

Voorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie

met case studies op gebied van het elektriciteitssysteem, elektronica en voertuigen



CML: Janneke van Oorschot, Jochem van der Zaag & Ester van der Voet
CBS: Vincent van Straalen & Roel Delahaye

Final draft, 22 Januari 2020



Universiteit
Leiden



Voorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie; met case studies op gebied van het elektriciteitssysteem, elektronica en voertuigen

Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie

Werkpakket 3 Grondstoffen en Effectmonitoring

T3.5 Dataverzameling voorraden

Universiteit Leiden, Centrum voor Milieuwetenschappen:

Janneke van Oorschot
Jochem van der Zaag
Ester van der Voet

Centraal Bureau voor de Statistiek:

Vincent van Straalen
Roel Delahaye

Final Draft, Januari 2020

Voorwoord

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie 2019-2023. Dit werkprogramma is een samenwerkingsverband van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML), het Centraal Planbureau (CPB), het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), RVO.nl, Rijkswaterstaat en TNO onder leiding van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Het kabinet streeft naar een volledig circulaire economie in 2050. Het doel van het werkprogramma is om de door het kabinet uitgezette koers naar 2050 te kunnen monitoren en te evalueren en de overheid te voorzien van de kennis die nodig is voor de vormgeving of bijsturing van beleid. Meer informatie over het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie is te vinden op <https://www.pbl.nl/monitoring-circulaire-economie>.



Monitoring en Sturing Circulaire Economie

Samenvatting

Een essentieel onderdeel van een circulaire economie is het benutten van de *urban mine*, de stedelijke mijn. In een economie waarin kringlopen zoveel mogelijk gesloten zijn is de stedelijke mijn de voornaamste bron van grondstoffen. Onze kennis van deze stedelijke mijn is tot nu toe zeer beperkt. Het is dan ook van groot belang hierin meer inzicht te krijgen. De stedelijke mijn verschilt op een aantal essentiële onderdelen van geologische mijnen:

- De stedelijke mijn is alomtegenwoordig, en de hoogste concentraties zijn waar ook de concentraties van mensen zijn
- De materialen in de stedelijke mijn zijn in gebruik, en daarmee niet onmiddellijk beschikbaar
- De materialen in de stedelijke mijn raken niet op maar worden steeds opnieuw aangevuld.

Dat maakt dat ook de exploitatie van de stedelijke mijn er anders uit zal zien dan die van een geologische mijn. Op dit moment echter bevindt het onderzoek naar *urban mining* zich in de fase van *prospecting*, het identificeren en kwantificeren van geschikte *deposits*. Vragen die zich voordoen zijn, onder andere:

- Hoeveel van welke materialen zitten in de stedelijke mijn?
- In welke hoeveelheden en in welk tempo komen deze beschikbaar voor hergebruik of recycling?

Vervolg vragen zoals hoe een *secondary supply chain* er uit moet zien, welke actoren betrokken moeten zijn, hoe een collectiesysteem het best opgezet kan worden, wat consequenties zijn voor materiaal- en productontwerp, etc., worden in deze rapportage niet behandeld.

Omdat het onderzoek naar *urban mining* nog in de kinderschoenen staat, dient dit onderzoek ook als haalbaarheidsstudie: in hoeverre is het mogelijk een kwantitatieve inventarisatie te maken van de omvang van de stedelijke mijn? In deze haalbaarheidsstudie proberen we dat te doen voor twee voorraden:

- Het Nederlandse elektriciteitssysteem, omvattende de elektriciteitsopwekking zowel als distributie
- Elektronische apparatuur in gebruik in Nederland.

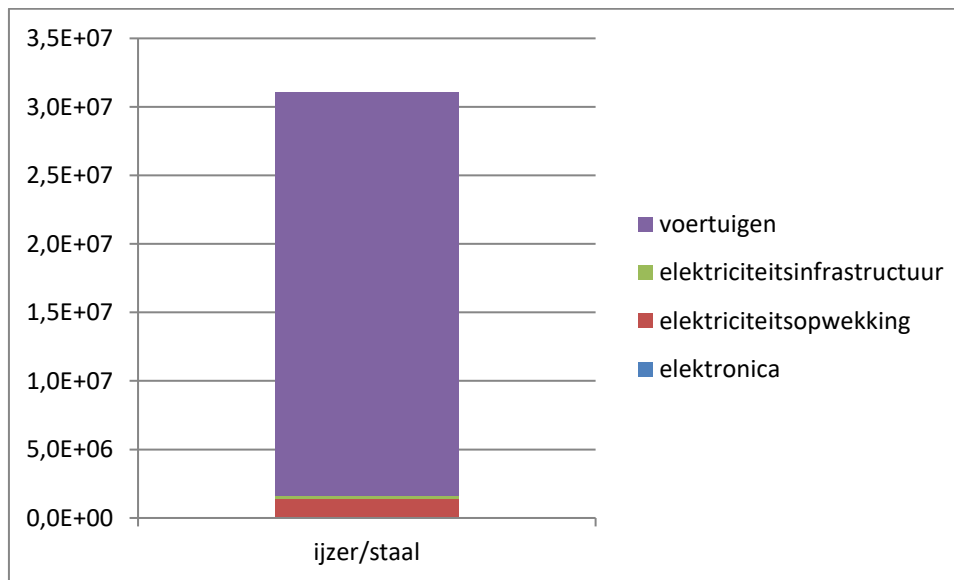
Een derde voorraad wordt hieraan toegevoegd gebaseerd op studentenonderzoek:

- Voertuigen van allerlei soort in gebruik in Nederland.

Van deze voorraden zijn in elk geval de materialen staal, aluminium en koper in kaart gebracht. Voor elektronica en het elektriciteitssysteem is daarnaast naar een serie kritische materialen gekeken.

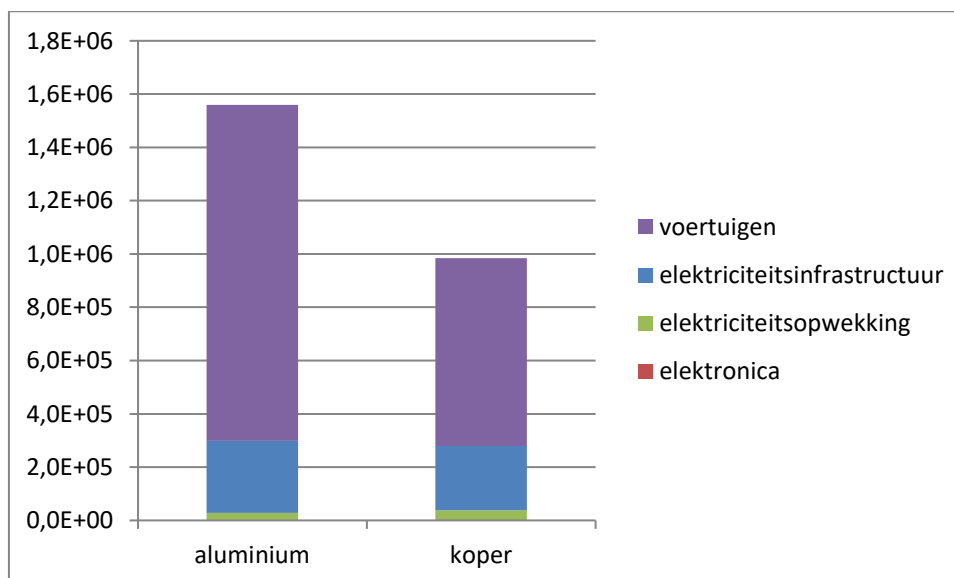
Onderstaande figuren tonen de belangrijkste bevindingen.

Figuur S.1 IJzer en staal in elektronica, het elektriciteitssysteem en voertuigen (1000 ton)



De ijzer- en staalvoorraden in de voertuigen zijn verreweg het grootst. In elektronica is de hoeveelheid relatief onbetekenend. Binnen de categorie voertuigen vormen schepen meer dan 80% van het totaal. Schepen zijn daarmee een interessante categorie: afgedankte schepen worden momenteel niet in Nederland verwerkt, het zou de moeite waard zijn te verkennen of dit een geschikte bron van secundair staal voor Nederland kan zijn.

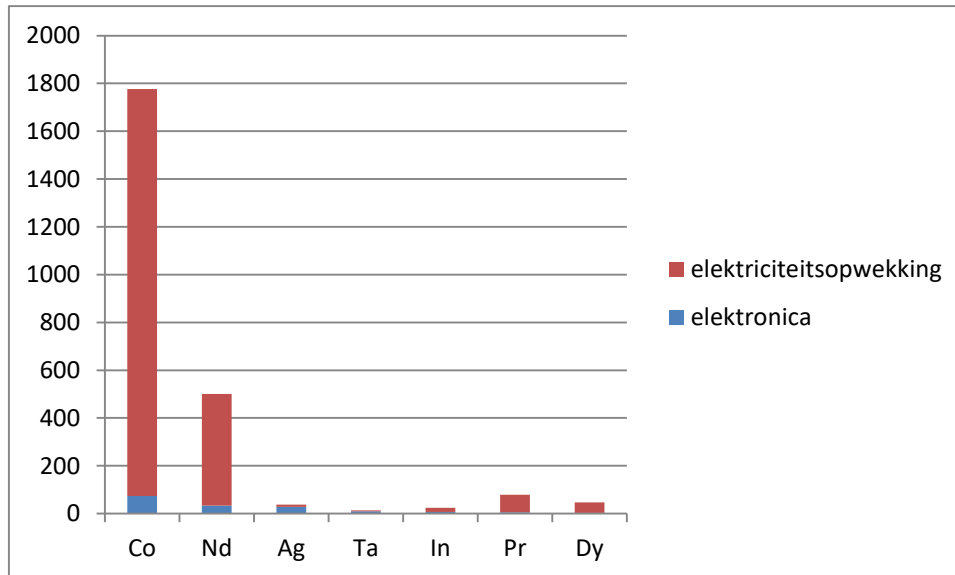
Figuur S.2 Aluminium en koper in elektronica, het elektriciteitssysteem en voertuigen (1000 ton)



De grootste voorraden van aluminium en koper zijn ook hier te vinden in voertuigen. Ook in het elektriciteitssysteem kunnen aanzienlijke hoeveelheden worden aangetroffen, met name in de infrastructuur van kabels en masten. Een deel hiervan betreft afgedankte kabels: een zogenaamde

hibernating stock, waarmee een voorraad wordt aangeduid die niet langer in gebruik is maar ook niet ter afvalverwerking aangeboden. Ook de categorie elektronica kent hibernating stocks. Omdat deze voorraden niet meer in gebruik zijn, zijn ze in principe meteen beschikbaar voor verwerking tot secundaire grondstoffen.

Figuur S.3 Kleine en kritische metalen in elektronica en elektriciteitsopwekking (ton)



Deze metalen zijn ook te vinden in voertuigen, met name in de nieuwe high-tech en elektrische voertuigen. De inventarisatie voor voertuigen heeft zich echter beperkt tot de grootschaliger materialen.

Kobalt is vooral te vinden als legeringselement in staal, gerelateerd aan fossiele elektriciteitsopwekking. Neodymium, Dysprosium en Praseodymium zijn met name gerelateerd aan windenergie. Elektronica zijn ook hier een kleine voorraad, maar niet onbelangrijk. Een veel breder spectrum aan kritische materialen, niet getoond in Figuur S.3, is te vinden in elektronica, die vanuit dat oogpunt een interessante voorraad vormt, omdat de doorlooptijden van elektronica relatief hoog zijn en makkelijk voorradig.

Hoewel met de nodige onzekerheden omgeven, bleek het wel mogelijk te zijn een inschatting te maken van deze voorraden. Dat is een bemoedigend resultaat. Ook de uitkomst is bemoedigend: deze drie voorraden bevatten een aanzienlijk potentieel aan secundaire materialen. Voor koper, bijvoorbeeld, is de stedelijke mijn (per Nederlander) in dezelfde orde grootte (100 kg) als de op dit moment bekende reserves in de geosfeer (per wereldburger).

Een volgende stap is het kwantificeren van de instromen, maar vooral de uitstromen uit deze voorraden. De uitstromen van afgedankte toepassingen is wat in principe beschikbaar is als materiaal voor een circulaire economie. Hoeveel daarvan ook daadwerkelijk kan worden ingezet, en voor welke doeleinden, is daarmee nog niet duidelijk. Wel is intussen duidelijk dat de herwinning van onderdelen en materialen veel beter zou kunnen, afhankelijk van een daarop gericht productontwerp. Een andere vraag die er ligt is, wat er op dit moment gebeurt met de afgedankte toepassingen. Hergebruik en recycling vindt tot op zekere hoogte plaats maar met name voor elektronica en voertuigen geldt dat een aanzienlijk gedeelte

geëxporteerd wordt, als afval maar ook als tweedehands product. Nederland verliest zo het zicht op de afvalverwerking en daarmee ook de greep op het mijnen van deze voorraden.

Er zijn nog meer relevante voorraden, die geïnventariseerd moeten worden om een totaalbeeld te krijgen van de stedelijke mijn. De gebouwde omgeving, de transportinfrastructuur en de zeer diverse groep van consumentenproducten horen daarbij. Ook interessant is het gas- en brandstofsysteem, en mogelijk ook de data- en communicatie-infrastructuur. Deze voorraden komen naar verwachting in een volgende fase van dit onderzoek aan de orde.

Tenslotte is de vraag, hoe dergelijke informatie gebruikt kan worden voor de ondersteuning van een circulaire economie.

In de eerste plaats is het van belang deze informatie bij te houden in het te ontwikkelen GRondstoffen Informatie Systeem (GRIS). De voorraden en hun uitstroom bepalen de mogelijkheid kringlopen te sluiten en informatie daarover is dus belangrijk.

In de tweede plaats kan de informatie gebruikt worden bij het maken van toekomstverkenningen. Grondstoffen worden niet standaard meegenomen in toekomstmodellen. Voor het schatten van de vraag naar grondstoffen in de toekomst is de dynamiek van deze voorraden belangrijk.

In de derde plaats kunnen deze inventarisaties een startpunt vormen voor het nadenken over welke activiteiten, actoren en zelfs sectoren in het leven geroepen moeten worden om de circulaire economie vorm te geven. Informeren, inventariseren, verzamelen, en verwerken moet anders. Product- en materiaalontwerp moet anders. Er zullen nieuwe vormen van bedrijvigheid nodig zijn.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting.....	4
1 Inleiding.....	11
2 Methode Inventarisatie Voorraden in de Maatschappij t.b.v. Ondersteuning van een Circulaire Economie beleid	14
2.1 Het voorraad-stroom systeem van de maatschappij.....	14
2.2 “Prospecting the urban mine”	14
2.2.1 Berekenen van voorraden uit stroomgegevens	15
2.2.2 Rechtstreekse inventarisatie van voorraden.....	16
2.2.3 Naar een geïntegreerde methode.....	18
3 Case study Elektriciteitssysteem	19
3.1 Inleiding	19
3.1.1 Relevantie	19
3.1.2 Doelstellingen.....	19
3.1.3 Scope	20
3.2 Methode en data.....	20
3.3 Resultaten.....	23
3.3.1 Het Nederlandse elektriciteitssysteem	23
3.3.2 Relevante materialen	27
3.3.3 Materiaalintensiteiten.....	29
3.3.4 Omvang componenten.....	33
3.3.5 Materiaalvoorraden in het Nederlandse elektriciteitssysteem	35
3.3.6 Tijdsdimensie.....	36
3.3.7 Ruimtelijke dimensie	41
3.4 Discussie	46
3.4.1 Methode	46
3.4.2 Data	47
3.3.4 Resultaten.....	53
3.4.4 Het benutten van de <i>urban mine</i>	61
3.5 Conclusie & aanbevelingen	62

4	Case study Elektronica.....	64
4.1	Inleiding	64
4.1.1	Achtergrond.....	64
4.1.2	Doelen	64
4.1.3	Leeswijzer	65
4.2	Methode en data.....	65
4.2.1	Databronnen	65
4.2.2	Berekeningsmethode	68
4.3	Resultaten.....	69
4.3.1	Elektronica.....	69
4.3.2	Goederengroepen uit de MateriaalMonitor	73
4.4	Conclusies.....	74
4.5.	Aanbevelingen.....	75
4.5.1	Betere informatie nodig over levensduur en standaarddeviatie	75
4.5.2	Informatie nodig over samenstelling producten om zo van producten naar materialen te komen	75
4.5.3	Onderzoek nodig naar aantal classificaties met vreemde uitkomsten	75
4.5.4	Aansluiting met de hoeveelheden goederen en afvalstromen in de MateriaalMonitor moet nog eens goed onderzocht worden.....	76
5	Case study Voertuigen.....	77
5.1	Inleiding	77
5.2	Methode en data.....	77
5.3	Resultaten.....	78
5.3.1	Aantallen voertuigen	78
5.3.2	Gewicht van de voertuigen	79
5.3.3	Materialen in de voertuigen.....	79
5.4	Discussie en conclusies.....	81
6	Conclusies, discussie, aanbevelingen	82
6.1	Conclusies.....	82
6.2	Discussie	83
6.2.1	Discussie: data en onzekerheden	83
6.2.2	Discussie: methode	84

6.2.3	Discussie: voorraden in de maatschappij	84
6.3	Aanbevelingen	86
6.3.1	Gebruik voorraad-informatie voor een circulaire economie beleid	86
6.3.2	Uitbreiding inventarisatie.....	87
6.3.3	Data en onzekerheden	89
7	Referenties	90
Appendices		96
Appendix 1	Data en classificaties relevant voor de elektronica case study	97
Appendix 2	Proces voor verwerking van de ruimtelijke data in GIS.....	112
Appendix 3	Berekeningen ontwikkeling voorraden materialen in windturbines (1990-2050)	113
Appendix 4	Berekening materiaalintensiteiten, met maximum en minimum waarden gevonden in de literatuur	116
Appendix 5	Vergelijking van de omvang van verschillende groepen voorraden voor relevante materialen	119

1 Inleiding

De Nederlandse overheid heeft ambitieuze doelstellingen in verband met het realiseren van een circulaire economie: in 2030 moet Nederland voor 50% circulair zijn, en in 2050 moet de economie volledig circulair zijn. Om deze doelstellingen te concretiseren is een Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie in het leven geroepen. Deze rapportage hoort bij de eerste ronde onderzoek van het Werkprogramma. Het maakt onderdeel uit van Werkpakket 3: Grondstoffen en Effectmonitoring.

In de Policy Brief Doelstelling Circulaire Economie 2030 (PBL, 2019) wordt het algemene doel, 50% circulariteit in 2030, nader uitgewerkt. Dit algemene doel wordt vertaald in termen van een reductie van de vraag naar primaire abiotische grondstoffen van 50%. In deze notitie wordt verwoord, waarom een circulaire economie belangrijk is, en hoe uit dit belang meer concrete doelstellingen gedestilleerd kunnen worden. Drie “achterliggende doelen” worden genoemd:

1. Reductie van milieu-effecten
2. Leveringszekerheid van grondstoffen
3. Economische kansen: waardebehoud en nieuwe activiteiten.

In de notitie wordt aangegeven hoe deze doelen aanknopingspunten kunnen bieden voor een nadere invulling van de halveringsdoelstelling, die op zichzelf te grof is en niet altijd tot gewenste effecten hoeft te leiden. Een voorbeeld is de energietransitie: deze vermindert milieu-effecten maar heeft wel een stijging van de vraag naar metalen tot gevolg. Belangrijke reducties kunnen plaatsvinden in CO₂ emissies door een groter aandeel secundair materiaal (o.a. van der Voet et al., 2019), maar dit is niet in alle gevallen waar.

Deze rapportage probeert bij te dragen aan het formuleren van concretere doelstelling door een groter inzicht te bieden in het metabolisme van de maatschappij. Hoe ontstaat de vraag naar grondstoffen, voor welke doeleinden worden zij gebruikt, en wat is de dynamiek van het materialengebruik in de maatschappij? Deze inzichten kunnen bijdragen aan het identificeren van mogelijkheden de grondstoffenvraag van de maatschappij op een andere manier te voldoen.

Een reductie van de vraag naar grondstoffen brengt risico's met zich mee. Kan de maatschappij zichzelf nog wel voorzien in de noodzakelijke behoeften? Daarvoor is het belangrijk te beseffen dat een reductie in de vraag naar primaire grondstoffen niet hetzelfde is als een reductie in de vraag naar grondstoffen in het algemeen. Als we primaire productie zoveel mogelijk willen terugdringen zonder verlies aan welvaart of functionaliteit, betekent dat dat het aanbod zoveel mogelijk uit secundaire grondstoffen zal moeten worden voldaan. Deze secundaire grondstoffen halen we niet uit het milieu, maar uit de *urban mine*, de stedelijke mijn: de voorraden van grondstoffen en materialen die aanwezig zijn in de maatschappij, en die op een gegeven moment vrij komen voor hergebruik of recycling. Dat betekent dat de stedelijke mijn een essentieel onderdeel is van een CE. En dat betekent weer, dat informatie over deze stedelijke mijn noodzakelijk is om een CE beleid te ondersteunen. Deze informatie is momenteel schaars, versnipperd of zelfs afwezig, en een van de belangrijkste hiaten in de kennisbasis voor een CE.

De stedelijke mijn

De begrippen “*urban mine*” en “*urban mining*” zijn niet strak gedefinieerd. Over het algemeen (Krook & Baas, 2013) worden vier typen voorraden onderscheiden:

- De voorraden van materialen die in gebruik zijn: grondstoffen die zijn opgesloten in gebouwen, infrastructuur, voertuigen, en allerlei producten. Gebouwen en infrastructuur bevatten vele tonnen materialen. In bepaalde productgroepen zoals elektronica vinden we specifieke materialen en grondstoffen, waaronder kritische materialen. Voertuigen bevatten beide. Deze voorraden groeien, maar kunnen op een gegevens moment ook verzadigd raken (Hu et al., 2010; Pauliuk et al., 2013). In de literatuur vinden we vooral studies naar twee typen voorraden: woningbouw, en elektronica (Heeren & Fishman, 2019; Tanikawa et al., 2015; Marinova et al., 2019; Deetman et al., 2019; Swilling et al., 2018; Deetman et al., 2018; ProSUM project). Woningbouw is een omvangrijke voorraad die een aantal veelgebruikte mineralen en metalen bevat, zoals beton, cement, staal, glas, hout, aluminium en koper. Elektronica case studies richten zich vooral op de specialty metalen, waaronder diverse kritische materialen.
- De voorraden van materialen die momenteel op afvalstortplaatsen liggen. Concentraties aan bepaalde elementen op afvalstorten soms hoger is dan in mijnen. Landfill mining is daarom een onderwerp dat ter sprake komt. Voor Nederland lijkt dit echter een weinig interessante voorraad.
- Voorraden van mijnbouw-afval die nog aanwezig zijn op de site. Deze voorraden worden na verloop van tijd weer interessant, als nieuwe technologieën in staat zijn om nog lagere concentraties op een economisch zinvolle manier te mijnen. Ook hier is voor Nederland niet veel te verwachten.
- “Hibernating stocks” – voorraden in winterslaap: producten of infrastructuur die niet langer in gebruik is, maar ook niet in het afvalstadium gekomen. Oude computers of mobiele telefoons in laatjes of op zolder, of niet langer in gebruik zijnde rails of elektriciteitskabels die gewoon zijn blijven liggen vallen in deze categorie. Dit kan voor Nederland mogelijk wel interessant zijn – groot voordeel van deze voorraden is dat ze niet meer in gebruik zijn en dus meteen geoogst kunnen worden. Op dit moment bestaat geen beeld van deze hibernating stocks.

De grootste voorraden zijn te verwachten in de eerste categorie: voorraden in gebruik. Deze zijn het onderwerp van dit rapport.

Kernvragen zijn

1. Hoeveel van welke materialen en grondstoffen zijn eigenlijk aanwezig in de maatschappij?
2. Wanneer komen deze materialen en grondstoffen beschikbaar voor recycling en hergebruik?
3. Wat is de kwaliteit van deze materialen en grondstoffen en voor welk doel kunnen ze worden aangewend?

Dit project richt zich op vraag 1, met doorkijkjes naar de vragen 2 en 3.

Omdat het onderzoek naar voorraden nog in de kinderschoenen staat, is dit tevens een haalbaarheidsstudie. We kiezen daarom twee verschillendsoortige voorraden. De eerste is het elektriciteitssysteem: de installaties en technologieën zoals kolencentrales, windparken en zonnecellen, maar ook de infrastructuur in de vorm van kabels, masten, transformatoren enz. Met name deze laatste zijn momenteel slecht in beeld, en deze studie heeft mede als doel om te zien of we met onbekende maar zeker deels beperkte gegevensbeschikbaarheid toch tot een redelijke eerste inschatting kunnen komen. De tweede voorraad is elektronica: een complexe voorraad waarnaar al onderzoek gedaan is, waarbij vooral gekeken wordt of het mogelijk is een dergelijke inventarisatie te baseren op beschikbare statistische gegevens.

Als derde, buiten de opdracht, voegen we de resultaten toe van een case study naar de voorraden in voertuigen. Dit begrip vatten we breed op: personenauto's, vrachtauto's, bussen, treinen, trams, metro, fietsen, brommers, motoren, schepen en vliegtuigen. Dit onderzoek is onder begeleiding van de auteurs van dit rapport gedaan als MSc thesis project van een student uit de Leids-Delftse MSc Industrial Ecology opleiding. Resultaten uit deze case study zijn opgenomen in dit rapport; de gehele MSc thesis rapportage is toegevoegd als bijlage bij dit rapport.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de methode die gebruikt wordt bij het inschatten van de omvang van genoemde drie voorraden in de maatschappij. Hoofdstuk 3 bevat de resultaten van de case study naar het elektriciteitssysteem. Hoofdstuk 4 is de rapportage van de elektronica case study. In hoofdstuk 5 worden de belangrijkste resultaten van de case study naar voertuigen samengevat. Tenslotte bevat hoofdstuk 6 de belangrijkste discussiepunten, conclusies en aanbevelingen uit het onderzoek. Referenties zijn te vinden in hoofdstuk 7 en het laatste deel van de rapportage bevat bijlagen met detailspecificaties.

2 Methode Inventarisatie Voorraden in de Maatschappij t.b.v. Ondersteuning van een Circulaire Economie beleid

2.1 Het voorraad-stroom systeem van de maatschappij.

Zoals in hoofdstuk 1 betoogd, is er een grote voorraad grondstoffen opgeslagen in allerhande toepassingen en producten in de maatschappij. Deze voorraad is de bron van grondstoffen voor een circulaire economie, waarin de extractie van primaire grondstoffen zo ver mogelijk is teruggedrongen.

Deze voorraad vertoont overeenkomsten, maar ook verschillen met de voorraad grondstoffen in een geologische mijn. Een belangrijk verschil is gelegen in de dynamiek van de stedelijke mijn. De geologische mijn is een voorraad in de grond op een bepaalde locatie, die planmatig gemijnd kan worden (uitstroom) en op een gegeven moment uitgeput is. De stedelijke mijn is ook een voorraad op een locatie, maar kan niet zomaar gemijnd worden: de voorraden zijn in gebruik. Met mijnen moet dus gewacht worden totdat de voorraden afgedankt worden. Anderzijds is van uitputting geen sprake omdat de voorraad ook steeds weer wordt aangevuld.

Een voorraad in de maatschappij kent dus instromen en uitstromen, en kan groeien of afnemen. Bij een groeiende voorraad wordt de instroom bepaald door twee dingen: enerzijds het vervangen van de afgedankte voorraden (compenseren voor uitstroom), en anderzijds de groei van de voorraad, bijvoorbeeld ten gevolge van een bevolkings- of welvaartstoename. De afgedankte producten (uitstroom) is wat beschikbaar komt voor reparatie, hergebruik, refurbishing of recycling. Het besluit om af te danken kan op vele manieren tot stand komen. Gewoonlijk wordt in voorraadinventarisaties gewerkt met een (gemiddelde) levensduur, waarna het product niet meer functioneert en dus wordt afgedankt. Planmatig afdanken is voor bepaalde voorraden zoals woningen of infrastructuur-elementen een meer gebruikte route. Herstructureringsplannen zijn in dat geval een betere sleutel tot het inschatten van de uitstroom

2.2 “Prospecting the urban mine”

Vraag 1, de vraag naar de hoeveelheid materialen in de stedelijke mijn, is in feite “prospecting the urban mine”, naar analogie van prospecting in de “gewone” mijnbouw. Prospecting is de fase waarin geologen een inschatting maken van de rijkdom en toegankelijkheid van het erts op een geselecteerde locatie, om te besluiten of het starten van een mijn op die locatie zinvol is. Datzelfde moet ook gebeuren voor de stedelijke mijn.

In de literatuur rondom het inschatten van stromen en voorraden van materialen komen we twee principieel verschillende benaderingen tegen om een inschatting te maken van voorraden in de maatschappij. De eerste benadering is een berekening van deze voorraden uit stroomgegevens. De

tweede benadering is een directe inventarisatie van voorraden die in gebruik zijn. In principe kunnen beide benaderingen tot goede resultaten leiden, en in theorie zouden de uitkomsten niet moeten verschillen. In de praktijk is de keuze voor een van beide vooral afhankelijk van de gegevensbasis. In het project worden beide benaderingen gebruikt voor de verschillende typen voorraden.

Hieronder worden beide benaderingen kort besproken.

2.2.1 Berekenen van voorraden uit stroomgegevens

Gegevens over stromen van grondstoffen – winning, productie, handel – zijn beschikbaar via statistieken. Gegevens over voorraden ontbreken grotendeels, of zijn versnipperd aanwezig. Dat maakt deze route een logische. Geologische diensten verzamelen gegevens over extractie van grondstoffen en volgen deze vaak tot het moment van de productie van materialen. De British Geological Survey produceert gegevens over extractie en handel van grondstoffen zowel als geraffineerde materialen voor alle landen ter wereld. Statistische bureaus hebben productie- en handelsdata van materialen zowel als producten. Input-output modellen koppelen extracties aan supply chains, en geven daarmee een beeld van hoe de grondstoffen zich over de wereldeconomie verspreiden. Zo kan een beeld worden geschetst van de eindvraag (final demand) naar materialen in een bepaald jaar. Vanaf dat moment worden de materialen onzichtbaar. Afvalstatistieken die zouden moeten beschrijven hoe de materialen uiteindelijk de gebruiksfase verlaten zijn vaak schaars, onvolledig en te geaggregeerd om van nut te zijn. In de Materiaalmonitor (Berkel et al, 2019) worden uitstromen geschat op basis van de afvalstatistieken, die in Nederland vrij volledig zijn, hoewel wel geaggregeerd.

In studies waarin voorraden worden ingeschat op basis van stromen, wordt gerekend met een “net-addition-to-stock”. Instromen zijn bekend, uitstromen worden ingeschat met behulp van een geschatte levensduur, en het verschil daartussen wordt geacht te worden toegevoegd aan de voorraad. Als de tijdreeksen maar lang genoeg zijn, kan door het optellen van alle net-additions-to-stock een inschatting worden verkregen van de voorraad zelf (o.a. Krausmann et al., 2017). Deze benadering wordt gebruikt wanneer het gaat over geaggregeerde categorieën van grondstoffen, zoals gebruikt in Material Flow Accounting: fossiele grondstoffen, biomassa, metalen, en mineralen. Er ontstaat zo een beeld hoe de voorraad zich ontwikkelt in termen van totale tonnen materiaal.

In formules:

$$F_{out}(t) = F_{in}(t - L)$$

$$NAS(t) = F_{in}(t) - F_{out}(t) = F_{in}(t) - F_{in}(t - L)$$

$$S(t) = \sum NAS(t, t-1, \dots, t-L)$$

Waarbij $F_{in}(t)$ de instroom is op tijdstip t , $F_{out}(t)$ de uitstroom op tijdstip t , L de levensduur is van de toepassingen van de grondstof in de maatschappij, $NAS(t)$ de Net Addition to Stock, en $S(t)$ de stock zelf op tijdstip t .

Hieruit volgt dat voor een stroom-benadering een tijdreeks nodig is die minimaal zo lang is als de levensduur van de toepassingen. De stroom kan gedefinieerd zijn in kg massa, in kg van een bepaald materiaal, of in termen van product of dienst. In het laatste geval is nog een vertaalslag nodig om vandaar tot een inschatting van de materiaalvoorraad te komen.

Een dergelijke stroom-gebaseerde benadering wordt ook gebruikt in het ProSUM project waar een inschatting wordt gemaakt van de stedelijke mijn voor elektronica, batterijen en personenauto's (ProSUM, 2019). Waar bij de MFA accounts de rationale van deze benadering ligt in het geaggregeerde karakter van de inventarisatie, zo is dat bij deze producten het feit dat vooral de stromen van producten goed gedocumenteerd zijn in een grote mate van detail, en de levensduur relatief kort is. De MFA accounts hanteren typisch een top-down benadering: geaggregeerde categorieën van grondstoffen. In tegenstelling daarmee wordt in het ProSUM project een bottom-up benadering gehanteerd: een gelaagde classificatie gehanteerd met een centrale rol voor producten. Materiaalstromen (en –voorraden) worden daaruit berekend via gegevens over de samenstelling van deze producten.

In het kader van dit project wordt deze stroomgerelateerde benadering toegepast voor de elektronica case study.

2.2.2 Rechtstreekse inventarisatie van voorraden

Een meer rechtstreekse benadering gaat uit van het inventariseren van de voorraden zelf. Deze benadering wordt vooral gebruikt voor studies met betrekking tot de gebouwde omgeving: gebouwen, wegen, bruggen, kabels en leidingen. Daarbij spelen GIS systemen een belangrijke rol: hierop zijn gebouwen en structuren goed zichtbaar. In Nederland is de BAG (Bestand Adressen en Gebouwen) gekoppeld aan GIS, waardoor niet alleen gedetailleerde informatie beschikbaar is over het “product” in gebruik, maar ook over de locatie. Dit maakt ruimtelijke differentiatie goed mogelijk.

