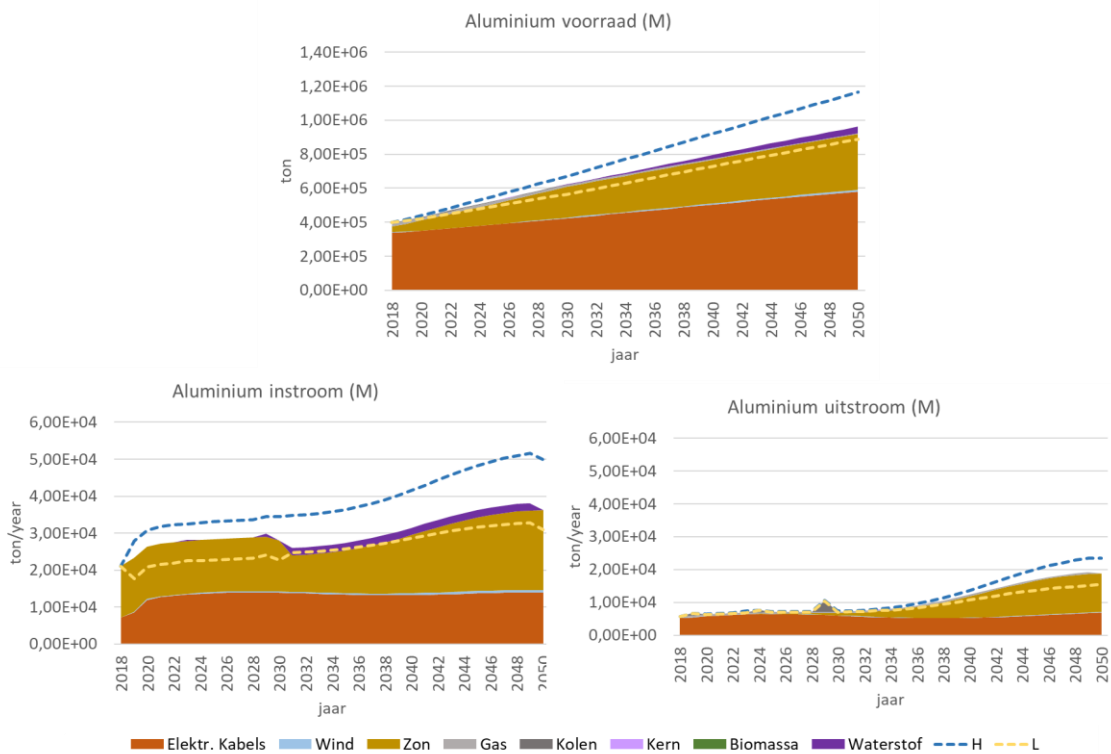
De voorraad staal groeit in alle scenario's (Figuur 4). Verder valt op dat de totale voorraad, instroom en uitstroom aan staal in 2050 twee tot drie keer groter is in scenario Midden (hierna scenario M genoemd) dan in scenario Laag (hierna scenario L genoemd), en het totaal in scenario Hoog (hierna scenario H genoemd), weer ongeveer twee keer groter is dan scenario M. De totale voorraden in 2050 zijn 26.8 miljoen ton, 12.4 miljoen ton en 5.4 miljoen ton voor scenario H, M en L respectievelijk. Staal bevindt zich met name in windturbines en zonnepanelen. De verhouding staal tussen de technologieën is in zowel de voorraad, in- en uitstroom redelijk vergelijkbaar voor de verschillende scenario's (zie bijlage B). Opvallend is verder dat de uitstroom van staal een aantal pieken laat zien. Dit illustreert het uitwerking treden van een aantal kolencentrales. Een dergelijke piek is ook zichtbaar voor de kerncentrale Borsele.

De grafieken zien er anders uit voor aluminium (Figuur 5). Hier vormen elektriciteitskabels een belangrijk onderdeel van de voorraad, instroom en uitstroom. Net als bij staal is verhouding aluminium tussen de technologieën in de voorraad, in- en uitstroom redelijk vergelijkbaar voor de verschillende scenario's (zie bijlage B). Daarnaast vormen ook zonnepanelen en waterstof elektriciteitscentrales een belangrijke onderdeel van de voorraad, instroom en uitstroom van aluminium. In alle scenario's neemt, net als bij staal, de totale voorraad, instroom en uitstroom toe. De verschillen tussen de scenario's is relatief klein in vergelijking met staal. De voorraad aluminium in 2050 is in scenario M (0.95 miljoen ton) ongeveer 10% hoger dan in scenario L (0.88 miljoen ton), en in scenario H (1.16 miljoen ton) 20% hoger dan in scenario M. Net als bij staal zijn bij de uitstroom de pieken bij de uitstroom van kolencentrales zichtbaar.

Een interessant gegeven is in hoeverre de vraag naar materialen in theorie voorzien kan worden uit het aanbod van de *urban mine*. Wanneer we kijken naar 2050, is er een tekort van 0.13 miljoen tot 1.2 miljoen ton staal in het scenario L en H respectievelijk. Voor aluminium zijn deze waarden 15 duizend tot 27 duizend ton voor het scenario L en H respectievelijk. Desalniettemin betekent dit dat een aanzienlijk deel van de vraag, typisch rond de 50% (afhankelijk van het scenario) in theorie voorzien kan worden uit de uitstroom van materialen uit de *urban mine*. Belangrijk is wel om te realiseren dat het niet zinvol is om alleen naar het elektriciteitssysteem te kijken voor het sluiten van de grondstoffenkring, maar dat ook naar andere voorraden moet worden gekeken. Echter geeft een dergelijke vergelijking wel een beter gevoel voor de cijfers en de relevantie van de uitstromen voor een circulaire econo



Figuur 4. Projecties voor de ontwikkeling van de voorraad, instroom, en uitstroom staal voor de scenario's Hoog (H), Midden (M) en Laag (L).

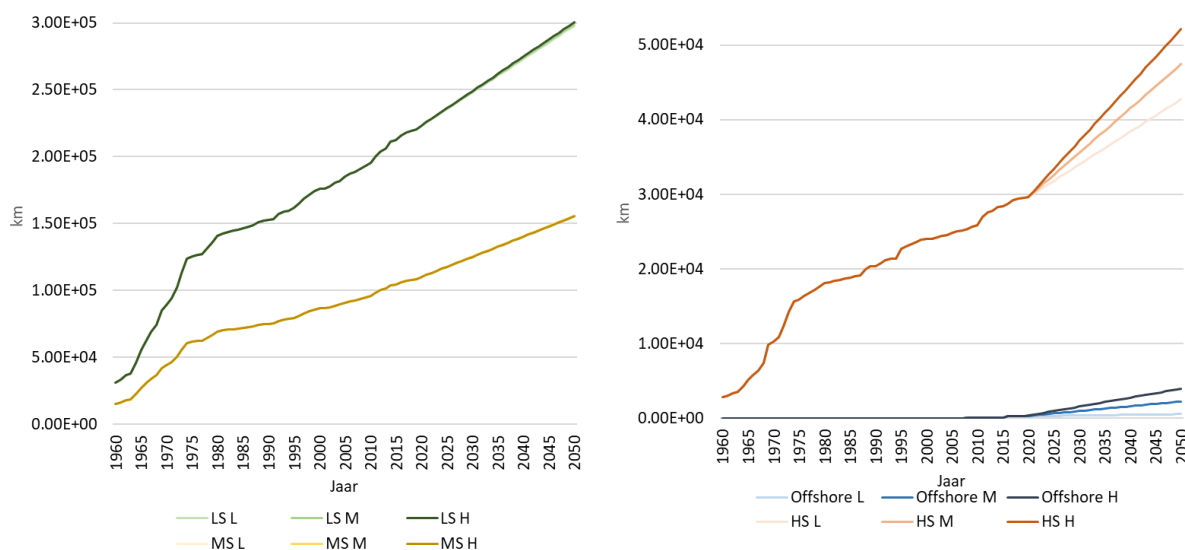


Figuur 5. Projecties voor de ontwikkeling van de voorraad, instroom, en uitstroom aluminium voor de scenario's Hoog (H), Midden (M) en Laag (L).

4.2 Resultaten per subgroep

4.2.1. Distributie & transport elektriciteit

De ontwikkeling van de voorraad in kilometer kabel is weergegeven per type kabel in Figuur 6. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen hoogspanning, middenspanning en laagspanning. Hoogspanning omvat extra hoogspanningslijnen, extra hoogspanningskabels (ondergronds), hoogspanningslijnen en hoogspanningskabels (ondergronds). Offshore hoogspanningskabels zijn apart weergegeven. Op midden- en laagspanningsniveau zijn alle kabels ondergronds. De figuur laat zien dat duidelijke verschillen zichtbaar zijn in de ontwikkeling van de kilometers kabels en lijnen op hoogspanningsniveau tussen de scenario's, terwijl deze verschillen relatief klein zijn voor laag- en middenspanningskabels.



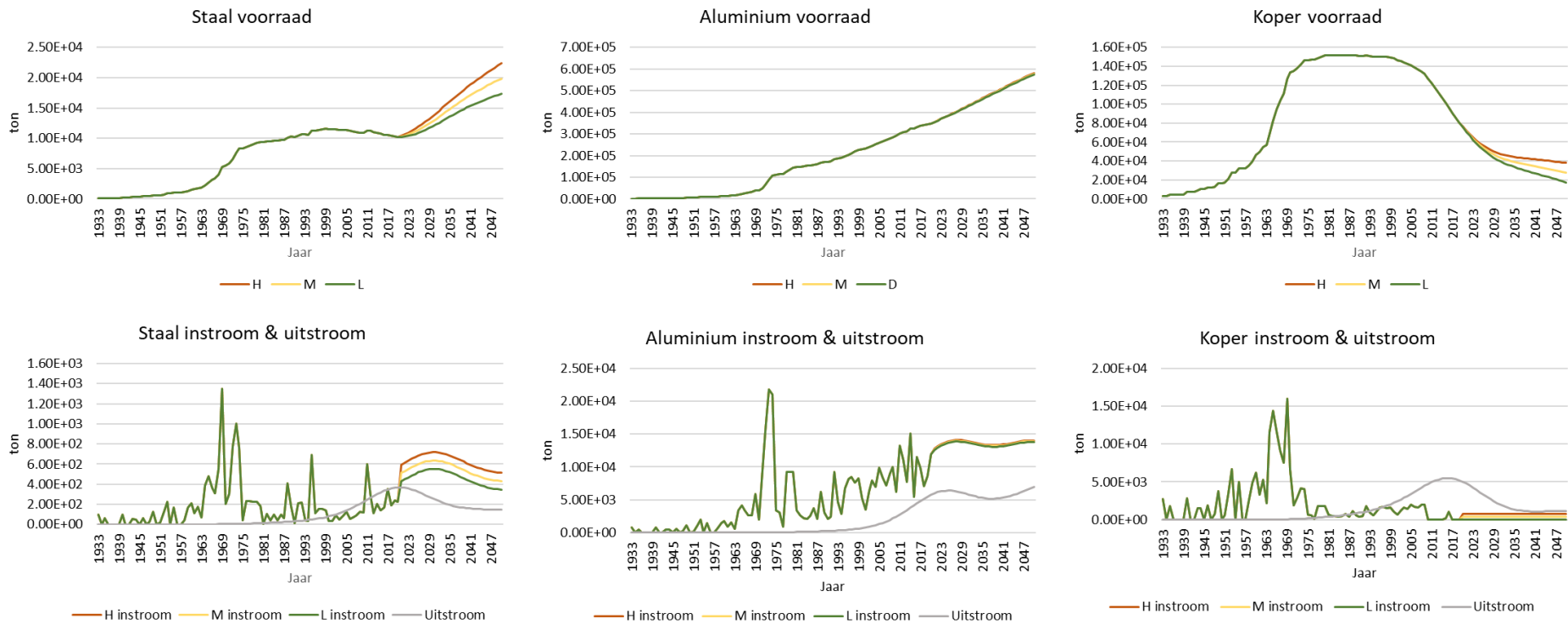
Figuur 6. Voorraadontwikkeling van verschillende type kabels voor de scenario's Hoog (H), Midden (M) en Laag (L). Links: laagspanningskabels (LS) en middenspanningskabels (MS), rechts: Hoogspanningskabels (HS, inclusief extra-hoogspanningskabels (EHS), ondergronds + bovengronds) en offshore (HS) kabels.

In elk scenario neemt het geïnstalleerde vermogen aan elektriciteit toe, resulterend in en groei van het benodigde transport en distributienet. Figuur 7 laat de ontwikkeling van de voorraad, instroom en uitstroom staal, aluminium en koper zien voor de scenario's Hoog, Midden en Laag. Opvallend is ten eerste het verschil tussen de ontwikkeling van de voorraad staal en aluminium, ten opzichte van koper. Waar de voorraad staal en aluminium in elk scenario groeit ten opzichte van het verleden, neemt de voorraad koper juist af. Dit is te verklaren door het feit dat nieuwe elektriciteitskabels meestal een aluminium geleider hebben in plaats van een koperen geleider. De enige uitzondering hierop zijn nu nog offshore kabels. De voorraad koper bereikt de grootste voorraad rond het jaar 1990, 0.15 miljoen ton, en zal volgens de scenario's afnemen tot tussen de 38 en 17 duizend ton in 2050. De voorraad staal neemt volgens de scenario's toe tot tussen de 17 en 22 duizend ton in 2050, en de voorraad aluminium tot rond de 0.58 miljoen ton in 2050. Belangrijk is om hierbij te vermelden dat hier nog geen rekening is gehouden met *hibernating stocks*. Verschelling (2020) schat het *hibernating* percentage van kabels die uit werking treden tussen de 65% tot 85%. Wanneer we uitgaan van deze percentages zal de werkelijke voorraad voor de verschillende materialen in

werkelijkheid hoger liggen. Vergelijkbaar zijn de berekende uitstromen in de scenario's waarschijnlijk een overschatting, en blijft een groot deel onder de grond liggen.

De instroom van aluminium en staal is voor elk scenario relatief hoog in vergelijking met voorgaande jaren, al zijn er ook jaren waarin de vraag hoger was dan elk van de scenario's. Ook valt op dat de vraag naar aluminium in de verschillende scenario's relatief dicht bij elkaar ligt, terwijl deze waarden verder uit elkaar liggen bij staal en koper. Omdat koper in moderne kabels vaak wordt vervangen door aluminium, zien we dat de instroom de afgelopen decennia is afgenomen, en ook in de verschillende scenario's laag blijft. De instroom koper die nog overblijft is voor offshore kabels.

Wanneer we naar de uitstroom van materialen uit elektriciteitskabels en lijnen kijken, blijkt dat, in theorie, tot 50% van de aluminium- en staalvraag voorzien zou kunnen worden door uitwerking getreden elektriciteitskabels en lijnen. Voor koper overschrijdt het aanbod van uit werking getreden kabels de vraag naar koper voor nieuwe kabels. Het overschat aan koper kan, gezien de over het algemeen goede recyclebaarheid en hoge waarde, waarschijnlijk wel in andere producten worden ingezet.



Figuur 7. Ontwikkeling van de voorraad, instroom en uitstroom staal (boven) en aluminium (onder) in elektriciteitskabels voor de scenario's hoog (H), Midden (M) en Laag (L).

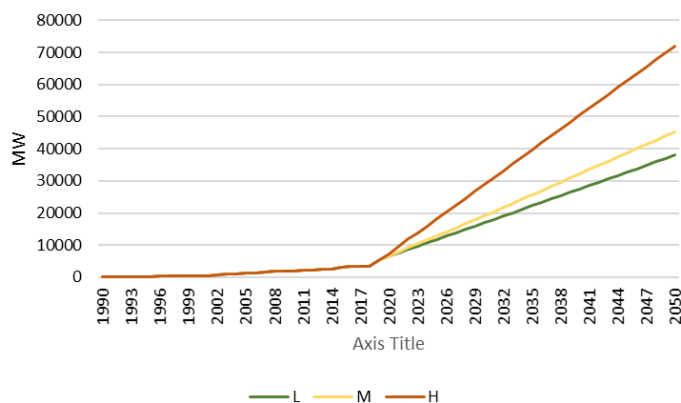
4.2.2. Windturbines

Figuur 8 laat de ontwikkeling van opgesteld vermogen zien voor de scenario's Hoog, Midden en Laag, en Figuur 9 de resultaten voor staal en neodymium. Een volledig overzicht van elk afzonderlijk materiaal (of element) en de opbouw van onderdelen in de voorraden en stromen zijn te vinden in de studie van Roelofs (2020). Hier is ervoor gekozen om staal en neodymium uit te lichten omdat staal een van de grootste en meest waardevolle bulkmaterialen vormt in de windturbines, en neodymium omdat het een kritiek materiaal is waarnaar de vraag in de toekomst zal groeien, terwijl het toeleveringsrisico toeneemt.

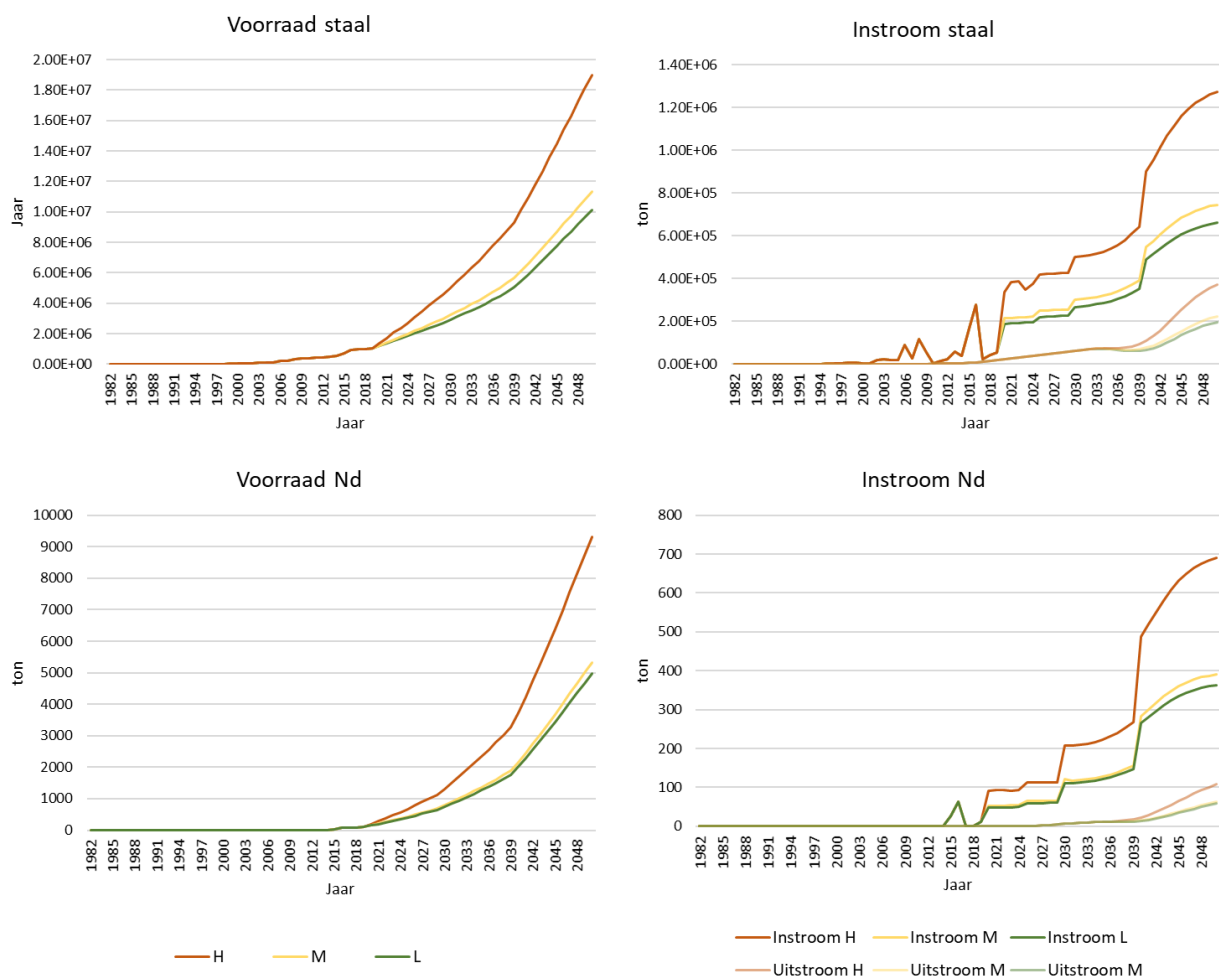
Andere relevante materialen in windturbines omvatten beton, aluminium, koper en kritieke metalen zoals dysprosium, praseodymium en terbium. De resultaten voor alle materialen en elementen zijn gerapporteerd in bijlage B.

De voorraad van materialen neemt in elk scenario sterk toe. Hetzelfde geldt, in mindere of meerdere mate, afhankelijk van het scenario, voor de in- en uitstroom. Het valt op dat het verschil in de voorraad uiteenloopt voor de verschillende scenario's; de voorraad staal in 2050 neemt in scenario M (11,3 miljoen ton) licht toe ten opzichte van scenario L (10.1 miljoen ton), en ligt in scenario H (19.0 miljoen ton) bijna twee keer hoger dan scenario L. Vergelijkbaar ligt de voorraad neodymium in scenario M (5.3 duizend ton) in de buurt van scenario L (5.0 duizend ton), en is scenario H (9.3 duizend ton) ongeveer twee keer groter dan scenario M en L.

Wanneer we de uitstroom met de instroom vergelijken, blijkt dat de uitstroom ruim beneden de instroom blijft. Voor staal kan, afhankelijk van het scenario en het jaar, tussen de 6% en 30% van de jaarlijkse vraag in theorie voorzien worden uit de uitstroom van staal. Van de neodymium kan in theorie tussen de 1% tot 16% voorzien worden uit secundair materiaal, afhankelijk van het scenario. Deze percentages zijn voor het jaar 2050, en lopen af in het verleden, omdat het gebruik van permanente magneten (NdFeB) pas relatief recent, en in steeds grotere mate, worden toegepast in windturbines.



Figuur 8. Ontwikkeling opgesteld vermogen windturbines voor de scenario's Laag (L), Midden (M), en Hoog (H).



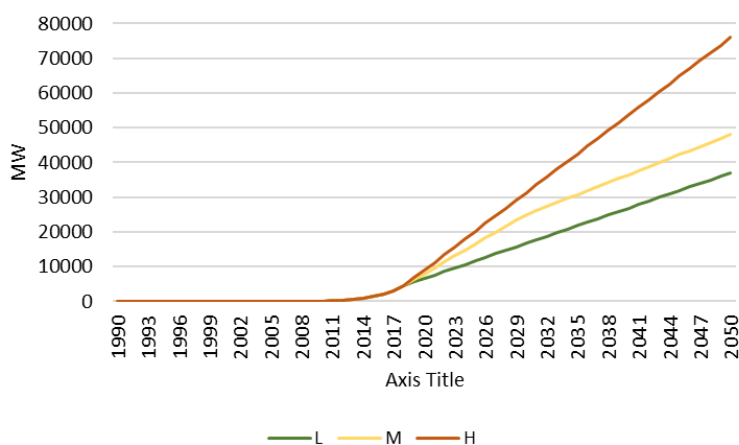
Figuur 2. Ontwikkeling van de voorraad, instroom en uitstroom van staal (boven) en neodymium (onder) in windturbines voor de scenario's Hoog (H), Midden (M) en Laag (L).