Een rechtstreekse inventarisatie van voorraden van materialen is eigenlijk altijd bottom-up, en verloopt via drie stappen:

- a) Identificatie: in welke producten is het materiaal toegepast?
- b) Kwantificering (1): hoeveel van deze producten zijn aanwezig in de maatschappij?
- c) Kwantificering (2): In welke hoeveelheden zit het materiaal in deze producten verwerkt?

Ad a. Dit kan een lange lijst zijn, en het begrip “producten” moet breed worden opgevat, klein en groot, eenvoudig en complex, van een theelepeltje tot een gebouw of een snelweg. Zeker wanneer aansluiting gezocht moet worden bij standaard statistische classificaties, kan dit een ingewikkelde zaak zijn waar afbakeningen en nadere definities essentieel kunnen zijn. Wat is een relevante eenheid? Is een schroef

een product, of is het product een tafel waarin schroeven verwerkt zijn? Is het misschien soms handiger een functionele eenheid te definiëren, zoals dat gebruikelijk is bij de LCA methode die zich bij uitstek op producten richt? Bijvoorbeeld, “vierkante meter woonoppervlak” eerder dan “huis” of “gebouw”, of “MW capaciteit” eerder dan “windmolen” of “kolencentrale”? Er zitten veel kanten aan deze vraag.

Ad b. Het zijn de producten waarin het materiaal is toegepast. Indien mogelijk is het het handigst om gewoon te weten hoeveel producten er in omloop zijn, vooral als het gaat om relatief goed gedefinieerde producten zoals een windmolen, een auto, een koelkast of een mobiele telefoon.

Voor producten als auto's en elektronica geldt dat er weliswaar veel diversiteit in is, maar dat het zinvoller lijkt om binnen deze categorieën subcategorieën te onderscheiden (kleine personenauto's, grote personenauto's, vrachtauto's, busjes, enz.) dan toe te gaan naar een andere functionele eenheid (km personentransport).

Voor andere toepassingen is het definiëren van een functionele eenheid mogelijk wel zinvol. Een standaardgebouw definiëren is vermoedelijk niet zinvol. Een woongebouw kan een klein huisje zijn, of het kan een enorm appartementengebouw zijn. Een wooneenheid is al beter, hoewel ook hier grote verschillen in te vinden zijn, maar een wooneenheid heeft standaard zaken als een keuken, een badkamer en een verwarmingssysteem. Waarschijnlijk werkt het in dit geval beter om een m² woonoppervlak te hanteren en verschillende gebouwtypen te onderscheiden op basis van de gebouweigenschappen. Wellicht is het nuttig om bepaalde onderdelen apart te classificeren, zoals deuren of raamkozijnen. Deze zouden als geheel kunnen worden “ge oogst” en hergebruikt.

Ad c. Om een materiaalgehalte van producten te bepalen, dient nader te worden vastgesteld wat een “materiaal” is. Is dat iets als “plastic” of “roestvrij staal”? Of hebben we het over “ijzer” of “niobium”? Ook hier kunnen we leren uit de benadering gekozen in het ProSUM project, waarin beide worden gespecificeerd: materialen en elementen. Daarmee wordt recht gedaan aan het feit dat materialen eigenlijk bijna altijd composieten of legeringen zijn, en tegelijkertijd gaat de informatie over elementen niet verloren, die relevant is met name voor het recyclingspotentieel.

Een rechtstreekse inventarisatie van voorraden levert, indien de gegevensbasis hiervoor voldoende is, vaak een veel nauwkeuriger beeld op dan een indirecte inschatting via stromen. Met name voor de kleinschaliger grondstoffen zoals kritische materialen levert een stroombenadering vaak onvoldoende op (Deetman et al., 2018). De verspreiding van deze materialen door de economie wordt niet bijgehouden en input output modellen zijn te grof en ongeschikt om te dienen als basis om deze verspreiding te modelleren. Wanneer we geïnteresseerd zijn in specifieke grondstoffen, is een rechtstreekse inventarisatie gewoonlijk de enige bruikbare optie.

Het grootste nadeel van een rechtstreekse inventarisatie is dat het vaak lastig is om te bepalen wat er beschikbaar gaat komen uit de stedelijke mijn. Een geschatte levensduur van de toepassingen is essentieel, maar niet voldoende: we moeten ook weten hoe de levensduuropbouw is van de voorraad, of we moeten beschikken over lange tijdreeksen of gedetailleerde onderhouds- en afdankingsplannen. Deze laatste zijn bijvoorbeeld relevant voor de weg- en waterbouw, of voor de infrastructuur van onze energievoorziening.

Voor de case study met betrekking tot het elektriciteitssysteem wordt een rechtstreekse inventarisatie van de voorraden in de maatschappij gemaakt.

2.2.3 Naar een geïntegreerde methode

In het ProSUM project wordt gebruik gemaakt van een classificatiesysteem ontwikkeld aan de United Nations University, genaamd UNU keys. Dit systeem sluit aan op de classificaties van de nationale handels- en productiestatistieken, maar onderscheidt vijf hiërarchische niveaus (Wagner et al., in review):

- Flow
- Product
- Component
- Material
- Element

Een Flow is in deze classificatie het totaal aan producten dat in een jaar op de markt wordt gebracht (POM, Put On Market), in kg product. Een component is een onderdeel van een product dat apart wordt geproduceerd en soms in meerdere producten gebruikt wordt, zoals bijvoorbeeld een weerstand, een capacitor of een printed circuit board. Een material is een legering of composiet, zoals roestvrij staal of messing, dat is opgebouwd uit verschillende elementen.

Dit (bottom-up) classificatiesysteem is bruikbaar voor zowel de rechtstreekse voorraadinventarisatie als de stroomgebaseerde benadering. Deze indeling is ontwikkeld voor de in ProSUM meegenomen producten: elektronica, batterijen en personenauto's. Voor andere typen voorraden zoals gebouwen of infrastructuur voldoet deze mogelijk niet geheel en zijn aanpassingen nodig.

In dit project worden beide benaderingen gebruikt: de stroom-gebaseerde benadering in de elektronica-case study en de rechtstreekse voorraad-inventarisatie in de case study over het elektriciteitssysteem. In de toegevoegde case study over voertuigen worden beide benaderingen geïntegreerd: er wordt zowel van voorraad-informatie als van stroom-informatie gebruik gemaakt. Dit is mogelijk vanwege de over het algemeen goede gegevensbeschikbaarheid van zowel voorraden als stromen. Op die manier ontstaat een beeld van de voor- en nadelen van beide benaderingen en kan wellicht meer gezegd worden over de toepasbaarheid van beide. In de discussie komen we hierop terug.

Van de UNU key classificatie wordt vooralsnog geen gebruik gemaakt. Hoewel interessant, zou het voor het doel van dit project te ver voeren te proberen deze classificatie ook op andere productgroepen toe te passen. Voor de langere termijn is dit wel een interessant pad om te bewandelen.

3 Case study Elektriciteitssysteem

3.1 Inleiding

3.1.1 Relevantie

Om een toekomstbestendige, duurzame economie te bewerkstelligen heeft de Nederlandse overheid de doelstelling geformuleerd om volledig circulair te zijn in 2050 (Rijksoverheid, 2016). In een circulaire economie wordt gestreefd naar het verlagen van extractie van grondstoffen uit het milieu door een zo groot mogelijk gedeelte van de vraag te voldoen via hergebruik, ofwel secundaire productie. Rood & Hanemaaijer (2017) stellen dat een circulaire economie Nederland drie kansen kan leveren: Een schoner milieu, economische baten en voorzieningszekerheid van grondstoffen (Figuur 3.1).

De doelstelling is onderdeel van het Nederlandse klimaatbeleid, waarin afspraken staan voor vermindering van uitstoot. Hieronder valt ook de energietransitie, met een groei van het elektriciteitsnetwerk en hernieuwbare energiebronnen als gevolg (PBL, n.d; ECN, 2017.). Hierdoor zal de vraag naar materialen, waaronder (kritische) metalen, toenemen (Exter et al., 2019; Kleijn et al., 2011). De introductie van meer zon en windenergie zal tevens ook verandering in het elektriciteitsinfrastructuur veroorzaken, waardoor een groeiende vraag naar koper, aluminium en staal verwacht kan worden. Circulariteit is daarom met name interessant in de energiesector.

Een recente studie van Exter et al. (2019) naar de metaalvraag in zonnepanelen en windturbines illustreert dat de vraag naar kritische metalen die nodig zijn om de Nederlandse energietransitie te doorgaan niet haalbaar is in de huidige bevoorradingsketen. Echter, de materialen vormen mogelijk een substantiële hoeveelheid in het huidige elektriciteitssysteem en een waardevolle bron voor secundaire productie. Het gebruik van deze *urban mine* verlaagt de vraag naar dure en milieubelastende primaire productie en sluit aan bij de circulariteitsdoelstelling van de Nederlandse overheid.

Om in te kunnen schatten in hoeverre een verschuiving naar een circulaire economie mogelijk is, is het van belang een inschatting te hebben van de omvang, locatie en dynamiek van de stedelijke mijn. Dit leidt tot de Circulaire Economie rapportage 2020; onder leiding van het PBL, een werkprogramma voor het monitoren en sturen van de circulaire economie om zo de nationale doelstellingen van 2050 te halen.

3.1.2 Doelstellingen

Het doel van dit onderzoek is om inzicht te krijgen in de materiaalvoorraden in de Nederlandse economie en de dynamiek hiervan voor het formuleren van een circulair economiebeleid. Ter illustratie

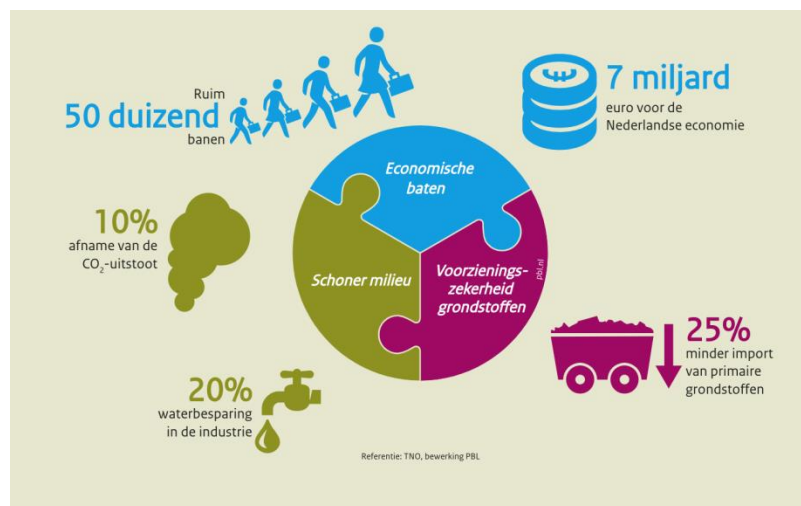
zijn drie voorraden uitgewerkt. Het CML (deze rapportage) richt zich op het elektriciteitsnetwerk, het CBS op elektronica en Rijkswaterstaat op infrastructuur. Dit wordt gedaan als onderdeel van het monitoringsysteem voor alle relevante voorraden, dat weer gekoppeld kan worden aan het Grondstoffen Informatie Systeem (GRIS). Vervolgstudies zijn daarna nodig voor de integratie van de overige voorraden en het modelleren van scenario's voor toekomstverkenningen.

3.1.3 Scope

De focus van deze rapportage is op materialen in het Nederlandse elektriciteitssysteem. Hiermee worden alle componenten voor elektriciteitsproductie en de benodigde infrastructuur voor transport en distributie bedoeld. De grenzen van het systeem zijn de aansluiting op openbare (e.g., verlichting) of private voorzieningen (e.g., huisaansluiting). Systemen voor de opslag van elektriciteit zijn niet meegenomen in deze studie.

Een component is in dit werk beschouwd als type technologie voor elektriciteitsproductie, bijvoorbeeld een windturbine of elektriciteitscentrale (bestaande uit verschillende subonderdelen). Voor het transport en distributienetwerk worden kabels, lijnen, masten en stations voor transformatie van elektriciteit als verschillende component beschouwd.

Figuur 3.1 Kansen voor Nederland in een circulaire economie (Rood & Hanemaaijer, 2017)



3.2 Methode en data

In dit hoofdstuk wordt de aanpak besproken voor het maken van een inventarisatie van materialen in het elektriciteitssysteem. Het betreft een directe bottom-up voorraad-inventarisatie (zie hoofdstuk 2).

Eerst is een inventarisatie gemaakt van de componenten in het elektriciteitssysteem (1), vervolgens is vastgesteld welke materialen interessant zijn om mee te nemen (2). Aan de hand van literatuur is de

materiaalintensiteit van de componenten bepaald (3) en aan de hand van statistieken, rapportages en ruimtelijke data is het aantal en de omvang van deze componenten in het Nederlandse elektriciteitssysteem geïnventariseerd (4). Met deze informatie kan vervolgens een inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid materialen in de stedelijke mijn (5). Tenslotte wordt ingegaan op de tijdsdimensie en de ruimtelijke dimensie van deze voorraad (6 & 7). De resultaten leiden tot inzicht in de relevantie van deze stedelijke mijn als bron van materialen voor een circulaire economie. Daarnaast kan met de resultaten worden bepaald wat er nog ontbreekt aan data om een dergelijke voorraad-inventarisatie te verbeteren. Figuur 3.2 geeft een schematische weergave van de methodiek.

1. Inventarisatie en classificatie componenten elektriciteitssysteem

Ten eerste is het Nederlandse elektriciteitssysteem in kaart gebracht; de huidige elektriciteitsmix en de transport en distributie van elektriciteit worden hier geanalyseerd. Vervolgens is gekeken welke componenten hierbij horen en bepaald hoe deze kunnen worden geclassificeerd.

2. Analyse relevante materialen

In deze studie zijn materialen geanalyseerd die relevant zijn voor een circulaire economie wat betreft toeleveringsrisico, milieuimpact, omvang en waarde. Leveringszekerheid wordt beïnvloed door factoren als geologische beschikbaarheid, geopolitiek risico, vervangbaarheid, recyclebaarheid en economisch belang (Deetman et al., 2018). De milieuimpact is gerelateerd aan de emissies en extracties in de gehele materiaalketen; deze kan in veel gevallen aanzienlijk verminderd worden door gebruik te maken van de stedelijke mijn (Van der Voet et al., 2019). Deze is hier verder niet getoetst. De economische waarde van de secundaire materialen is niet expliciet berekend, maar de omvang, herbruikbaarheid en mate van kritiek geven hiervoor een goede indicatie. Op basis van deze informatie kunnen nieuwe verdienmodellen worden ontwikkeld door middel van het terugwinnen en hergebruik van materialen in nieuwe toepassingen.

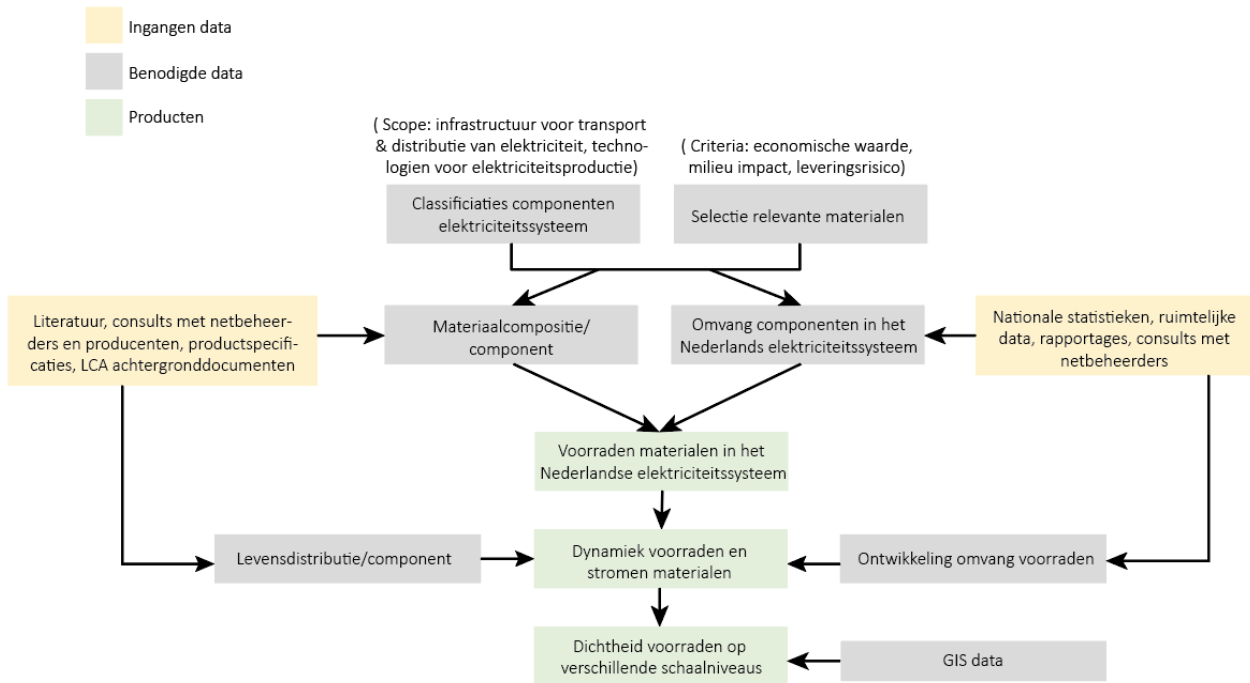
3. Materiaalintensiteit van componenten

Materiaalintensiteiten zijn veelal verkregen uit de wetenschappelijke literatuur. Voor sommige componenten is ook informatie van producenten of netbeheerders een waardevolle bron; zo heeft persoonlijke communicatie met netbeheerders van het laag- en middenspanningsnet (e.g., Enexis) en het hoogspanningsnet (Tennet) tot een beter inzicht geleid in materiaalintensiteiten in elektriciteitskabels en lijnen. Ook via een producent van laag- en middenspanningskabels, Prysmian, kon gedetailleerde informatie over de materiaalcomposities worden verkregen van hun huidige afname. Deze informatie is wellicht interessant bij het doen van toekomstverkenningen.

De materiaalcomposities van de componenten voor elektriciteitsproductie zijn bepaald aan de hand van literatuur en LCA achtergronddocumenten (Ecolnvent, 2007). Bij rapportage van verschillende waarden in de literatuur is een gemiddelde genomen.

Voor elektriciteitskabels is ton per kilometer aangehouden als eenheid. Voor overige componenten is ofwel ton per geïnstalleerd MW (e.g., voor kolencentrales of windmolens), of ton per component (e.g., elektriciteitsmasten) gebruikt.

Figuur 3.2 Schematische opzet weergave methode



4. Aantal en omvang componenten elektriciteitssysteem

Voor het kwantificeren van de componenten in het elektriciteitssysteem zijn wegens beperkte databeschikbaarheid verschillende aanpakken gebruikt. Ten eerste is gebruik gemaakt van nationale statistieken. Deze omvatten onder andere data van het CBS, Netbeheer Nederland en Windstats. Daarnaast bood openbare ruimtelijke data een ingang. Wanneer ruimtelijke data actueel en compleet was had deze de voorkeur.

Hier wordt kilometer als eenheid voor elektriciteitskabels, geïnstalleerd vermogen in MW voor technologieën voor elektriciteitsproductie en aantallen voor overige componenten gebruikt.

5. Omvang voorraden in het Nederlandse elektriciteitssysteem

De data besproken in sectie 3 en 4 zijn gerapporteerd in een Excel tabel, bijgevoegd als bijlage bij dit rapport. Aan de hand van deze tabel is vervolgens per materiaal de totale omvang in het Nederlandse elektriciteitssysteem berekend. Het resultaat geeft een eerste indicatie van welke voorraden interessant kunnen zijn als grondstofbasis voor een circulaire economie, wanneer deze beschikbaar komen om te “mijnen”. Daarnaast kon op basis van het resultaat worden bepaald welke data nog onzeker is of ontbreekt, zodat duidelijk wordt wat nodig is om een betere inventarisatie van de voorraden te maken.

6. Dynamiek van de stedelijke mijn

De voorraadmodellering vormt de basis voor de integratie in scenario-analyses voor de dynamiek van de stedelijke mijn. Aan de hand van gegevens over de voorraadopbouw uit verleden, scenario's voor de

ontwikkeling van de voorraadopbouw in de toekomst en informatie over de levensduur van componenten in het systeem, kan worden berekend wat de vraag naar materialen gaat worden, en wanneer materialen (in theorie) beschikbaar komen voor hergebruik of recycling. Hierbij wordt gebruik gemaakt van dynamische *material flow/stock analysis* (MFA).

De omvang van voorraden in het verleden zijn grotendeels gebaseerd op Nederlandse statistieken (e.g., CBS). Voor de toekomst is gebruik gemaakt van toekomstverkenningen in rapportages van ECN (2017), WLO (2016) en Tennet (2018). Ten slotte zijn de levensverwachtingen gebaseerd op verschillende literatuurbronnen.

7. Ruimtelijke component

Door de voorraadgegevens te koppelen aan een geografisch informatiesysteem (GIS) kunnen de voorraden op ruimtelijke niveau worden geïnventariseerd. Dit levert aanknopingspunten voor een circulaire economiebeleid op verschillende schaalniveaus.

In deze studie is de bruikbaarheid van een ruimtelijke component voor de voorraden geïllustreerd door de materiaaldichtheid van één van de component in kaart te brengen. Hiervoor wordt de software ArcGIS gebruikt. Naast de voorbeeldstudie is geïnventariseerd welke data beschikbaar is, en wat nog ontbreekt voor het doen van een goede ruimtelijke analyse voor het Nederlandse elektriciteitssysteem. Wanneer de ruimtelijke data volledig is, vormt dit een goede bron voor het doen van voorraad- en stroomanalyses (MFA).

De schaalniveaus zijn gekozen op basis van de bestuurlijke niveaus en administratieve grenzen: provincieniveau (voor landelijk en provinciaal bestuursniveau), gemeente niveau (voor provinciaal en gemeentelijk bestuursniveau), wijk en buurtniveau (gemeentelijk bestuursniveau). De dichtheden op verschillende schaalniveaus helpen bij het toegankelijk maken van de stedelijke mijn. Daarnaast leveren de kaarten inzicht in wat een haalbaar en wenselijk schaalniveau is voor een circulaire economie.

3.3 Resultaten

3.3.1 Het Nederlandse elektriciteitssysteem

De Nederlandse elektriciteitsmix

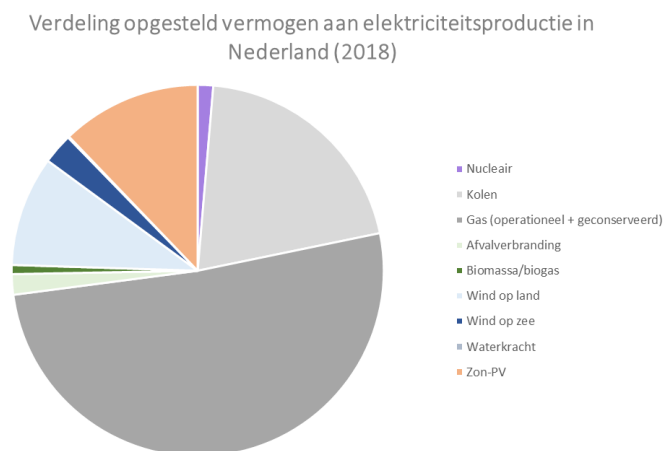
Om inzicht te krijgen in de technologieën die gebruikt worden in Nederland voor de productie van elektriciteit, is een inventarisatie gemaakt van het geïnstalleerde vermogen per technologie, weergegeven in Tabel 3.1. De waarden geven aan, onder ideale omstandigheden, hoeveel elektrische energie (in Megawatt) geproduceerd kan worden met de betreffende technologie. De technologieën en het geïnstalleerde vermogen worden uitgebreider besproken in hoofdstuk 3.4.

Figuur 3.3 laat het aandeel geïnstalleerd vermogen per technologie zien. Het grootste deel van de elektriciteit wordt in het huidige systeem kan geleverd worden uit conventionele elektriciteitsbronnen: aardgas en kolen. Wel moet genoteerd worden dat 2900 MW geïnstalleerd vermogen aan gascentrales “geconserveerd” is, wat betekent dat deze tijdelijk buiten werking zijn gesteld. 72% van het geïnstalleerde vermogen bestaat uit gas- en kolencentrales. 25% van het vermogen wordt gevormd door hernieuwbare energiebronnen. Hiervan bestaat 12% uit zonnepanelen, 12% uit windturbines en vormen waterkrachtcentrales en biomassa 1%. 1% van de capaciteit bestaat uit kernenergie, en de laatste 2% bestaat uit afvalverbrandingscentrales.

Tabel 3.1 Nederlandse elektriciteitsmix (ECN, 2017; Tennet, 2017)

Technologie	Opgesteld vermogen (MW)
Nucleair	485,0
Kolen	7381,0
Gas (operationeel + geconserveerd)	18500,0
Afvalverbranding	643,3
Biomassa	286,2
Wind op land	3465,0
Wind op zee	957,0
Waterkracht	37,0
Zon-PV	4400,0

Figuur 3.3 Opgesteld vermogen aan elektriciteitsproductie in Nederland



Classificatie componenten in het elektriciteitssysteem

In dit hoofdstuk worden de componenten besproken die gebruikt worden voor de productie en transport van elektriciteit. Een overzicht van deze componenten en de gebruikte classificaties zijn samengevat in Tabel 3.2.

Het grootste deel van de Nederlandse elektriciteit is afkomstig van aardgas en kolencentrales. Hier is voor de ketel en leidingen van kolencentrales uitgegaan van *the current best technology*, en een *advanced ultra-supercritical (A-USC)* turbine (Moss et al., 2013). Voor de bulkmaterialen is uitgegaan van een *hard coal power plant* van 100 MW en 500 MW (Ecoinvent, 2007). Voor gas wordt een 400 MW *Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)* aangenomen. Daarnaast is voor de bulkmaterialen een 100 MW *gas power plant* en een 400 MW *gas combined cycle power plant* meegenomen (Ecoinvent, 2007). Voor kerncentrales is een *pressure water reactor* aangenomen (Moss et al., 2013), in overeenstemming met technologie die toegepast is in kerncentrale Borssele (Wise Nederland, n.d.).

Voor biomassacentrales is aangenomen dat deze vergelijkbaar zijn met afvalverbrandingscentrales (Ecoinvent, 2007; Sullivan et al., 2010). Het type centrale is gebaseerd op het werk van Sullivan et al. (2010), uitgaande van een *integrated gasification combined cycle (IGCC)* centrale. Voor waterkrachtcentrales is uitgegaan van een 8,6 MW *run-of-river* krachtcentrale, gebaseerd op het werk van Flury and Frischknecht (2012). Verder worden zonnepanelen en windturbines onderscheiden. De eerste is onder te verdelen in *silicon* en *thin film* technologieën. Een onderscheid is gemaakt tussen *a-Si*, *c-Si*, *CdTe* en *CIGS* varianten, omdat deze het meeste worden toegepast en sterk verschillen in materiaalsamenstelling (Ohrlund, 2011; Exter et al., 2019). Om dezelfde reden is een onderscheid gemaakt tussen *onshore* en *offshore* windturbines, en het type aandrijving *direct drive* en *gearbox* (Bonou et al., 2016; Exter et al., 2019).

De geproduceerde elektriciteit wordt vervolgens via het transport- en distributienet naar de eindgebruiker vervoert (huishoudens en industrie) (Figuur 3.4). Op hoogspanningsniveau wordt de stroom van grote elektriciteitscentrales door het land getransporteerd, op laag spanningsniveau wordt de stroom gedistribueerd naar de eindgebruiker. Het hoogspanningsnet, met spanningen van 110 tot 380 kV wordt ook wel het koppelnet genoemd (Van Oirsouw & Cobben, 2011). Het transportnet, met een hoogspanning van 50 tot 150 kV, transporteert ook elektriciteit op landelijk niveau. Onderstations transformeren de spanning van het hoogspanningsniveau of tussenspanningsniveau naar middenspanning, voor regionale distributie van de elektriciteit. Middenspanning varieert tussen de 3 en 25 kilovolt. Op lokaal niveau wordt de elektriciteit in een netstation vervolgens overgezet naar laagspanning, met spanningen lager dan 1 kilovolt. Hierop kunnen huizen worden aangesloten. Het aantal soorten kabels op verschillende schaalniveaus is groot (F. Middel, persoonlijke communicatie, 7 Juni 2019; Enexis, 2017, 2019; Nexans, n.d.). Om de studie overzichtelijk te houden is gewerkt met een gemiddelde samenstelling van de kabels op de drie spanningsniveaus.

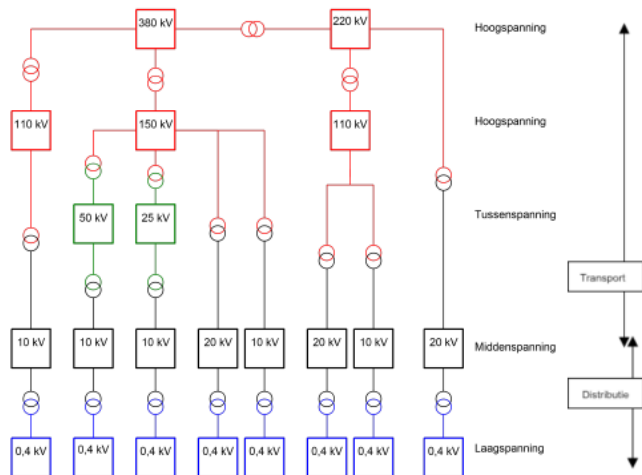
Transformatie van spanningen naar lagere spanningsniveaus gebeurt met behulp van transformatoren. Voor transformatie van elektriciteit van hoogspanning naar middenspanning gebeurt dit in onderstations. Een netstation transformeert spanningsniveaus van midden naar laagspanning (van Oirsouw & Cobben, 2011).

Daarnaast bestaan er schakelstations en regelstations waarin inkomende velden met gelijkblijvend spanningsniveau worden omgezet naar een veelvoud van afgaande velden voor distributie. De vier type transformatiestations zijn onderscheiden in deze studie.

Om kabels met elkaar te verbinden worden zogeheten moffen gebruikt. Echter zijn deze oninteressant om mee te nemen in dit onderzoek wegens beperkte waarde (licht gewicht, geen waardevolle materialen) en de hoeveelheid energie die nodig is om de recycelen door het gebruik van materialen als giethars (P. Soepboer, persoonlijke communicatie, 6 Juni 2019).

Energieopslagsystemen zullen met name interessant worden wanneer elektriciteit geproduceerd door intermitterende elektriciteitsbronnen, zoals wind en zon, toenemen. In het huidige systeem is de toepassing van opslagsystemen op de schaal van elektriciteitsproductie en infrastructuur nog klein (Energy Storage NL, 2019). De opslag van elektriciteit zal waarschijnlijk relevanter worden wanneer gekeken wordt naar de toekomst. Omdat in deze studie wordt gekeken naar het huidige systeem, is besloten deze nog niet mee te nemen in de inventarisatie.

Figuur 3.4 Schematische weergave van spanningsniveaus in het Nederlandse elektriciteitsnetwerk (Van Oirsouw & Cobben, 2011)



Tabel 3.2 Classificatie componenten in het Nederlands elektriciteitssysteem

Hoofdcategorie	Technologie	Type	
Technologieën voor elektriciteitsproductie	Zonnepanelen	<i>c-Si</i> <i>a-Si</i> <i>CdTe</i> <i>CIGS</i>	
	Windturbines	<i>Onshore gearbox</i> <i>Onshore direct drive</i> <i>Offshore gearbox</i> <i>Offshore direct drive</i>	
	Kolencentrales	<i>A-USC</i>	
	Gasgestookte elektriciteitscentrales	<i>CCGT/IGCC</i>	
	Biomassacentrales (inclusief afvalverbranding)	<i>IGCC</i>	
	Kerncentrales	<i>Pressure water reactor</i>	
	Waterkrachtcentrales	<i>River-run-of-powerstation</i>	
	Infrastructuur voor transport en distributie van elektriciteit	Elektriciteitskabels en elektriciteitslijnen	Hoogspanningslijnen en kabels (> 100 kV) Middenspanningskabels (1- 50 kV) Laagspanningskabels (<1 kV)
		Onderstations	Lucht geïsoleerd, 132 kV of 275-400 kV, 7 <i>circuit breakers</i> , 5-15 <i>substation bays</i> , 1-3 transformatoren per onderstation, elk met 500 MVA power
		Transformatiestation	315 kVA transformator voor klantstation en netstation, 9,4 MVA transformator voor transport- en distributieverdeelstation
Hoogspanningsmasten		132 kV, 275-400 kV of 400 kV variant	

3.3.2 Relevante materialen

In deze sectie is een inventarisatie gemaakt van materialen die mogelijk een interessante bron voor *urban mining* zijn. Hierbij is gebruik gemaakt van de criteria beschreven in hoofdstuk 3.2. Plastics zijn buiten beschouwing gelaten wegens de veelheid aan soorten, relatief lage waarde en beperkingen wat betreft hoogwaardig recyclen.

Een onderscheid kan worden gemaakt tussen (meestal LCA gerelateerde) literatuur die zich focust op de bulkmaterialen in het elektriciteitssysteem (e.g., Jorge et al, 2012a, b; Haapala & Prempreeda, 2014), en studies die kritische metalen in dit systeem bestuderen (e.g., Moss et al., 2011; 2013; Exter et al., 2019). In de eerste worden onder andere beton, staal, koper en aluminium onderscheiden voor technologieën voor elektriciteitsproductie. Voor transport en distributie van elektriciteit zijn vooral koper, aluminium en staal relevant (F. Middel, persoonlijke communicatie, 7 Juni 2019; P. Soepboer, persoonlijke communicatie 6 Juni 2019; Enexis, 2017, 2019; P. Oosterlee, persoonlijke communicatie, 22 Juni 2019). Ook Kleijn et al. (2011) benadrukken dat de vraag naar aluminium en koper voor de transport en distributie van elektriciteit zal groeien wanneer het aandeel windturbines en zonnepanelen toeneemt.