4.2.3. Zonnepanelen

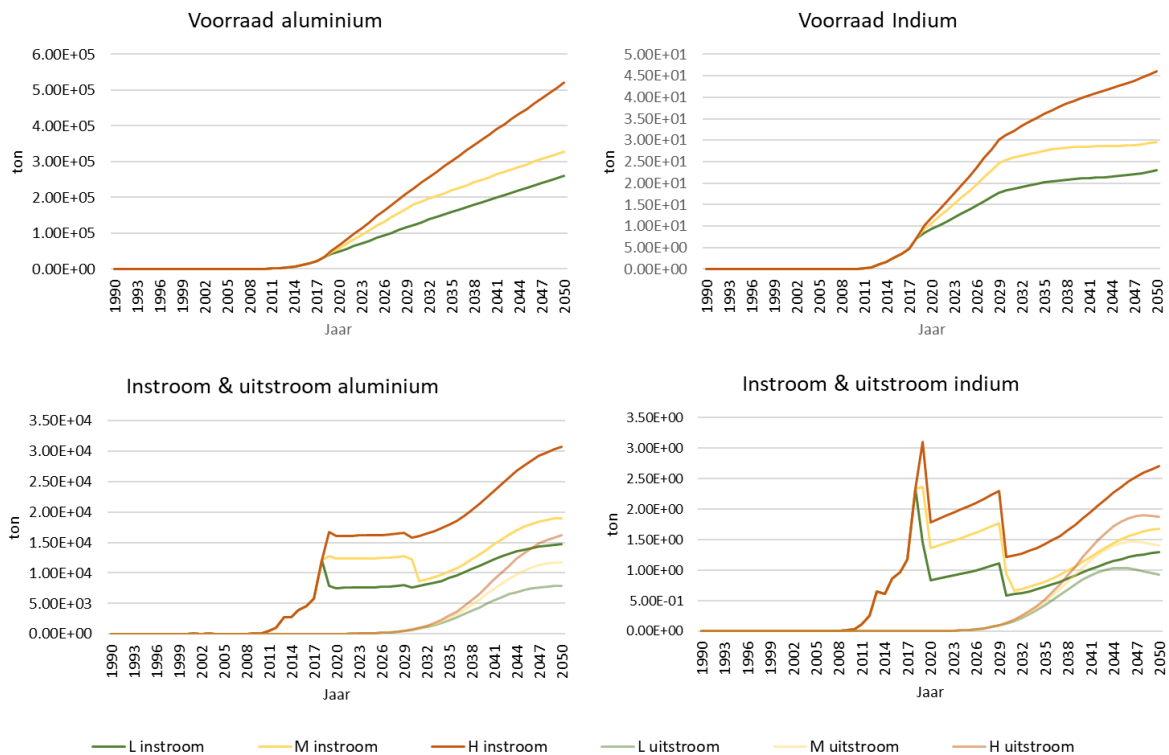
Figuur 10 laat de ontwikkeling van het opgesteld vermogen zonnepanelen zien, en Figuur 11 de ontwikkeling van de voorraden, instromen en uitstromen aluminium en indium voor de scenario's Hoog, Midden en Laag. Net als bij windturbines zijn deze twee materialen uitgelicht omdat aluminium een waardevolle bulk van het product vormt, en indium een kritiek metaal is waarnaar de vraag waarschijnlijk zal groeien. De resultaten voor alle materialen zijn gerapporteerd in bijlage B.

Ten eerste valt op dat de voorraden van beide materialen sterk groeien in de drie scenario's, waarbij de groei aanzienlijk sterker is bij aluminium dan bij indium. De afvlakking van de voorraadgroei indium is te verklaren is door de aangenomen toename in materiaal efficiëntie. De waarden voor de verschillende scenario's liggen voor beide materialen redelijk ver uit elkaar. De totale voorraad aluminium neemt in 2050 toe tot 0.52 miljoen ton in scenario H, met 37% minder in scenario M (0.33 miljoen ton) ten opzichte van scenario H, en weer met 21% in scenario L (0.26 miljoen ton) ten opzichte van scenario M. De totale voorraad indium neemt in 2050 toe tot 46 ton in scenario H, 30 ton in scenario M (36% lager dan H) en 23 ton (22% lager dan M) in scenario L. De instroom en uitstroom blijven redelijk stabiel tussen 2020 en 2030, waarbij er nauwelijks materialen uitstromen. Vanaf 2030 is een sterkere stijging in de in- en uitstroom te zien tot 2040. Tussen 2040 en 2050 vlakt de groei van de stromen weer af. De instroom blijft in deze periode groter dan de uitstroom, maar deze komen in de scenario's wel iets dichterbij elkaar. In theorie kan een aanzienlijk deel van de vraag naar aluminium en indium in de verschillende scenario's worden voorzien door uitstromen uit afgedankte zonnepanelen. Typisch zijn deze waarden nog laag voor de verschillende scenario's tot 2030 (minder dan 1% tot enkelen procenten), maar lopen de waarden voor aluminium op tot rond de 50% en de waarden voor indium tot rond de 90% in 2040.

Pieken in de instroom kunnen worden verklaard door een sterke toename in het geïnstalleerde vermogen tussen 2017 en 2018 (CBS, 2019). Het dal in 2030 wordt veroorzaakt door aannames in de materiaal efficiëntie.



Figuur 10. Ontwikkeling opgesteld vermogen zonnepanelen voor de scenario's Laag (L), Midden (M) en Hoog (H).

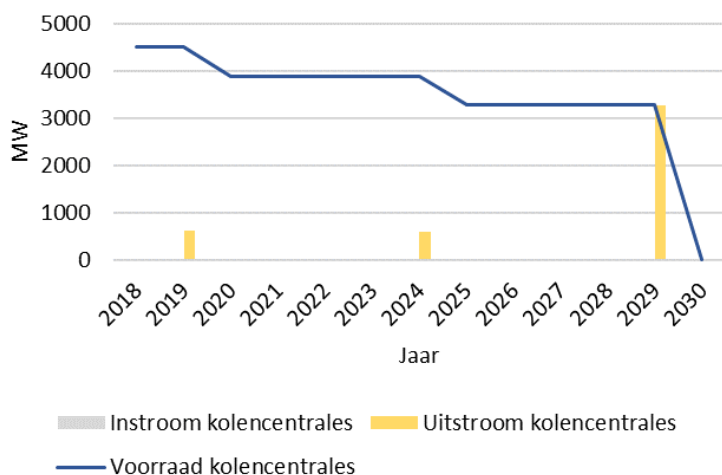


Figuur 11. Ontwikkeling van de voorraad, instroom en uitstroom aluminium (links) en indium (rechts) in zonnepanelen voor de scenario's Hoog (H), Midden (M) en Laag (L). De uitstromen zijn aangegeven met de transparantere kleuren.

4.2.4. Kolencentrales

De ontwikkeling van materiaalvoorraden en uitstromen uit kolencentrales wordt gekenmerkt door een aantal pieken (uitstroom) en dalen (voorraad). De totale voorraad neemt af tot 0 in het jaar 2030. In de jaren waarin centrales uit werking treden is een piek in de uitstroom te zien, en de bijbehorende daling in de voorraad. Figuur 12 laat de resultaten in geïnstalleerd vermogen zien; de grafiek ziet er vergelijkbaar uit voor de materialen. De uitstroom voor staal vormt bijvoorbeeld 49 duizend ton in 2019, 46 duizend ton in 2024 en 0.25 miljoen ton in 2030. De resultaten van alle materialen is gerapporteerd in Bijlage B.

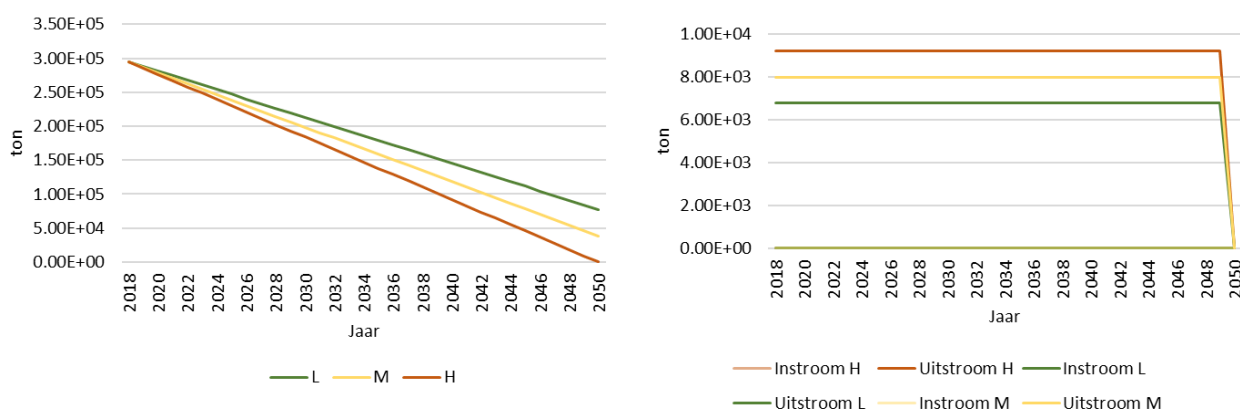
De voorraden en stromen weergegeven in het figuur vormen een versimpelde weergave van de werkelijkheid. In werkelijkheid is de dynamiek complexer, omdat behalve sloop en recycling de kolencentrales ook kunnen omschakelen naar bijvoorbeeld biomassacentrales of een totaal andere functie kunnen krijgen. Daarnaast kan de sloop langer dan een jaar duren, resulterend in het later beschikbaar komen van de materialen en componenten voor secundaire productie. De hier gepresenteerde uitstromen laten dus een theoretisch maximum van uitstromen zien.



Figuur 12. Ontwikkeling geïnstalleerd vermogen kolencentrales.

4.2.5. Gascentrales

Voor gascentrales is een geleidelijke uitfasering van het geïnstalleerd vermogen aangenomen. De jaarlijkse uitstroom voor staal is 9.2 duizend ton in scenario H, 8 duizend ton in scenario M, en 6.8 duizend ton in scenario L (Figuur 13). De voorraad neemt af tot 0 in het scenario Hoog, en neemt af tot 78 duizend ton en 39 duizend ton in het lage scenario Laag en Midden respectievelijk. Dit komt overeen met een afname van geïnstalleerd vermogen van 19 GW in 2018 tot 5 GW, 2.5 GW en 0 GW voor scenario Laag, Midden en Hoog respectievelijk. Net als bij kolencentrales laten de andere materialen eenzelfde figuur zien, met andere waarden. De resultaten voor alle materialen zijn gerapporteerd in Bijlage B. In werkelijkheid zal de voorraadontwikkeling en uitstroom meer door pieken worden gekenmerkt; in sommige jaren is er misschien geen uitstroom, in anderen in mindere of meerdere mate, afhankelijk van het aantal centrales en de capaciteit van die centrales. Net als bij kolencentrales is hier geen rekening gehouden met de eventuele ombouw naar elektriciteitsproductie op basis van een andere brandstof, zoals bijvoorbeeld waterstof, of het krijgen van een totaal nieuwe functie.

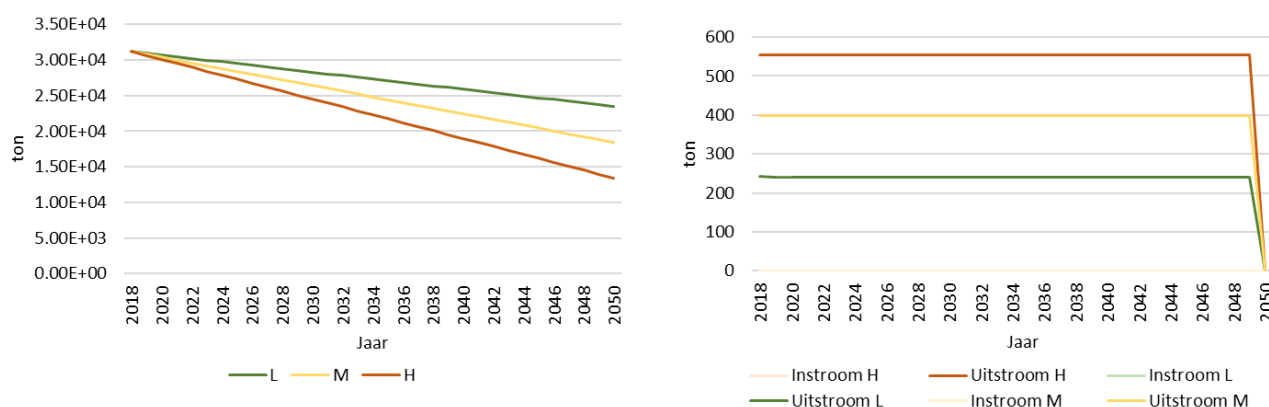


Figuur 13. Ontwikkeling van de voorraad (links), instroom (rechts, is 0) en uitstroom (rechts) staal in gascentrales voor de scenario's Laag (L), Midden (M) en Hoog (H).

4.2.6. Biomassa- en afvalverbrandingscentrales

De resultaten voor biomassa- en afvalverbrandingscentrales zijn vergelijkbaar met de gascentrales. In het scenario Hoog neemt de voorraad af van 929 MW tot 400 MW geïnstalleerd vermogen in 2050, in het scenario Midden neemt de voorraad af tot 550 MW geïnstalleerd vermogen, en in het lage scenario ligt deze waarde in 2050 op de 700 MW. Figuur 14 laat de ontwikkeling van de voorraad, instroom en uitstroom zien tot 2050 voor staal. Aangenomen is het geïnstalleerde vermogen geleidelijk afneemt. In werkelijkheid zal de dynamiek, net als bij kolen- en gascentrales, meer gekenmerkt worden door pieken en dalen. Ook zijn de eventuele instroom van nieuwe afval- en biomassacentrales niet meegenomen; hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het omschakelen van kolencentrales naar biomassacentrales.

De uitstroom staal in het scenario Hoog, 555 ton per jaar, is relatief een stuk hoger dan de uitstroom in het lage scenario, welke 240 ton per jaar omvat.



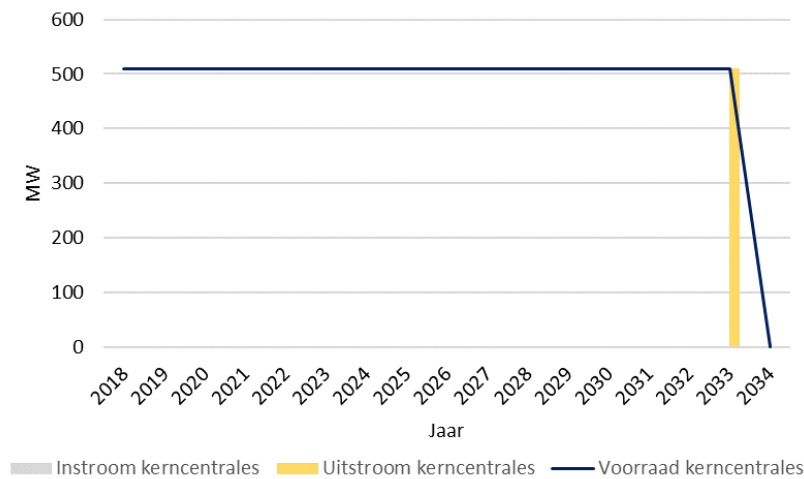
Figuur 14. Ontwikkeling van de voorraad (links), instroom (rechts, is 0) en uitstroom (rechts) staal in biomassa- en afvalverbrandingscentrales, voor de scenario's Laag (L), Midden (M), en Hoog (H).

4.2.7. Kerncentrales

Er is slechts één kerncentrale actief in Nederland, de centrale in Borssele. Deze zal volgens het huidige beleid in 2034 uit werking treden (Figuur 15). De onderdelen komen dan niet direct beschikbaar voor secundaire productie. Dit heeft te maken met de complexe ontmanteling door de aanwezige radioactiviteit en straling. Een deel zal daarom op geschikte methoden moeten worden opgeruimd en verwerkt. Het project van ontmanteling duurt volgens het EPZ tot 2048. Het gaat in totaal over ruim 350.000 ton aan materiaal, waarvan circa 10%, 35.000 ton, radioactief afval vormt. Bijna 300.000 ton beton komt en 30.000 ton staal komt vanaf 2034 in fases beschikbaar voor recycling.

Figuur 15 laat het resultaat in geïnstalleerd vermogen zien; de figuur is vergelijkbaar voor de materialen. Aangenomen is hier dat het materiaal direct na het uit werking treden van de kerncentrale beschikbaar komt voor secundaire productie. In werkelijkheid komt het materiaal, zoals hierboven uitgelegd, waarschijnlijk pas op langere termijn beschikbaar.

Er is in de scenario's nog geen rekening gehouden met de eventuele bouw van nieuwe kerncentrales.

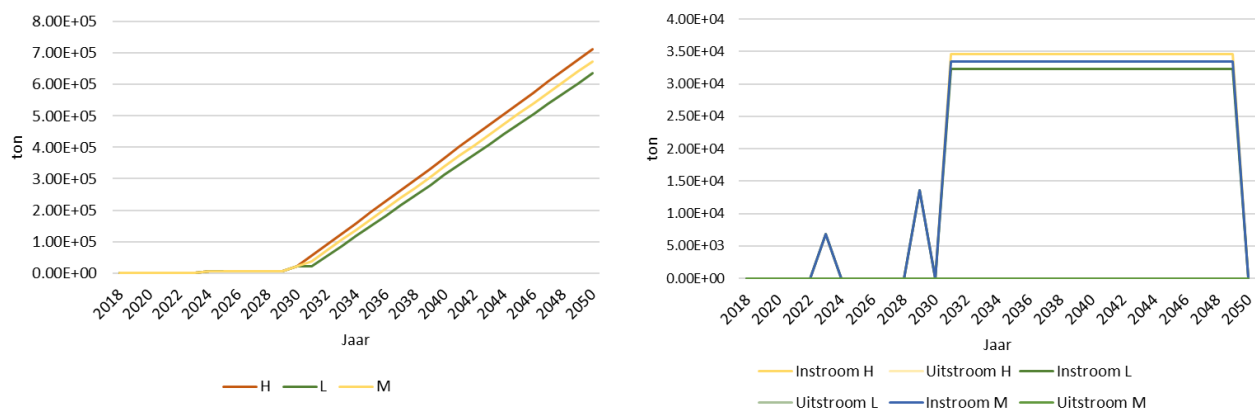


Figuur 15. Ontwikkeling geïnstalleerd vermogen kerncentrales.

4.2.8. Waterstofcentrales

Ten slotte bespreken we de resultaten voor waterstofcentrales. Volgens onze scenario's neemt het opgesteld vermogen voor deze technologie sterk toe de komende decennia: van 0 MW in 2018 tot variërend tussen de 41 en 46 GW opgesteld vermogen in 2050, afhankelijk van het scenario. De voorraden staal (Figuur 16) nemen toe tot 0.71 miljoen ton voor het scenario Hoog, en 0.64 miljoen ton in het lage scenario. Met een levensduur die gelijk wordt geschat op die van gas- en kolencentrales is nog geen uitstroom verwacht van materialen tot 2050.

Opvallend is de sterke fluctuatie voor de instromen. De pieken in de jaren 2023 en 2029 worden veroorzaakt door het geleidelijk omschakelen van de aardgas gestookte Magnumcentrale naar een waterstofcentrale. Vervolgens is een jaarlijkse instroom van capaciteit, en dus materialen, aangenomen om tot de doelstellingen voor 2050 te komen in de scenario's Hoog, Midden en Laag. De instroom omvat 35 duizend ton staal per jaar vanaf 2030 in het scenario Hoog en 32 duizend ton staal per jaar in het scenario Laag. In werkelijkheid zal de instroom gekenmerkt worden door meer pieken; hier was geen gedetailleerde informatie voor beschikbaar.



Figuur 16. Ontwikkeling van de voorraad (links), instromen (rechts) en uitstromen (rechts, is 0) staal in waterstofcentrales voor de scenario's Laag (L), Midden (M) en Hoog (H).

4.3 Hergebruik en recycling van uitstromen

4.3.1. Transport & distributie van elektriciteit

Ten eerste bespreken we de mogelijkheden voor het hoogwaardige herbestemmen van de materialen in elektriciteitskabels- en lijnen. Voor een uitgebreide analyse kan het werk van Verschelling (2020) worden bestudeert. Hier bespreken wij de belangrijkste bevindingen.

Op basis van expert interviews is aangenomen dat 75% van de uit werking getreden kabels ondergronds blijft liggen en onderdeel wordt van de *hibernating stock*. In deze waarde zit een grote onzekerheid, omdat ook experts geen goed beeld hebben van de exacte omvang van deze voorraad. Verschelling analyseert daarom ook *hibernation* percentages van 65% en 85%. Van *hibernation* is alleen sprake bij ondergrondse kabels; hoogspanningslijnen betreden meestal wél een afvalverwerkingsstroom omdat deze in het zicht liggen. De hibernating stock resulteert in een gemiste bron van met name waardevol secundair aluminium en koper; de hoeveelheid koper en aluminium die jaarlijks in *hibernation* treedt loopt op tot enkele duizenden tonnen per jaar, en de totale omvang van de *hibernating* stock vormt in 2050 rond de 300 kiloton aluminium, en 150 kiloton koper (uitgaande van 65-85% *hibernation*).

De redenen waarom kabels vaak lange tijd blijven liggen nadat ze uit gebruik zijn genomen zijn ten eerste om overlast op de betreffende locatie te minimaliseren en ten tweede om de kosten laag te houden. De kabels liggen vaak onder de straat, en de straat zou te lang opengebrouwen zijn wanneer zowel nieuwe kabels worden aangelegd als oude kabels worden verwijderd. Vaak is het pas bij een volgende keer dat de straat wordt opgebroken mogelijk om de kabels te verwijderen.

Wanneer kabels een afvalverwerkingsstroom betreden, worden ze eerst versnipperd, waarna de materialen worden gesorteerd. Oudere kabels worden eerst gestript omdat ze olie bevatten. De recyclede materialen kunnen echter niet opnieuw voor kabels worden ingezet omdat voor aluminium kabels een zuiverheid van 99,99% is vereist. Secundair aluminium en koper worden over het algemeen gesorteerd op legeringstype, en belanden met verschillende legeringen in dezelfde smelterij. Secundair aluminium en koper bevat daardoor veel vervuilingen en de zuiverheid is niet hoog genoeg voor de productie van nieuwe kabels. Geconcludeerd kan dus worden dat er in het huidige proces sprake is van downcycling. Ook van hergebruik van kabels is nauwelijks sprake omdat de secundaire kabels vaak zijn verkort; bij het weer verbinden van de relatief korte stukken neemt de kans op storingen toe.

Om hoogwaardige recycling van de metalen in kabels te bewerkstelligen, zou gedacht kunnen worden aan selectieve inzameling. Hierbij worden de specifieke legeringen apart verzameld en recycleert, waarna het materiaal opnieuw hoogwaardig kan worden ingezet. Een knelpunt is hierbij de oplagegrootte, die mogelijk te laag is voor Nederlandse kabels en lijnen. Om het proces economisch rendabel te maken kan eventueel een samenwerking met andere Europese landen worden overwogen om zo de instroom van specifieke materialen te vergroten. Ook kan gekeken worden naar samenwerkingen met andere sectoren die dezelfde legeringen toepassen, of het standaardiseren van materialen in bepaalde toepassingen. Ten slotte kan de benodigde puurheid van het materiaal nader worden bestudeerd; misschien kunnen met een lichte daling van de puurheid nog wel de kwaliteitseisen van de kabels worden behaald en wordt het recyclen daardoor economisch interessanter.

Om de groei van de *hibernating stock* te verkleinen kan gedacht worden aan stimulerende instrumenten van de overheid, ofwel door wetgeving, zoals bijvoorbeeld een precario heffing in te voeren op kabels die niet meer worden gebruikt maar in de grond blijven liggen, ofwel door subsidies voor het gebruik van secundair materiaal en recycling. Ook zouden opties bekeken kunnen worden voor het anders positioneren van kabels, waardoor ze aan het einde van het leven makkelijker toegankelijk zijn; bijvoorbeeld door de kabels dichter bij het oppervlak te plaatsen, of in een speciale tunnel.

4.3.2. Windturbines

In deze paragraaf bespreken we de mogelijkheden voor hergebruik van materialen in windturbines. Een uitgebreide analyse is te vinden in het werk van Roelofs (2020). Wij bespreken hier de belangrijkste bevindingen.

De bulk van de materialen in windturbines bestaan uit metalen. Vaak zijn hierbij waardevolle en/of kritische metalen gebruikt als legeringselementen. Om dergelijke legeringen hoogwaardig te kunnen hergebruiken is selectieve inzameling nodig. Door selectieve recycling kan typisch rond de 30% van de vraag naar kritische materialen worden voldaan door de uitstroom. Echter vormt de beperkte oplage voor specifieke legeringen mogelijk een beperking, en zal gekeken moeten worden naar intersectorale en internationale samenwerkingen.