Gezien de verwachte omvang en waarde zijn daarom ten eerste daarom beton, staal, koper en aluminium meegenomen.

De (mogelijk) kritische metalen die aan bod komen in de literatuur lopen uiteen. Graedel (2011) rapporteert metalen voor energieproductie die schaars zijn of een hoog toeleveringsrisico hebben. Hierbij ligt de nadruk op elementen die wenselijk of essentieel zijn voor de ontwikkeling van hernieuwbare energie. Deze omvatten: Kobalt, koper, gallium, seleen, cadmium, indium, telluur, lanthanum, neodymium, dysprosium en hafnium. Hierbij zijn met name gallium, indium en neodymium onzeker wat betreft leveringszekerheid op de lange termijn. Ook Deetman et al. (2018) bestuderen metalen die mogelijk een toeleveringsrisico in de toekomst vormen en relevant zijn voor, onder andere, elektriciteitsproductie. Hiertoe zijn koper (gebruikt in alle elektriciteit-technologieën), tantalium en kobalt (niet hernieuwbare technologieën voor elektriciteitsproductie) en neodymium (windturbines) geanalyseerd.

In het werk van Elshkaki en Graedel (2013) naar de metaalvraag in verschillende scenario's voor de ontwikkeling van het elektriciteitsnet komt naar voren dat voor zonnepanelen beperkende metaalvoorraden verwacht kunnen worden. Relevante metalen omvatten hier zilver, telluur, cadmium, indium en germanium, met name in *thin film* technologieën. Exter et al. (2019) beschouwen daarnaast ook seleen en gallium als kritische metalen in dit type zonnepanelen.

Voor windturbines kan een onderscheid gemaakt worden tussen een *gearbox* en een *direct drive* aandrijving. Het verschil is dat in de *direct drive* meer neodymium wordt gebruikt en daarnaast ook dysprosium, terbium en praseodymium aanwezig is, door het gebruik van permanente magneten (Exter et al., 2019).

Alhoewel ook andere materialen en elementen in deze studie zijn gerapporteerd, wanneer gevonden in de literatuur, ligt de focus op een selectie materialen (en elementen) die relevant zijn in een circulair economie beleid. Deze omvatten ten eerste een viertal materialen met een substantiële omvang: beton, koper, aluminium en staal. Daarnaast zijn (mogelijk) kritische metalen die nodig zijn voor zon- en wind technologieën meegenomen, deze omvatten: neodymium, dysprosium, praseodymium, terbium, zilver, telluur, indium, cadmium en seleen. Ten slotte worden de kritische metalen kobalt en tantalium meegenomen, deze bevinden zich met name in turbines van gas- en kolencentrales. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een tweetal materialen, beton en staal, en een reeks elementen (e.g., neodymium en kobalt). Hoe de metalen zich in het materiaal bevinden (in de vorm van legeringen) en verschillende soorten beton worden, wegens de veelheid aan soorten en scope van dit onderzoek, niet onderscheiden.

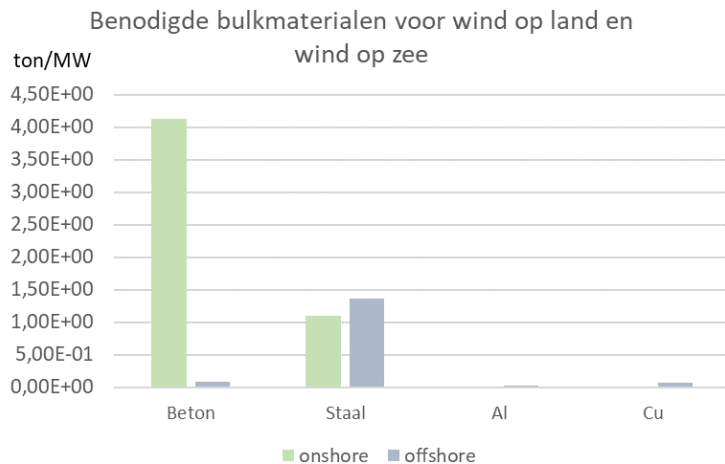
3.3.3 Materiaalintensiteiten

In dit hoofdstuk worden de aannames voor materiaalintensiteiten besproken. Een uitgebreide rapportage van de vergelijking van de verschillende bronnen en argumentatie van de keuzes is te vinden in Appendix 4.

Windturbines

Verschillende bronnen zijn gevonden die rapporteren over materialen in windturbines (Ecoinvent, 2007; Elshkaki & Greadel, 2013; Bonou et al., 2016, Marimuthu & Kirubakaran, 2013; Wilburn, 2011; Exter et al., 2019; Haapala & Prempreeda, 2014). Voor beton, staal, ijzer en koper wordt het gemiddelde van de hoogste en de laagste waarde genomen in studies die het betreffende materiaal analyseren. Onderscheid is gemaakt tussen *onshore* en *offshore*, aangezien materiaalwaarden substantieel verschillen in de literatuur. Figuur 3.5 laat zien dat op land een grote hoeveelheid beton nodig is, terwijl op zee een grotere hoeveelheid staal, aluminium en koper (onder andere voor bekabeling) wordt gebruikt. Voor de bulkmaterialen is geen onderscheid gemaakt tussen een *gearbox* of *direct drive* aandrijving, omdat dit nauwelijks verschil maakt voor de benodigde bulkmaterialen.

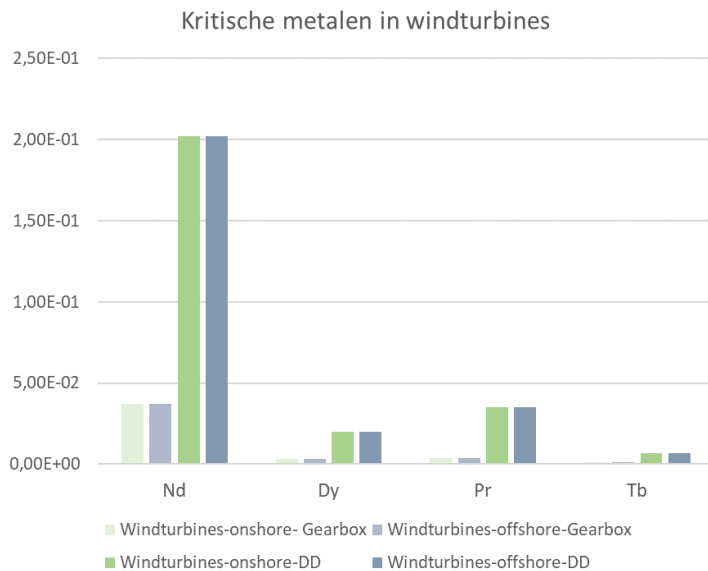
Figuur 3.5 Vergelijking benodigde bulkmaterialen voor windturbines op land en op zee, in ton/MW



De kritische metalen zijn bepaald aan de hand van de studie van Exter et al. (2019) omdat in dit werk een onderscheid wordt gemaakt tussen zowel onshore en offshore als een *direct drive* en *gearbox* aandrijving; afhankelijk van het type zijn andere soorten en/of hoeveelheden kritische metalen nodig. Exter et al. (2019) baseren hun waarden op verschillende literatuur, en definiëren een *lower band*, *upper band* en *medium band* aan de hand van waarden gevonden in literatuur. De medium waarde is aangehouden in dit werk, aannemend dat een gemiddelde materiaalintensiteit geldt voor de 4 typen wind technologieën. De waarden zijn gevalideerd met het werk van Moss et al. (2011), Ohrlund (2011) en Elshkaki & Graedel (2013) en waren minstens in dezelfde orde grootte, en vaak vergelijkbaar in waarde. Het verschil in materiaalvraag voor de verschillende technologieën, in ton per MW, is weergegeven in Figuur 3.6. Het figuur laat zien dat de vraag naar kritische metalen groter is in

windmolens met een *direct drive* aandrijving. Er is geen verschil in de benodigde hoeveelheid kritische metalen voor *onshore* en *offshore* windturbines.

Figuur 3.6 Kritische metalen in verschillende soorten windturbines

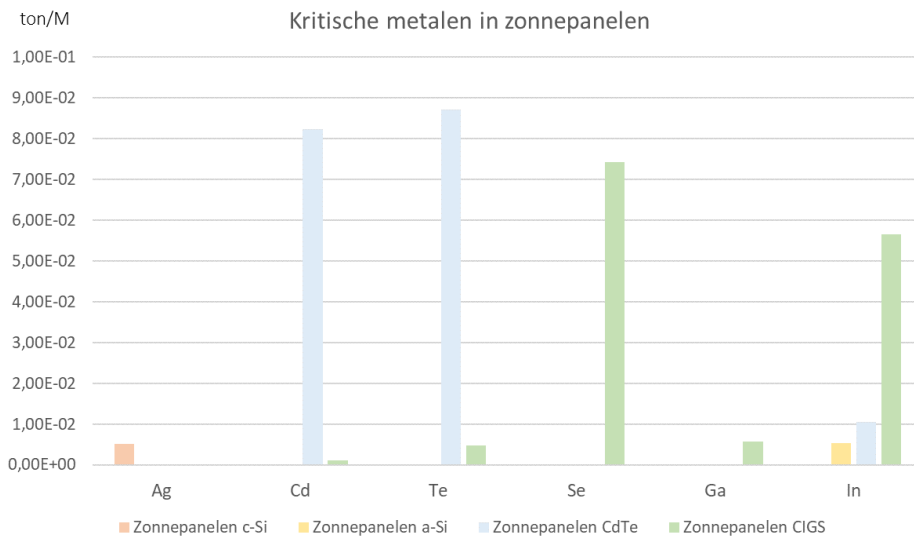


Zonnepanelen

Bronnen die materiaalintensiteiten van technieken voor zonnepanelen rapporteren zijn gelimiteerd. Gevonden en geanalyseerde studies zijn hier Ohrlund (2011), Elshkaki en Graedel (2013), Moss et al. (2011), Arrobas et al. (2017) en Exter et al. (2019). Per studie verschilt welke technologieën en materialen zijn meegenomen. In deze studie zijn *c-Si* (siliconen), *a-Si*, *CdTe* en *CIGS (thin-film)* onderscheiden. Per type technologie en materiaal is de best beschikbare data voor materiaalintensiteiten gebruikt en bij meerdere bronnen is een gemiddelde van de hoogste en laagste waarde genomen.

Figuur 3.7 geeft per technologie aan hoeveel kritische materialen nodig zijn. Op het gebruik van zilver in kristallijn varianten (*c-Si*) na, zijn met name de *thin film* varianten *CdTe* (cadmium en telluur), *CIGS* type (seleen, gallium) relevant wat betreft de benodigde kritische metalen.

Figuur 3.7 Benodigde kritische metalen in verschillende typen zonnepanelen, in ton/MW



Biomassa- en afvalelektriciteitscentrales

Aangenomen is dat een afvalenergiecentrale vergelijkbaar is met een biomassacentrale. Voor de bulkmaterialen zijn EcoInvent (2007) gebruikt en waarden uit het werk van Sullivan et al. (2012). Waarden voor beton hebben dezelfde orde grootte, terwijl waarden voor staal en aluminium een orde grootte verschillen. Gemiddelden zijn gebruikt in dit werk. Bij gebrek aan beschikbare data is aangenomen dat de hoeveelheden kritische metalen in afval- en biomassacentrales vergelijkbaar zijn met die in kolencentrales.

Kolencentrales

Voor de bulkmaterialen in kolencentrales is van EcoInvent (2007) en Sullivan et al. (2012) het gemiddelde genomen. Voor de kritische metalen is het werk van Moss et al. (2013) gebruikt.

Gasgestookte elektriciteitscentrales

EcoInvent (2007) en Moss et al. (2013) vormden hier de best beschikbare literatuur, voor zowel bulkmaterialen als kritische metalen. Ook hier is, wanneer er verschil was tussen de waarden, een gemiddelde genomen van de hoogst en laagst gevonden waarde. De waarden van de twee studies lagen hier redelijk dicht bij elkaar in de buurt.

Kerncentrales

EcoInvent (2007) is gebruikt voor kwantificatie van de bulkmaterialen en Moss et al. (2011) voor de kritische metalen.

Waterkrachtcentrales

Voor de bulkmaterialen is gebruik gemaakt van het werk van Flury en Frischknecht (2012). Voor kritische metalen is het werk van Moss et al. (2013) gebruikt.

Transmissie- en distributienetwerk

Hoogspanningslijnen, kabels en masten

Voor de materiaalintensiteit van hoogspanningskabels zijn verschillende aannames gemaakt. De materiaalintensiteit van de kabels en lijnen is bepaald aan de hand van ruimtelijke data van Tennet (ArcGIS, 2019) en het werk van Harrison et al. (2010). In het werk van Harrison et al. (2010) worden voor hoogspanningslijnen twee typen legeringen onderscheiden: AAAC en ACSR. ACSR bestaat uit ongeveer 59% aluminium en 41% staal. Omdat er verschillende AAAC legeringen zijn is hier aangenomen dat alle kabels van de ACSR variant zijn. Voor een 132 kV hoogspanningslijn wordt 0,842 ton ACSR gebruikt. Aan de hand van de ruimtelijke data van Tennet is berekend hoeveel procent van de lijnen 110, 150, 220, 380 of 450 kV hebben. Vervolgens is de materiaalintensiteit geschaald aan de hand van voltage van de lijnen en vermenigvuldigd met het percentage van de totale lengte hoogspanningslijnen. Zo is de gemiddelde compositie staal en aluminium in ton per kilometer berekend. Eenzelfde benadering is gebruikt voor de hoogspanningskabels. Alle ondergrondse hoogspanningskabels hebben een koperen geleider (P. Avadhoot, persoonlijke communicatie, 2019 25 Juli).

Voor hoogspanningsmasten zijn 3 typen onderscheiden in het werk van Harrison et al. (2010): masten voor kabels van 132 kV, 275-400 kV en 400 kV. De verhouding tussen deze masten is geschat aan de hand van verhoudingen 110, 150, 220 en 380 kV masten in Nederland (Netbeheer Nederland, n.d.). Dit komt neer op 63% 132 kV variant, 9% van de 275-400 kV variant en 28% van de 400 kV variant. Aan de hand van deze data kan de gemiddelde hoeveelheid beton en staal per hoogspanningsmast worden berekend.

Transformatiestations

Waarden voor onderstations (voor transformatie van hoogspanning naar middenspanning) zijn gebaseerd op het werk van Harrison et al. (2010) en ruimtelijke data van Tennet (ArcGIS, 2019). In Nederland zijn 288 onderstations van 110-150 kV en 450 van 220/380 kV. Aangenomen is dat de eerste overeenkomt met een 132 kV *air insulated* (AIS) onderstation, en de tweede overeenkomt met een 275/400 AIS onderstation.

De volgende onderdelen kunnen worden onderscheiden in een onderstation: stroomonderbrekers, "substation bays", basis civiele techniek en transformatoren. Op basis van de studie is aangenomen dat elk onderstation 7 stroomonderbrekers heeft, de 132 kV variant 6 en de 275-400 kV variant 15 "substation bays" hebben (dit is inclusief 2 extra om hulpmateriaal te vertegenwoordigen). Verder is aangenomen dat alle onderstations *air-insulated* zijn. Tenslotte is aangenomen dat elke transformator 500 MVA aan kracht heeft en 1 of 3 transformatoren heeft per onderstation voor respectievelijk de 132 kV en de 275-400 kV variant.

Op basis van het percentage per type onderstation (132kV of 400 kV) is vervolgens de gemiddelde materiaalcompositie per onderstation bepaald.

De materiaalcompositie van transformatiestations op midden of laagspanningsniveau zijn gebaseerd op materiaalcomposities in het werk van Jorge et al. (2012a). Daarbij is aangenomen dat distributieverdeelstations en transportverdeelstations (Enexis, n.d.) vergelijkbaar zijn met een 9,6 MVA transformator. Voor een klantstation en netstation is aangenomen dat deze vergelijkbaar zijn met een 315 kVA transformator. Overige onderdelen van het station (e.g., het gebouw) zijn niet meegenomen.

Midden- en laagspanningskabels

Waarden voor midden en laagspanning zijn gebaseerd op informatie die verkregen is via netbeheerders. 3 Netbeheerders, Enexis, Enduris en Stedin, waren bereid om samenstellingen van de door hen beheerde kabels te delen. De gemiddelde hoeveelheid materiaal is berekend voor laag en midden spanning, op basis van hun aandeel in het net. De waarden lagen redelijk dicht bij elkaar (e.g., tussen de 0,32 en 0,72 ton koper per kilometer laagspanningskabel). Verschillen in gemiddelde compositie is mogelijk door het gebruik van andere typen kabels.

3.3.4 Omvang componenten

Windturbines

Statistieken van het CBS Statline (2019) voor het geïnstalleerd vermogen van onshore en offshore windturbines zijn gebruikt in dit werk. Het vermogen was in 2018 voor onshore windturbines 3426 MW en voor offshore windturbines 957 MW.

Naast onshore en offshore is een onderscheid gemaakt tussen een *gearbox* en *direct drive* type. Exter et al. (2019) maken voor 2030 /2050 de volgende projecties in gebruik technologieën: 30% *offshore direct drive*, 70% *offshore gearbox*, 45% *onshore direct drive* 55% *onshore gearbox*. Viebahn et al. (2015) maken een inschatting voor de verdeling van soorten windenergie voor 2020 in Duitsland. Deze studie is beschouwd als betrouwbaarder omdat de inschatting dicht bij het huidige jaar ligt. Hierin is aangenomen dat alle *offshore* windturbines een *gearbox* hebben, en dat 43% van de onshore windturbines een *gearbox hebben*. Bosch & Van Rijn (2019) geven een overzicht van alle windturbines in Nederland met het merk erbij. Hieruit is, vergelijkbaar met het werk van Viebahn et al. (2015), afgeleid dat 100% van de offshore windturbines in Nederland een *gearbox* hebben, en dat 47% van de onshore windturbines een *gearbox* hebben. Deze waarden zijn gebruikt in dit werk.

Zonnepanelen

Het totaal geïnstalleerd vermogen van zonnepanelen in Nederland was in 2018 4400 MW (CBS, 2019). Echter zijn geen statistieken beschikbaar aangaande het type technologie. Viebahn et al. (2015) geven in hun projectie voor 2020 een 90 tot 98% *c-Si* en *mc-Si* aan en 2 tot 8% *CIGS* en 1 tot 3% *a-Si/μ-Si*. Vergelijkbaar is de studie van Moss et al. (2011), waarin geschat wordt dat 80% van de markt *c-Si* is, 10%

a-Si, en 5% *CIGS* en 5% *CdTe*. Gebaseerd op deze studies neem ik het volgende aan: 80% *c-Si*, 10% *a-Si*, 5% *CIGS* en 5% *CdTe*.

Biomassa- en afvalelektriciteitscentrales

Biomassa en afvalelektriciteitscentrales zijn samen genomen in deze studie. Het totaal aan geïnstalleerd vermogen voor elektriciteitsproductie van afvalelektriciteitscentrales in Nederland is 643 MW (Rijkswaterstaat, 2018). Het totaal geïnstalleerd vermogen aan biomassacentrales is 286,2 MW (Wise, 2019). Het totaal wordt dan 929,2 MW.

Kolencentrales

Het totale vermogen aan kolencentrales in Nederland (inclusief centrales buiten werking) was in 2017 7381 MW (Greenpeace, 2017). Deze waarden zijn gebruikt in deze studie.

Gasgestookte elektriciteitscentrales

Tennet (2018) rapporteert een totaal geïnstalleerd vermogen (inclusief buitenwerking gesteld vermogen) van 19 GW voor 2018.

Kerncentrales

In Nederland is een kerncentrale actief: Kerncentrale Borssele. De centrale heeft een vermogen van 485 MW (Wise Nederland, n.d.).

Waterkrachtcentrales

Het geïnstalleerd vermogen aan waterkrachtcentrales is verkregen via Milieucentraal (n.d.): 37 MW.

Transmissie- en distributienetwerk

De lengte van de kabels voor het MS en LS net kunnen op twee manieren verkregen worden: Via statistieken (Netbeheer Nederland, n.d.) of via beschikbare gegevens van netbeheerders in de vorm van ruimtelijke (GIS) data (e.g., Enexis, n.d.). Aangezien ruimtelijke data niet beschikbaar voor heel Nederland, is gebruik gemaakt van de statistieken van Netbeheer Nederland (n.d.). De waarden voor lengtes kabels van netbeheerders die wel ruimtelijke data beschikbaar hadden zijn vergeleken met de data van Netbeheer Nederland en kwamen voldoende overeen.

Voor het kwantificeren van componenten in het hoogspanningsnet is gebruikt gemaakt van openbare ruimtelijke data van Tennet via ArcGIS (2019). Dit is de meest recente beschikbare informatie voor zowel hoogspanningskabels, hoogspanningsleidingen, masten en onderstations.

Het aantal transformatiestations op midden en laagspanningsniveau is gebaseerd op ruimtelijke data van Enexis (Enexis, n.d.). Op basis van het aantal netklanten en percentage van het totale aantal netklanten (Netbeheer Nederland, n.d.) is vervolgens het totaal aantal transformatorstations berekend.

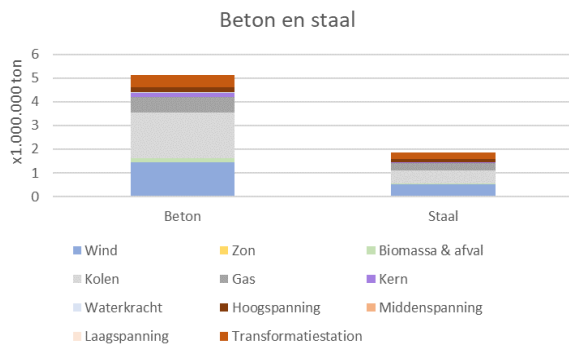
3.3.5 Materiaalvoorraden in het Nederlandse elektriciteitssysteem

De materiaalintensiteiten (in ton/MW, ton/component of ton/kilometer) zijn vermenigvuldigd met de aanwezige hoeveelheid van het betreffende component (in MW, aantal componenten of aantal kilometers). De totalen zijn, gerangschikt van hoog naar laag, gepresenteerd in Tabel 3.3. Deze zijn ook weergegeven in de Figuren 3.8, 3.9, 3.10 en 3.11, gerangschikt op basis van omvang.

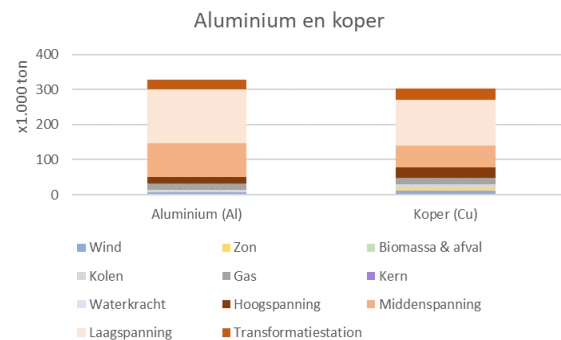
De materialen beton en staal vormen de grootste bulk van de materialen: 5,1 en 1,9 miljoen ton respectievelijk. Figuur 3.8 geeft aan hoe de hoeveelheden zich verhouden per component. Het grootste aandeel beton bevindt zich in kolencentrales (37%), gascentrales (13%) en in windturbines (28%, grotendeels in onshore windturbines). Verder kan in onderstations 10% en in hoogspanningsmasten 4% van de betonvoorraad in het elektriciteitssysteem worden gevonden. Deze cijfers zijn vergelijkbaar voor de hoeveelheden staal.

De voorraden aluminium en koper hebben een vergelijkbare grootte: 0,3 miljoen ton. De grootste hoeveelheid aluminium (90%) bevindt zich in hoogspanningslijnen. Ook koper is grotendeels te vinden in midden- en laagspanningskabels (78%) (Figuur 3.9).

Figuur 3.8 Beton en staal in het NL elektriciteitssysteem



Figuur 3.9 Aluminium en koper in het NL elektriciteitssysteem

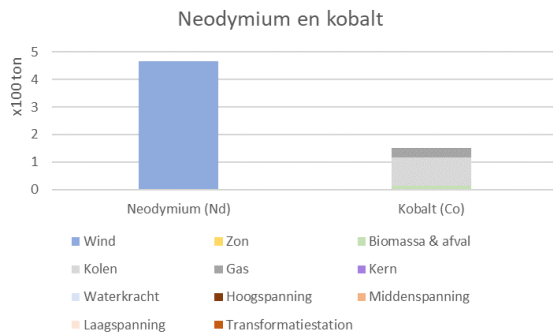


De materialen neodymium, dysprosium, praseodymium en terbium zijn in de beschikbare data uitsluitend in windturbines gevonden. De totale hoeveelheid van deze materialen is 450, 45, 75 en 15 ton respectievelijk (Figuur 3.10 en 3.11).

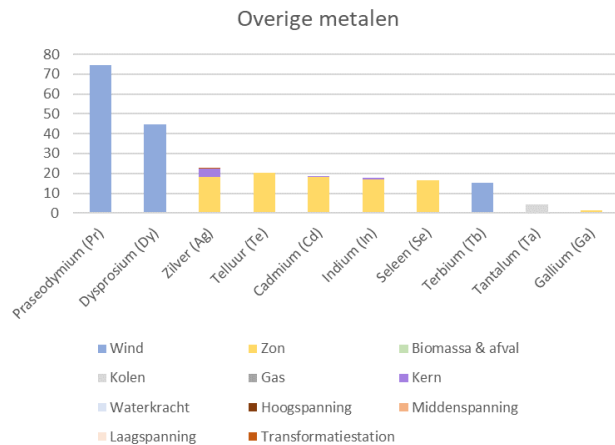
Telluur, seleen, en gallium vormen relatief kleine hoeveelheden materiaal (20, 16 en 1 ton respectievelijk) en zijn uitsluitend in zonnepanelen te vinden. Daarnaast is het overgrote deel cadmium en indium (99% en 96%) ook te vinden in de zonnecellen, met totalen van 19 ton en 18 ton respectievelijk. De overige hoeveelheden kunnen gevonden worden in de kerncentrale (een in dit geval, Borssele) (Figuur 3.11). Zilver vormt een totaal van 22 ton, waarvan 81% zich bevindt in zonnecellen en 18% in de kerncentrale (Figuur 3.11).

Kobalt vormt 150 ton, tantalium slechts 4 ton. 69% van het kobalt en 89% van het tantalium bevindt zich in kolencentrales en 23 van het kobalt bevindt zich in gasgestookte elektriciteitscentrales. 9% van het kobalt en 11% van het tantalium bevindt zich in biomassacentrales (Figuur 3.10 en 3.11).

Figuur 3.10 Neodymium en kobalt in het Nederlandse elektriciteitssysteem



Figuur 3.11 Overige metalen in het Nederlandse elektriciteitssysteem



Tabel 3.3 Totalen materialen in het Nederlandse elektriciteitssysteem, met aandeel per technologie

	Hoeveelheid (ton)	Wind	Zon	Biomassa & afval	Kolen	Gas	Kern	Waterkracht	Hoogspanning	Midden-spanning	Laagspanning	Transformatie-station
Beton	5.127.414,46	0,28	0,00	0,04	0,37	0,13	0,03	0,00	0,04	0,00	0,00	0,10
Staal	1.858.189,53	0,28	0,00	0,02	0,31	0,16	0,02	0,00	0,08	0,00	0,00	0,15
Aluminium (Al)	328.846,62	0,02	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,00	0,06	0,29	0,47	0,09
Koper (Cu)	301.654,45	0,04	0,03	0,00	0,04	0,06	0,00	0,00	0,10	0,20	0,43	0,10
Neodymium (Nd)	466,63	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kobalt (Co)	150,21	0,00	0,00	0,09	0,69	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Praseodymium (Pr)	74,62	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dysprosium (Dy)	44,49	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zilver (Ag)	22,45	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Telluur (Te)	20,22	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cadmium (Cd)	18,58	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Indium (In)	17,86	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Seleen (Se)	16,33	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Terbium (Tb)	15,44	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tantalum (Ta)	4,24	0,00	0,00	0,11	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gallium (Ga)	1,27	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

3.3.6 Tijdsdimensie

Ten eerste wordt geïnventariseerd welke data beschikbaar is voor het doen van een MFA voor het Nederlandse elektriciteitssysteem. Hiertoe worden de levensverwachting en de ontwikkeling van voorraden in het verleden bestudeerd.

Vervolgens wordt ter illustratie een eerste berekening gemaakt van de ontwikkeling van voorraden, instromen en uitstromen van één van de componenten in het elektriciteitssysteem: windturbines. Aan de hand van tijdreeksen van de omvang van de voorraden in het verleden en een bijbehorende

levensduur, plus het verwachte toekomstig aandeel van windenergie in de elektriciteitsmix, zijn projecties gemaakt voor de omvang van voorraden en van in- en uitstromen in de toekomst. De levensduur is gebaseerd op literatuur. Er wordt een constante materiaalcompositie en levensduur aangenomen voor de componenten over de periode. In werkelijkheid variëren de materiaalcompositie en levensduur over de jaren door technologische ontwikkelingen; dit gaat echter het doel van deze voorbeelduitwerking te boven.

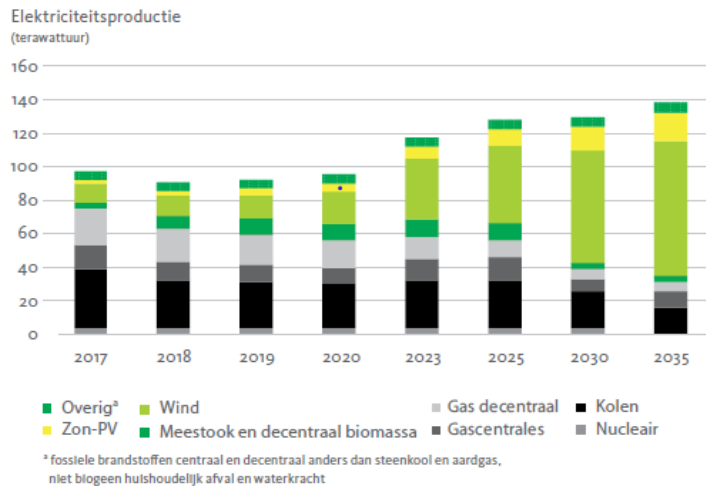
Om de dynamiek van de stedelijke mijn te bepalen worden eerst de ontwikkelingen van de voorraden in het verleden bepaald. Vervolgens wordt aan de hand van projecties de omvang van de voorraad voor de periode van 2020 tot 2050 geschat. Aan de hand van de omvang van de voorraden voor elk jaar tussen 1990 en 2050 wordt de instroom aan materialen berekend als het verschil in de omvang van de voorraad tussen twee opeenvolgende jaren plus de uitstroom in het betreffende jaar (uitbreiding + vervanging). In het eerste jaar wordt daarbij een instroom met een grootte van de voorraad aangenomen. De uitstroom is gelijk gesteld aan de instroom, met een vertraging die gelijk is aan de levensduur van het product.

Voor elk van de componenten is literatuur te vinden voor de verwachte levensduur. Deze variëren voor de verschillende componenten maar zijn over het algemeen tussen de 20 en 40 jaar. Dit betekent de periode tussen instroom en uitstroom van een component over het algemeen vrij lang is. De huidige groei van bijvoorbeeld windturbines en zonnepanelen resulteert dus in eenzelfde groei in de uitstroom, met een vertraging van ongeveer 20 jaar, de levensduur van het product.

Voor de ontwikkeling van het elektriciteitssysteem vormt het CBS een belangrijke bron voor het verleden, en rapportages van ECN (2017), CPB/PBL (2016), Tennet (2019) en het Klimaatakkoord (2019) bronnen voor ontwikkelingen van de elektriciteitsmix in de toekomst. Data voor de ontwikkeling van de infrastructuur voor transport en distributie van elektriciteit zijn lastiger te vinden. Om een beter beeld te krijgen van de ontwikkeling hiervan biedt het benaderen van netbeheerders een ingang. Per technologie is hieronder toegelicht welke data beschikbaar is en wat dit impliceert.

De komende decennia wordt een afname van de conventionele elektriciteitsproductie verwacht (ECN, 2017) (Figuur 3.12).

Figuur 3.12 Ontwikkeling opgesteld vermogen in Nederland, 2017-2035 (ECN, 2017)



Reeds is begonnen aan de ontmanteling van 5 kolencentrales (2015-2017) (Wise Nederland, 2019). Daarbij kunnen materialen als beton, staal, aluminium, koper, tantalium en kobalt worden gemijnd. Recent (2015-2016) zijn nog drie nieuwe kolencentrales geopend. De overige twee centrales zijn in de jaren 90 in werking getreden. Gezien een levensduur van gemiddeld 30 jaar en de doelstellingen aangaande het klimaatakkoord kan in de komende 3 decennia een volgende uitstroom van materialen uit kolencentrales worden verwacht. Het CPB/PBL (2016) geeft een indicatie van een vermindering van 25% elektriciteitsproductie uit kolen in 2013 tot 5% in 2050, en wenselijk een complete uitfasering van het gebruik van kolen.

In 2013 werd besloten dat kerncentrale Borssele tot 2033 open zou blijven (Wise Nederland, n.d.). Uit een rapportage van het CPB/PBL (2016) blijkt dat het geïnstalleerd vermogen aan kernenergie waarschijnlijk onveranderd blijft tot 2050. Wanneer de centrale wordt afgeschreven komt bij de ontmanteling naast staal en beton hierbij ook een reeks aan kritische metalen beschikbaar.

De geïnstalleerde capaciteit biomassa neemt in rapportages van Tennet (2018) en ECN (2017) weinig toe tot 2030. De capaciteit voor afvalverbranding neemt in de rapportage van Tennet (2018) wel toe met 100 MW. In het Klimaatakkoord (2019) wordt aangegeven dat geïnvesteerd gaat worden in de groei duurzame biomassa, en wordt omschreven als “transitiebrandstof”. Wanneer gekeken wordt naar de gerapporteerde leeftijdscategorieën in Tabel 3.4 en uitgaan van een levensverwachting van 30 jaar (Elshkaki & Graedel, 2013), kan in de komende decennia een uitstroom van afvalcentrales worden verwacht. Hierbij komen onder andere beton, staal, tantalium en kobalt beschikbaar voor secundaire productie.

Ook de hoeveelheid gasgestookte elektriciteitscentrales zal afnemen in de toekomst. Tennet (2018) voorspelt een daling in geïnstalleerd vermogen van 19 GW in 2018 naar 14 GW in 2033, en CPB/PBL (2016) een afname van 55% elektriciteitsproductie met gas in 2013 naar 10% tot 20% in 2050. Tabel 3.4 laat zien dat de laatste 10 jaar nog substantiële hoeveelheden aan nieuw vermogen zijn geïnstalleerd. Gezien de verwachte levensduur van 30 jaar en de doelstellingen van het kabinet kan in de komende decennia een uitstroom van deze componenten verwacht worden. Materialen zijn hierbij vergelijkbaar als in kolencentrales.

Tabel 3.4 Leeftijdsofbouw productievermogen (Tennet, 2018)

[GW]	0<L≤5	5<L≤10	10<L≤15	15<L≤20	20<L≤25	25<L≤30	30<L≤35	35<L≤40	40<L≤45	45<L≤50	L>50	TOTAAL
uranium	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5
kolen	3,4	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6
gas	2,4	5,9	1,2	1,3	3,6	0,3	1,0	0,3	0,4	0,3	0,1	16,7
afval	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,9
TOTAAL	5,9	6,2	1,3	1,3	5,0	0,4	1,0	0,3	0,8	0,4	0,1	22,7

De groei van windturbines in Nederland is sterk; het geïnstalleerde vermogen aan windturbines was in 2018 drie keer groter dan in 2004 (CBS Statline, 2019) en in het klimaatakkoord wordt een vertienvoudiging van het huidige geïnstalleerde vermogen gepresenteerd voor 2050 (Klimaatakkoord, 2019). Tussen de in- en uitstroom van windturbines zit typisch 20 jaar (Bonou et al., 2016; Viebahn et al., 2015). De groei resulteert in een grotere vraag naar materialen. Welke materialen dat precies zijn ligt aan de ontwikkeling van de technologieën (*onshore* versus *offshore* en *direct drive* versus *gearbox*). Met name het aandeel *offshore* windturbines zal sterk groeien (CPB/PBL, 2016; ECN, 2017; Rijksoverheid, 2019). Dit resulteert in een grotere vraag naar staal, aluminium en koper en een lagere vraag naar beton in vergelijking met windturbines op land. Daarnaast zou de inzet van meer *direct drive* typen resulteren in een groei naar de vraag neodymium, dysprosium, terbium en praseodymium ten opzichte van het *gearbox* type.

In 2033 verwacht Tennet (2018) een verzesvoudiging van het geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen ten opzichte van 2018. In het Klimaatakkoord (2019) wordt zelfs gestreefd naar een geïnstalleerd vermogen van 48 GW in 2050, ten opzichte van 2 GW in 2017. De geïnstalleerde capaciteit aan zonnepanelen neemt sinds 2012 sterk toe (CBS Statline, 2019). Echter, gezien de huidige mix van zonnepanelen voor het overgrote deel uit het siliconen c-Si type bestaat, zullen de komende decennia nog niet veel relevante materialen beschikbaar komen voor secundaire productie. Hoe het beschikbaar komen van materialen zich ontwikkelt in de toekomst is afhankelijk van de technologie- en marktontwikkelingen. In het onderzoek van Viebahn et al. (2015) naar de ontwikkeling van technologieën voor elektriciteit uit zonnecellen en windturbines in Duitsland, wordt een scenario gepresenteerd waarin CIGS en a-Si technologieën geleidelijk toenemen tot ongeveer 30% en 10% respectievelijk in 2050. CIGS en a-Si technologieën zijn vooral geschikt wanneer ruimtebeperking geen rol speelt, bijvoorbeeld voor zonneparken of grote daken. Gezien de groei van zonneparken in Nederland (ROM3D, 2019) lijkt dit een aannemelijk scenario. Een dergelijke ontwikkeling zou de vraag naar en het beschikbaar komen van, op langere termijn, indium, selenium, tellurium en gallium betekenen. Net als voor windturbines voorzien Viebahn et al. (2015) in de toekomst een lagere vraag naar kritische metalen in *thin film* technologieën (a-Si, CIGS) per geïnstalleerd MW, door een afnemende dikte van de absorberende laag.

Ten slotte zal het elektriciteitsnet sterk moeten uitbreiden om de groei aan elektriciteit uit wind en zon te kunnen transporteren. Dit betekent een groei in de vraag naar koper en aluminium. Echter wordt steeds vaker gekozen voor aluminium als geleider in plaats van koper. Alhoewel koper een betere geleider is, heeft aluminium vaak de voorkeur omdat dit materiaal goedkoper is (F. Middel, persoonlijke

communicatie, 7 Juni 2019). Gezien een levensverwachting van ruim 40 jaar kan verwacht worden dat de komende decennia nog vrij veel koper beschikbaar zal komen. Echter zal het aandeel aluminium toenemen.

Voorbeeld: ontwikkeling voorraden en stromen van materialen in windturbines

De waarden voor geïnstalleerd vermogen aan windturbines in de periode van 1990 tot en met 2018 zijn bepaald aan de hand van statistieken van het CBS Statline (2019). In deze data is een onderscheid gemaakt worden tussen windturbines op land en windturbines op zee. Het geïnstalleerd vermogen tot en met 2025 is bepaald aan de hand van waarden in een rapportage van Tennet aangaande de ontwikkeling van het elektriciteitssysteem (2018). Voor de jaren tussen deze periode wordt een lineaire groei van het geïnstalleerde vermogen aangenomen. Het geïnstalleerde vermogen voor 2030 en 2050 is gebaseerd op doelstellingen geformuleerd in het Klimaatakkoord (2019). Bij gebrek aan meer datapunten is ook tussen deze jaren een lineaire groei van het geïnstalleerde vermogen aangenomen.

De verhouding windturbines op land en op zee konden ook verkregen worden uit de hierboven vermelde bronnen. De verhouding tussen een *gearbox* en een *direct drive* aandrijving zijn gebaseerd op scenario's in het werk van Viebahn et al. (2015) en Exter et al. (2019). In de eerste zijn scenario's ontwikkeld voor de ontwikkeling van windturbine technologieën in Duitsland. De tweede gebruikt het werk van Viebahn et al. (2015) en Moss et al. (2011) voor een projectie van de ontwikkeling van deze technologieën in Nederland.

Tussen 1990-1995 is aangenomen dat er geen *direct drive* aandrijving wordt gebruikt. Dit is gebaseerd op cijfers van Windstats (2019), waarin staat dat het grootste aandeel windmolens in die periode van het merk *Lagerwey* is. Op de website van *Lagerwey* (n.d.) is gevonden dat tot 1995 alleen *gearbox* aandrijvingen werden geproduceerd. Vanaf 1995 is een toename van 5% per jaar voor windturbines op land aangenomen, tot het geïnstalleerde vermogen *direct drive* en *gearbox* (in 2005) gelijk is. Aangenomen is dat de verhouding gelijk blijft tot 2050. Daarnaast heeft 100% van de offshore heeft een *gearbox* tot 2018 (Windstats, n.d.; Viebahn et al., 2015).

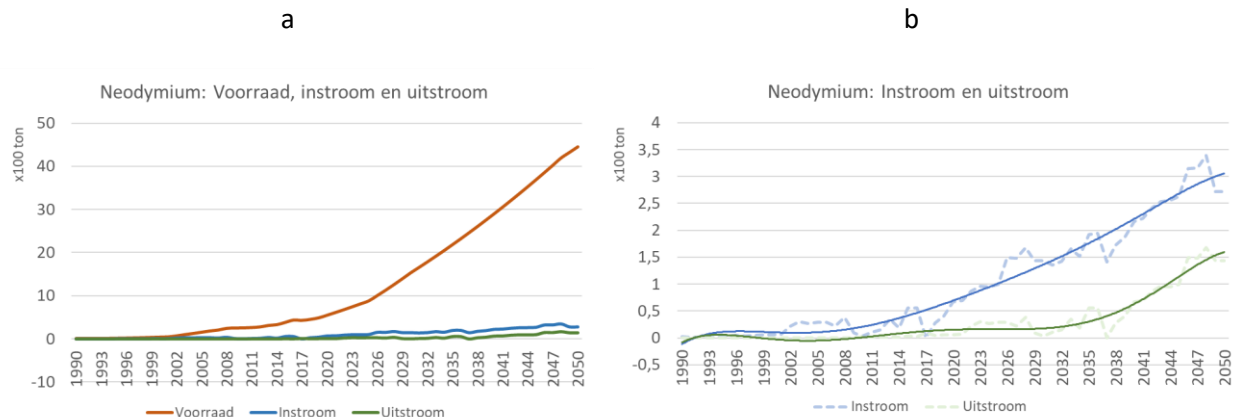
De aannames vanaf 2018 zijn gebaseerd op het "*upscaling*" scenario voor windturbines zoals geformuleerd door Viebahn et al. (2015). Deze neemt, in overeenstemming met ontwikkelingen in Nederland (CLO, 2018), een voortgaande groei van de afmetingen van windgeneratoren aan. Vooral op zee groeit de omvang van windturbines. Als consequentie daarvan neemt het gebruik van permanente magneten in *offshore* turbines toe. Voor windturbines op land wordt aangenomen dat 50% een *direct drive* heeft. In offshore neemt het aandeel van de *direct drive* geleidelijk toe tot 30%. Dit is in overeenstemming met het werk van Exter et al. (2019). Vanaf 2018 is een jaarlijkse toename van het geïnstalleerde vermogen van *offshore direct drive* windturbines aangenomen van 1%.

Voor de materialen in windturbines is berekend hoe de voorraad, instroom en uitstroom in Nederland zich ontwikkelen van 1990 tot 2050. Ter illustratie is hier neodymium besproken (Figuur 3.13). De grafieken van het totaal geïnstalleerde vermogen en van de andere materialen zien er vergelijkbaar uit, maar hebben andere waarden. Deze zijn te vinden in Appendix 3. De verschillen voor de verschillende materialen kunnen worden verklaard door veranderingen in het aandeel *onshore* en *offshore*

windturbines en het aandeel *direct drive* en *gearbox* aandrijvingen. Door de groei van offshore windturbines kan een groeiende vraag naar staal worden verwacht. De introductie van steeds meer permanente magneten, in *direct drive* windturbines, zorgt daarnaast voor een groei van de vraag naar neodymium, dysprosium, praseodymium en terbium.

Figuur 3.13 (links) laat zien dat de voorraad neodymium toeneemt tot 2050, met een sterke groei vanaf 2018. Wanneer alleen gekeken wordt naar de in- en uitstroom (Figuur 3.13, rechts) is te zien dat ook deze flink toenemen, waarbij de instroom vanaf ongeveer 2010 en de uitstroom vanaf 2035 sterkt groeit. De pieken en dalen in de exacte datapunten kunnen worden verklaard door historische fluctuaties in de groei van de voorraad. De toename van de instroom in 2020 en 2026 en de afname in 2030 (en de herhaling hiervan 20 jaar later) is te verklaren door de aangenomen lineaire groei in totaal geïnstalleerd vermogen tussen deze perioden. Tussen 2020 en 2025 resulteert dit in een toename van 883 MW per jaar, tussen 2025 en 2030 is dat 1780 MW per jaar, en van 2030 tot 2050 is dat 1305 MW per jaar. In 2009 en 2010 was er een relatief kleine toename in het geïnstalleerd vermogen. Dit verklaart het dal in de instroom 2009 en 2010. De lage instroom heeft invloed op de instroom en uitstroom 20 en 40 jaar later (2029, 2030, 2049 en 2050). In 2017 is er een afname van totaal geïnstalleerd vermogen ten opzichte van 2016, terwijl er in 2015 juist 912 MW aan vermogen bijkwam. Vandaar de piek en het dal in deze jaren. 20 jaar later, in 2035 en 2037, is eenzelfde piek en dal te zien in de instroom en uitstroom.

Figuur 3.13 Ontwikkeling voorraad (a), instroom en uitstroom (a, b) van neodymium in windturbines



3.3.7 Ruimtelijke dimensie

Ten eerste is een inventarisatie gemaakt van beschikbare ruimtelijke data voor de componenten in het elektriciteitssysteem, weergegeven in Tabel 3.5. Een groene markering geeft aan dat er complete en recente data beschikbaar is voor de locatie en het soort component. Een gele markering geeft aan dat de data wel beschikbaar is, maar incompleet is, mogelijk gedateerd is, of gedetailleerde informatie over het type component ontbreekt. Een rode markering geeft aan dat de data niet beschikbaar is. De enige ruimtelijke databron die aan alle criteria voldoet betreft data voor het hoogspanningsnet (ArcGIS, 2019), deze data is ook gebruikt in de voorradeninventarisatie. De data is recent (uit 2019) compleet en

gedetailleerd (specifiek voor type technologie). Echter is deze data niet beschikbaar voor voorgaande jaren.

In Nederland bevinden zich 5 kolencentrales en 20 gascentrales (inclusief geconserveerde centrales), verspreid over het land. Naast kolen- en gascentrales staan in Nederland bij benadering 16 afvalverbrandingscentrales, 13 *standalone* biomassacentrales (hier alleen meegenomen met een vermogen hoger dan 10 MW) en 1 kerncentrale. Open Streetmaps biedt hier ruimtelijke data voor aan, echter is deze niet compleet en niet gedateerd.

Tabel 3.5 Beschikbaarheid ruimtelijke data van componenten in het Nederlandse elektriciteitssysteem

Categorie	Bron	Content & betrouwbaarheid (rood = incompleet, geel = medium, groen = compleet)	Beschikbaarheid data voorgaande jaren	Jaar	Notities	Link
Windturbines	BRT TOP10NL (windmolens)	Windturbines en windmolens	Beschikbaar voor een aantal voorgaande jaren (tot 2012)	2019	Geen informatie over type turbine, onshore/offshore, geïnstalleerd vermogen, wel informatie over begindatum en in/uit gebruik	http://esrin-content.maps.arcgis.com/home/group.html?id=ac1c21974f2b4544891040c8820105ac#overview
Zonnepanelen	CBS	Opgesteld vermogen en aantal installaties van zonnepanelen bij woningen, per buurt, wijk, gemeente of provincie,	Beschikbaar voor een aantal voorgaande jaren (tot 2016)	2018	Alleen van installaties bij huizen, niet voor zonnepaneel parken	https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/84517NED/table?ts=1565072031597
Verschillende technologieën voor elektriciteitsproductie	openstreetmaps	Presenteren componenten voor elektriciteitsproductie: windturbines, gas, kolen, nucleair, zonnepanelen, hydro	alleen laatste versie beschikbaar		Incompleet, bronnen en accuraatheid van data ? onzeker	http://osm2shp.ru/
Midden en laagspanning	Stedin	LS verbindingen en MS stations		2017		https://www.stedin.net/zakelijk/open-data/liggingsdata-kabels-en-leidingen
	Enexis	LS en MS verbindingen, technisch gebouw, aansluitkast, OV aansluiting,	alleen laatste versie beschikbaar	2019	Volledige, recente dataset, met informatie over voltage	https://www.enexis.nl/over-ons/wat-bieden-we/andere-diensten/open-data
	Liander	LS en MS verbindingen, technisch gebouw, aansluitkast, OV aansluiting,	alleen laatste versie beschikbaar		? Type kabel gegeven	https://www.liander.nl/partners/datadiensten/open-data/data
	Enduris	<i>niet beschikbaar</i>		x	x	x
	Westland infra	<i>niet beschikbaar</i>		x	x	x
	Endinet groep	<i>niet beschikbaar</i>		x	x	x
	Rendo netwerken	<i>niet beschikbaar</i>		x	x	x
	Cogas	<i>niet beschikbaar</i>		x	x	x
Hoogspanning	Tennet Assets (Hoogspanning)	Kabels, lijnen, masten & onderstations	alleen laatste versie beschikbaar	2019	Volledige, recente dataset, met informatie over voltage	http://www.arcgis.com/home/item.html?id=6466dec22bf485587bc4daf98da1306
	Openstreetmaps	Presenteren componenten voor transformatie, transport, distributie	alleen laatste versie beschikbaar		Incompleet, bronnen en accuraatheid van data ? onzeker	http://osm2shp.ru/

De dichtheid van windturbines in Nederland varieert; zo staan in Flevoland 669 turbines, terwijl Utrecht en Zuid-Holland er in totaal 252 staan (Windstats, n.d.). Daarnaast staat een deel van de windturbines op zee, 289 turbines in totaal (957 MW). Op land zijn dat er in totaal 2027. Veel windmolens staan geclusterd in parken. Dit maakt het “mijnen” van deze materialen aantrekkelijker, gezien de turbines dicht bij elkaar staan en waarschijnlijk rond dezelfde tijd worden verwijderd. In de ruimtelijke data van

TOP10NL zijn windturbines gerapporteerd, echter is hierbij geen informatie over het type technologie beschikbaar

Naast windparken groeit ook het aandeel zonneparken (Zonopkaart, n.d.). Gezien de hoge concentratie van producten in een dergelijk park en waarschijnlijk eenzelfde levensduur komen deze waarschijnlijk gelijk beschikbaar voor secundaire productie. Naast de parken bevindt een groot deel van de zonnepanelen zich op woningen en andere gebouwen. Het geïnstalleerde vermogen aan zonnepanelen op woningen kan op buurtniveau worden weergegeven met CVS data van CBS Statline (2019b). Echter omvat deze data geen overige zonnepanelen.

Naast technologieën voor elektriciteitsproductie vormt ook het netwerk voor transport en distributie van elektriciteit een belangrijke bron voor secundaire productie, vooral voor koper en aluminium. Echter is de materiaaldichtheid op ruimtelijke schaal laag omdat de kabels een aanzienlijk netwerk vormen, verspreid over het land. Naast de kabels kunnen ook substantiële hoeveelheden beton, koper en aluminium in onderstations en trafostations worden gevonden. Deze componenten hebben een hogere dichtheid aan materialen dan kabels en vormen daarom een interessante bron voor secundaire productie. Vooral in de transformatoren bevinden zich relevante hoeveelheden staal en koper. Voor het hoogspanningsnet is recente en technologie specifieke ruimtelijke data beschikbaar via ArcGIS (2019). Voor het midden- en laagspanningsnet is de beschikbaarheid afhankelijk van de netbeheerder.

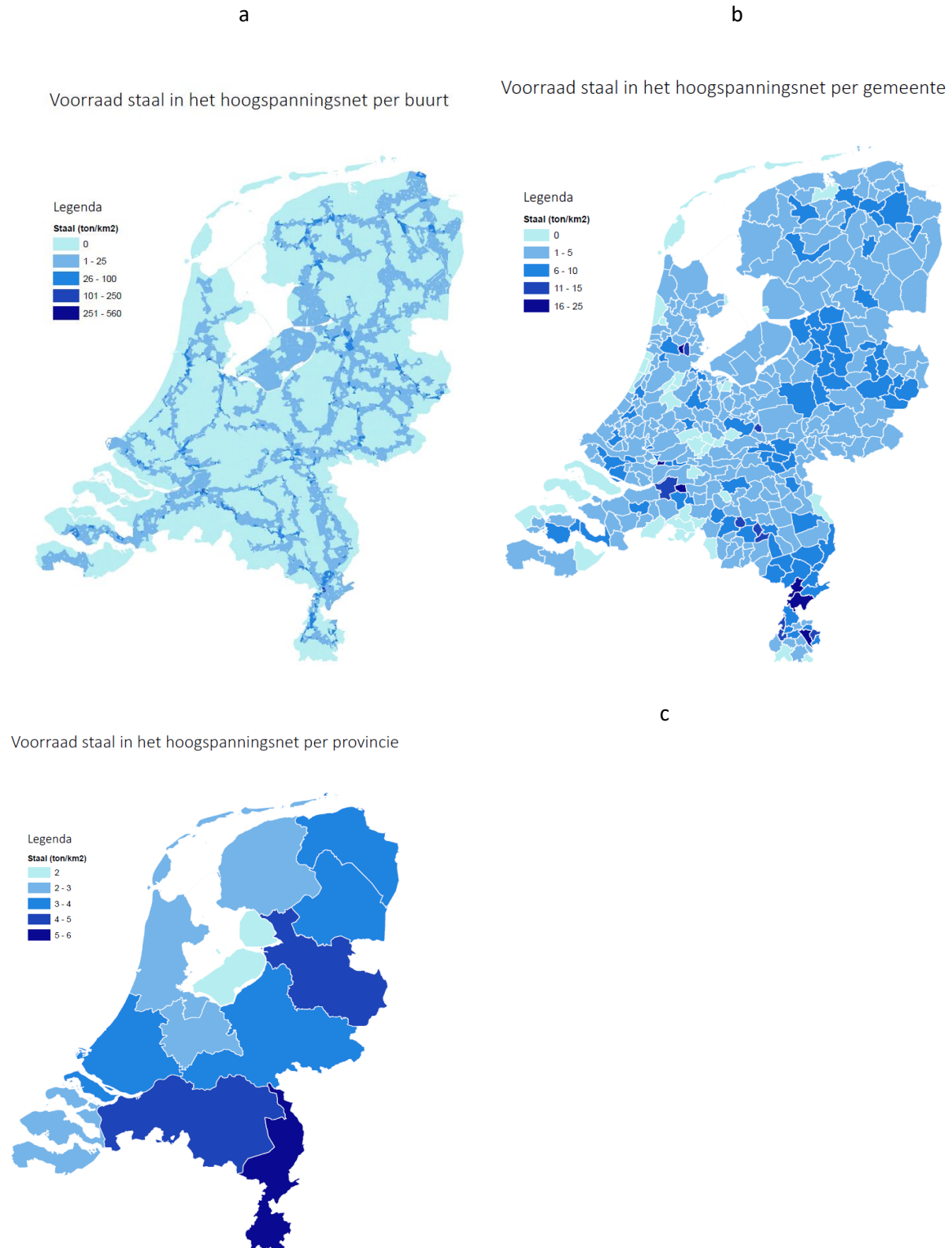
Omdat de meeste componenten in het elektriciteitssysteem “in zicht” zijn, kan worden verwacht dat de *end-of-life* componenten volledig worden verwijderd en een afvalverwerkingsstroom ingaan. Een uitzondering hierbij zijn elektriciteitskabels. De toegankelijkheid van deze componenten is beperkt door de ligging onder de grond. Bij het aanleggen van nieuwe kabels blijft de oude kabel over het algemeen liggen. Om overlast op lange duur te voorkomen wordt niet meteen de oude kabel verwijderd. Achteraf opnieuw de kabel opgraven is ook niet rendabel (P. Soepboer, Enexis, persoonlijke communicatie, 6 Juni 2019). Het moment waarop de kabels worden verwijderd hangt dus af van het moment dat de kabel weer toegankelijk is (bij het openbreken van de straat).

Voorbeeld: Ruimtelijke spreiding staal in het hoogspanningsnet op verschillende schaalniveaus

Ter illustratie zijn hier voorraden materialen in het hoogspanningsnet geanalyseerd, omdat deze data relatief compleet en betrouwbaar is. De meegenomen componenten omvatten hier hoogspanningslijnen, kabels, masten en onderstations. De materiaalcomposities die in deze studie geanalyseerd zijn in deze componenten omvatten beton, staal, aluminium en koper. Voor elk component wordt de gemiddelde materiaalcompositie gebruikt, en dus geen onderscheid gemaakt tussen verschillende typen kabels, masten en onderstations. De materiaalcompositie is eerst berekend op buurtniveau, door de totale lengte aan kabels en lijnen en het totaal aantal masten en onderstations per buurt te vermenigvuldigen met de betreffende materiaalcompositie. Vervolgens zijn de dichtheden geaggregeerd naar gemeente- en provincieniveau. De complete proces flow gebruikt in GIS is te vinden in Appendix 2.

Op de kaarten in Figuur 3.14 is de dichtheid van staal in het hoogspanningsnet weergegeven op verschillende ruimtelijke niveaus. Gekozen is voor staal omdat dit materiaal zich zowel in de hoogspanningslijnen, masten en onderstations bevindt. De figuren laten de materiaalintensiteiten in ton per vierkante kilometer zien op buurt-, gemeente- en provincieniveau. Op buurtniveau is duidelijk te zien dat de dichtheid van staal grotendeels wordt bepaald door de ligging van de hoogspanningslijnen.

Figuur 3.14 Dichtheid van staal in het hoogspanningsnet per buurt (a), gemeente (b) en provincie (c)

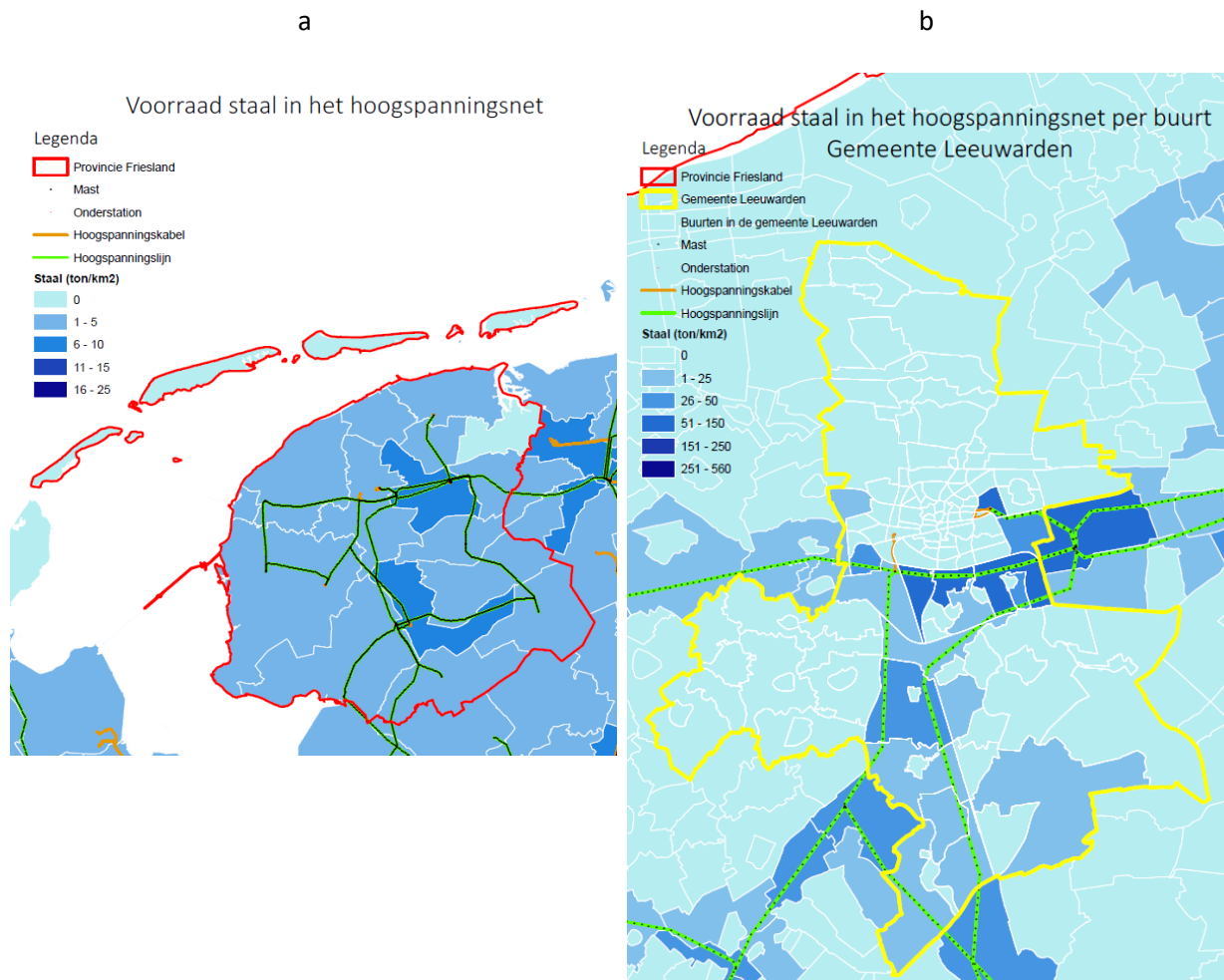


Waarden per buurt variëren van 0 tot 560 ton staal per vierkante kilometer. Wanneer de dichtheid wordt geaggregeerd naar gemeente en provincieniveau nemen de waarden af. Per provincie ligt de gemiddelde dichtheid tussen de 2 en 6 ton staal per vierkante kilometer.

Figuur 3.15 laat een close-up zien van een willekeurige provincie (a) en gemeente (b). Op de kaarten zijn ook de componenten weergegeven.

Deze kaart kan worden uitgebreid naar een breder scala aan componenten en materialen, mits hier ruimtelijke data voor beschikbaar is.

Figuur 3.15 Dichtheid van staal in een willekeurige provincie per gemeente (a), en in een willekeurige gemeente per buurt (b)



3.4 Discussie

3.4.1 Methode

Vorraden

Voor het inventariseren van de omvang van componenten in het elektriciteitssysteem is in deze studie gebruik gemaakt van beschikbare statistieken en ruimtelijke databronnen. Door deze te combineren met materiaalintensiteiten, gebaseerd op literatuur, kon een goede inschatting gemaakt worden van de materiele basis van het elektriciteitssysteem. Excel was een geschikte tool voor deze fase van het onderzoek. Idealiter wordt zoveel mogelijk gewerkt met ruimtelijke data, zodat voorraden op verschillende schaalniveaus kunnen worden geïnventariseerd. Om te kunnen rekenen met grote hoeveelheden (ruimtelijke) data is naast Excel een programmeertaal (bijvoorbeeld Python) nodig om de data relatief snel en makkelijk te kunnen verwerken en bewerken. Daarnaast is een complexer model nodig om ook veranderingen in de materiaalsamenstelling, de levensduur en eventueel andere variabelen te kunnen doorrekenen.

De methode die hier toegepast is voor het elektriciteitssysteem kan ook gebruikt worden voor andere voorraden, bijvoorbeeld de bouwsector, elektronica en voertuigen. De integratie van een ruimtelijke component is ook bij deze voorraden wenselijk, al zal dit lastiger zijn voor niet stationaire objecten zoals elektronica en transport. Toch kan voor deze objecten vaak een locatie worden toegekend, bijvoorbeeld door auto's per huishoudens te specificeren. Op deze manier kan de totale stedelijke mijn letterlijk in kaart worden gebracht.

In dit werk is gefocust op materialen die van waarde zijn in het elektriciteitssysteem, maar het scala aan materialen kan uitgebreid worden naar meer relevante materialen wanneer aanwezig in andere voorraden. Daarnaast kan de inclusie van niet-elektrische energievoorzieningen (e.g., gasleidingen) een goede aanvulling zijn, om zo een compleet beeld te krijgen van het Nederlandse energiesysteem.

Hier is de data gerapporteerd op basis van type technologie of functie in het transport van elektriciteit (e.g., kabels en masten) per materiaal (beton of staal) of element (e.g., neodymium). Voor een eerste inventarisatie van de voorraad is dit voldoende. Echter, om secundaire productie te bevorderen, is ook inzicht nodig in de samenstelling van elementen in materialen (e.g., aluminiumlegeringen) en de materiaalcompositie op onderdeelniveau. Dit zou een interessante vervolgstudie kunnen zijn.

Ten slotte moet de categorisering van de verschillende voorraden goed op elkaar worden afgestemd. Het elektriciteitssysteem is nu gespecificeerd als alle componenten van productie tot en met distributie van elektriciteit. Sommige componenten bevinden zich echter op de grens van verschillende groepen. Zonnepanelen bijvoorbeeld zouden ook bij de voorraad van woningen meegenomen kunnen worden. De grenzen moeten hier dus goed worden afgebakend.

Tijdsdimensie

Het modelleren van de dynamiek van stromen en voorraden in Excel was voldoende voor een eerste verkenning van de tijdsdimensie. Bij complexere berekeningen is Excel onvoldoende en moet een model geprogrammeerd worden. In het model kunnen de verschillende variabelen aparte sub-modellen worden. Gewicht, samenstelling, materiaalintensiteit en levensduur van de componenten kunnen alle dynamisch gemaakt worden als een stap om circulariteits-opties zoals tweedehandsgebruik, reparatie, refurbishing of remanufacturing door te rekenen. Dan kan ook eenvoudig geschakeld worden tussen verschillende componenten, materialen en schaalniveaus. Ook wordt op deze manier minder snel fouten gemaakt door het gebruik van een script in plaats van berekeningen in de datasheet zelf. Met een model kan ook gemakkelijker een distributie van levensverwachtingen worden toegekend aan de componenten. Ook kan een analyse worden gemaakt van voorraden en stromen per cohort of leeftijdsklasse. Tenslotte kunnen recycling-opties worden doorgerekend, als het model wordt uitgebreid met een materiaalprocestechnologie-module. Dit zijn aspecten die in toekomstverkenningen met betrekking tot circulaire economie maatregelen niet kunnen ontbreken.