Voor het recyclen van metalen is vaak zuivering nodig; dergelijke methoden omvatten hydrometallurgie, pyrometallurgie en elektrometallurgie. De huidige meest voorkomende recycling routes voor staal zijn toevoeging bij nieuw materiaal in een hoogoven of zuurstofoven, en secundaire productie in een vlamboogoven, beiden leidend tot een opbrengst van 94%.

Het inzamelingspercentage van staal in windturbines is typisch hoog, met uitzondering van de palen ("monopiles") die zich in de zee bevinden. De palen worden typisch 1 a 2 meter beneden zeeniveau verwijderd, resulterend in een overblijvende massa staal die ongeveer 57% van de paal vormt.

Aluminium en koper kan over het algemeen hoogwaardig worden gerecycled, leidend tot een puur secundair materiaal. Specifieker kan 93% tot 98% van het koper uit transformatoren en generatoren respectievelijk worden gerecycled. Ook in de wieken van de molen bevindt zich koper, maar door de compositie van het materiaal is de recycling graad hier typisch laag (Roelofs schat 13,5%).

Het recyclen van permanente magneten is relevant omdat deze kritische metalen bevatten: neodymium, praseodymium, dysprosium en terbium. Herbestemmingsroutes omvatten hier *magnet-to-REE* en *magnet-to-magnet* recycling. Voor de eerst genoemde methode wordt in de literatuur een recycling efficiëntie voor neodymium genoemd variërend tussen de 70 en 99,9%. Echter bevinden veel van deze technologieën zich nog in de ontwikkelingsfase. *Magnet-to-magnet* recycling biedt opties voor het hergebruiken van het materiaal zonder de zeldzame elementen te hoeven extraheren, maar gaat typisch gepaard met kwaliteitsverliezen oplopend tot 20%.

De wieken, neuskegel en gondel zijn gemaakt van complexe composietmaterialen, die uitdagend zijn om hoogwaardig te recyclen. Een mogelijkheid is om de onderdelen op componentniveau te recyclen. Hier kan gedacht worden aan kunstobjecten, bruggen of fietsschuren. Op lange termijn bieden dergelijke opties geen oplossing, omdat ze maar in beperkte mate kunnen worden hergebruikt.

Mechanische versnipperen is tegenwoordig de meest gangbare recycling methode voor composieten. Echter is deze recycling route economisch weinig aantrekkelijk door de lage kosten van het primaire materiaal, en de verslechterde materiaaleigenschappen van het versnipperde composiet. Er zijn tal van andere recyclingmethoden in ontwikkeling, al blijken bij elke methode de materiaaleigenschappen in mindere of meerdere mate te degraderen. Een van deze recyclingopties is de co-verwerking met cement; hierbij wordt de composietenschroot omgezet naar cement klinker. Een voordeel is dat een dergelijke infrastructuur al bestaat, en dat de methode de milieupact geassocieerd met cementproductie kan verlagen. Andere opties zijn het versnipperen of vernalen van de composieten en het vervolgens inzetten als versterkend materiaal; echter is ook dit downcycling. Kostbaardere opties omvatten pyrolyse en solvolyse; hiermee kan vezelherstel worden bewerkstelligd, met enige mate van kwaliteitsverlies. Met deze technieken kunnen vezels, koolwaterstofgrondstoffen en vulstoffen worden teruggewonnen.

Ten slotte wordt rond de 97% van het beton sloopafval als fundering voor wegen ingezet. Roelofs (2020) stelt op basis van de literatuur dat beton via een alternatieve recyclingroute hoogwaardiger kan worden ingezet. Hierbij blijft 27% van het beton over voor de fundering voor wegen. De overige 58% kan worden ingezet als schoon aggregaat voor beton, en de overige 15% voor cement.

4.3.3. Zonnepanelen

In het hoogwaardig herbesteden van afgedankte zonnepanelen zijn nog veel stappen te maken. De materialen in de panelen zijn lastig van elkaar te scheiden, en de secundaire materialen hebben daarom nu typisch een lage economische waarde.

In ieder geval worden zonnepanelen in 5 materialen gescheiden: glas, plastic, aluminium, siliconen en metalen (CED Greentech, n.d.). Het huidige, meest voorkomende recycling proces voor een silicium module kan als volgt worden beschreven: (1) Het verwijderen van het aluminium frame (100% herbruikbaar), (2) het scheiden van het glas (95% herbruikbaar), (3) thermische verwerking bij 500 °C voor de verdamping van de kleverige plastic componenten zodat de cellen makkelijker kunnen worden gescheiden en (4) het wegetsen van de siliciumwafels en omsmelten tot herbruikbare plakken (85% herbruikbaar).

Er zijn meer recyclingopties dan de hiervoor besproken methode. Uit de literatuur en informatie van leveranciers blijkt dat er veel ontwikkelingen zijn in de hoogwaardige, commerciële recycling van zonnepanelen (Padoan et al., 2019; Deng et al., 2019; Persoonlijke communicatie, Stichting ZRN, 2020). Chowdhury et al. (2020) presenteren een overzicht van dergelijke methoden, met milieu- en sociaal gerelateerde voor- en nadelen. Hierbij wordt mechanische scheiding, thermische en chemische behandeling onderscheiden. Het voordeel van mechanische verwerking is dat het goedkoop is, een nadeel is de degradatie van de materiaaleigenschappen, waardoor de materialen niet meer hoogwaardig kunnen worden ingezet. Alleen mechanische verwerking is niet voldoende omdat giftige elementen moeten worden verwijderd. Gedacht kan hierbij worden aan thermische recycling. Echter heeft deze een hoge energie consumptie, en alhoewel er geen afval wordt geproduceerd, komen er wel giftige gassen vrij in dit proces. Daarnaast is nog onderzoek nodig om een beter beeld te krijgen van milieu gerelateerde en economische duurzaamheid van thermische recycling (Pandoan et al., 2019).

Chemische verwerking is vooral gericht op het terugwinnen van metalen, met behulp van oplosmiddelen en andere reagentia. Het nadeel van deze technologie is vooral de kosten. Het belangrijkste voordeel is de puurheid van de eindmaterialen, met name voor metalen met een hoge

waarde. Een uitdaging is hier het ontwikkelen van processen die de regeneratie van de gebruikte reactanten mogelijk maakt, zodat de milieupact en de verwerkingskosten verminderen.

Op commercieel gebied zijn er verschillende gepatenteerde recycling processen voor zonnepanelen. Deze specialiseren zich op siliconen, dunne-film of beiden typen zonnepanelen. Processen die het recyclen van dunne-filmpanelen meenemen zijn vaak economisch aantrekkelijker vanwege de hoge waarde van teruggewonnen materialen (Padoan et al., 2020). Met een aantal van deze processen is het bijvoorbeeld mogelijk waardevolle metalen te extraheren zoals cadmium, tellurium, selenium, gallium en indium. Echter is verder onderzoek nodig om zowel de economische als milieu gerelateerde duurzaamheid van het proces te vergroten.

Veel landen hebben al een wetgeving opgesteld voor het recyclen van afgedankte PV panelen, ter aanmoediging van de ontwikkelingen van methoden om de materialen terug te winnen. In Nederland geldt de wet Afgedankt Elektrisch en Elektronisch Afval (AEEA), de Nederlandse implementatie van de WEEE richtlijn, die partijen die zonnepanelen op de Nederlandse markt zetten verantwoordelijk stelt voor de inname en verwerking van de panelen aan het einde van de levensduur. In Nederland zorgen met name de organisaties PV Cycle Nederland en Stichting Zonne-energie Recycling Nederland (ZRN) voor een geschikte recyclingroute voor de zonnepanelen, batterijen en omvormers van hun klanten, met oog op hoogwaardige recycling, een lage milieupact en haalbare kosten. Via de inzamelingsystemen wordt aan de overheid in het Nationaal WEEE Register de hoeveelheid afgedankte zonnepanelen geregistreerd, per leverancier.

De verwerking van EOL zonnepanelen gebeurt op het moment niet in Nederland. Zonnepanelen worden getransporteerd naar gespecialiseerde verwerkers zoals Veolia in Frankrijk en Reiling Group in Duitsland. In Duitsland werkt Suez ook aan een hoogwaardige recyclingmethode, welke binnenkort waarschijnlijk operationeel wordt. Hoogwaardig recyclen blijft echter nog lastig. Hoewel Viola 95% van het materiaal zegt te kunnen hergebruiken, is er vaak sprake van downcycling. Metalen kunnen over het algemeen wel hoogwaardig worden gerecycled, al kan niet altijd al het metaal worden teruggewonnen. Het terugwinnen van zeldzame of kritische metalen is vaak energie intensief en duur, maar wegens de economische waarde vaak juist interessant. Gerecycled glas wordt in alle gevallen nu nog ingezet in laagwaardigere producten (bijvoorbeeld flessen). Voor een verbeterde verwerking kan mogelijk een lokale demontage verkiesbaar zijn, om zo de frame en de aansluitdoos al te verwijderen en lokaal te verwerken. De overgebleven dunne plaat kan vervolgens efficiënt worden vervoerd naar specialistische verwerkers zoals Veolia. Complexer wordt het verhaal echter als er steeds verschillende toepassingen komen, zoals wandpanelen, fietspaden of dakpanelen. Daarom is het essentieel om bij het ontwerp van deze producten al rekening te houden met de *end-of-life* verwerking.

Deng et al. (2019) identificeren een aantal mogelijkheden om technisch-economische barrières te overkomen voor recycling van zonnepanelen. Deze omvat ten eerste het creëren van een prijs signaal (door de (lokale) overheid) om het verwerken als afval te voorkomen en een inzamelingsnetwerk te creëren. Dit is in Nederland al in zekere mate van toepassing. Ten tweede zou mogelijk meer economische waarde kunnen worden behaald wanneer recyclers zich richten op waarde herstel in plaats van massa herstel, met name gericht op het terugwinnen van intacte silicium cellen en zilver, en kritieke metalen in dunne film zonnepanelen. Verder moeten de verwerkingskosten voor recycling worden vermindert. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door opschaling, technologische innovatie in het recyclingproces of een nieuw productontwerp. Ten slotte zouden producenten van zonnepanelen verantwoordelijk kunnen worden gesteld voor het einde van het leven van het product, wat moet leiden tot herontwerp van de panelen om recycling te verbeteren, met oog voor demontage, recyclen en het verminderen of volledig elimineren van giftige componenten. Het betrekken van

producenten bij de *end-of-life* kan leiden tot hoogwaardigere recycling. De zonnepanelen producent First Solar neemt bijvoorbeeld alle dunne film panelen aan het einde van het leven terug om het cadmium en tellurium terug te winnen uit het paneel en weer opnieuw toe te passen. Ook streeft Stichting ZRN naar een landelijk inzamelingsstelsel via de Organisatie Producentenverantwoordelijkheid E-waste Nederland (OPEN): Een dergelijk, aan de overheid gelinkt stelsel zou oneerlijke concurrentie moeten voorkomen en moet zorgen dat alle leveranciers bijdragen aan de kosten voor inzameling en recycling. Dit resulteert in een transparanter, milieuvriendelijker, goedkoper en eerlijker stelsel.

4.3.4. Recycling overige technologieën voor elektriciteitsproductie

Recycling van elektriciteitscentrales zal hoofdzakelijk via de conventionele route voor afgedankte gebouwen gaan. Bij deze technologieën zijn dan ook met name bulkmaterialen zoals staal en beton relevant, met uitzondering van de turbine (gas, kolen, biomassa, afval), reactor (kern) en brandstofcellen (waterstof), waarin meer waardevolle en/of kritische metalen voorkomen. Voor beton en staal is al een recyclingroute aanwezig. In de meeste gevallen is hier echter sprake van downcycling. Beton wordt vaak als fundering voor wegen gebruikt en ook staal wordt in minder waardevolle toepassingen gebruikt omdat het materiaal een mix van verschillende metalen is geworden die niet meer voor hoogwaardige toepassingen kan worden gebruikt.

Er zijn echter steeds meer ontwikkelingen in hoogwaardig hergebruik van deze grondstoffen. Zo is in Nederland een gepatenteerde methode ontwikkeld om beton hoogwaardig te scheiden, waarbij cement (een grondstof met een hoge milieuimpact) kan worden gescheiden en deels worden hergebruikt (Recycling Nederland, 2020). In de voorgaande paragrafen bespraken wij meer opties om beton en staal hoogwaardig te recyclen. Het selectief verzamelen van materialen kan ook hier mogelijk een oplossing zijn, eventueel door samen te werken met andere landen in Europa om een voldoende grote instroom te bewerkstelligen. Naast dergelijke opties op materiaalniveau kan ook gekeken worden op product of component niveau. Voorbeelden zijn het hergebruiken van kolencentrales voor de verbranding van biomassa, of het herbestemmen van specifieke onderdelen in de centrales.