Ruimtelijke dimensie

Met behulp van GIS systemen kan een locatie worden toegekend aan componenten uit het elektriciteitssysteem. Ook hier geldt, omdat gekeken wordt naar een tal aan voorraden, componenten, materialen en jaren, dat het gebruik van een programmeertaal waarschijnlijk geschikter is dan de hier gebruikte tools in ArcGIS. De modelbuilder tool in ArcGIS had hier de voorkeur omdat hiermee sneller dan in een programmeertaal de materiaaldichtheid van een component kon worden geïllustreerd. Echter, om makkelijk te kunnen schakelen tussen verschillende componenten, materialen en schaalniveaus, heeft een programmeertaal de voorkeur.

3.4.2 Data

In dit hoofdstuk komt de beschikbaarheid en onzekerheid van de gebruikte data aan bod, om een beter inzicht te geven in de betrouwbaarheid van de resultaten.

Tabel 3.6 Overzicht beschikbaarheid data

Component	Type	Voorraden		Tijdsdimensie			Ruimtelijke dimensie
		Omvang component	Materiaal compositie	Ontwikkeling omvang componenten	Levensduur (ontwikkeling)	Ontwikkeling technologie	Locatie
Windturbines	DD/GB, onshore / offshore	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green
Zonnepanelen	c-Si, a-Si, CdTe, CIGS	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow
Aardgas/kolen/nucleair/biomassa/afval/waterkracht elektriciteitscentrale		Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow
Transport & distributie elektriciteit	HS kabel/lijn	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green
	MS kabel	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	LS kabel	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	HS Masten	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green
	Onderstation (HS-MS)	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green
	Transformatiestation (MS-LS)	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow

Tabel 3.6 geeft een overzicht van de databeschikbaarheid, zowel voor de omvang van de componenten in het elektriciteitssysteem, de materiaalintensiteiten, de dynamische component en de ruimtelijke component. Een gele markering refereert naar onvolledige data. Groen geeft aan dat voldoende data beschikbaar is. De tabel laat zien dat, alhoewel de data niet altijd compleet of toereikend is, voor alle componenten een inschatting te maken is op basis van de beschikbare statistieken, rapportages en literatuur.

Voor het inventariseren van de omvang van de componenten is de meeste data goed beschikbaar. Een uitzondering hierbij zijn de componenten in het transport- en distributienet midden- en laagspanningsniveau; niet alle netbeheerders waren bereid hier data voor openbaar te stellen. De totale lengte van midden- en laagspanningskabels in Nederland konden wel via nationale statistieken worden verkregen, echter is onduidelijk hoe recent deze data is.

In tegenstelling tot de omvang van de componenten bevatten de materiaalcomposities relatief veel onzekerheden. Literatuur is beschikbaar aangaande de materiaalcomposities van de verschillende onderdelen, echter is deze niet altijd technologie specifiek of is data vooral beschikbaar voor ofwel de bulkmaterialen ofwel de kritische materialen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij zonnepanelen; hier kon geen goede inschatting gemaakt worden van de hoeveelheden bulkmaterialen in het product. Alleen voor midden en laagspanningskabels was deze data, via drie grote netbeheerders, in detail te verkrijgen.

De beschikbaarheid van data met betrekking tot de tijdsdimensie loopt uiteen. Zo zijn in verschillende rapportages toekomstverkenningen gevonden aangaande het geïnstalleerd vermogen van de verschillende technologieën voor elektriciteitsproductie. Echter is lastiger te vinden hoe het transport- en distributienet zich zou kunnen ontwikkelen. Van dit laatste zijn wel inschattingen te maken op basis

van geïnstalleerd vermogen aan technologieën voor elektriciteitsproductie en rapportages van netbeheerders.

De levensduur, zowel in het verleden, heden als in de toekomst, blijft onzeker voor de meeste componenten. Inschattingen zijn wel te maken op basis van literatuur maar in de praktijk wijken deze waarden vaak af. Een uitzondering zijn hier de grotere energiecentrales. Van deze technologieën is meestal al een einddatum vastgesteld en zijn de waarden in de literatuur goed te valideren.

Ook zijn er onzekerheden voor de ontwikkeling van de technologieën voor alle componenten. Literatuur biedt hier wel een ingang, maar een uitgebreide scenario ontwikkeling is nodig om de mogelijkheden in meer detail uit te werken.

Ten slotte wordt de ruimtelijke dimensie besproken. Deze is (compleet) gevonden voor windturbines, hoogspanningskabels en lijnen, masten en onderstations. Voor windturbines is deze data echter niet technologie specifiek. Voor zonnepanelen is alleen voor woningen ruimtelijke data gevonden (geïnstalleerd vermogen / aantal panelen per buurt), en ook hier is niet uit af te leiden om wat voor type zonnepanelen het gaat. Voor componenten op midden- en laagspanningsniveau verschilt de ruimtelijke beschikbaarheid (en het detail van de data) per netbeheerder.

Omvang componenten

De beschikbaarheid van informatie over de omvang componenten in het Nederlandse elektriciteitssysteem loopt uiteen. Zo hebben de netbeheerders gedetailleerde informatie over locatie, het type, de omvang en waarschijnlijk ook de leeftijd van de componenten in het transport en distributienet. Echter is de bereidheid van netbeheerders om deze data te delen beperkt (bijvoorbeeld wegens veiligheidsoverwegingen). Deze data is essentieel om een compleet informatiesysteem te realiseren. Voor het hoogspanningsnet zijn dergelijke kaarten al openbaar beschikbaar.

Aan de hand van statistieken was het geïnstalleerd vermogen van de technologieën voor elektriciteitsproductie goed te bepalen. Echter ontbrak in de bronnen vaak informatie over het type technologie en moesten aanvullende literatuur worden geraadpleegd. Een gedetailleerder overzicht van het geïnstalleerde vermogen voor de verschillende technologieën is daarom wenselijk.

Ten slotte is geen data gevonden voor *hibernating stocks*. Voor zichtbare componenten zoals elektriciteitscentrales en hoogspanningslijnen is dit waarschijnlijk niet van toepassing, maar voor bijvoorbeeld elektriciteitskabels zijn deze wel aanwezig. Uit gesprekken met Enexis (P. Soepboer, persoonlijke communicatie, 6 Juni 2019) kwam naar voren dat oude kabels bij vernieuwing vaak onder de grond blijven liggen, aangezien het direct verwijderen te veel overlast veroorzaakt. In de ruimtelijke data van Enexis (n.d.) is ook aangegeven of kabels in of uit werking zijn. Deze zijn echter, wegens incompleetheid voor het gehele midden-en laagspanningsnet, niet onderscheiden in deze studie. Dit onderwerp zou een relevante vervolgstudie kunnen vormen.

Materiaalintensiteiten

In deze sectie worden de onzekerheden in de materiaalintensiteiten besproken. Een overzicht van de verschillende waarden (hierin is ook de mate van variatie in de waarden te zien) is te vinden in Appendix 4. De data wordt per technologie besproken. Voor alle technologieën geldt onzekerheid wat betreft de exacte materialensamenstelling. In dit werk zijn verschillende soorten staal en beton niet onderscheiden, en is voor de overige metalen niet overwogen of deze puur of als legeringen zijn toegepast. Dit is zeker relevant om mee te nemen om (hoogwaardige) secundaire productie te bevorderen. Waar dit werk als doel heeft een inzicht te krijgen in de omvang van voorraden in het elektriciteitssysteem, kan een vervolgstudie meer gericht zijn op de samenstelling van materialen en producten en het bewerkstelligen van de *reverse supply chain*.

Windturbines

Voor de materiaalcompositie van windturbines is een redelijke hoeveelheid data gevonden. Echter komen de waarden voor de materiaalintensiteiten niet altijd overeen in de verschillende bronnen. Verschil in de geïnterpreteerde onderdelen maakt vergelijken lastiger. Zo nemen sommige studies naast de windturbine en de fundering ook kabels en onderstations mee in de inventarisatie. Echter zijn de waarden voor veel van de bulkmaterialen juist lager voor de studie die ook deze onderdelen meenemen. In een iteratie van de huidige analyse is het daarom goed om de waarden te valideren bij windturbine producenten. Nu is een gemiddelde genomen van de hoogst en laagst gevonden waarden. Voor bulkmaterialen verschillen de waarden maximaal een ordegrootte en zijn met name onzeker voor koper en aluminium (Appendix 4).

Beperkte data is beschikbaar voor de hoeveelheid kritische metalen in verschillende technologieën. In deze studie zijn de waarden van Exter et al. (2019) gebruikt. Deze zijn ter validatie vergeleken met andere literatuur. Hierin komen de waarden meestal redelijk overeen (Appendix 4), met name voor neodymium en dysprosium, waarvoor Viebahn et al. (2015) ook een onderscheid maken tussen direct drive, high-speed en medium-speed aandrijvingen (hier refererend naar *gearbox*). De waarden in de studie zijn gevalideerd met expert interviews. Voor praseodymium en terbium rapporteert Ohrlund (2011) waarden, echter alleen voor high-speed en low-speed (hier waarschijnlijk refererend naar direct drive) met een ordegrootte verschil. De hoogste waarde komt in de buurt van de waarde van Exter et al. (2019) voor *direct drive*, de laagste in de buurt van de *gearbox*. Voor een beter onderscheid tussen de verschillende technologieën en de betreffende materiaalcompositie en toepassing daarvan is een aanvullende analyse nodig.

Zonnepanelen

Bulk materialen, met name voor de installatie van de zonnecellen (e.g., frame en montage), zijn onzeker, aangezien de meeste literatuur focust op kritische metalen in de zonnecellen. Bronnen die waarden voor componenten om de cel heen geven, vermelden deze waarden in gewicht per oppervlak, terwijl hier gewerkt is met gewicht per geïnstalleerd vermogen. Voor staal zijn hier de waarden gebruikt uit het werk van Elshkaki & Graedel (2013). Voor koper verschillen de waarden per technologie tot twee ordegroottes, terwijl voor aluminium verschillende studies dezelfde waarden rapporteren (Appendix 4).

Ook bij de kritische metalen verschillen de materiaalcomposities in de literatuur, maar zijn de waarden meestal vergelijkbaar en hebben minstens dezelfde ordegrootte. De grootste verschillen zijn hier gevonden voor indium, waar Ohrlund (2011), in vergelijking met Exter et al. (2019), een twee keer lagere waarde rapporteert voor CdTe en een bijna drie keer hogere waarde voor CIGS.

Kolen, gas, biomassa, afval

Gevonden materiaalintensiteiten in de literatuur voor beton en staal verschillen maximaal een ordegrootte (Appendix 4). De minimale en maximale waarden gevonden zijn 165 en 353 ton/MW voor verschillende typen kolencentrales (EcoInvent, 2007). Het gemiddelde van deze waarden is genomen in deze studie. Voor koper en aluminium zijn de waarden van EcoInvent (2007) gebruikt. De waarden zijn vergelijkbaar met de intensiteiten voor gascentrales in Moss et al. (2013) en lijken daarom reëel. Voor kobalt en tantalium zijn de waarden van Moss et al. (2013) gebruikt, uitgaande van een A-USC turbine. Deze waarden zijn niet gevalideerd met andere literatuur.

Bij gebrek aan data is aangenomen dat voor biomassa en afvalenergiecentrales de intensiteiten kobalt en tantalium gelijk zijn met die in kolencentrales (Appendix 4). Voor de bulkmaterialen is een gemiddelde genomen van EcoInvent (2007) en Sullivan et al. (2011). De waarden verschillen tussen de studies en een grondigere analyse is nodig om de waarden te valideren. Hier is een gemiddelde genomen van de waarden

De waarden voor gascentrales zijn gebaseerd op EcoInvent en Moss et al. (2013). EcoInvent rapporteert voor twee verschillende typen gascentrales. Voor beton zijn de waarden vergelijkbaar. Voor het CCPP type is echter 5 keer meer staal nodig per MW. Vergelijkbaar is de waarde gerapporteerd door Moss et al. (2013) ongeveer 5 keer kleiner dan het CCPP type. Het is in deze studie niet onderzocht welke technologieën zijn toegepast in Nederland. In plaats daarvan is het gemiddelde van de waarden genomen. Waarden voor aluminium en koper liggen redelijk dicht bij elkaar voor aluminium en koper. Alleen Moss et al. (2013) rapporteren een waarde voor kobalt.

Nucleair, waterkracht

Voor de materiaalintensiteiten in kerncentrales en waterkrachtcentrales is per materiaal een studie gebruikt; de waarden zijn niet gevalideerd met andere bronnen.

Transport en distributie van elektriciteit

De waarden voor hoogspanningskabels, lijnen en masten bevatten onzekerheid. Materiaalintensiteiten konden niet worden gevalideerd met Tennet, de netbeheerder van het Nederlandse hoogspanningsnet. De waarden zijn nu gebaseerd op waarden van Harrison et al. (2011). Echter bestaan verschillende soorten hoogspanningslijnen en kabels en verschilt ook het type aluminiumlegering dat wordt toegepast. Deze studie vormde ook de basis voor materialen in onderstations. Hier is een eerste inschatting gemaakt, maar onzekerheid bestaat nog over het aantal stroomonderbrekers, “substations bays” en transformatoren per onderstation. In een iteratie van deze analyse moeten de materiaalintensiteiten daarom gevalideerd worden, bijvoorbeeld met data van netbeheerders of producenten van componenten in het hoogspanningsnet.

Anders dan hoogspanningslijnen en kabels is de data voor materiaalintensiteiten in midden- en laagspanningskabels goed betrouwbaar (Appendix 4). Van drie netbeheerders is een gemiddelde compositie koper en aluminium in zowel laag- als middenspanningskabels verkregen. De waarden verschillen, maar liggen voldoende bij elkaar in de buurt (ten minste dezelfde orde grootte). Het verschil kan worden verklaard door een andere verhouding tussen de verschillende soorten kabels. Voor transformatiestations op midden en laagspanningsniveau is het werk van Jorge et al. (2011) gebruikt. Net als voor de onderstations is hier een eerste inschatting gemaakt, maar bestaat nog wel onzekerheid over de exacte materiaalsamenstelling van deze stations.

Tijdscomponent

Voor het analyseren van de dynamiek van de stedelijke mijn is ten eerste de levensduur van het component essentieel. Echter was dit niet voor elk component in het elektriciteitssysteem goed te bepalen. Voor grotere elektriciteitscentrales in Nederland is vaak een einddatum vastgesteld, waarmee de waarden uit de literatuur konden worden gevalideerd. Voor windturbines en zonnepanelen zijn de waarden uit de literatuur lastiger te valideren. Echter blijkt uit bronnen dat deze niet altijd overeen komen. Zo werden in Nederland in 2016 bijvoorbeeld windmolens met een laag vermogen vroegtijdig afgebroken en doorverkocht aan het buitenland, omdat de subsidietermijn (ongeveer 10 tot 15 jaar) was verlopen en efficiëntere grote turbines werden verplaatst (Straver, 2016). Dit levert lagere waarden op dan de 20 jaar gerapporteerd in literatuur. Een verbetering moet daarom gemaakt worden door het toevoegen van een leeftijdsdistributie. Vergelijkbaar is de levensduur (distributie) moeilijk te achterhalen voor elektriciteitskabels. Hier zijn waarden voor te vinden in de literatuur, maar uit gesprekken met netbeheerders blijkt dat deze waarden in werkelijkheid vaak afwijken (P. Soepboer, persoonlijke communicatie, 6 Juni 2019). Zo is voor laag- en middenspanningskabels 40 jaar als levensduur genomen gebaseerd op literatuur, maar is 60 jaar ook niet uitzonderlijk. Tenslotte kan worden aanbevolen om in toekomstige iteraties van dit werk de ontwikkeling van levensduren van de componenten mee te nemen. Dit was buiten de scope van dit project.

Projecties voor de ontwikkeling van voorraden zijn gevonden in verschillende bronnen (e.g., ECN, 2017, CPB/PBL, 2016, Klimaatakkoord, 2019). Een uitzondering hierbij is data aangaande de ontwikkeling van het transport- en distributienetwerk. Nader onderzoek is nodig voor de ontwikkeling hiervan, zowel in het verleden als in de toekomst.

Verder ontbreekt in rapportages voor de ontwikkeling van de elektriciteitsmix specifieke informatie over het type technologie. Het is echter essentieel om scenario's voor de verschillende typen technologieën te analyseren, omdat dit de materiaalvraag en beschikbaarheid beïnvloedt. Ook per type technologie kan de materiaalcompositie veranderen over tijd. Bijvoorbeeld, de benodigde kritische metalen per geïnstalleerde MW *direct drive* windturbine neemt waarschijnlijk af in de komende decennia (Viebahn et al., 2015). Voor elektriciteitskabels geldt dat nieuwe kabels meestal een aluminium geleider hebben, terwijl vroeger meestal koper werd gebruikt (F. Middel, Persoonlijke communicatie, 6 Juni 2019). Voor de ontwikkeling van technologieën vormt literatuur en onderzoek door de Europese commissie (e.g., Moss et al., 2013; Hernandez et al., 2017; Ohrlund, 2011, Moss et al., 2013) een ingang. In het uitgewerkte voorbeeld in deze studie is aangenomen dat de materiaalcompositie onveranderd blijft.

Ruimtelijke component

Ruimtelijke data voor het elektriciteitssysteem is incompleet voor de meeste componenten, met uitzondering van het hoogspanningsnet. Alhoewel een aantal netbeheerders wel de ruimtelijke data van de componenten in het midden- en laagspanningsnet dat zij beheren openbaar stellen, zijn anderen hier niet toe bereid, bijvoorbeeld wegens veiligheid redenen. Van de overige componenten in het elektriciteitsnet ontbreekt nog technologie specifieke ruimtelijke data. Wat voor alle componenten ontbreekt is data van voorgaande jaren. Dit is essentieel voor het illustreren aan materiaalstromen op ruimtelijk niveau.

3.3.4 Resultaten

Vergelijking verschillende voorraden

Om de resultaten beter te kunnen begrijpen zijn de waarden vergeleken met bevindingen in vergelijkbare literatuur. Echter is geen literatuur gevonden die materiaalvoorraden in het elektriciteitsnetwerk kwantificeren. De resultaten kunnen wel vergeleken worden met voorraden materialen in gebouwen, (huishoudelijke) elektrische en elektronische apparaten en voertuigen (personenauto's en bestelwagens). Een overzicht van de voorraden in de verschillende productgroepen kan teruggevonden worden in Appendix 5.

Beton vormt de grootste bulk in het Nederlandse elektriciteitssysteem. In een studie van Miatto et al. (2019) voor de materiaalvoorraad in gebouwen in Padua, Italië is een hoeveelheid van 67 ton beton per capita berekend. In vergelijking met 0,26 ton beton per capita voor Nederland, lijkt het elektriciteitsnetwerk niet de meest interessante bron voor het mijnen van beton. Echter, met een totale hoeveelheid van ruim 5 miljoen ton (grotendeels in technologieën voor conventionele elektriciteitsproductie en windturbines) is dit materiaal toch belangrijk om mee te nemen in een circulair economie beleid.

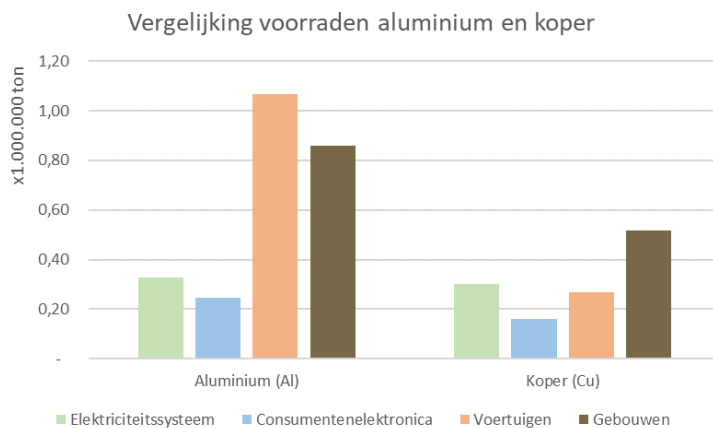
De hoeveelheid staal vormt ruim 1,6 miljoen ton. Ter vergelijking is een studie van Kleeman et al. (2017) naar materialen in de gebouwen van Wenen (Oostenrijk) gebruikt. Voor staal is hier een waarde van 3,2 ton per capita berekend. Staal in Nederlandse voertuigen (2018) staat gelijk aan 0,4 ton per capita en in elektrische en elektronische apparaten is dat 0,13 ton per capita (Urban Mine Platform, 2017). Voor het Nederlandse elektriciteitssysteem geldt omgerekend 0,10 ton staal per capita. Alhoewel dit, vergeleken met de andere productgroepen, niet de grootste voorraad lijkt dit aandeel alsnog substantieel. Figuur 3.16 laat de totale hoeveelheden staal voor verschillende productgroepen in Nederland zien. Voor gebouwen is hier de hoeveelheid staal per capita vermenigvuldigd met het aantal inwoners van Nederland.

Figuur 3.16 Vergelijking hoeveelheid staal in het elektriciteitssysteem met andere productcategorieën



De hoeveelheid aluminium en koper in het elektriciteitssysteem zijn beide rond de 0,02 ton per capita (0,3 miljoen ton in totaal). In het werk van Kleeman et al. (2017) zijn deze waarden 0,05 ton per capita voor aluminium in gebouwen en 0,03 ton per capita voor koper in gebouwen. Voor voertuigen (alleen personenauto's en bestelwagens) is dit 0,06 ton per capita voor aluminium en 0,02 ton koper per capita (Urban Mine Platform, 2017). De waarden zijn ook vergeleken met de voorraad aan aluminium en koper in elektronische en elektrische apparaten (alleen consumentenelektronica) in Nederland (Urban Mine Platform, 2017). Hieruit volgen waarden van 0,01 ton per capita voor zowel aluminium als koper. Figuur 3.17 laat de totale omvang aluminium en koper voor de verschillende productgroepen in Nederland zien. Voor gebouwen is de materiaalintensiteit per capita vermenigvuldigd met het aantal inwoners van Nederland. De waarden voor de verschillende productgroepen liggen vrij dicht bij elkaar in de buurt. Gezien het substantiële aandeel in de totale voorraad en het brede scala aan mogelijke toepassingen zijn koper en aluminium in het elektriciteitssysteem relevant om mee te nemen in een circulair economiebeleid.

Figuur 3.17 Vergelijking hoeveelheden aluminium en koper in het elektriciteitssysteem met andere productcategorieën

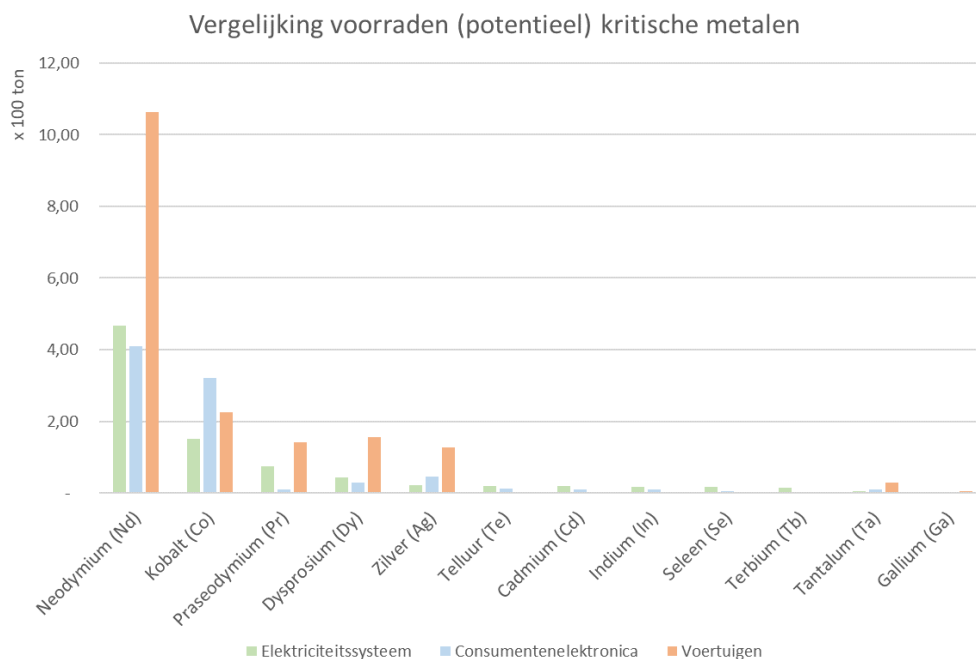


Ook de waarden voor kritische metalen gevonden in deze studie zijn vergeleken met de aanwezigheid van deze elementen in consumentenelektronica en voertuigen en laten grotendeels vergelijkbare hoeveelheden zien. Figuur 3.18 laat de hoeveelheden voor de verschillende productgroepen in Nederland zien. De hoeveelheid kobalt in het elektriciteitssysteem is vergelijkbaar maar kleiner dan de hoeveelheden in consumentenelektronica en voertuigen in Nederland. De hoeveelheden neodymium, praseodymium, indium en terbium zijn groter dan de totalen bij consumentenelektronica. Voor indium en terbium geldt dit ook voor voertuigen. Telluur, cadmium en selenium vormen vergelijkbare maar grotere voorraden in het elektriciteitssysteem, en worden niet gerapporteerd voor voertuigen. De hoeveelheid neodymium, praseodymium en dysprosium in Nederlandse voertuigen is ongeveer twee keer zo groot ten opzichte van het elektriciteitssysteem. Voor zilver zijn voertuigen en elektronica een interessantere bron dan het elektriciteitssysteem, met een of twee ordegrottes verschil. Ten slotte zijn de hoeveelheden tantaal en gallium vergelijkbaar, maar groter in consumentenelektronica en voertuigen.

De resultaten indiceren dat de hoeveelheden kritische metalen in het elektriciteitssysteem interessant zijn om mee te nemen in een circulair economiebeleid. Echter bestaat er wel competitie voor het gebruik van de metalen in verschillende productgroepen. Dit is in overeenstemming met de bevindingen in het werk van Exter et al. (2019) en Deetman et al. (2016).

De meeste kritische metalen bevinden zich in de windturbines en zonnepanelen, en in mindere mate in kerncentrales. Verwacht kan worden dat de vraag naar metalen die nodig zijn in deze technieken zal toenemen, omdat het aandeel hiervan in de toekomst zal groeien (ECN, 2017). Gezien het toeleveringsrisico van deze metalen is secundaire productie van deze metalen in de toekomst essentieel. Welke hoeveelheden en type kritische metalen precies nodig zijn hangt af van de ontwikkeling van de technologieën en zal aan de hand van scenario's moeten worden bepaald.

Figuur 3.18 Vergelijking hoeveelheden kritische metalen in het elektriciteitssysteem met andere productcategorieën



Vergelijking voorraden met in- en uitstroom van materialen

Van een aantal voorraden is een vergelijking gemaakt met de instroom en uitstroom van componenten in datzelfde jaar, uitgaande van 2018, met als doel inzicht te krijgen in de verhouding hiertussen. Hierbij is uitsluitend gerekend aan voorraden die “dynamisch” zijn van qua omvang. Hiermee wordt bedoeld dat er een regelmatige instroom en/of uitstroom (op jaarbasis) van componenten plaatsvindt. Daarom zijn grotere elektriciteitscentrales, (hier omvattend kolencentrales, gascentrales, biomassa- en afvalverbrandingscentrales, kerncentrales en waterkrachtcentrales), niet in de analyse meegenomen. De volgende componenten zijn hier onderscheiden: elektriciteitskabels (op middenspannings- en laagspanningsniveau), windturbines en zonnepanelen. Hoogspanningskabels en lijnen zijn niet meegenomen omdat uit statistieken van netbeheerders (P.Avadhoot, persoonlijke communicatie, 5 Augustus 2019; Tennet, 2018) blijkt dat de omvang vervangen en uitgebreide kabels op jaarbasis laag is, en de cijfers voor vervanging en uitbreiding sterk variëren per jaar.

De vergelijking is voor windturbines en zonnepanelen gebaseerd op basis van veranderingen in het geïnstalleerde vermogen. Hierbij zijn statistieken van het CBS (CBS Statline, 2019) gebruikt en is een levensduur van 20 jaar voor windturbines en 25 jaar voor zonnepanelen aangenomen (Viebahn et al., 2015; Bonou et al., 2016; Ohrlund, 2011). De waarden voor de voorraden wijken hier wat af van de berekende waarden in de inventarisatie van deze studie omdat hier alleen met de gemiddelde materiaalcompositie van de verschillende technologieën is gerekend. Voor elektriciteitskabels is uitgegaan van cijfers van Netbeheer Nederland (n.d.) en de uitbreidings- en vervangingsplannen gerapporteerd door Enexis (2018). Aan de hand van de totale omvang van de kabels en het percentage

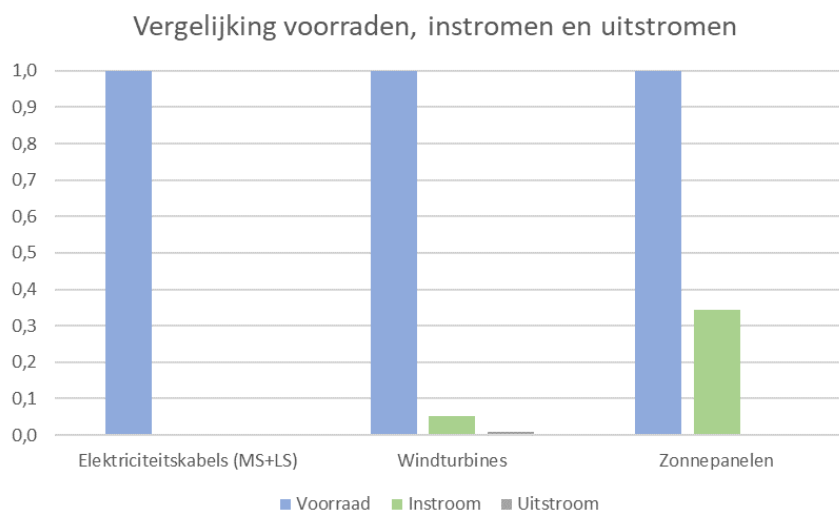
dat Enexis beheert (ongeveer 40%) is het totaal aantal kilometer vervangen en bijgelegde kabels berekent.

Figuur 3.19 laat de genormaliseerde waarden zien voor de drie componenten en Tabel 3.7 de omvang van materiaalvoorraden en stromen in de componenten. Voor elektriciteitskabels geldt dat de instroom en uitstroom relatief klein zijn (0,7% en 0,3% respectievelijk) in vergelijking met de voorraad. Dit betekent dat er relatief weinig beschikbaar komt voor secundaire productie, maar ook dat de vraag is naar nieuw materiaal laag is. Ter illustratie, de instroom van aluminium omvatte 1600 ton en de uitstroom 600 ton in 2018.

Voor windturbines en zonnepanelen omvatte de instroom respectievelijk 5% en 35% van het geïnstalleerde vermogen in 2018. De uitstroom in geïnstalleerd vermogen windturbines en zonnepanelen was respectievelijk slechts 0,9% en 0,02% van de voorraad. De cijfers laten zien dat de voorraad toeneemt, en de vraag naar materialen nog substantieel groter is dan de uitstroom van materialen; volledig circulair is daarom nog niet haalbaar.

Deze analyse geeft een indicatie van hoe voorraden, de vraag naar materialen en de beschikbaarheid van secundaire materialen zich met elkaar verhouden. Het is interessanter om naar een serie van jaren te kijken, omdat dan naar ontwikkelingen van vraag en aanbod in de toekomst kan worden gekeken, wat relevante informatie levert voor het formuleren van een circulaire economiebeleid.

Figuur 3.19 Vergelijking voorraden, instromen en uitstromen (genormaliseerd) van elektriciteitskabels, windturbines en zonnepanelen in 2018



Tabel 3.7 Vergelijking voorraden, instromen en uitstromen in ton/jaar per materiaal in 2018

Voorraden en stromen 2018		Voorraad (ton)	Instroom (ton)	Uitstroom (ton)
MS kabels	Al	94.200,00	522,00	130,50
	Cu	61.700,00	342,00	85,50
LS kabels	Al	154.000,00	350,00	140,00
	Cu	130.000,00	295,00	118,00
Windturbines	Beton	926.923,00	48.530,00	8.229,00
	Staal	544.732,00	28.520,00	4.836,00
	Al	7.248,45	379,50	64,35
	Cu	16.913,05	885,50	150,15
	Nd	527,16	27,60	4,68
	Dy	50,52	2,65	0,45
	Pr	85,66	4,49	0,76
	Tb	17,57	0,92	0,16
Zonnepanelen	Al	337,67	115,59	0,08
	Cu	5.252,66	1.798,09	1,19
	Ag	5,69	1,95	0,00
	Cd	91,81	31,43	0,02
	Te	132,42	45,33	0,03
	Se	82,10	28,10	0,02
	Ga	6,40	2,19	0,00
	In	79,89	27,35	0,02

Beschouwd versus totaal gewicht

In dit hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt tussen de totaalgewichten van de verschillende componenten en het totaalgewicht van de meegenomen materialen in deze studie per component. Het doel is om inzicht te krijgen in de (hoeveelheden) materialen die nog ontbreken in deze analyse. De totaalgewichten zijn verkregen uit verschillende bronnen. Hierin worden meestal geen kritische metalen meegenomen wegens hun relatief kleine gewicht.

97% resp. 88% van het gewicht van windturbines op land resp. zee is meegenomen in deze studie. Bij *onshore* turbines bestaat 73% uit beton en 21% uit staal, terwijl in *offshore* windturbines 79% juist uit staal bestaat en slechts 5% uit beton. Niet meegenomen materialen (3-12%) omvatten epoxy, glasvezels, plastics en lood (Bonou et al., 2016). Deze materialen bevinden zich, op lood na, in de wieken van de turbine. Wegens de lastigheid om plastics hoogwaardig te recyclen en veelheid aan verschillende soorten zijn deze niet in de analyse meegenomen.