Metaal moet in Nederland volgens de wet worden hergebruikt of gerecycled. Echter wordt het grootste deel van metaalschroot nu nog geëxporteerd (Cramer & Van Driel, 2019). Ook wordt in Nederland verhoudingsgewijs meer Ferro (ijzer) dan non-ferro (e.g., Al) metaal gerecycled. Dit komt omdat een groot deel van de non-ferro producten in het buitenland, met name in China, worden geproduceerd, en de veelal vieze recycling technologieën goedkoper zijn in China, waar de metalen nog handmatig worden gescheiden. Voor grootschalige en hoogwaardige recycling in Nederland is meer innovatie nodig om pure materialen te krijgen.

De ontmanteling van de kerncentrale heeft, anders dan de overige centrales door het bevatten van radioactief afval, specialistisch werk. Er is daarom al een plan van aanpak opgesteld door EPZ (n.d.) voor het verantwoord verwerken van materialen in de kerncentrale. Uiteindelijk kan ongeveer 10% van het afval wegens radioactiviteit niet worden hergebruikt. Dit afval wordt verwerkt door COVRA, een organisatie gespecialiseerd in de verzameling, verwerking en opslag van radioactief afval.

6. Discussie, conclusie & aanbevelingen

6.1. Discussie & conclusie

In deze studie zijn projecties gemaakt voor de ontwikkeling van de materiaalvoorraad en bijbehorende in- en uitstromen in het elektriciteitssysteem. Het scenario Midden (M) laat de resultaten zien voor het beoogde beleid voor de ontwikkeling van het geïnstalleerd vermogen aan technologieën voor elektriciteitsproductie. De scenario's Laag (L) en Hoog (H), op basis van scenario's ontwikkeld door Berenschot (2020) en CE Delft (2016), in samenwerking met netbeheerders, laten meer extreme waarden zien. Hierbij verwijst Hoog naar een hoge mate van elektrificatie en een grote inzet van hernieuwbare energiebronnen, met name wind en zon; scenario Laag verwijst naar een relatief lage mate van elektrificatie en een lage inzet van windturbines en zonnepanelen.

De groei van de vraag naar de materialen hangt af van het scenario en is substantieel hoger voor scenario Hoog. Dit is te verklaren door de hoge mate van zelfvoorziening, wat resulteert in een grote vraag naar grondstoffen voor de benodigde technologieën. Het verschil heeft ook te maken met de hoge mate van elektrificatie in scenario Hoog, waardoor meer bronnen voor elektriciteitsproductie en distributie nodig zijn. In scenario Laag is de elektrificatie relatief laag en wordt veel energie geïmporteerd, waardoor minder materiaal nodig is.

De resultaten laten zien dat de vraag naar de staal, aluminium en koper flink zal toenemen voor elk van de scenario's. Hetzelfde geldt voor constructiematerialen zoals beton, al blijft deze voorraad waarschijnlijk relatief klein in vergelijking met de bouw. De vraag naar staal is met name gerelateerd aan de bouw van windturbines, zonnepanelen en in groeiende mate in waterstofcentrales. Ook de vraag naar aluminium en koper blijft groeien, en deze materialen bevinden zich voornamelijk in elektriciteitskabels en zonnepanelen. De staalsoorten bevatten verschillende legeringselementen, waaronder een toenemende hoeveelheid waardevolle en/of kritieke metalen. De ontwikkeling van de vraag naar deze metalen varieert per product. Zo komen neodymium, praseodymium, dysprosium en terbium voornamelijk in de permanente magneten van windturbines voor; indium, gallium, terbium en cadmium worden voornamelijk in zonnepanelen gebruikt.

Naast de materiaalvraag per technologie, is de ontwikkeling van de voorraaddynamiek in totaal (voor alle producten) geanalyseerd. Hiertoe is het materiaal staal uitgelicht omdat het een essentieel materiaal vormt voor elk van de hier besproken technologieën en zeer relevant is voor de circulaire economie wegens de hoge economische waarde en over het algemeen goede recyclebaarheid. Eenzelfde analyse is gemaakt voor aluminium en soortgelijke resultaten kunnen voor de overige materialen worden gegenereerd op basis van de resultaten in Bijlage B. De vraag naar staal vervijfvoudigt tot vertienvoudigt in 2050 ten opzichte van 2018, afhankelijk van het scenario. De uitstroom is nu nog relatief laag, maar neemt toe met een factor 13 tot 22 in 2050, afhankelijk van het scenario. De resultaten impliceren dat de komende decennia een aanzienlijke groei in de materiaalvraag kan worden verwacht voor het elektriciteitssysteem, maar impliceren ook dat het aanbod van materialen uit de *urban mine* van het elektriciteitssysteem aanzienlijk zal toenemen. Alhoewel de huidige mate waarin het aanbod staal uit de *urban mine* aan de staalvraag kan voldoen nog vrij laag is, rond de 10%, is in de scenario's typisch een groei te zien in dit percentage vanaf 2030; de percentages lopen op tot tussen de 33% en 36% in 2050, afhankelijk van het scenario. Wanneer we kijken naar het kritische metaal neodymium (in windturbines), neemt het percentage toe van lager dan 1% in 2018, naar 16% in 2050, en voor het kritische metaal indium (in zonnepanelen) neemt het percentage toe van bijna 0 in 2018 tot rond de 7% in 2050. Met name wanneer de groei naar materialen voor elektriciteitsproductie afneemt, wat te verwachten is wanneer de transitie is

gemaakt naar een duurzame energievoorziening, kan verwacht worden dat een aanzienlijk deel van de materiaalvraag voorzien kan worden uit secundaire productie.

Het besproken aanbod van materiaal in de vorige alinea vormt een theoretisch maximum, aannemend dat alle afgedankte producten een geschikte recycling stroom betreden, er geen sprake is van *hibernation*, en 100% van het materiaal kan worden teruggewonnen en weer hoogwaardig kan worden ingezet. De realiteit is helaas nog niet zover. Zo blijven kabels vaak in de grond liggen (*hibernation*) en wordt beton vaak als grondligger voor wegen gebruikt en belanden verschillende legeringen op eenzelfde hoop, waardoor er sprake is van *downcycling*. Alhoewel recycling methoden zich in rap tempo ontwikkelen, gaan de technologieën die nu commercieel beschikbaar zijn vaak nog gepaard met substantiële verliezen in de opbrengst en/of de degradatie van de materiaaleigenschappen. Daarnaast ontbreekt vaak nog een geschikte recyclingroute; voor veel producten bestaat bijvoorbeeld nog geen inzamelingsstelsel of is nog geen technologie voor hoogwaardige recycling beschikbaar, bijvoorbeeld omdat de omvang van het materiaal te klein om de realisatie van een dergelijke installatie economisch haalbaar te maken.

Op basis van het verkregen inzicht over de huidige recyclingactiviteiten binnen het elektriciteitssysteem kunnen een aantal kansen ter bevordering van hoogwaardige secundaire productie worden geïdentificeerd. Ten eerste is heeft dit betrekking op het relatief kleine aantal eigenaren van de producten, in vergelijking met bijvoorbeeld gebouwen of huishoudelijke apparaten. Het elektriciteitstransport- en distributienet wordt beheert door 8 netbeheerders, en de elektriciteitscentrales, windparken en zonneparken door een beperkt aantal energieleveranciers. Het voordeel hiervan is dat makkelijker afspraken gemaakt kunnen worden ter bevordering van secundaire productie, en de producten makkelijker te monitoren zijn. Hierbij kan gedacht worden aan het verantwoordelijkheid stellen van de eigenaar voor de afdanking van het product, waardoor ook *hibernation* van producten kan worden voorkomen. Een ander voordeel is de grootschaligheid van de projecten; een windpark bevat grote hoeveelheden materialen, die waarschijnlijk gelijktijdig beschikbaar komen voor recycling. De grootschaligheid maakt hoogwaardige recycling waarschijnlijk economisch aantrekkelijker. Ten slotte maakt de hoge waarde van met name de metalen in de producten hoogwaardige recycling mogelijk interessant. De typisch lange levensduur van de producten vormt echter een beperking. Dit resulteert in het verouderd raken van de gebruikte technologieën en de toegepaste materialen in afgedankte producten uit het systeem, waardoor hergebruik op product- of onderdeelniveau vaak niet interessant is. In plaats daarvan is recycling dus de aangewezen route voor de voorraden.

Bovengenoemde kwestie geldt met name voor staal, van welke meer dan 2.000 soorten bestaan met verschillende functionele en structurele eigenschappen. Veel gebruikte staalsoorten in het elektriciteitssysteem zijn bijvoorbeeld te categoriseren tot *electrical steel* en *high temperature steel* (Pirani, 2020). Moderne varianten van deze staalsoorten hebben een lage dikte in vergelijking met oudere varianten. Ondanks de lagere efficiëntie van de oude staalsoorten kunnen de materialen wel worden hergebruikt door technieken als walsen en gloeien. Echter verhindert de snelle ontwikkeling van de staalsoorten een effectieve herverwerking of hergebruik van de staalsoorten. In een studie naar de hoogwaardige herbestemming van metalen in het Nederlandse elektriciteitssysteem stelt Pirani (2020) dat ontwikkelingen in de productietechnologieën voor dergelijke staalsoorten misschien een efficiënte herverwerking in de toekomst kunnen bewerkstelligen. Voorwaarden hiervoor zijn echter dat de staalsoorten selectief worden ingezameld, en dat de oplagen voldoende groot zijn voor een recycling installatie. Bij het eerstgenoemde zou bijvoorbeeld gedacht kunnen worden aan een landelijk inzamelingsstelsel en bij het tweede aan een samenwerking met buurlanden om een voldoende grote doorstroom te bewerkstelligen voor de productiefaciliteit.

Tot nu toe bespreken we met name de metalen in het elektriciteitssysteem. De nadruk in deze studie lag dan ook minder op materialen als plastics en composieten. Deze materialen zijn uitdagend om

hoogwaardig te recyclen, zowel vanuit technisch als economisch standpunt. Plastics bevinden zich onder andere in kabels en zonnepanelen, en composieten in de wieken van windturbines. Het scheiden van verschillende soorten plastics is lastig waardoor hoogwaardige recycling niet mogelijk is, en ook de recycling van composieten resulteert in een sterke degradatie van het materiaal. Ontwikkelingen zijn nog nodig voor hoogwaardige verwerking van dergelijke materialen, of eventuele substitutie naar een duurzamer materiaal.

Op basis van de bevindingen kunnen een aantal aanbevelingen worden geformuleerd om een hoogwaardige herbestemming van de materialen te stimuleren; deze worden in de volgende paragraaf besproken.

6.2. Aanbevelingen ter bevordering van circulariteit

Op basis van de analyse naar recyclingroutes voor de producten in het elektriciteitssysteem zijn een aantal mogelijkheden geformuleerd voor de bevordering van hoogwaardige herbestemming van de uitstromen in het elektriciteitssysteem:

- Stimuleer de selectieve inzameling en verwerking van materialen, met name van de vele staallegeringen aanwezig in het elektriciteitssysteem, om degradatie door het vermengen van verschillende materialen (bijvoorbeeld plastics en legeringen) te voorkomen. Met name voor legeringen met waardevolle en/of kritische metalen (bijvoorbeeld neodymium in permanente magneten van windturbines en indium in dunne film zonnepanelen) is selectieve recycling mogelijk interessant.
- Bij het bovenstaande punt moet kritisch gekeken worden op welk schaalniveau recycling wenselijk is, vanuit een milieu gerelateerd (minimaliseer milieupact), technisch (streven naar hoogwaardige secundaire productie) en economisch (financieel rendabel) standpunt. Hier moeten waarschijnlijk afwegingen worden gemaakt; zo kunnen zonnepanelen waarschijnlijk het beste deels lokaal worden gedemonteerd, terwijl het paneel met de zonnecellen het best door een specialistisch bedrijf kan worden verwerkt in grotere oplagen, wat grotere economische en milieu gerelateerde voordelen biedt.
- Een voorwaarde voor hoogwaardige recycling is de ontwikkeling van geschikte technologieën. Voor zowel de vele staalsoorten, composieten en plastics in het elektriciteitssysteem zijn nog stappen te maken met betrekking tot de opbrengst, zuiverheid van het materiaal, de kosten en de milieupact. Het laatste heeft betrekking op gasemissies, oplosmiddelen en reagentia (bijvoorbeeld door emissiefilters, hergebruik van reagentia en afvalwaterzuivering). Dergelijke ontwikkelingen zullen moeten worden gestimuleerd.
- Het beperkte aantal eigenaren van de producten in het elektriciteitssysteem creëert kansen voor circulariteit binnen deze sector; bijvoorbeeld door afspraken te maken over de bestemming en verwerking van afgedankte producten, en het monitoren van de voorraden en stromen.
- Bovenstaande strategie is niet toepasbaar op producten van bewoners of bedrijven, zoals zonnepanelen op daken. Voor dergelijke producten kan een landelijk inzamelingssysteem (e.g., OPEN) wenselijk zijn om een eerlijke, milieuvriendelijke, en financieel haalbare inzameling en verwerking van de producten te bewerkstelligen.