Voor elektriciteitscentrales (kolen, gas, biomassa, nucleair en waterkracht) kan worden aangenomen dat het de hier meegenomen materialen redelijk in de buurt liggen van het totale gewicht aangezien materialen als beton en staal waarschijnlijk het grootste aandeel vormen. Ter vergelijking, een studie van Kleeman et al. (2017) laat zien dat 92% van industriële gebouwen (gebouwd tussen 1977 en nu) bestaan uit beton, staal en (een relatief klein aandeel) koper en aluminium. De overige materialen omvatten mineralen, plastics, bitumen en hout.

In een webshop voor zonnepanelen is gevonden dat een c-Si zonnepaneel 16,8 kg weegt en 274 W vermogen heeft. Omgerekend is dit 67 ton/MW. Het totale gewicht van de materialen meegenomen in deze studie voor c-Si zonnepanelen is 3 ton/MW. Een groot deel van het gewicht is dus niet meegenomen. Het gaat hier met name om materialen voor de behuizing en installatie van de zonnepanelen, waar geen goede data voor gevonden is.

Van de elektriciteitskabels en lijnen zijn in deze studie alleen de geleiders meegenomen (koper en aluminium). Het totaalgewicht van de kabels is gebaseerd op data van kabelfabrikant Prysmian (F. Middel, persoonlijke communicatie, 7 Juni 2019). Van de verschillende hoog-, midden- en laagspanningskabels die worden geproduceerd bij het bedrijf bestaat 47%, 46% en 52% respectievelijk van het totaalgewicht uit plastics, en is dus pakweg de helft van het gewicht meegenomen. De plastics omvatten PVC, PE, XLPE en rubber. Echter heeft 78% van de middenspanningskabels en 31% van de laagspanningskabels die nu onder de grond liggen geen plastic als isolatie, maar ouderwets isolatiemateriaal bestaande uit lood, gebitumeerd papier en jute (P. Soepboer, persoonlijke communicatie, 6 Juni). Van deze kabels bestaat ongeveer 10% uit papier en jute en 40% uit lood. Voor ondergrondse hoogspanningskabels is hier geen data voor gevonden. In hoogspanningslijnen wordt lucht gebruikt als isolatie, en is dus in deze studie nagenoeg 100% van het materiaal meegenomen.

Ongeveer 70% van het gewicht van transformatiestations op midden- en laagspanningsniveau zijn in deze studie meegenomen (Jorge et al., 2011b). De overige 30% bestaat uit olie, isolatiemateriaal, porselein en ongedefinieerde overige materialen. Voor onderstations is dit percentage 92% van het gewicht (Harrison et al., 2011). De overige materialen bestaan uit hekwerk, olie en porselein. Lijmsteen kiezels, ca. 6720 ton per onderstation, zijn hier niet in meegenomen en ook niet overwogen in dit werk. Ten slotte is tussen de 91% en 95% van de hoogspanningsmasten meegenomen. De overige 5-9% bestaat uit porselein.

Tijdsdimensie

Als doelstellingen van de overheid, geformuleerd in het Klimaatakkoord (2019) worden gerealiseerd, kan een sterke groei van windturbines worden verwacht. De analyse van voorraden en stromen materialen in windturbines laat zien dat de voorraden sterk groeien in de komende decennia. Hierdoor blijft de vraag naar materialen groter dan de materialen die beschikbaar komen voor secundaire productie. Echter, de omvang van de uitstroom groeit en wordt vanaf ca. 2035 substantieel vergeleken met de vraag naar materialen voor windmolens.

In de analyse is uitgegaan van een toename van offshore windturbines en een *direct drive* aandrijving. De groei van het aandeel windturbines op zee resulteert in een relatief grote groei, ten opzichte van nu, van de benodigde hoeveelheid staal en lagere groei voor de hoeveelheid beton. Daarnaast is bij de introductie van meer *direct drive* windturbines een groei te verwachten in de vraag naar de kritische metalen neodymium, dysprosium, praseodymium en terbium. In het werk van Exter et al. (2019) werd al geïllustreerd dat het toeleveringsrisico van deze metalen in de toekomst groot is. Het is daarom belangrijk om verschillende scenario's, ook voor de andere componenten in het elektriciteitssysteem, te

ontwikkelen om het toeleveringsrisico van de benodigde materialen voor de energietransitie te beperken.

De bevindingen in dit werk onderstrepen dat een dergelijke analyse zinvol en essentieel is voor het formuleren van een circulaire economie beleid. Door de vraag (instroom) naast de beschikbaarheid van materialen (uitstroom) uit de *stedelijke mijn* te leggen, kan worden beargumenteerd of het zinvol is componenten her te gebruiken of te recyclen. Daarnaast vormen de resultaten een basis voor een analyse van het mogelijke toeleveringsrisico in de toekomst. Vervolgens kan op basis van de bevindingen worden bepaald wat voor infrastructuur nodig is voor secundaire productie, welke technologieën ontwikkeld moeten worden en hoe circulair productontwerp hieraan kan bijdragen.

Ruimtelijke dimensie

In deze studie is ter illustratie een deel van het elektriciteitssysteem, het hoogspanningsnet, in kaart gebracht. De resultaten laten zien dat de waarden per buurt variëren tussen de 0 en 560 ton staal per vierkante kilometer. Wanneer deze waarden worden geaggregeerd tot provinciaal niveau worden de waarden een stuk kleiner: 2 tot 6 ton staal per vierkante kilometer. Dit geeft aan dat de betreffende voorraad sterk locatie specifiek is. Hetzelfde kan verwacht worden voor technologieën voor elektriciteitsproductie. Voor midden- en laagspanningskabels zullen de materiaalintensiteiten misschien gelijk verdeeld zijn omdat de kabels een dicht netwerk vormen, verspreid over het land.

Het in kaart brengen van de dichtheid materiaal vormt een belangrijk aanknopingspunt voor een circulaire economiebeleid. Naast informatie over de hoeveelheid materiaal kan door het gebruik van GIS geïnventariseerd worden waar het materiaal gewonnen kan worden. Dit is een belangrijk startpunt voor het toegankelijk maken van de *stedelijke mijn*. Materiaaldichtheden per provincie zijn relevant voor beleid op nationaal en provinciaal niveau om in te schatten of de hoeveelheden relevant zijn. Vervolgens kan per gemeente in meer detail worden geïnventariseerd waar relevante materialen beschikbaar komen voor secundaire productie en welk beleid vervolgens nodig is.

Naast praktische informatie over de locatie van materialen dienen de kaarten ook voor de evaluatie van een haalbare en wenselijke schaal van circulariteit. Door kaarten met de vraag naar materialen naast de beschikbaarheid daarvan te leggen, op verschillende bestuurlijke niveaus, kan worden onderzocht op welk niveau vraag en aanbod (nagenoeg) aan elkaar gelijk zijn. De uitstroom aan materialen kan in kaart worden gebracht aan de hand van ruimtelijke data van de voorraden in voorgaande jaren. Zo kan geïllustreerd worden hoeveel materialen op een bepaalde locatie in een bepaalde periode beschikbaar komen voor secundaire productie.

Wanneer de kaarten worden uitgebreid met andere componenten in het elektriciteitssysteem, en zo ook meer materialen, en met andere voorraden, kunnen materiaaldichtheden bestudeerd worden per component (e.g., windturbines), per type voorraad (e.g., voor alle componenten in het elektriciteitssysteem), of voor alle relevante voorraden (gebouwen, voertuigen, infrastructuur, et cetera).

3.4.4 Het benutten van de stedelijke mijn

In deze sectie wordt besproken hoe secundaire productie van de componenten het beste gefaciliteerd kan worden aan de hand van circulaire ontwerpprincipes en technologische ontwikkelingen.

Om de vraag naar nieuwe materialen te verkleinen kan ten eerste de levensduur van het product worden geoptimaliseerd door middel van technologische ontwikkelingen. Een geoptimaliseerde levensduur kan bijvoorbeeld de voorkeur hebben bij grote installaties zoals *offshore* windturbines. Een andere mogelijkheid is het hergebruik van het product voor een andere functie, bijvoorbeeld het hergebruiken van kolencentrales voor het verbranden van biomassa. Ook heeft reparatie de voorkeur boven vervanging van het product, eventueel door het vervangen van onderdelen. Een voorwaarde hiervoor is dat onderdelen in het product demonteerbaar zijn. Hier moet rekening mee gehouden worden in het productontwerp. Op deze manier wordt zoveel mogelijk waarde van het product behouden, en dat sluit aan bij de doelstellingen van een circulaire economie.

Wanneer de levensduur van het product niet kan worden verlengd, en onderdelen zich niet lenen voor hergebruik, kan het materiaal worden gerecycled. Echter, de meeste metalen besproken in deze studie zijn verwerkt als legeringen. Het hoogwaardig recyclen van legeringen is lastig en brengt significante materiaalverliezen met zich mee. Het is daarom vanuit een recyclingperspectief wenselijk om zo min mogelijk additieven per materiaal te gebruiken. Daarnaast kan in de ontwerpfase al rekening gehouden worden met hoe de verschillende materialen aan het einde van het leven kunnen worden gedemonteerd. Zo min mogelijk verschillende materialen per component is daarbij wenselijk. Materialen in zonnepanelen zijn bijvoorbeeld lastig her te gebruiken, omdat de materialen nauwelijks gescheiden kunnen worden. Het gebruik van minder verschillende materialen en het verbeteren van de demonteerbaarheid zou het recycling potentieel van zonnepanelen kunnen vergroten.

Windturbinebladen vormen een ander voorbeeld; deze onderdelen bestaan uit een mix van vezels, hars, lijm en coatings die lastig van elkaar te scheiden zijn.

Secundaire materialen kunnen worden toegepast in allerlei producten. Beton en staal worden gebruikt in constructies, en daarnaast wordt staal in grote hoeveelheden toegepast in voertuigen en elektronica. Een infrastructuur voor het recyclen van deze materialen is al aanwezig. Echter worden de materialen vaak *ge-downcycled*, bijvoorbeeld door het gebruik van beton als fundering voor wegenbouw. Dit sluit niet aan bij de principes van een circulaire economie. Investeren in een hoogwaardig recycling systeem, voor de verschillende materiaalstromen is daarom essentieel.

Ook voor koper en aluminium bestaan vaak al recyclingroutes en de herwonnen materialen kunnen vervolgens in een breed scala aan producten toegepast. Voor de uitbreiding van het elektriciteitsnet zal de vraag naar deze materialen blijven groeien, en daarnaast worden de materialen ook gebruikt in gebouwen, transport en elektronica.

Ten slotte maakte deze studie inzichtelijk dat de vraag naar kritische metalen, benodigd voor de energietransitie, dramatisch zal groeien in de komende decennia. Een bijkomende lastigheid is dat veel van deze metalen in competitie zijn met toepassingen in andere producten. Bijvoorbeeld het gebruik van neodymium, dysprosium, kobalt, tantalium en praseodymium in (elektrische) transportmiddelen, en indium in elektrische en elektronische apparaten. Recycling van kritische metalen wordt daarom in de toekomst essentieel, en investering in geschikte recyclingroutes is daarvoor nodig.

3.5 Conclusie & aanbevelingen

In het kader van het formuleren van een Nederlands circulaire economie beleid is in deze studie een uitwerking gerealiseerd van materiaalvoorraden in het Nederlandse elektriciteitssysteem. Dit systeem is met name interessant omdat het in de nabije toekomst sterk zal veranderen als gevolg van de energietransitie. Dit resulteert in zowel het beschikbaar komen van materialen uit het huidige systeem, als een materiaalvraag voor het nieuwe systeem. Aan de hand van de bevindingen zijn conclusies en aanbevelingen geformuleerd.

De resultaten van deze studie laten zien dat de voorraad aan materialen in het elektriciteitssysteem een waardevolle bron voor secundaire productie vormt. Er kan daarom geconcludeerd worden dat het van belang is om deze mee te nemen bij het formuleren van een circulaire economie beleid. Van de grotere materiaalvoorraden zijn met name de hoeveelheden aluminium en koper relevant. Beide materialen hebben met 0,3 miljoen ton een vergelijkbare omvang als hoeveelheden in gebouwen, elektrische en elektronische apparaten en voertuigen. Deze materialen bevinden zich voornamelijk in elektriciteitskabels en lijnen. Beton en staal vormen een nog grotere hoeveelheid, 5,1 en 1,7 miljoen ton respectievelijk, en zijn daarom belangrijk om mee te nemen. Echter vormt dit een relatief kleine voorraad in vergelijking met de bouwsector. Daarnaast zijn de hoeveelheden kritische metalen interessant, met name in zonnepanelen en windturbines en in mindere mate in conventionele technologieën voor elektriciteitsproductie. Met de verwachte groei van windturbines en zonnepanelen zal de vraag naar veel van deze metalen toenemen (ECN, 2017; Klimaatakkoord 2019). De mogelijke toeleveringsrisico's van de onderzochte kritische metalen worden aangekaart in verschillende studies. Om minder afhankelijk te zijn van de import van deze materialen is het daarom van belang om te onderzoeken hoe secundaire productie kan worden vergroot.

De inventarisatie van de voorraden kan worden verbeterd door een gedetailleerdere analyse van het type technologie per component en de bijbehorende materiaalcompositie uit te voeren. Hiertoe zou samenwerking met netbeheerders en elektriciteitsproducenten kunnen bijdragen.

De huidige materiaalvoorraad vormt de basis voor het inventariseren van voorraden, instromen en uitstromen in de toekomst. Een dergelijke analyse geeft inzicht in de vraag naar materialen in de toekomst en hoeveel van die vraag voorzien kan worden door materialen uit de *stedelijke mijn*. Deze informatie is direct relevant voor het formuleren van een circulaire economiebeleid. Ook geven de resultaten inzicht in mogelijke toeleveringsrisico's. Aan de hand van deze analyse kan vervolgens bepaald

worden welke acties nodig zijn, bijvoorbeeld in de vorm van het ontwikkelen van nieuwe recycling routes, circulair productontwerp of investering in ontwikkeling van technologie.

Huidige projecties voor de ontwikkeling van het elektriciteitssysteem indiceren dat de vraag naar relevante materialen drastisch zal toenemen in de komende decennia, en benadrukt het belang van secundaire productie. De hier gerealiseerde voorbeelduitwerking van de ontwikkeling van materiaalvoorraden en stromen in windturbines laat zien dat de vraag naar materialen sterk groeit in de komende decennia, en dat de uitstroom vanaf ongeveer 2035 substantieel gaat worden als mogelijke bron van secundaire materialen.

Wat nog ontbreekt in de huidige projecties zijn scenario's voor de ontwikkeling van de verschillende technologieën, de bijbehorende levensdistributie en de materiaalcompositie. Dit is essentieel voor het sturen van een circulaire economiebeleid. Hier is nader onderzoek voor nodig.

Door een ruimtelijke component toe te voegen kunnen de dichtheden van materialen geanalyseerd worden op verschillende bestuurlijke niveaus. De voorbeelduitwerking in deze studie laat zien dat de dichtheid van materialen sterk afhankelijk is van de schaal waarop deze bestudeerd worden. Om een circulaire economie op verschillende bestuursniveaus te ondersteunen is deze informatie daarom essentieel. Voor de meeste componenten ontbreekt echter complete en betrouwbare ruimtelijke data. Voor alle componenten ontbreekt ruimtelijke data van voorgaande jaren. Deze data is essentieel om, naast de locatie van de voorraden, te analyseren wanneer deze beschikbaar komen voor secundaire productie. Inspanningen zijn nodig om deze data te verzamelen.

4 Case study Elektronica

4.1 Inleiding

4.1.1 Achtergrond

Dit hoofdstuk beschrijft de uitwerking van het onderdeel “Duurzame consumptiegoederen, met name elektronica” welke één van de onderdelen is van het onderzoeksprogramma “De materiële basis van de circulaire economie: de stedelijke mijn ofwel de voorraden in de maatschappij”.

In een circulaire economie wordt gestreefd naar het verlagen van extractie van grondstoffen uit het milieu door een zo groot mogelijk gedeelte van de vraag te voldoen via hergebruik, ofwel secundaire productie. Dit wordt ook wel aangeduid als het benutten van de stedelijke mijn: de voorraden van materialen die in onze maatschappij in gebruik zijn. Om te kunnen inschatten in hoeverre zo’n verschuiving naar secundaire productie mogelijk is, is het van belang een inschatting te hebben van de omvang en locatie van deze mijn, van de dynamiek ervan (op welk moment komt hoeveel beschikbaar voor recycling en hergebruik?) en van de kwaliteit ervan (is het materiaal herbruikbaar of herwinbaar?).

Elektronica en elektrische apparaten is een groep goederen die met name relevant is voor metalen en kritische materialen. Er is veel onderzoek gedaan naar deze kritische materialen vanuit voorzieningszekerheids-oogpunt: welke materialen zijn nodig om de moderne maatschappij te laten draaien, en voorzien we problemen met het aanbod? Een groter aandeel aanbod uit de stedelijke mijn zou veel potentiële problemen kunnen oplossen. Aan de andere kant is het vaak niet eenvoudig deze materialen te herwinnen, vanwege de lage concentraties waarin deze voorkomen. Hergebruik van onderdelen zou dan een oplossing zijn die in potentie meer kan opleveren.

Het doel van dit projectonderdeel is het maken van een inschatting van de stedelijke mijn gerelateerd aan duurzame consumptiegoederen, met name elektronica. De eerdere studie van het CBS over EEE en WEEE is hierbij een goed startpunt: “Uitbreiding Materiaalmonitor met voorraden” (Delahaye et al., 2017).

4.1.2 Doelen

Doel van dit project is een inschatting te maken van:

- De relevante producten in de categorie elektronica
- De hoeveelheden van deze producten die in gebruik zijn op dit moment

- De gehalten van een (beperkt) aantal grondstoffen / materialen in deze producten. In elk geval wordt koper (Cu) als materiaal gekozen en verder andere materialen waarbij gegevensbeschikbaarheid leidend zal zijn voor de keuze.

Om deze doelen te realiseren zijn de volgende producten uitgewerkt die worden behandeld in dit rapport:

1. Methodiek voor bepalen voorraden (urban mine) in Nederland
2. Toepassing van de methodiek voor het bepalen van de voorraden duurzame consumptiegoederen, met name elektronica, in de Nederlandse economie
3. Koppeling aan goederenstromen zoals waargenomen in de MateriaalMonitor (en dus het te ontwikkelen GRIS (GRondstoffenInformatieSysteem))

4.1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 4.2 worden eerst de databronnen en alle tabellen beschreven die nodig zijn voor de berekeningen. Vervolgens wordt de berekeningsmethode uitgelegd. Dit is de uitwerking van het eerste doel.

In hoofdstuk 4.3 komen de resultaten aan bod van wat de uitwerking is van doel 2. Eerst de uitkomsten van de voorraad elektronica producten naar UNU_Key categorieën. Daarna komt de uitsplitsing naar soort materiaal. In het vervolg van dit hoofdstuk worden de uitkomsten van overige duurzame goederen gegeven naar MateriaalMonitor categorieën wat een uitwerking is van doel 3.

In hoofdstuk 4 staat een conclusie van de belangrijkste bevindingen. En als laatste in hoofdstuk 5 staat een lijst met aanbevelingen waarmee de uitkomsten verbeterd zouden kunnen gaan worden via vervolg projecten.

In Appendix 1 staan meer gedetailleerde tabellen van de gepresenteerde resultaten uit hoofdstuk 3.

4.2 Methode en data

4.2.1 Databronnen

De brondata zijn de Internationale Handel (IH) en Productie (Prodcom) statistieken afkomstig van het CBS. Deze bron bevat alle Nederlandse data, ook die het CBS vanwege geheimhouding niet mag publiceren. Conversietabellen zijn nodig om de goederenclassificaties uit deze bronnen om te zetten naar de publicatiegroepen (UNU_Keys voor elektronica en MateriaalMonitor Keys voor overige producten). Deze data is beschikbaar vanaf 2004 en wordt verder terug geëxtrapoleerd (tot 1980).

Daarnaast zijn er conversietabellen nodig om de niet-kilo-eenheden om te zetten naar kilo's. Deze tabellen worden door Eurostat beschikbaar gesteld (Eurostat (2019)). Hieronder worden alle hulptabellen die nodig zijn geweest om consistente cijfers te krijgen kort besproken.

A IH naar Prodcop

Deze koppeltabel bevat de links van de IH classificatie naar de Prodcop classificatie. In de meeste gevallen zijn er meerdere IH groepen die onder 1 Prodcop groep vallen. Maar dit kan soms ook omgekeerd zijn. Deze tabel vormt de basis om gegevens over IH te converteren naar Prodcop niveau.

B IH naar UNU_Key

Deze tabel bevat de conversie van IH classificaties naar UNU_Key classificaties.

C IH naar MateriaalMonitor Key

De IH data linkt via deze tabel naar de MateriaalMonitor indeling.

D Prodcop naar UNU_Key

Deze tabel bevat de conversie van Prodcop classificaties naar UNU_Key classificaties.

E Prodcop naar MateriaalMonitor Key

Deze tabel neemt de tabel uit C en combineert deze met A. Als onderliggende IH groepen naar verschillende MateriaalMonitor groepen verwijzen, dan wordt de MateriaalMonitor groep gekozen waar het meeste naar gelinkt wordt.

F Conversiefactoren IH

Dit gaat over de conversie factoren:

- Gewicht per 'supplementary unit' (rapportage eenheid, meestal stuks)
- Waarde in euro's per kg

Deze data is afkomstig van de Eurostat afdeling Internationale Handel. Data is beschikbaar voor 2009 en later en wordt gebruikt om het conversiefactoren voor Prodcop goederengroepen te berekenen. Zie hiervoor tabel G.

G Conversiefactoren Prodcop

De tabel uit E wordt geconverteerd naar Prodcop niveau met behulp van de tabel uit F. Deze Prodcop data is vaak niet in gewicht beschikbaar, dus de omrekening van rapportage eenheid naar gewicht of van waarde in euro's naar gewicht is hier van groot belang.

Net als bij de IH zijn ook bij de Prodcop de volgende twee conversiefactoren nodig:

- Gewicht per 'supplementary unit' (rapportage eenheid, meestal stuks)

- Waarde in euro's per kg

Als er meerdere IH groepen linken aan dezelfde Prodcod groep worden de factoren overgenomen van de IH groep die het meest lijkt op die uit de Prodcod. Dit gaat door eerst uit de tabel met conversiefactoren IH de waarde per rapportage eenheid te berekenen. Uit de Prodcod wordt ook de waarde per rapportage eenheid berekend. Deze twee waarden kunnen nu vergeleken worden en de conversie factoren van de IH classificatie waarbij de rapportage eenheid het meest lijkt op die uit de Prodcod worden dan overgenomen naar de bijbehorende Prodcod code.

H Stage of production

Deze tabel is afkomstig van Eurostat. Hij bevat de IH codes en laat dan zien of dit finale producten zijn of producten die nog verder bewerkt moeten worden. De volgende 3 codes worden onderscheiden:

- [SM_FIN] Stage of Manufacturing - finished products
- [SM_RAW] Stage of Manufacturing - raw products
- [SM_SFIM] Stage of Manufacturing - semi-finished products

Alleen IH codes die finale producten bevatten worden meegenomen in de berekeningen omdat deze in de voorraden terecht komen. Er wordt verondersteld dat ruwe en halffabricaten alleen worden ingezet voor het maken van andere producten.

I Lijst met parameters voor levensduur van op de markt gebrachte elektronica per UNU_Key

Deze lijst bevat de scale en shape parameters die nodig zijn om de op de markt gebrachte elektronica als e-waste te verdelen over de volgende jaren voor de publicatie naar UNU_Key. Deze verdeling gaat op basis van de Weibull verdeling.

J Lijst met parameters voor levensduur op de markt gebrachte goederen per MM

Deze lijst bevat de gemiddelde levensduur en standaarddeviatie parameters die nodig zijn om de op de markt gebrachte goederen als afval te verdelen over de volgende jaren voor de publicatie naar MateriaalMonitor. Deze verdeling gaat op basis van de Normale verdeling.

K Materiaal composities

De voorraad uitkomsten naar producten worden via deze conversiefactoren naar materialen verdeeld. Deze lijst is beschikbaar gesteld door UNU met data uit het ProSUM project (ProSUM, 2019). De materiaalcomposities zijn op een geaggregeerd niveau waarbij de 54 UNU_Key categorieën zijn ingedikt tot 6 categorieën.

4.2.2 Berekeningsmethode

De voorraden kunnen afgeleid worden door consumptiegegevens te combineren met levensduur. Voor de consumptie heb je dan wel een tijdreeks nodig die langer is dan de levensduur. De Prodcom statistiek bevat binnenlandse productiecijfers. De Internationale Handel statistiek bevat internationale handelscijfers. De consumptie wordt bepaald door de productie op te tellen bij de import en daar vervolgens de export van af te trekken. Uit berekeningen blijkt dat de invloed van de consumptie van lang geleden op de voorraden klein is.

Deze methode is een afgeleide van de methodiek van het ProSUM project (ProSUM, 2019) waaraan CBS eerder heeft meegedaan (Van Straalen, 2016). In het ProSUM project zijn internationale datasets van Eurostat gebruikt. Deze bevatten voornamelijk bij de productiecijfers soms lege cellen om onthulling van vertrouwelijke data tegen te gaan. In tegenstelling tot het ProSUM project gebruiken we dit keer Nederlandse Prodcom en Internationale Handel data direct uit de CBS bron waarbij beveiligde data ook beschikbaar zijn en de kwaliteit beter is. De internationale handels data is al beschikbaar in gewicht, dus er hoeft niet van stuks naar gewicht omgerekend te worden wat wel nodig is bij de Eurostat data die bij ProSUM wordt ingezet. De Nederlandse Internationale Handel data is echter wel pas vanaf 2004 beschikbaar. Voor 1995 t/m 2003 wordt daarom gebruik gemaakt van de Nederlandse Internationale Handeldata zoals gepubliceerd bij Eurostat. Voor deze jaren moeten stuks wel omgerekend worden naar gewicht. Dat heeft niet veel effect op de huidige voorraad doordat de meeste elektronica die in die jaren op de markt is gezet inmiddels al afval is geworden. Voor Prodcom wordt er gerapporteerd in niet-kilo eenheden die moeten worden omgezet via conversiefactoren.

Gemiddelde gewichten van de Internationale Handel data worden gebruikt om gerapporteerde hoeveelheden in stuks uit de Prodcom om te rekenen naar gewicht.

Uitzondering op deze methodiek zijn de zonnepanelen. Deze zijn berekend via conversiefactoren die het gewicht berekenen uit de geïnstalleerde capaciteit van zonnepanelen zoals opgenomen in de Eurostat tabel met nummer nrg_113a.

Met een tijdreeks van consumptiecijfers (verkoop van goederen) kan via levensduurprofielen de hoeveelheid afval worden afgeleid. Vervolgens is het verschil de voorraad (urban mine).

De hoeveelheid afval die per jaar vrijkomt wordt bepaald door een Weibull of normaal verdeling te zetten op de consumptiecijfers. De variabelen van de normaalverdeling zijn de levensduur en de standaarddeviatie en is daarmee makkelijker te gebruiken. De Weibull functie is echter realistischer voor het bepalen van de overlevingsfunctie van kapitaalgoederen (o.a. Meinen et al., 1998).

4.3 Resultaten

In paragraaf 4.3.1 staan de voorraad uitkomsten van de elektronica. Hierbij is de categorie indeling de UNU_Key. Zie voor deze indeling Tabel A.3 uit de Appendix. Van de uitkomsten van de elektronica voorraad is ook een verdeling naar de materialen waaruit ze bestaan gemaakt. In paragraaf 4.3.2 staan de experimentele uitkomsten van overige relevante categorieën in de indeling van de MateriaalMonitor. Hierbij is geen uitsplitsing naar gebruikte materialen gemaakt omdat er op dit moment geen informatie over de afzonderlijke materialen beschikbaar is.

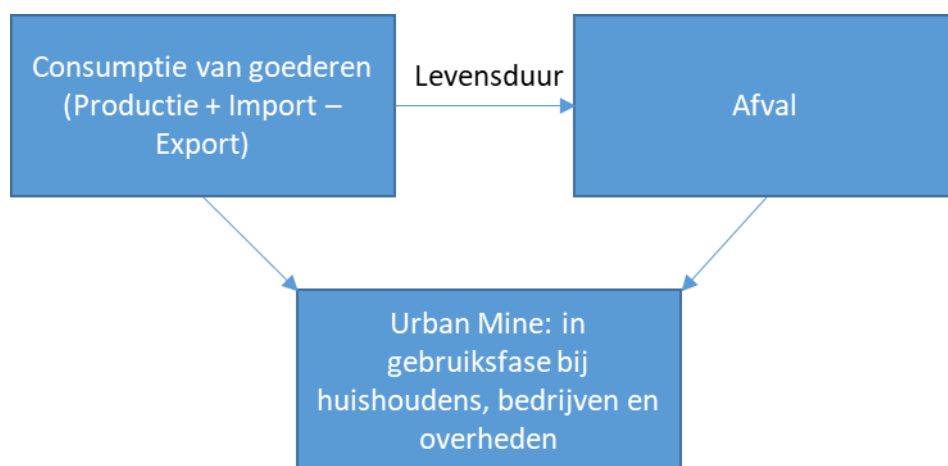
4.3.1 Elektronica

Deze uitkomsten bevatten de resultaten per UNU_Key. Hierbij zijn de elektronische producten in 54 groepen geïnclassificeerd waarmee deze indeling het meest bruikbaar is voor een gedetailleerd beeld van de voorraad elektronica.

Voor het bepalen van de hoeveelheid afval die vrijkomt uit historische consumptie (Put-on-market of POM) wordt hier de Weibull verdeling gebruikt met dezelfde parameters als een aantal jaren geleden voor het ProSUM project zijn gebruikt.

Hieronder zijn de voorraad cijfers voor 2017 opgenomen. Voor 2018 zijn bij het schrijven van dit rapport nog geen Internationale Handel cijfers beschikbaar in de benodigde indeling. De data van de 54 UNU_Key groepen is in Figuur 4.1 geaggregeerd naar de 6 hoofdgroepen uit de WEEE directive Annex III indeling (zie Tabel A.3).

Figuur 4.1 Voorraad elektronica in gewicht (t) per soort



De Large equipment categorie is inclusief 169.758 ton aan zonnepanelen. Zie Tabel A.4 in Appendix 1 voor een tabel met gewicht van de voorraad per UNU_Key.

Bepalen van cijfers over materialen in elektronica

De voorraad uitkomsten naar producten worden via conversiefactoren naar materialen en elementen verdeeld waarbij de elementen de meeste gedetailleerde eenheid zijn. Deze lijst is beschikbaar gesteld door UNU met data uit het ProSUM project.

Omdat de elementen en de materialen elkaar overlappen zijn de resultaten in twee aparte tabellen opgenomen. De hoeveelheden materiaal en elementen zijn op een geaggregeerd niveau weergegeven waarbij de 52 UNU_Key categorieën zijn ingedikt tot 6 categorieën. Cijfers op gedetailleerder niveau zullen een beter resultaat geven, maar de indeling in 6 groepen geeft ook voldoende kwaliteit voor dit project. In de onderstaande tabellen zijn de hoeveelheden materialen en elementen opgenomen. Hiervoor zijn weer de 6 hoofdgroepen uit de WEEE directive Annex III gebruikt als classificatie.

Tabel 4.1 Materialen per elektronica categorie

	Temperature exchange equipment	Screens, monitors, and equipment containing screens (..)	Lamps	Large equipment	Small equipment	Small IT and telecommunication equipment	Totaal
Materiaal	Gewicht materiaal (t)	Gewicht materiaal (t)	Gewicht materiaal (t)	Gewicht materiaal (t)	Gewicht materiaal (t)	Gewicht materiaal (t)	Gewicht materiaal (t)
AlloyTungsten	14	0		5	79	1	99
AlloyZinc	3.481	626		42	447	26	4.622
AluminiumAlloy	30.423	22.074	267	1.982	8.146	697	63.589
Brass	128	751		212	684	34	1.810
Bronze	98	15		14	630	24	780
CastIron	70.767	0	2	1.890	232	16	72.909
CopperAlloy	26.151	1.127		710	3.226	158	31.372
CrAlloy				206			206
Glass		7.770	706	4.650	3.221	1.167	17.515
NiAlloy	5	91		20	49	27	192
Plastic	211.075	101.672	265	6.976	26.501	17.386	363.874
StainlessSteel	202.987	2.930	24	5.635	4.312	428	216.316
Totaal Materialen	545.129	137.056	1.264	22.342	47.527	19.965	773.283
<i>Totaal Product</i>	<i>844.695</i>	<i>524.392</i>	<i>38.384</i>	<i>1.559.854</i>	<i>2.088.342</i>	<i>705.533</i>	<i>5.761.199</i>

Tabel 4.2 Elementen per elektronica categorie

	Temperature exchange equipment	Screens, monitors, and equipment containing screens (..)	Lamps	Large equipment	Small equipment	Small IT and telecommunication equipment	Totaal
Materiaal	Gewicht materiaal (t)						
Ag	0	32			1	2	35
Al	29.704	28.533	264	1.957	8.837	1.248	70.542
As	0	8		0	0	0	8
Au	0	7	0	0	0	0	8
Bi		9				0	9
Cd	0	1		0	0	0	1
Ce	0	3	0	0	0	0	4
Co	7	45	17	0	1	9	79
Cr			14	1.224			1.238
Cu	26.575	15.023	40	1.071	6.191	931	49.830
Dy	0	1	0	1	0	1	3
Fe	347.055	128.353	28	31.432	48.507	17.554	572.929
Ga	0	1	0	0	0	0	1
In	0	9	0	0	0	0	9
Mg	755	4.931	7	49	204	20	5.966
Mn	3.961	1.455	1	333	511	178	6.440
Mo	0	1		0	0	0	2
Nd	0	20	0	12	0	7	38
Ni	16.245	437	12	471	395	103	17.663
Pb	14	15.190		3	20	38	15.265
Pd	0	1	0	0	0	0	2
Pr	0	3	0	0	0	1	5
Si		27.238					27.238
Sn	64	482	0	4		76	626
Sr	160	3.835	0		46		4.041
Ta	0	11	0	0	0	0	12
W	43	10	6	5	88	2	153
Y	0	1	2	0	0	0	4
Zn	3.410	1.568	0	104	755	80	5.917
Zr		728				0	728
Totaal Elementen	427.992	227.939	392	36.667	65.557	20.252	778.799
<i>Totaal Product</i>	<i>844.695</i>	<i>524.392</i>	<i>38.384</i>	<i>1.559.854</i>	<i>2.088.342</i>	<i>705.533</i>	<i>5.761.199</i>

De ProSUM data bevat geen informatie over overige materialen en/of elementen die deel uitmaken van de totale producten.

Data kwaliteit UNU_Key categorieën

Deze data uit de voorgaande tabel is volledig afkomstig uit de data van Nederlandse Prodcum en Internationale Handelsdata. In tegenstelling tot de ProSUM methodiek hoefden er geen beveiligde waardes ingeschat te worden. Correcties op basis van data van andere landen was hierdoor ook niet nodig.

Als we de Put-on-market (POM) uitkomsten vergelijken met die van de ProSUM data zien we dat deze bij de meeste van de 52 categorieën vrij goed vergelijkbaar zijn. Echter bij de categorieën 0202 (Equipment for food preparation), 0203 (Small household equipment for hot water preparation), 0304 (Printers) en 0306 (Mobile Phone) zijn onze uitkomsten onrealistisch hoog. Deze hoge waarden zijn over de hele periode consistent hoog in de internationale handelsdata. De reden hiervoor is nog onbekend en kan in een vervolgproject nader bekeken worden.

Wat het totaal van de overige elektronica categorieën betreft zijn de uitkomsten goed vergelijkbaar. En als extra is er nu ook wat data aanwezig over categorie 0703 (Leisure equipment) waar de zonnebedden onder vallen. Deze producten zijn door beperkingen in de Eurostat data niet opgenomen in de ProSUM data.

Als we de gewichten via gemiddelde gewichten omrekenen in stuks en uitdrukken in aantal per inwoner of per huishouden, geeft dat een indruk van de betrouwbaarheid. In Tabel A.5 in Appendix 1 staan deze cijfers voor het jaar 2017 waarbij is uitgegaan van 17.140.000 inwoners en 7.800.000 huishoudens. De data is per huishouden en inwoner, maar bevat ook de voorraad aanwezig in bedrijven en stuks die niet meer gebruikt worden, maar nog geen afval zijn geworden. Deze tabel berekent de stuks uit het gewicht via gemiddelde gewichten van nieuwe producten uit 2017. Niet het gemiddeld gewicht ten tijde dat de producten op de markt gebracht zijn.

In deze tabel staan veel aannemelijke waarden zoals de vaatwassers op 0,68 per huishouden, koelkasten met 1,8; stofzuigers met 1,7; persoonlijke verzorging van 5,7; CRT monitoren van 0,6 en platte monitoren van 3,5. Dat klinkt wel aannemelijk. Bij de wasmachines is het er 0,9 per huishouden. Daar wordt toch wel 1 verwacht. Misschien is het gemiddeld gewicht ook niet precies genoeg bij deze gebruikte methode. Verder lijken de lampen armaturen met 248 stuks en de vuur en inbraakalarmen met 31 per huishouden wel heel hoog. De desktops met 1,1 per persoon klinkt vrij hoog, maar die worden bij bedrijven nog wel veel gebruikt en gezien het aantal beeldschermen van ongeveer 1,8 klopt dat wellicht wel. De laptops/tablets met 5,6 per persoon lijkt ook aan de hoge kant net zoals de mobiele telefoons met 14,2 al tellen de aantallen in bedrijven dus ook mee. Oude mobieltjes blijken vaak bewaard te worden, waarmee ze dus in de voorraad aanwezig blijven. Hetzelfde geldt wellicht ook voor oude tablets.

In de tabel zijn de kleuren groen, geel en rood opgenomen als eerste indicatie of de uitkomsten goed, redelijk of slecht lijken. De afweging is gemaakt op basis van of de aantallen per persoon/huishouden

aannemelijk lijken en of de uitkomsten dichtbij de ProSUM uitkomsten over 2017 liggen. De ProSUM data waarmee is vergeleken zijn de berekeningen gedaan in 2017 waarbij 2015 het laatste jaar was waarvoor toen data beschikbaar was en waaruit de 2017 cijfers zijn geëxtrapoleerd. Voor PV panelen is geen kleur weergegeven. Voor deze categorie maken we gebruik van dezelfde methodiek als ProSUM waarbij data over 2017 een schatting is van een aantal jaren gelden. Data is afkomstig uit een Eurostat tabel, maar daar zijn op dit moment nog geen nieuwe cijfers uit beschikbaar.

De met onze methodiek gemaakte POM data kan ook vergeleken worden met de POM data van het Nationaal WEEE Register (Nationaal WEEE Register, 2019). Dit is in Tabel A.6 in Appendix 1 opgenomen. Alleen classificaties die vergeleken kunnen worden zijn in de tabel opgenomen. Het is nooit perfect vergelijkbaar vanwege verschillen in de classificaties en de producten die tot een klasse worden gerekend. Toch geeft het een indicatie voor de kwaliteit. We zien hier dat de zonnepanelen (UNU_Key 0002) lager zijn, maar hier zijn onze cijfers niet goed vergelijkbaar omdat de 2017 cijfers nog niet in Eurostat tabel zijn opgenomen. Het betreft nu een forecast schatting die een aantal jaren geleden is gemaakt. Het gewicht aan koelkasten/vriezers (0108/0109) komt aardig overeen. Elektronische gereedschappen (06*) en platte televisies (0408) ook. Kleine huishoudelijke apparaten (02*) zijn bij ons veel hoger, als wat ook al bleek in de vergelijking met de ProSUM data. De POM aan platte computerschermen (0309) was in 2017 ongeveer dubbel zo hoog in onze data.

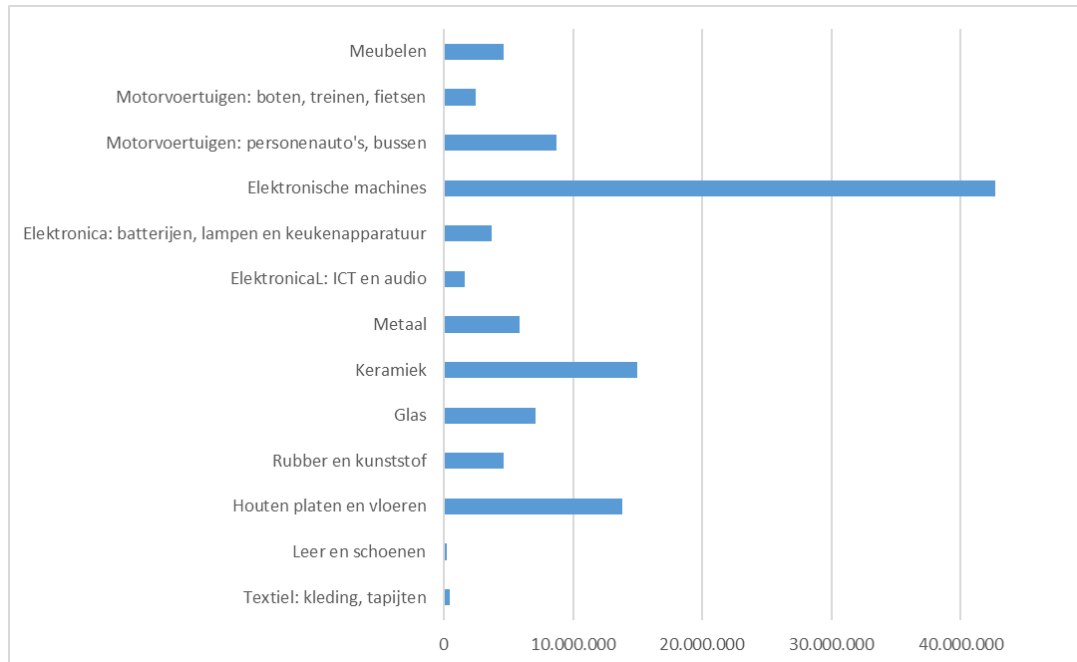
4.3.2 Goederengroepen uit de MateriaalMonitor

Nieuw voor dit project is de aggregatie van de cijfers naar de goederengroep-classificatie van de MateriaalMonitor (MM) (Berkel en Delahaye, 2019). Om een integrale database, zoals voorgesteld in het GRondstoffen Informatie Systeem, GRIS), te hebben met “voorraden”, “stromen” en ook “composities” is het belangrijk dat de goederengroep-classificatie van de berekende voorraden aansluiten bij de stromen uit de MateriaalMonitor (MM). Om dit voor elkaar te krijgen worden in de eerste plaats de goederengroepen uit de internationale handel (CN codes) aan de MM goederengroepen gelinkt via een sleuteltabel. De Prodcom codes worden via de koppeling tussen CN codes en Prodcom codes ook gekoppeld aan de MM goederengroepen. Wel is het zo dat de codes elk jaar wat kunnen veranderen. Voor elk jaar moet dus gekeken worden of er veranderingen in bepaalde codes hebben plaatsgevonden.

Voor het bepalen van de hoeveelheid afval die vrijkomt uit historische POM wordt hier de normaal verdeling gebruikt. Deze zijn gevuld voor alle relevante MM goederengroepen waardoor de voorraden ook voor al deze groepen uitgerekend kunnen worden. De gemiddelde levensduur en standaarddeviatie parameters voor de MM goederengroepen zijn niet meer dan een eerste schatting. Meer onderzoek is nodig om deze beter te maken. Wat dit lastig maakt is dat de MM goederengroepen uit veel verschillende soorten producten bestaan. Het zou misschien beter zijn om voor de onderliggende producten de voorraad te bepalen (met een eigen levensduurprofiel) en deze daarna op te tellen tot de MM goederengroep.

In de volgende grafiek staat de verdeling van de voorraden van 13 groepen van relevante MateriaalMonitor categorieën over 2017. Dit betreft een eerste schatting en geen definitieve cijfers. De methodiek van de elektronica is hier ook toegepast op overige productgroepen. Zie ook paragraaf 3.1.2 en hoofdstuk 5.

Figuur 4.2 Voorraad in gewicht (t) MateriaalMonitor groepen, eerste schatting



Zie Tabel A.7 in Appendix 1 voor een tabel met voorraad cijfers voor alle 73 relevante MateriaalMonitor categorieën.

Voor de producten onder de MateriaalMonitor indeling is op dit moment geen informatie over de afzonderlijke materialen beschikbaar.

4.4 Conclusies

De volledig geautomatiseerde berekeningsmethode is geschikt om integraal voor alle duurzame consumptiegoederen de voorraden van producten in de economie te schatten. Plausibiliteit controles maken ook onderdeel uit van de programmatuur.

Gegevens over samenstelling van producten kan geïntegreerd worden in de berekeningsmethode zodat ook de voorraden van de materialen in de producten kan worden geschat. Voor de elektronica is dit al gebeurd.

De berekeningsmethode maakt gebruik van reguliere statistieken waardoor updates en consistentie van de resultaten in de tijd gewaarborgd is.

Met de methode kan ook een schatting worden gemaakt over de materialen die de komende jaren vrijkomen zolang er data beschikbaar is over de samenstelling.

Aansluiting met de goederen uit de MateriaalMonitor is mogelijk en daarmee de integratie in het GRIS. Veranderingen in de voorraad kunnen in theorie ook geschat worden aan de hand van de goederen en afvalstromen in de MateriaalMonitor.

De gebruikte brondata wordt ook door andere EU landen verzameld. Met wat aannames voor cijfers die niet publiekelijk beschikbaar zijn (cijfers die geheim moeten worden gehouden) kan deze methode dan ook voor andere landen worden toegepast.

4.5. Aanbevelingen

4.5.1 Betere informatie nodig over levensduur en standaarddeviatie

Levensduurprofiel voor de MM goederengroepen is nu een grove schatting en onderzoek is nodig om dit te verbeteren. Verder moet bekeken worden of de goederengroepen in de MM misschien te inhomogeen zijn om hier een levensduur en standaarddeviatie voor te bepalen. Dit zou betekenen dat de voorraden eerste voor onderliggende goederen moet worden bepaald en die dan later geaggregeerd worden tot de goederenindeling in de MM.

4.5.2 Informatie nodig over samenstelling producten om zo van producten naar materialen te komen

Voor de producten in de MM goederenindeling is nog geen onderverdeling naar Materialen beschikbaar. Hier kan wellicht ook aansluiting worden gezocht bij het TNO onderzoek naar “kritieke materialen”.

4.5.3 Onderzoek nodig naar aantal classificaties met vreemde uitkomsten

Bij een aantal elektronica categorieën zoals 0202 (Equipment for food preparation), 0203 (Small household equipment for hot water preparation), 0304 (Printers) en 0306 (Mobile Phone) zijn onze uitkomsten onrealistisch hoog. De Internationale Handel data is hier consistent te hoog. Verder onderzoek is nodig om te zien waar dit aan ligt en of het verbeterd kan worden.

4.5.4 Aansluiting met de hoeveelheden goederen en afvalstromen in de MateriaalMonitor moet nog eens goed onderzocht worden.

In principe zou de POM - die aan de basis ligt van de cijfers in dit rapport - welke per MM goederengroep wordt berekend uit Prodcop en IH data overeen moeten komen met het gebruik finale gebruik van deze producten in de MM. De verschillen tussen deze cijfers zou nog eens uitgezocht moeten worden. Een verschil met de methode uit dit rapport en de MM is dat 1) de MM totale productie en gebruik bevat terwijl Prodcop een steekproef is, 2) in de MM is het aanbod gelijk gesteld aan het gebruik (en dit vereist aanpassingen van de cijfers) terwijl Prodcop alleen naar de productie kijkt. Wat de vergelijking ook lastig maakt is dat in de MM goederengroepen soms, naast finale producten, ook onderdelen (niet finale producten zitten) bevatten terwijl niet-finale producten in de methode in dit rapport buiten beschouwing zijn gelaten.

Wat ook interessant zou zijn om te bekijken is hoe het vrijgekomen afval zoals berekend in dit rapport overeenkomt met de afvalproductie zoals die in de afvalstatistieken (en dus ook de MM) wordt waargenomen. Dit zou redelijk overeen moeten komen. Misschien kan de methode in dit rapport een schatting maken van secundaire materialen die vrijkomen maar die (in de toekomst) vanwege wetgeving buiten de afvalrekeningen vallen.

5 Case study Voertuigen

5.1 Inleiding

Het onderzoek naar voertuigen is geen onderdeel geweest van de opdracht, maar is in aanvulling daarop uitgevoerd als MSc thesis project van de Leids-Delftse opleiding Industrial Ecology, gecombineerd met een stage bij PBL. De MSc thesis rapportage (van der Zaag, 2020) komt begin 2020 beschikbaar en zal toegevoegd worden als bijlage bij dit rapport.

In dit onderzoek is een breed palet aan voertuigen meegenomen. Het idee is geweest een zo compleet mogelijk overzicht te genereren:

- Personenauto's en vrachtauto's
- Treinen voor personenvervoer
- Bussen
- Fietsen en brommers
- Zeeschepen en binnenvaartschepen
- Vliegtuigen

Ook binnen genoemde categorieën is nog onderscheid gemaakt naar verschillende typen of groottes van de voertuigen.

Trams, metro's en goederentreinen zijn niet geïnventariseerd. De gegevensverzameling voor deze categorieën kan beter op lokaal niveau plaatsvinden.

Hoewel het onderzoek een bredere scope had – zo is bijvoorbeeld gekeken naar mobiliteitsscenario's voor Nederland – wordt hier uitsluitend de inventarisatie van de voorraden gerapporteerd. In het onderzoek zijn tijdreeksen van 2000 tot 2017 gespecificeerd, om ook de ontwikkeling te laten zien die in het recente verleden heeft plaatsgevonden. Tevens kan deze tijdreeksen worden gebruikt voor een stock dynamics model, om ook uitstromen te kunnen berekenen.

5.2 Methode en data

De methode die gebruikt is, is een bottom-up rechtstreekse inventarisatie van de voorraden. Van genoemde voertuigen is een inventarisatie gemaakt van:

- het aantal voertuigen dat op dit moment in gebruik is
- het gewicht van deze voertuigen
- de samenstelling van deze voertuigen in termen van de materialen waar zij uit bestaan.

De gegevens omtrent het aantal voertuigen zijn zoveel mogelijk betrokken van standaard statistische bronnen. Deze bleken voor een aantal categorieën voldoende. Voor andere categorieën, met name schepen en vliegtuigen, is aanvullende informatie verzameld bij de beherende instanties. De minst toegankelijke data was over treinen, waar zelfs de rapportage van het Nationaal Voertuigregister voor Spoorvoertuigen van de Inspectie Leefomgeving en Transport onvoldoende bleek. Voor met name vliegtuigen en zeeschepen is afbakening nodig om vast te stellen welke bij Nederland horen. Voor vliegtuigen zijn uitsluitend de exemplaren meegenomen die geregistreerd staan in het Nederlands luchtvaartregister, herkenbaar aan het zgn. PH-nummer. Voor zeeschepen zijn schepen die zowel varen onder Nederlandse vlag, als onder Nederlands beheer vallen, meegenomen.

Gewichten zijn betrokken uit een variëteit van bronnen, met name de eco-invent database (Wernet, 2016), de eerder genoemde beherende instanties en andere bronnen van technische specificaties zoals het GREET 'Vehicle-Cycle' model van (Burnham, 2012).

De eco-invent database, of eigenlijk de achtergrondrapportages die bij deze database behoren, is de belangrijkste bron voor de data over de samenstelling van de voertuigen.

5.3 Resultaten

5.3.1 Aantallen voertuigen

Onderstaande tabel laat het aantal voertuigen zien, in geaggregeerde categorieën, in Nederland, voor 2017. Alleen voor pleziervaartuigen is 2014 genomen, aangezien de enige inventarisatie voor dat jaar is geweest.

Tabel 5.1 Aantallen voertuigen in verschillende categorieën, Nederland, 2017.

	2017
Vliegtuigen	521
Fietsen	25824200
Personenauto's	8225750
Binnenvaartschepen	5067
Pleziervaartuigen	210988*
Zeeschepen	1458
Treinen en bussen	107547
Vrachtwagens	926308

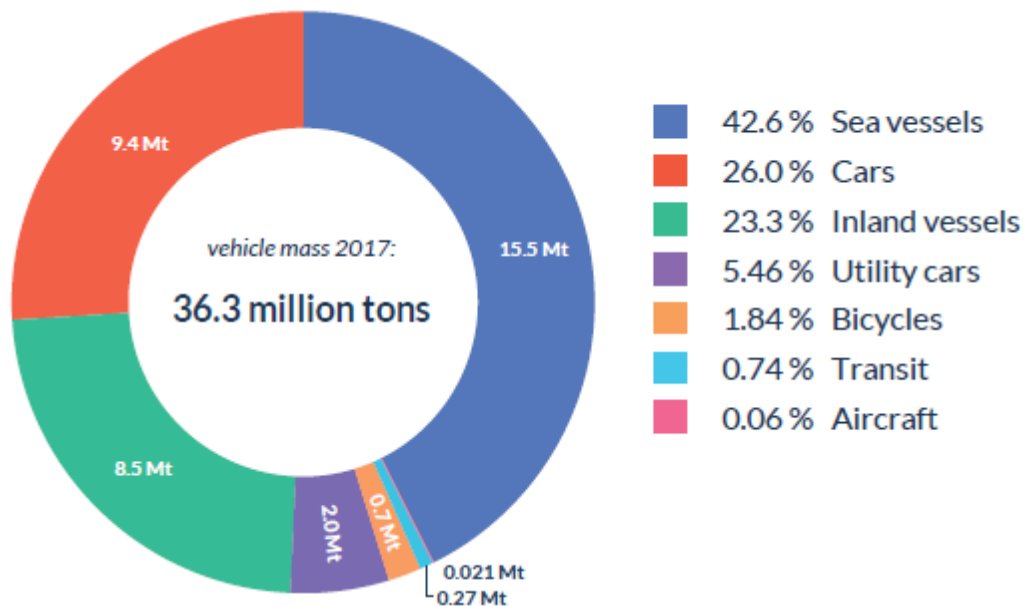
*getal voor 2014 (eenmalige inventarisatie)

Veruit de grootste aantallen betreft de fietsen: meer dan 1 fiets per Nederlander. Tweede in omvang is personenauto's, pakweg 1 auto per 2 Nederlanders rijdt op de weg. Daarna volgen vrachtwagens en, opvallend genoeg, pleziervaartuigen: maar liefst 1% van de Nederlanders bezit een pleziervaartuig. Bij vliegtuigen, schepen en openbaar vervoer gaat het om veel kleinere aantallen. Wel zijn deze voertuigen veel groter en zwaarder.

5.3.2 Gewicht van de voertuigen

In totaal komt deze inventarisatie uit op een gewicht van 35.7 miljoen ton voor alle voertuigen gezamenlijk, zoals weergegeven in onderstaande figuur 5.1.

Figuur 5.1 Gewicht van voertuigen in Nederland, 2017



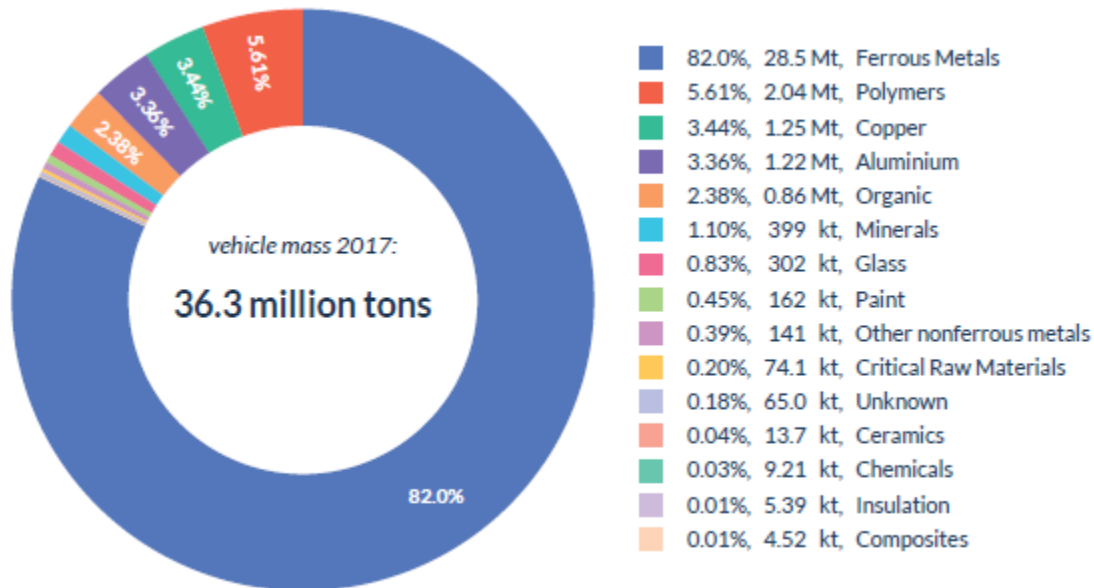
In deze figuur staat "Cars" voor personenauto's, terwijl "Transit" het totaal aan bussen en treinen vertegenwoordigt.

Hoewel niet groot in aantal, vormen schepen wel de grootste bijdrage aan het totale gewicht van de voertuigen. Maar liefst twee derde van het totaal gewicht betreft schepen. Daarna volgt de categorie personenauto's – net iets meer in gewicht dan de binnenvaartschepen. Fietsen, hoewel verreweg het meest in aantal, zijn klein in gewicht. Vliegtuigen zijn in deze figuur nauwelijks zichtbaar: hoewel groot, zijn het er maar weinig en zijn ze aanzienlijk minder zwaar dan schepen.

5.3.3 Materialen in de voertuigen

Zoals blijkt uit Figuur 5.2, bestaan voertuigen voornamelijk uit metalen, en dan vooral ijzer en staal (ca. 85%).

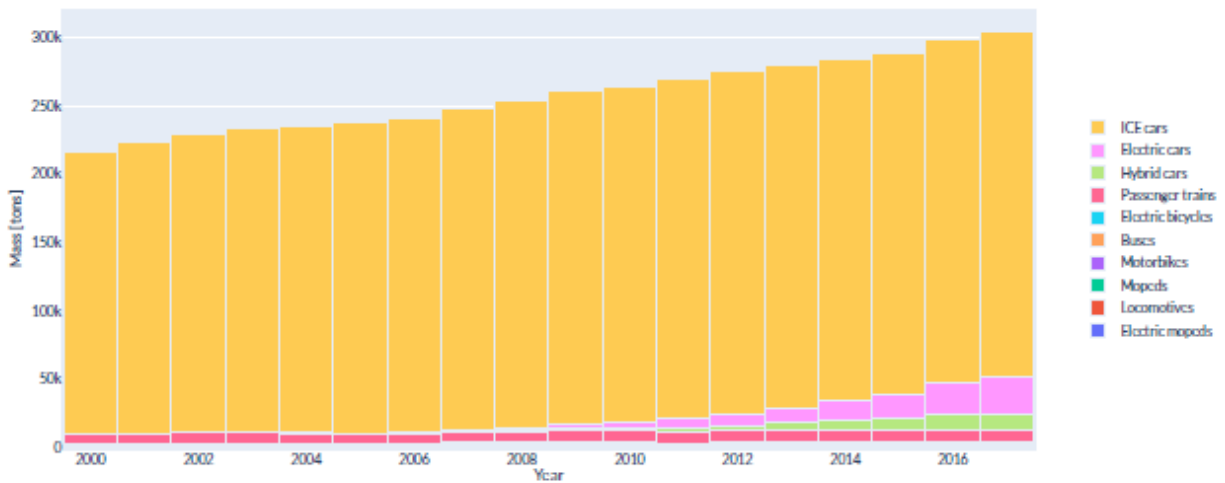
Figuur 5.2 Materialen in Nederlandse voertuigen, 2017



Voor schepen, alle categorieën auto's, en voor de openbaar vervoer-voertuigen is staal de belangrijkste basis. Vergeleken met de andere twee voorraden uit dit rapport, het elektriciteitsnet en de elektronica, is het gewicht aan staal in voertuigen een factor 20 groter. Ook voor koper en aluminium zijn voertuigen de grootste voorraad, maar slechts met een factor 2 à 3 verschil vergeleken bij het elektriciteitssysteem. Kleinere schaal metalen, m.n. kritische materialen, zijn voor de voorraad aan voertuigen niet onderzocht. In omvang vormen deze verhoudingsgewijs een klein aandeel, maar het belang van deze materialen kan desondanks groot zijn. Evenals voor het elektriciteitssysteem geldt, dat een omschakeling naar elektrisch rijden de vraag naar, en op termijn ook de voorraad van, kritische materialen flink kan doen stijgen.

Aluminium vinden we vooral in vliegtuigen en fietsen. Koper is in vrijwel alle voertuigen te vinden, en is een groeiende toepassing: elektrische auto's en elektrische fietsen bevatten veel meer koper dan hun traditionele voorgangers, en zijn een groeiende markt. Figuur 5.3 laat zien hoe zich dit door de tijd heen heeft ontwikkeld voor de weg- en railvoertuigen, onder bepaalde aannames. In de toekomst zal deze groei zich naar verwachting voortzetten.

Figuur 5.3 Ontwikkelingen in kopergebruik voor weg- en railverkeer, 2000 - 2017



5.4 Discussie en conclusies

Uit de inventarisatie blijkt dat de voorraden van metalen in voertuigen groot is. De levensduur van deze voorraad verschilt uiteraard per type voertuig – schepen, vliegtuigen en treinen gaan lang mee, terwijl auto’s en fietsen een kortere levensduur hebben. Een kortere levensduur samen met een grote voorraad betekent dat ook de stromen uit deze voorraad groot kunnen zijn. Het verdient daarom aanbeveling na te gaan wat er met de uitstroom gebeurt. Auto’s in Nederland worden goed gerecycled, maar een belangrijk deel van de afgedankte auto’s wordt niet in Nederland verwerkt: , naar schatting de helft (BOVAG-RAI, 2018). In plaats daarvan wordt het geëxporteerd, deels om als tweedehands auto elders een nieuw leven te beginnen. Afgedankte schepen, de grootste voorraad, worden niet in Nederland verwerkt. Wellicht kan dit onder een circulaire economie beleid heroverwogen worden.

Het onderzoek naar aantallen voertuigen, inclusief de ontwikkelingen in het verleden, geeft o.i. een goed beeld. De materialencomponent is nog onvoldoende uitgewerkt. De eco-invent database die gebruikt is, is voor sommige categorieën best goed (auto’s) maar voor andere erg schetsmatig (vliegtuigen). Ook bevat de database geen veranderingen in de tijd, waardoor innovaties niet goed zichtbaar worden. Tenslotte ontbreken in deze inventarisatie kritische materialen, die voor vliegtuigen en voor elektrische auto’s en fietsen zeker belangrijk zijn. Hieraan zal in een vervolgonderzoek nader aandacht besteed moeten worden.

6 Conclusies, discussie, aanbevelingen

6.1 Conclusies

Deze verkenning naar voorraden in de maatschappij is bemoedigend. Voor alle drie de voorraden die bekeken zijn in het kader van dit project – het elektriciteitssysteem, elektronica en voertuigen – zijn we erin geslaagd tot een redelijke eerste schatting te komen van de aard en omvang. Zowel voor de producten als voor een aanzienlijk aantal materialen en elementen hebben we eerste inschattingen kunnen maken.

Belangrijke voorraden van basismetalen koper en aluminium, en het leeuwendeel van de kritische en specialiteit-metalen, kan in genoemde voorraden gevonden worden. Voor beton en staal zijn vermoedelijk andere voorraden, zoals de gebouwde omgeving en transportinfrastructuur, belangrijker.

De in dit onderzoek gemaakte kwantificering betreft een eerste inschatting. Op den duur is het belangrijk nauwkeuriger cijfers te genereren om een preciezer beeld te creëren van de bruikbaarheid van deze stedelijke mijn. In 6.2 wordt ingegaan op de onzekerheden, haken en ogen van deze exercitie en wordt een interpretatie van de resultaten toegevoegd. In 6.3 worden aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek.

Dit onderzoek naar voorraden is een eerste stap naar het in kaart brengen van de mogelijkheden om Nederlandse economie te transformeren naar een circulaire economie. Deze voorraden zijn als het ware de grondstof voor een circulaire economie. Vervolgvragen zijn gerelateerd aan

- (1) De dynamiek van deze mijn, die totaal anders is als die van geologische mijnen
- (2) De bruikbaarheid van de producten en materialen die uit deze mijn komen
- (3) De voorwaarden waaronder deze geëxploiteerd kunnen worden in termen van infrastructuur, technologieën en verdienmodellen.

Voorraden in de maatschappij verdienen een centrale plaats in een monitorings- en modelleringssysteem ter ondersteuning van een circulaire economie. In inventarisaties tot nu toe worden voorraden onderbelicht. De focus op stromen is logisch vanuit de huidige economische analyses, maar kan beschouwd worden als de uitkomst van een black box. Stromen zijn het resultaat van voorraaddynamiek. Om begrip te krijgen voor het systeem van materialen in de maatschappij is kennis van deze voorraaddynamiek essentieel. Datzelfde geldt daarmee voor het genereren van toekomstscenario's voor grondstofgebruik. Zonder de dimensie van de voorraaddynamiek is het niet goed mogelijk zulke scenario's door te rekenen op hun effectiviteit vanuit oogpunt van de circulaire economie.

6.2 Discussie

6.2.1 Discussie: data en onzekerheden

Een eerste constatering is dat het mogelijk bleek een inschatting te maken van de omvang van de drie voorraden waarover gerapporteerd wordt – het elektriciteitssysteem, elektronica en voertuigen. Gezien het feit dat het om heel verschillendsoortige voorraden gaat biedt dat goede hoop dat ook voor andere voorraden zo'n inschatting mogelijk zal zijn.

Een volgende constatering is dat de gegevensbasis voor deze inschattingen niet bepaald gestandaardiseerd is. Voor bepaalde onderdelen zijn goede statistische gegevens beschikbaar, zoals bijvoorbeeld de elektriciteitsopwekking in termen van de verschillende technologieën, het wegverkeer, en de handelstatistieken met betrekking tot de elektronica. Voor andere aspecten moest – deels informele – informatie gehaald worden bij de betreffende bedrijven, zoals de elektriciteitsleveranciers voor het kabelnet, de NS voor treinen, en de KLM voor vliegtuigen.

Bovenstaande betreft de producten waar de materialen in zijn toegepast. Om vervolgens een inschatting te maken van de materialen zijn gegevens nodig over de samenstelling van deze producten. Die gegevens worden niet standaard verzameld. Er zijn incidenteel inventarisaties gemaakt die we hebben kunnen gebruiken. Deze houden geen rekening met verschillen binnen de productgroep, en ook niet met het feit dat de samenstelling van producten kan veranderen in de tijd. Voor elektronica is gebruik gemaakt van data uit het ProSUM project, een Europese database over elektronica. Voor kabels is gebruik gemaakt van gegevens van de netbeheerders. Voor veel van de overige producten is gebruik gemaakt van de ecoinvent database, een Life Cycle Inventory database die (soms versimpelde, soms verouderde) informatie biedt over de samenstelling van producten om LCA studies mogelijk te maken. De grootste onzekerheden bij het rechtstreeks inschatten van de voorraad zijn dus gelegen in de materialensamenstelling.