- Het verantwoordelijk stellen van producenten/leveranciers voor de verwerking van het *end-of-life* product kan de betrokkenheid van producenten stimuleren, en kan leiden tot een beter productontwerp, wat gericht is op herbruikbaarheid van product of component en gemakkelijk te demonteren is tot onderdelen van één materiaal.
- Verantwoordelijkheid van de producent en/of leverancier van de producten creëert transparantie van de *supply-chain*, wat het makkelijker maakt om producten en materialen te volgen. Dit is belangrijk om circulariteit te monitoren.

6.3. Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

Deze studie biedt een vrij compleet inzicht in de mogelijke ontwikkeling van de vraag naar- en het aanbod van materialen die gepaard gaat met de ontwikkeling van het energiesysteem. Er blijven nog een aantal beperkingen bestaan in dit onderzoek, ofwel door gebrek aan beschikbare data of de toegankelijkheid hiertoe. In deze paragraaf lichten wij deze toe en stellen voor hoe de resultaten eventueel in een vervolgstudie kunnen worden verbeterd of aangevuld. Ten slotte formuleren we een aantal algemene aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

Ten eerste bestaat voor een aantal technologieën onzekerheid aangaande de ontwikkeling van het opgesteld vermogen. Dit is het geval voor biomassa- en kerncentrales door onzekerheid in de richting van het beleid. De mate waarin het opgesteld vermogen van deze technologieën in de toekomst zal veranderen is politiek onder discussie. Verder bestaat voor zowel de ontwikkeling van biomassa en (groen)gascentrales onzekerheid door het gebrek aan concrete cijfers voor de mogelijke ontwikkeling van deze voorraden. Wanneer een beter inzicht wordt verkregen in de ontwikkeling van deze voorraden kan dit in de scenario's worden verwerkt. Voor waterkrachtcentrales waren ook geen cijfers beschikbaar voor de ontwikkeling van het opgesteld vermogen maar gezien het zeer kleine aandeel in de huidige elektriciteitsmix en het gebrek van informatie over de ontwikkeling van het opgesteld vermogen in de gebruikte studies zal deze ook niet erg belangrijk zijn.

Ook wordt de dynamiek gecompliceerd door de mogelijke herbestemming van centrales voor andere doeleinden; kolencentrales die uit werking treden, kunnen in plaats van ontmanteling mogelijk ook gebruikt voor het verbranden van biomassa, of voor een heel ander doeleinde. Het was buiten de scope van dit onderzoek om alle opties in volledigheid te analyseren. Dit zou eventueel in een iteratie op het huidige studie kunnen worden geïnventariseerd.

De nadruk van dit onderzoek lag op analyseren van materialen die waardevol zijn voor een circulaire economie. Om deze reden is in minder detail gekeken naar materialen zoals bijvoorbeeld plastic en glas. Het wel dan niet meenemen van deze materialen verschilde per product afhankelijk van de databeschikbaarheid. In Bijlage B kunnen de resultaten per materiaal, en specifiek per product, worden teruggevonden. Omdat deze materialen niet compleet waren voor elk product (bijvoorbeeld: plastic in kabels is niet geanalyseerd, maar plastic in zonnepanelen wel), hebben wij deze data verder dan ook niet geanalyseerd. Een iteratie op deze studie zou erop gericht kunnen zijn de data voor de nog ontbrekende materialen te vervolledigen.

Ten slotte kan er nog een notitie gemaakt worden bij de waarden voor metalen. De waarden voor de categorie staal zijn een som van verschillende legeringen, inclusief de legeringselementen (bijvoorbeeld: structureel staal, gietijzer en legeringen met o.a. nikkel, vanadium, chroom en silicium). De elementen zijn, wanneer data beschikbaar was, ook los gerapporteerd (Bijlage B), maar vormen ook een onderdeel van de categorie staal. De percentages van de legeringselementen zijn

typisch kleiner dan een procent, en vormen dus slechts een klein aandeel van de totale hoeveelheid staal, die voor het overgrote deel uit ijzer bestaat. Een uitzondering hierop is neodymium, dat meer dan 20% van permanente magneten vormt. Het betreffende materiaal, NdFeB, is daarom apart beschouwd (alleen van toepassing in windturbines, en vormt maximaal 0.2% van al het staal in de windturbines).

Naast de bovengenoemde mogelijkheden om de limitaties in het onderzoek te overkomen, kunnen een aantal algemene aanbevelingen worden gemaakt voor vervolgonderzoek. Dit werk bouwt voort op een voorraadinventarisatie van het elektriciteitssysteem. In diezelfde studies zijn ook de voorraden van elektrische- en elektronische apparaten en voertuigen in kaart gebracht. Daarnaast leveren wij tegelijk met dit werk een voorraadinventarisatie van de bouw, en het CBS een inventarisatie van de voorraden textiel en elektronische machines. Een aantal voorraden, en de bijbehorende dynamiek, ontbreken nu nog in de inventarisatie. Ten eerste omvatten deze een uitbreiding naar andere technologieën voor energieproductie en energieopslag. De eerste omvat bijvoorbeeld warmtenetten en systemen voor de productie- en distributie van (groen) gas voor warmte. De inzet van systemen voor energieopslag zijn in de huidige economie nog klein, maar zullen met de groei van fluctuerende energiebronnen zoals zon en wind, en de groei van elektrificatie in het algemeen, steeds belangrijker worden. Hiertoe kan bijvoorbeeld gedacht worden aan accu's, waterkrachtcentrales en elektrische laadpalen.

Naast energie gerelateerde voorraden ontbreekt verder nog een voorraadinventarisatie van infrastructuur voor personenvervoer (autowegen, fietspaden, rails), infrastructuur drinkwater- en afvalwater, de internet- en telecom infrastructuur, en huishoudelijke producten zoals meubels. Het in kaart brengen van deze voorraden draagt bij aan het vervolledigen van het inzicht in de materiele voorraad en de dynamiek daarvan in de maatschappij. Aan de hand van een dergelijke inventarisatie kan de voortgang naar een circulaire economie worden gemonitord, en kan vervolgens de sturing van circulair beleid worden aangescherpt.

Bronnenlijst

Berenschot (2011). Roadmap Zon op Nederland. Roadmap for Sun on the Netherlands. A roadmap for the solar ecosystem of the Netherlands developing towards a worldwide radiating top region.

Berenschot (2020). Klimaatneutrale energiescenario's 2050. Geraadpleegd van: <https://www.berenschot.nl/actueel/2020/april/nederland-klimaatneutraal-2050/>

Berger, Wolfgang, Franz-Georg Simon, Karin Weimann, and Erik A. Alsema. 2010. A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. *Resources, Conservation and Recycling* 54 (10): 711–18. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.12.001.

Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., & Pavel, C. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system.

CBS (2019). Zonnestroom; vermogen bedrijven en woningen. Geraadpleegd van: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/84518NED/table?dl=1DE74>

CE Delft (2016). Net voor de toekomst. Geraadpleegd van: <https://www.ce.nl/publicaties/2030/net-voor-de-toekomst>

CE Delft & ECN (2016). MKEA zon-PV en wind op land. Geraadpleegd van: <https://www.ce.nl/publicaties/1905/mkea-zon-pv-en-wind-op-land>.

CED Green tech (n.d.). Can solar panels be recycled? Geraadpleegd van: <https://www.cedgreentech.com/article/can-solar-panels-be-recycled>

Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 532-550.

Eerste Kamer der Staten Generaal (2019). Verbod gebruik kolen bij elektriciteitsproductie. Geraadpleegd van: https://www.eerstekamer.nl/nieuws/20191203/verbod_gebruik_kolen_bij

ECN (2015). Kosten wind op zee. Geraadpleegd van: <http://vrijehorizon.nl/wp-content/uploads/2016/01/ECN-042015.pdf>

EPZ (n.d.). Ontmanteling Kerncentrale Borssele. Geraadpleegd van: <https://epz.nl/themas/ontmanteling/ontmanteling-kerncentrale-borssele>

Jäger-Waldau, A. (2018). PV Status report 2018. JRC Science for Policy Report. Publication Office of the European Union, Luxembourg.

Kuitche, Joseph M. 2010. *Statistical Lifetime Predictions for PV Modules*. Accessed March 12, 2013. http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvrw2010_kuitche.pdf.

Kumar, Suresh, and Bijan Sarkan. 2013. Design For Reliability With Weibull Analysis For Photovoltaic Modules. *International Journal of Current Engineering and Technology* 3 (1): 129–34. <http://inpressco.com/wp-content/uploads/2013/02/Paper18129-134.pdf>.

Laronde, Rémi, Abderafi Charki, David Bigaud, and Philippe Excoffier. 2010. Photovoltaic system lifetime prediction using Petri networks method. In *SPIE Solar Energy+ Technology*, 777306: International Society for Optics and Photonics.

Leguijt, C., Grinsven, A. van, Maarten Afman, Veen, R. van der, Meyer, M., Hers, S., Ushmani, O., Marsidi, M., Wetzels, W., Gerdes, J., Waal, J. van der, & Vermeulen, M. (2019). *Rapportage systeemstudie energie-infrastructuur Noord-Holland*.

- Li, F., Ye, Z., Xiao, X., Xu, J., & Liu, G. (2020). Material stocks and flows of power infrastructure development in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 160(April), 104906.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104906>
- Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., & Kooroshy, J. (2011). Critical metals in strategic energy technologies. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Moss, R. L., Tzimas, E., Willis, P., Arendorf, J., Thompson, P., Chapman, A., ... & Tercero-Espinoza, L. (2013). Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. *Assessing rare metals as supply-chain bottlenecks in low-carbon energy technologies*. JRC Report EUR, 25994.
- München, D. D., Bernardes, A. M., & Veit, H. M. (2018). Evaluation of Neodymium and Praseodymium Leaching Efficiency from Post-consumer NdFeB Magnets. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(2), 288-294.
- Niet, S. van der, Rooijers, F., Veen, R. van der, Voulis, N., Wirtz, A., & Lubben, M. (2019). *Systeemstudie energie-infrastructuur Groningen & Drenthe*.
- Padoan, F. C., Altimari, P., & Pagnanelli, F. (2019). Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. *Solar Energy*, 177, 746-761.
- PBL (2019a). Achtergronddocument effecten ontwerp klimaatakkoord: elektriciteit. Geraadpleegd van <https://www.pbl.nl/publicaties/achtergronddocument-effecten-ontwerp-klimaatakkoord-elektriciteit>.
- PBL (2019a). Achtergronddocument effecten ontwerp klimaatakkoord: elektriciteit. Achtergronden bij de analyse voorde elektriciteitssector. Geraadpleegd van: <https://www.pbl.nl/publicaties/achtergronddocument-effecten-ontwerp-klimaatakkoord-elektriciteit>
- PBL (2019b). Klimaat en energieverkenning. Geraadpleegd van: <https://www.pbl.nl/publicaties/klimaat-en-energieverkenning-2019>
- PBL (2017). Nationale Energieverkenning. Geraadpleegd van: <https://www.pbl.nl/publicaties/nationale-energieverkenning-2017>
- Pauliuk, S., & Heeren, N. (2019). ODYM—An open software framework for studying dynamic material systems: Principles, implementation, and data structures. *Journal of Industrial Ecology*.
- Recycling Nederland (2020). *Rutte Groep Beton recycling*. Geraadpleegd van: <https://recyclingnederland.nl/betonrecycling/rutte-groep-betonrecycling/>
- Pirani, A. (2020). Steels in Urban Mines. CML, Leiden.
- Reijn, G. (2019). *Elektriciteitscentrale verruult steenkool voor hout, maar is dat wel zo duurzaam?* Geraadpleegd van: <https://www.volkskrant.nl/economie/elektriciteitscentrale-verruult-steenkool-voor-hout-maar-is-dat-wel-zo-duurzaam~b2871ef7/>
- Rijksoverheid (2019). Klimatakkoord. Geraadpleegd van: <https://www.klimatakkoord.nl/binaries/klimatakkoord/documenten/publicaties/2019/06/28/klimatakkoord/klimatakkoord.pdf>
- Roelofs, B. (2020). *Material Recovery from Dutch Wind Energy: A dynamic material flow analysis on Dutch wind turbines towards 2050 including recycling approaches for recovery of key materials*. MSc Thesis Industrial Ecology, Leiden Universiteit.
- RVO (2014). Opbrengst van zonnestroomsystemen in Nederland. Geraadpleegd van: https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/03/Definitief_rapport%20opbrengst%20van%20zonnestroomsyste men%20in%20NL.pdf
- Strauver, F. (2019). Doorbraak voor zonne-energie: milieubeweging akkoord met grote zonnepanelen in het

landschap. Trouw. Geraadpleegd van: <https://www.trouw.nl/duurzaamheid-natuur/doorbraak-voor-zonne-energie-milieubeweging-akkoord-met-grote-zonneparken-in-het-landschap~b9dbae7c/>

Straver, F. (2017). Afval verbranden heeft geen toekomst. Trouw. Geraadpleegd van: <https://www.trouw.nl/duurzaamheid-natuur/afval-verbranden-heeft-geen-toekomst~bb1c7378/>

Tennet TSO (2018). Monitoring leveringszekerheid 2018. Geraadpleegd van: https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Company/Publications/Technical_Publications/Dutch/Rapport_Monitoring_Leveringszekerheid_2018.pdf

Urgenda (2017). Nederland 100% duurzame energie in 2030.

Van Oorschot, J., van der Zaag, J., van der Voet, E., Van Straalen, V. & Delahaye, R. (2020). Voorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie. Geraadpleegd van: <https://www.universiteitleiden.nl/nieuws/2020/01/de-stad-als-urban-mine>

Van Zoelen, B. (2019). *Grote planning voor sluitende Hemwegcentrale*. Geraadpleegd van: <https://www.parool.nl/amsterdam/grote-plannen-voor-sluitende-hemwegcentrale~bc0dcae6/>

Verschelling, J. (2020). *A circular economy by 2050. A look at the stocks and flows of electricity cables in The Netherlands*. MSc Thesis Industrial Ecology, Leiden Universiteit.

Viebahn, P., Soukup, O., Samadi, S., Teubler, J., Wiesen, K., & Ritthoff, M. (2015). Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 655-671.

Wiersma, K. (n.d.). *Magnumcentrale*. Geraadpleegd van: <https://www.gasunienewenergy.nl/projecten/magnumcentrale>

Windstats (2020). Statistieken. Geraadpleegd van: <https://windstats.nl/statistieken/>

Zimmerman, T. (2013). Dynamic material flow analysis of critical metals embodied in thin-film photovoltaic cells.

Bijlagen

A) Overzicht materiaalintensiteiten

Zie Excel bestand: *Bijlage_A_Materiaalintensiteiten_&_Huidigevoorraad.xlsx*

Notitie 1: De materiaalintensiteiten zijn veranderd voor windturbines; voor een overzicht van de hier gebruikte materiaalintensiteiten kan de studie van Roelofs (2020) worden geraadpleegd.

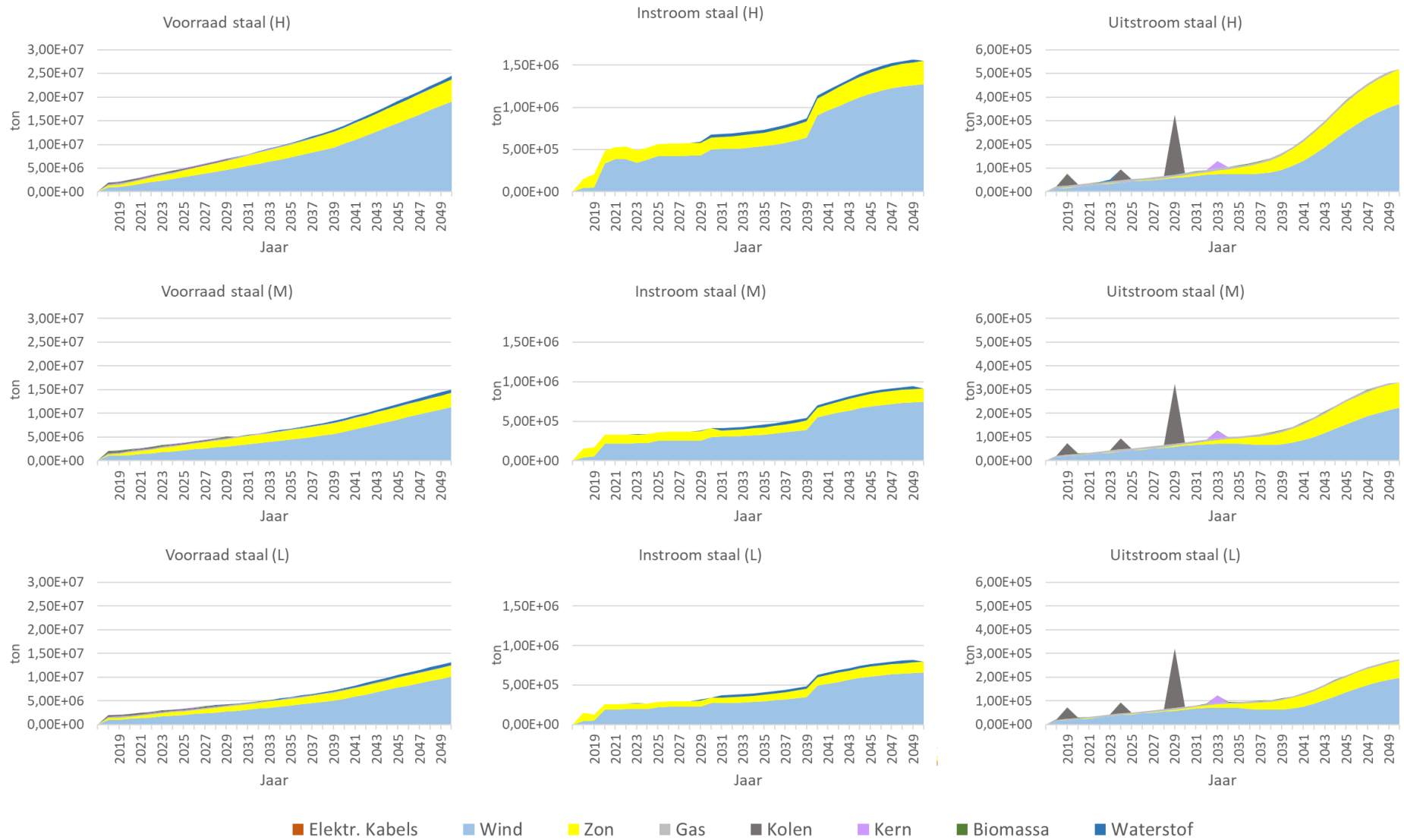
Notitie 2: Update materiaalintensiteiten zonnepanelen, opgedeeld in 1990-2020, 2020-2030, en 2030-2050 op sheet 2 van de Excel sheet.

B) Resultaten ontwikkeling materiaalvoorraad, instroom en uitstroom

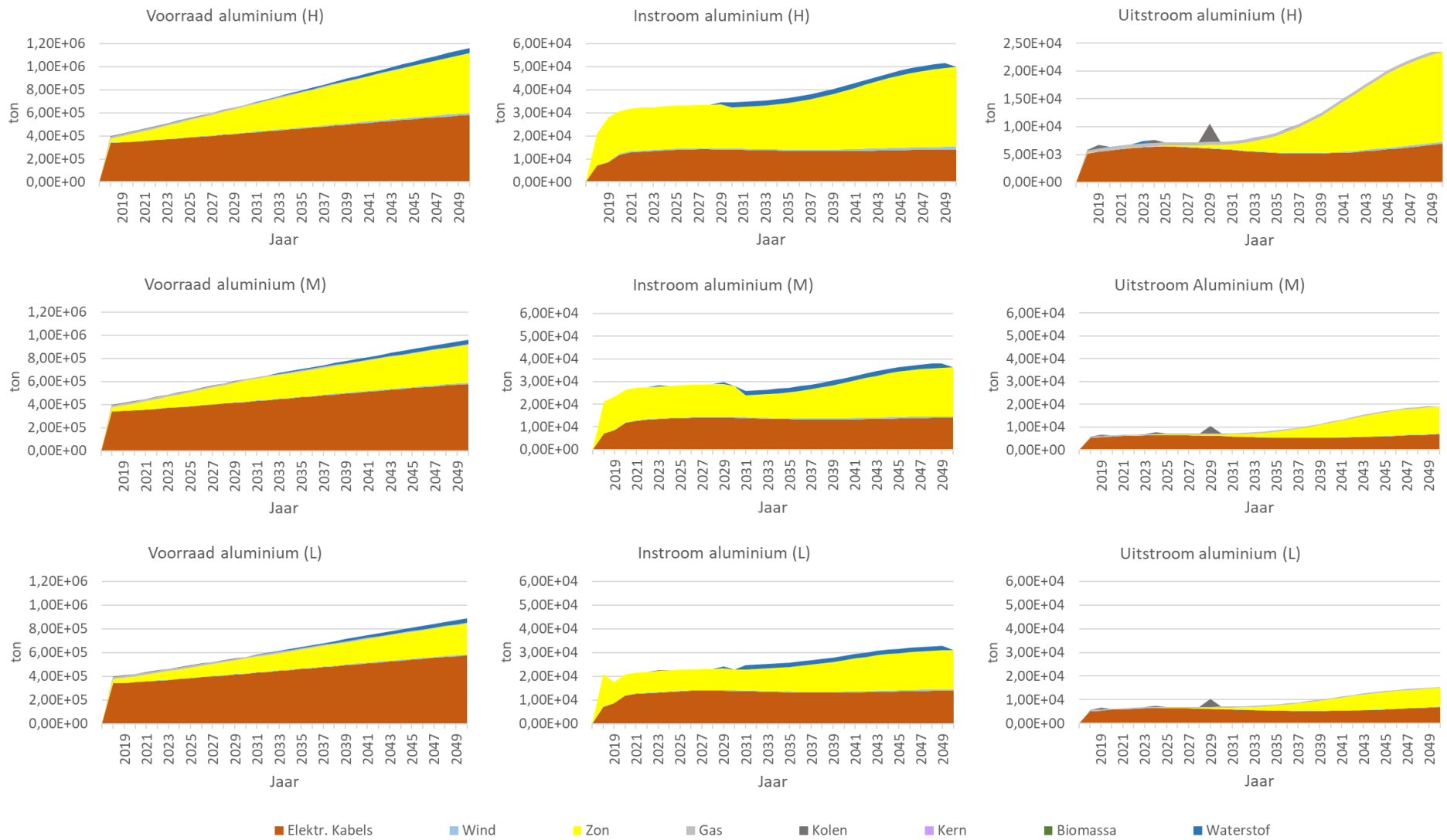
Zie Excel bestand: *Bijlage_B_Resultaten_Dynamiek_Elektriciteitssysteem.xlsx*

Figuur B1: Voorraad, instroom en uitstroom staal in het Nederlandse elektriciteitssysteem voor scenario Hoog (H), Midden (M) en Laag (L).

Figuur B2: Voorraad, instroom en uitstroom aluminium in het Nederlandse elektriciteitssysteem voor scenario Hoog (H), Midden (M) en Laag (L).



Figuur B1



Figuur B2