Bij een indirecte inschatting van voorraden op basis van stroomgegevens komt er nog een andere grote onzekerheid bij: de inschatting van de levensduur van de producten. Deze is nodig om de uitstromen te bepalen, en daarmee ook de omvang van de voorraad: een langere levensduur betekent een grotere voorraad. Levensduren zijn slecht in kaart gebracht en kunnen enorm variëren. Hoe langer de levensduur, des te groter ook de spreiding daarin. Om die reden wordt modelmatig vaak gewerkt met een levensduurverdeling, hoewel dit vaak een aangenomen verdeling is en niet op waarnemingen gebaseerd. Datzelfde geldt overigens in veel gevallen voor de levensduur zelf: deze is in veel studies een grove inschatting en niet gebaseerd op empirische gegevens.

Voor extreem lang levende producten zoals gebouwen, wegen of elektriciteitskabels kan het beter zijn te werken met “obsolescence planning”: een geplande vervanging door de beheerende instantie.

Een complicerende factor is verder nog het verschijnsel van “hibernating stock”. Hierbij gaat het om producten die niet langer gebruikt worden, maar ook niet ter verwerking zijn aangeboden aan afvalverwerkers of recyclers. Voorbeelden zijn oude elektronica die bij mensen thuis in laatjes of op

zolder zijn opgeslagen, of – zo blijkt gaat hier hierbij om aanzienlijke hoeveelheden – kabels die wel vervangen maar niet weggehaald worden en gewoon in de grond blijven liggen. Dit verschijnsel maakt het lastig om levensduren empirisch te bepalen. Wel duidt het op een voorraad die onmiddellijk beschikbaar is, en daarmee interessant vanuit oogpunt van “urban mining”.

6.2.2 Discussie: methode

In het onderzoek zijn twee benaderingen gebruikt om een inschatting te maken van de voorraden in de maatschappij: een benadering gebaseerd op stromen, waarbij de voorraad wordt geschat als de cumulatieve net-addition-to-stock, en een rechtstreekse inventarisatie van de voorraad zelf, waarbij geen in- en uitstromen worden bepaald. In principe zijn beide benaderingen correct en zouden idealiter tot dezelfde resultaten moeten leiden. In de praktijk is gebleken dat er toch wel redenen kunnen zijn voor de keuze voor de ene of de andere benadering.

De stroomgebaseerde benadering is het meest nuttig wanneer het gaat om producten waarvoor de handels- en productiestatistieken goed zijn, de afvalstatistieken goed zijn, en de levensduur kort is. In zulke gevallen kan een redelijke schatting gemaakt worden gebaseerd op (openbare en) beschikbare statistieken, en is een aparte arbeidsintensieve voorraadschatting niet nodig. Voor consumentenelektronica was dit het geval.

De rechtstreekse benadering werkt het best voor voorraden met een lange levensduur, en voorraden waarvoor geldt dat de afdanking (en aanvulling) eerder planmatig verloopt. Dit is het geval voor gebouwen en vooral voor infrastructuur. Netbeheerders beslissen over nieuwe kabels, kabels worden niet vervangen omdat hun levensduur voorbij is maar, bijvoorbeeld, omdat de capaciteit niet meer voldoende is. Data over in- en uitstromen zijn daarmee niet rechtstreeks te relateren aan voorraadgegevens, en daarmee is de stroomgebaseerde benadering voor dit type voorraden moeilijk toepasbaar.

Het kan interessant zijn om beide benaderingen te checken via de ander. Komen voorraadschattingen die via verschillende routes zijn gemaakt met elkaar overeen? En de in- en uitstroomschattingen? Kan de ene benadering gebruikt worden om de ander aan te vullen of te valideren?

6.2.3 Discussie: voorraden in de maatschappij

Het onderzoek naar voorraden in de maatschappij is nieuw. Eén van de doelen van dit project was, te zien of het eigenlijk wel mogelijk zou zijn hiervan redelijke inschattingen te maken. Voor de gekozen voorraden bleek dat inderdaad wel mogelijk te zijn. Het was niet mogelijk te volstaan met statistiek, maar met aanvullende gegevens uit allerlei hoeken en gaten bleek het toch mogelijk een inschatting te

maken die in de goede orde grootte zit. Onder het hoofdje Aanbevelingen geven we een overzicht van wat er nodig is om de inschatting nauwkeuriger en betrouwbaarder te maken.

Een tweede doel was, te inventariseren of de Nederlandse stedelijke mijn de moeite waard is. Het antwoord daarop weten we natuurlijk pas als ook andere belangrijke voorraden in kaart zijn gebracht. Wel kunnen we constateren dat er aanzienlijke hoeveelheden mineralen en metalen in de drie onderzochte voorraden te vinden zijn. Voor beton en staal komen de schattingen voor deze voorraden in de orde van de miljoenen tonnen uit. Deze voorraden zijn waarschijnlijk klein vergeleken bij die in de gebouwde omgeving. Ook voor aluminium en koper worden de voorraden van voertuigen en het elektriciteitssysteem in de orde van de miljoenen tonnen geschat. Ook in absolute zin is dat veel, vergelijkbaar met of zelfs meer dan de voorraden in gebouwen. Kritische materialen zijn vooral te vinden in elektronica en in zon- en windenergie technologieën. De hoeveelheden zijn veel kleiner – duizenden tot tienduizenden tonnen.

Is dat veel of weinig? Daarvoor moeten we de getallen in perspectief plaatsen. We nemen koper als voorbeeld.

Vergeleken met de huidige schatting van de wereldwijde kopervoorraad in de grond is onze stedelijke mijn niet groot – de geschatte wereldreserves liggen in de honderden miljoenen tonnen, drie orde groottes meer, pakweg 100 kg per wereldburger. De jaarlijkse wereldproductie van koper ligt momenteel rond de 20 miljoen ton, ook beduidend hoger dan de Nederlandse voorraad. Maar Nederland is een klein land – het bevat enkele promillen van de wereldbevolking, en het Nederlandse GDP ligt in de orde van 1% van het wereldtotaal. Vanuit dat oogpunt is de stedelijke mijn ineens weer aanzienlijk en is zelfs vergelijkbaar met de wereldwijde koperreserves, pakweg 100 kg per Nederlander, alleen voor deze drie voorraden. De Nederlandse kopervraag is in de orde van tienduizenden tonnen per jaar. Ook vanuit dat oogpunt is de kopervoorraad aanzienlijk: twee orde groottes meer.

Het lijkt erop dat de constatering van Graedel et al. (2013), namelijk dat de bovengrondse voorraden momenteel in dezelfde orde grootte liggen als de ondergrondse, terecht is. En daarmee, dat de stedelijke mijn (althans voor koper) een zeer significante bron van materialen zou kunnen zijn voor een circulaire economie.

Van belang is uiteindelijk hoeveel er uit deze voorraad teruggewonnen kan worden op jaarlijkse basis. De uitstroom van afgedankte producten uit de voorraad is dan een cruciale variabele. Deze hangt af van de voorraad, en voorraadopbouw in de tijd, en de levensduur van de toepassingen. Ook het feit of de voorraad nog in de groeifase verkeert is van belang: dit bepaalt het verschil tussen instroom en uitstroom. Voor een groeiende voorraad zal het ook bij een *end-of-life-recycling rate* van 100% niet mogelijk zijn de *recycled content* van het aanbod naar 100% te krijgen. Tenslotte is van belang inzicht te krijgen in de fractie van de afgedankte producten die hergebruikt of gerecycled kunnen worden. Niet alles is beschikbaar – incomplete inzameling en export van afval – en van wat beschikbaar is is niet alles opnieuw inzetbaar. Hieraan is in dit project geen aandacht besteed, maar het is wel essentieel voor het welslagen van een circulaire economie.

Wel is het de moeite waard om te vermelden dat er één cruciaal verschil tussen de stedelijke en de geologische mijn is: de stedelijke mijn wordt voortdurend aangevuld, terwijl de geologische mijn alleen maar leeg loopt. Dat lijkt een voordeel te zijn voor investeerders: zodra we deze voorraad kunnen aanboren, is de beschikbaarheid voor langere tijd gegarandeerd.

6.3 Aanbevelingen

Dit onderzoek naar voorraden in de maatschappij was een eerste stap. Om tot een bruikbaar set gegevens en modellen te komen om een circulaire economie beleid te ondersteunen, is meer nodig. In het onderstaande worden hiervoor aanbevelingen gedaan.

6.3.1 Gebruik voorraad-informatie voor een circulaire economie beleid

Voorraden in de maatschappij zijn de grondstof voor een circulaire economie. In een grondstoffeninformatiesysteem kan informatie over deze voorraden dan ook niet ontbreken.

De omvang van deze voorraden kan als zodanig als indicator gebruikt worden. Een dergelijke indicator geeft de potentie aan voor het terugdringen van de vraag naar primaire grondstoffen.

Voorraden en voorraaddynamiek zijn bepalende factoren voor stromen. Zij zijn tevens de *trait-d'union* tussen de productie van goederen en diensten, en de productie van afval. Zij vertegenwoordigen het stadium van consumptie in de levenscyclus. Tegelijkertijd maakt de voorraaddynamiek duidelijk dat het bij consumptie niet altijd gaat om aanschaf/stromen, maar vaak om gebruik/voorraden. Op basis van dit inzicht kunnen voorraden op verschillende manieren worden geïntegreerd in toekomstverkenningen.

Bij het genereren van scenario's voor toekomstverkenningen m.b.t. de circulaire economie moet deze voorraaddynamiek in de modellen worden opgenomen. Daartoe zijn zeker aanknopingspunten, die met name gelegen zijn in de WLO scenario's. Deze scenario's vertalen algemene economische variabelen zoals welvaart en bevolking in consumptie-gerelateerde variabelen zoals woonoppervlak en transportbehoefte. Deze kunnen vervolgens weer worden vertaald in (stroom- en) voorraadgrootheden zoals woningen en passagiersvoertuigen. En die vervolgens weer in materialen en grondstoffen. Een dergelijke opzet maakt het ook mogelijk op al deze punten variaties in te bouwen en door te rekenen op hun effectiviteit. Kleinere auto's? Minder auto's? Andere materialen in de auto's? Langere levensduur van de auto's? Minder export en meer recyclen of (op onderdelen) hergebruiken in eigen land? Een andere modal split? Allemaal opties waarvoor een voorraadmodel noodzakelijk is.

Het onderzoek naar voorraden kan ook een verbindende factor worden in het nastreven van coherentie tussen de verschillende bestuurslagen. Het gebruik van GIS-systemen, een veel voorkomende tool met

name op lokaal niveau, maakt het mogelijk voorraden aan een locatie toe te delen. De gegevensbasis is dan in elk geval op alle schaalniveaus dezelfde, een goed startpunt voor verdere beleidsvorming.

6.3.2 Uitbreiding inventarisatie

Uitbreiding scope aan voorraden

In deze rapportage zijn drie voorraden geïnventariseerd: het elektriciteitssysteem, elektronica, en voertuigen. Om een completer beeld te krijgen van de omvang van de stedelijke mijn is het noodzakelijk daar nog andere aan toe te voegen.

De grootste voorraad in onze maatschappij is waarschijnlijk de gebouwde omgeving. Er ligt al vrij veel op het gebied van woningbouw, waarnaar diverse inventarisaties zijn gedaan, ook in Nederland. Op gebied van de utiliteitsbouw is er veel minder gedaan. De BAG levert aanknopingspunten in het categoriseren van deze gebouwen en het inventariseren van hun oppervlak. Materiaalgehalten moeten specifiek voor deze gebouwen verzameld worden. Beton, staal, hout, glas, koper en aluminium zijn belangrijke materialen.

Een tweede zeer grote voorraad betreft de transportinfrastructuur – wegen, rails, bruggen, tunnels. Deze voorraad zal met name uit zand, beton en asfalt en staal bestaan, met wat zink en aluminium als het wegenmeubilair wordt meegenomen. Een interessant aspect van deze voorraad is dat het momenteel een sink vormt voor grote hoeveelheden bouw- en sloopafval.

Een derde, mogelijk grote en zeker interessante, voorraad betreft de brandstof-infrastructuur. Deze voorraad bevat een grote hoeveelheid gasleidingen, die bij een succesvol Nederland-van-het-gas-af-beleid langzamerhand veranderen in een hibernating stock. Naast gas gaat het ook om brandstof voor voertuigen. Over de daaraan gerelateerde infrastructuur is weinig bekend. Naar verwachting zal het mogelijk zijn benzinepompen te identificeren, maar zal het in kaart brengen van de materialen een uitdaging zijn. Een laatste uitbreiding van de energie-gerelateerde voorraden betreft de energie-opslag. Dit is momenteel een kleine voorraad maar is interessant omdat hier onder invloed van de transitie naar zon en wind als energiebron een flinke toename te verwachten is, die ook relevant is vanuit oogpunt van kritische materialen.

In de grote categorie infrastructuur kan het ook interessant zijn de informatie-infrastructuur in de vorm van servers, datastations en kabels in kaart te brengen. Hieraan is bij ons weten nog nooit systematisch aandacht gegeven.

Vervolgens vormt de grote en diverse groep van consumentengoederen een relevante aanvulling. Het gaat hierbij om meubilair, textiel, aankleding van huis en tuin, en gebruiksvoorwerpen van allerlei aard. De omvang is veel kleiner dan die in de bouw maar de uitstromen kunnen toch significant zijn vanwege de doorgaans veel kortere levensduren. Een nauwkeurig beeld krijgen van de samenstelling van deze

voorraad is een uitdaging: informatie over materiaalgehaltenes zowel als levensduren worden niet systematisch verzameld.

Hibernating stocks tenslotte is een voorraad die zich kenmerkt door het gebrek aan gegevens hierover. Mogelijk is deze groot, bevindt zich in verschillende categorieën toepassingen, en is interessant omdat het materiaal niet langer in gebruik is dus direct beschikbaar. Met meer inzicht in deze voorraden zou wellicht geconstateerd kunnen worden of dit een voorraad is die de moeite waard is.

Aandacht voor in- en uitstromen

Uiteindelijk zijn het niet de voorraden zelf, maar de uitstroom daaruit die rechtstreeks van belang is: de grondstof voor een circulaire economie. In dit onderzoek zijn in- en uitstromen gespecificeerd voor elektronica, omdat deze inventarisatie via een stroom-gebaseerde methode tot stand is gebracht. Voor het elektriciteitssysteem is dat niet het geval, daarvoor is het nodig in een volgende fase hierover specifiek te worden. Hoeveel kunnen we op jaarlijkse basis verwachten dat er uit deze voorraden komt?

Vervolgens is het nodig om inzicht te krijgen in de huidige bestemming van deze uitstromen. Hoeveel daarvan wordt nu al op een of andere wijze opnieuw ingezet? Valt dat percentage nog omhoog te krijgen? Waar ligt het knelpunt hierbij? Is dat de inzameling, is het de samenstelling van de afvalberg, is het de (on)mogelijkheid van scheiding van afvalstromen? Of zijn er aanzienlijke stromen van afval, of tweedehands producten, naar het buitenland zodat Nederland de greep op de afvalverwerking verliest? Het lijkt erop dat dit het geval is, voor verschillende typen voertuigen en ook voor elektronica. *Urban mining* is een activiteit die zich niet per se aan landsgrenzen zou hoeven houden: als in het buitenland recycling of andere vormen van opwerking plaatsvinden is het óók goed. Wel liggen hier kansen voor een nieuwe sector van de Nederlandse industrie, die op dit moment in ieder geval niet benut worden. Hierin zou via een circulaire economie beleid belangrijke veranderingen kunnen worden aangebracht.

Een verder punt is de complexe samenstelling van de afvalstroom, zelfs al wordt deze gescheiden ingezameld. Producten kunnen beter ontworpen worden vanuit oogpunt van circulariteit. *Design for robustness* om de levensduur te verlengen, of *design voor disassembly* om hergebruik van onderdelen of recycling van materialen beter mogelijk te maken. Het materiaalontwerp zelf verdient ook aandacht. Er zijn duizenden soorten staal met verschillende eigenschappen en samenstellingen. Die allemaal samen recycelen leidt tot kwaliteitsverlies en zorgt ervoor dat primaire productie noodzakelijk blijft. Een inventarisatie naar de kwaliteit van de uitstroom en de mogelijkheden deze te verbeteren door een beter ontwerp van producten en materialen is essentieel, en zou prioriteit moeten krijgen.

In de Materiaalmonitor wordt op geaggregeerd productniveau de toevoeging en onttrekking aan de voorraden al meegenomen. Door het toevoegen van de daadwerkelijk voorraad aan de Materiaalmonitor worden de materiaalstromen van, naar en binnen de Nederlandse economie op macro-niveau gepresenteerd naast de daadwerkelijk stock. Dit plaatst de voorraden, en de potentie om daar materialen uit te halen, in het perspectief met de import, export en de verwerking van materialen in Nederland. Het raamwerk van de Materiaalmonitor biedt in het GRIS ook de mogelijkheid om een

koppeling te maken tussen de voorraden en andere onderzoek dat in het kader van het werkprogramma wordt uitgevoerd, zoals het onderzoek naar onze afhankelijk naar kritieke materialen of de milieu-impact gerelateerd aan het Nederlandse grondstofgebruik.

6.3.3 Data en onzekerheden

Uit dit onderzoek is gebleken dat drie grote brokken informatie nodig zijn, namelijk (1) hoeveelheid producten, (2) materiaalsamenstelling van deze producten, en (3) levensduren. Van deze drie bleek de eerste het best beschikbaar, zij het niet allemaal uit officiële statistieken.

Over de materialensamenstelling bleek voor alle drie de voorraden wel wat te vinden, maar verspreid, incidenteel en weinig coherent. Veranderingen in deze samenstelling in de tijd is niet of nauwelijks gedocumenteerd. Het introduceren van productpaspoorten kan hier enorm helpen. In elk geval zou dit soort informatie ook onderdeel moeten zijn van een grondstoffeninformatiesysteem.

Voor de levensduren bleek de staat van informatie het slechtst. De in de literatuur gevonden waarden berusten bijna allemaal op aannames, er is weinig empirisch onderzoek gedaan. Vaak wordt gewerkt met een levensduurverdeling, om recht te doen aan het verschijnsel dat een type product korter of langer kan meegaan. De parameters van deze verdeling zijn ook dikwijls niet op empirische bevindingen gestoeld, maar op aannames.

Voor zeer lang levende producten, zoals gebouwen of elektriciteitskabels, is ook nauwelijks te spreken van een levensduur. Hier is eerder *obsolescence planning* van belang. Wanneer en waarom wordt een trein vervangen, of een vliegtuig? Wanneer een huis afgebroken? Wanneer een kabel afgedankt? Gewoonlijk zijn deze toepassingen niet kapot of op, maar voldoen ze niet meer aan moderne eisen en worden volgens een planning vervangen.

De onzekerheden in de voorradeninventarisatie zijn dus groot. Aan voldoende data voor een nette onzekerheidsanalyse om een bepaalde bandbreedte aan resultaten aan te geven ontbreekt het eigenlijk ook. Wat wel kan, is een gevoeligheidsanalyse voor bepaalde aannames. Die kunnen dan op hun beurt gecheckt worden aan andere wel beschikbare gegevens, bijvoorbeeld stroomgegevens over bepaalde materialen. In een vervolg op dit project, gericht op in- en uitstromen uit de voorraden, wordt hieraan aandacht besteed.

Tenslotte blijft het bij al deze onderzoeksactiviteiten van belang dat de connectie met beleidsondersteuning en beleid maken steeds in het oog wordt gehouden. Waarom willen we het weten? Wat kunnen we eruit concluderen? Hoe maakt dit de ondersteuning van een circulaire economie beleid beter? En hoe kan het voorradenonderzoek in verband worden gebracht met al het andere onderzoek voor dit beleid?

7 Referenties

ArcGIS (2019). Tennet Assets (Hoogspanning). Verkregen van:

<http://www.arcgis.com/home/item.html?id=646a6dee22bf485587bc4daf98da1306>

Arrobas, D. L. P., Hund, K. L., McCormick, M. S., Ningthoujam, J., & Drexhage, J. R. (2017). The growing role of minerals and metals for a low carbon future. The World Bank: Washington, DC, USA.

Berkel J. en Delahaye R. (2019), Material Flow Monitor 2016 – technical report, CBS, Den Haag/Heerlen.

Bonou, A., Laurent, A., & Olsen, S. I. (2016). Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy- from theory to application. Applied energy, 180, 327-337.

Bosch & van Rijn (2019, 1 Augustus). Windstats. Verkregen van: <https://windstats.nl/statistieken/>

Burnham, A., 2012. Updated Vehicle Specifications in the GREET Vehicle-Cycle Model. Center for Transportation Research Argonne National Laboratory.

Cacci, L. , I. Vassura and F. Passarini, 2017. Urban Mines of Copper: Size and Potential for Recycling in the EU. Resources 2017, 6(1), 6; <https://doi.org/10.3390/resources6010006>

CBS (2016). Hernieuwbare energie in Nederland. Centraal Bureau voor Statistiek, Den Haag.

CBS (2019). Vermogen zonnepanelen meer dan de helft toegenomen. Verkregen van:

<https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/17/vermogen-zonnepanelen-meer-dan-de-helft-toegenomen>

CBS Statline (2019). Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen. Verkregen van:

<https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82610ned/table?fromstatweb>

CBS Statline (2019). Zonnestroom; vermogen zonnepanelen woningen, wijken en buurten, 2017.

Verkregen van: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/84517NED/table?ts=1573802980886>

CLO (2018). Windturbines op land en op zee, 1990-2016. Verkregen van:

<https://www.clo.nl/indicatoren/nl1475-windturbines-in-de-groene-ruimte>

CPB/PBL (2016). Toekomstverkenning 2030 en 2050. Achtergronddocument, Klimaat en energie. Den Haag.

Deetman, S., Pauliuk, S., van Vuuren, D. P., Van Der Voet, E., & Tukker, A. (2018). Scenarios for demand growth of metals in electricity generation technologies, cars, and electronic appliances. Environmental Science & Technology, 52(8), 4950-4959.

Deetman, S., S. Marinova, E. van der Voet, D. van Vuuren, O. Edelenbosch, R. Heijungs (2019). Modelling global material stocks and flows for residential and commercial buildings towards 2050. Journal of Cleaner Production, Special Issue Urban Mining, accepted.

Delahaye, R., Meeuwissen, H., Straalen van, V.M, Baldé, C.P. (2017) Uitbreiding Materiaalmonitor met voorraden. CBS, Den Haag/Heerlen

Duebendorf, Switzerland. Available at: <http://www.ecoinvent.ch>.

ECN (2017). Nationale energieverkenning 2017. Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). Verkregen van: <https://www.ecn.nl/nl/energieverkenning/index.html>

Ecoinvent (2007). Ecoinvent Database v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

Elshkaki, A., & Graedel, T. E. (2013). Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 59, 260-273.

Energy Storage NL (2019). Nationaal Actieplan Energieopslag en Conversie 2019. Geraadpleegd van: <https://www.fme.nl/nl/system/files/publicaties/ESNL%20NAPEOC%202019%20web.pdf>

Enexis (2017) Productspecificaties Laagspanningskabels. Verkregen van: <https://den.enexis.nl/Documenten%20DEN/Eez-0003.Q.pdf>

Enexis (n.d.). Open data. Verkregen van: <https://www.enexis.nl/over-ons/wat-bieden-we/andere-diensten/open-data>

Enexis Productspecificaties Middenspanningskabels (2019). Verkregen van: <https://den.enexis.nl/Documenten%20DEN/Ecz-0001.Q.pdf>

Eurostat (2019). INTRASTAT NET MASS SINCE 2006. Luxemburg, Eurostat. Opgehaald van: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/newxtweb/downloadobject.do?keepsessionkey=true&filenameOut=INTRASTAT_NET_MASS_SINCE_2006.zip&mimeType=application/zip&objectID=610438034&objectType=L OB&disposition=attachment

Exter, P. van, Bosch, S., Schipper, B., Sprecher, B., Kleijn, R. (2019). Metal requirements for renewable electricity generation in the Netherlands. Dutch ministry of Infrastructure and Water Management.

Flury, K., & Frischknecht, R. (2012). Life cycle inventories of hydroelectric power generation. ESU-Services, Fair Consulting in Sustainability, commissioned by€ Oko-Institute eV, 1-51.

Graedel, T. E. (2011). On the future availability of the energy metals. *Annual review of materials research*, 41, 323-335.

Graedel, T.E., D. van Beers, M. Bertram, K. Fuse, R. B. Gordon, A. Gritsinin, A. Kapur, R. J. Klee, R. J. Lifset, and L. Memon. 2013. Multilevel Cycle of Anthropogenic Copper. *Environmental science & technology* 38(4): 1242-1252

Greenpeace (2017). Factsheet kolenexit in Nederland. verkregen van: <http://www.greenpeace.nl/Global/nederland/report/2017/klimaat%20en%20energie/Factsheet%20kolenexit%20in%20Nederland%20update%20juli%202017.pdf>

- Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 3(2), 170-185.
- Harrison, G. P., Karamanlis, S., & Ochoa, L. F. (2010). Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain. *Energy Policy*, 38(7), 3622-3631.
- Heeren, N. & T. Fishman (2019). A database seed for a community-driven material intensity research platform, *Scientific Data*. 6, 1–10. doi:10.1038/s41597-019-0021-x
- Hernández, C. V., Telsnig, T., & Pradas, A. V. (2017). JRC wind energy status report 2016 edition. Market, Technology and Regulatory Aspects of Wind Energy.
- Hu, M., S. Pauliuk, T. Wang, G. Huppel, E. van der Voet and D.B. Müller (2010). Iron and Steel in Chinese Residential buildings: a dynamic analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(9):591-600
- Krausmann, F., D. Wiedenhofer, C. Lauk, W. Haas, H. Tanikawa, T. Fishman, A. Miatto, H. Schandl, H. Haberl, Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114 (2017) 1880–1885. doi:10.1073/pnas.1613773114
- Krook, J. and L. Baas, 2013. Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research. *Journal of Cleaner Production* (55) pp 1-9
- Jorge, R. S., Hawkins, T. R., & Hertwich, E. G. (2012a). Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 1: power lines and cables. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), 9-15.
- Jorge, R. S., Hawkins, T. R., & Hertwich, E. G. (2012b). Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 2: transformers and substation equipment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(2), 184-191.
- Kleemann, F., Lederer, J., Rechberger, H., & Fellner, J. (2017). GIS-based analysis of Vienna's material stock in buildings. *Journal of Industrial Ecology*, 21(2), 368-380.
- Kleijn, R., Van der Voet, E., Kramer, G. J., Van Oers, L., & Van der Giesen, C. (2011). Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy*, 36(9), 5640-5648.
- Klimaatakkoord (2019). Den Haag. Verkregen van: <https://www.klimaatakkoord.nl/binaries/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord/klimaatakkoord.pdf>
- Lagerwey (n.d.). Geschiedenis van Lagerwey. Verkregen van: <https://www.lagerweywind.nl/over-lagerwey/geschiedenis/>
- Liu, G., C. E. Bangs, and D. B. Müller. 2013. Stock dynamics and emission pathways of the global aluminium cycle. *Nature Climate Change* 3(4): 338

Marimuthu, C., & Kirubakaran, V. (2013). Carbon pay back period for solar and wind energy project installed in India: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 80-90.

Marinova, S., S. Deetman, E. van der Voet, V. Daioglou, 2019. Global construction materials database and stock analysis of residential buildings between 1970-2050. *Journal of Cleaner Production*, special issue Urban Mining, accepted.

Miatto, A., Schandl, H., Forlin, L., Ronzani, F., Borin, P., Giordano, A., & Tanikawa, H. (2019). A spatial analysis of material stock accumulation and demolition waste potential of buildings: A case study of Padua. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 245-256.

Milieucentraal (n.d.). Waterkracht. Verkregen van: https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/energiebronnen/waterkracht/?onderwerp=Waterkracht#Waterkracht_in_Nederland

Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., & Kooroshy, J. (2011). Critical metals in strategic energy technologies. JRC-scientific and strategic reports, European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport.

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.

Nationaal WEEE Register (2019). Nationaal (W)EEE Register. Opgehaald van <https://www.nationaalweeeregister.nl/nederlands/rapportage.html>

Netbeheer Nederland (n.d.). Hoofdstuk 1: Kerngegevens energienetten. Geraadpleegd van: <https://energiecijfers.info/hoofdstuk-1/>

Nexans (n.d.). Land High Voltage Cables. Verkregen van: https://www.nexans.nl/eservice/Netherlands-nl_NL/navigate_354055/Land_High_Voltage_cables.html

Ohrlund, I. (2011). Future Metal Demand from Photovoltaics and Wind Turbines. Science and Technology Options Assessment (STOA). European Parliament.

Openstreetmaps (n.d.). Power grid. Verkregen van: <https://www.flosm.de/en/powergrid.html?lat=64.3226090&lon=-8.09439603&r=5000000.0&st=0&sw=cabledistributioncabinet,generator,powerbay,powerbiofuel,powerbiogas,powerbiomass,powerbusbar,powercoal,powercompensator,powerconverter,powergeothermal,powerhydro,powerline380k,powerline400k,powerline420k,powerline750k,powerline765k,powerlinedchigh,powernuclear,poweroil,powerpole,powersolar,powersubstation,powerswitch,powertidal,powertower,powerwaste,powerwind,transformer>

Pauliuk, S., R.L. Milford, D.B. Müller and J. Allwood, 2013. The Steel Scrap Age. *Environmental Science & Technology*, Volume 47, Issue 7, Pages 3448-3454

PBL (n.d.). Energietransitie: Joulebak 2050. Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag

ProSUM (2019). ProSUM Consortium. Opgehaald van <http://www.prosumproject.eu>

Rijksoverheid (2016). Nederland circulair in 2050; Rijksbreed programma circulaire economie. Het ministerie van Infrastructuur en Milieu en het ministerie van Economische Zaken, mede namens het ministerie van Buitenlandse Zaken en het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. Geraadpleegd van:

<https://www.circulair economie nederland.nl/rijksbreed+programma+circulaire+economie/Programma+documenten/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=806451>

Rijkswaterstaat (2018). Afvalverwerking in Nederland, gegevens 2017. Rijkswaterstaat, Ministerie van infrastructuur en waterstaat. Verkregen van: <https://www.afvalcirculair.nl/onderwerpen/helpdesk-afvalbeheer/publicaties/downloads/downloads-0/afvalverwerking-8/>

ROM3D (2019). Zon op Kaart. Verkregen van: <http://www.zonopkaart.nl/>

Rood, T., Hanemaaijer, A. (2017). Waarom een circulaire economie? PLB. Planbureau voor de leefomgeving, Den Haag

Straalen van, V.M, Roskam, A.J., & Baldé, C.P. (2016). Waste over Time [computer software]. CBS, Den Haag/Heerlen. Opgehaald van: <http://github.com/Statistics-Netherlands/ewaste>

Straver, F. (2016). Windmolens afgebroken en verkocht. Trouw. Verkregen van: <https://www.trouw.nl/nieuws/windmolens-afgebroken-en-verkocht~bbcb3b43/>

Sullivan, J. L., Clark, C. E., Yuan, L., Han, J., & Wang, M. (2012). Life-cycle analysis results for geothermal systems in comparison to other power systems: Part II (No. ANL/ESD/11-12). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).

Swilling, M., M. Hajer, T. Baynes, J. Bergesen, F. Labbé, J. K. Musango, A. Ramaswami, B. Robinson, S. Salat, S. Suh, P. Klugman Currie, A. Fang, A. Hanson, A. Kruit, M. Reiner, S. Smit and S. Tabory, 2018. The Weight of Cities: Resource Requirements of Future Urbanization. United Nations, International Resource Panel, ISBN 978-92-807-3699-1.

Tanikawa, H., T. Fishman, K. Okuoka and K. Sugimoto, 2015. The weight of society over time and space: a comprehensive account of the construction material stock of Japan, 1945-2010. Journal of Industrial Ecology, DOI 10.1111/jiec.12284

Tennet (2018). Monitoring leveringszekerheid 2018. Tennet TSO

TNO (2013). Kansen voor de circulaire economie. Delft, Nederland

Urban Mine Platform (2017, 24 Mei). Composition of EEE: elements per country. Verkregen van: <http://www.urbanmineplatform.eu/composition/eee/elements>

Van der Voet, E., Van Oers, L., Verboon, M., & Kuipers, K. (2019). Environmental implications of future demand scenarios for metals: methodology and application to the case of seven major metals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 141-155.

Van Oirsouw, P., & Cobben, J. F. G. (2011). De opbouw van een net: 4 Netcomponenten. Netten voor distributie van elektriciteit. Phase to Phase. Verkregen van: https://phasetophase.nl/boek/boek_1_4.html

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.

Voet, E. van der, L. van Oers, M. Verboon & K. Kuipers (2018). Environmental Implications of Demand Scenarios for Metals, Methodology and Application to Seven Major Metals. *Journal of Industrial Ecology*, DOI: 10.1111/jiec.12722

Wagner, Michelle, Amund N. Løvik, Hina Habib, Paul Mährlitz, Jaco Huisman, Daniel Cassard, Ester van der Voet (2019). The role of harmonization in improving consolidation of composition data for WEEE products. In review, *Journal of Waste Management*.

Wallsten, B., A. Carlsson, P. Frändegård, J. Krook and S. Svanström, 2013. To prospect an urban mine - assessing the metal recovery potential of infrastructure "cold spots" in Norrköping, Sweden. *Journal of Cleaner Production* (55), 103-111.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1218–1230

Wilburn, D. R. (2011). Wind energy in the United States and materials required for the land-based wind turbine industry from 2010 through 2030. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Windstats (n.d.). Statistieken. Verkregen van: <https://windstats.nl/statistieken/>

Wise Nederland (2019, 25 Juni). Stroomdossier: Kolen. Verkregen van: <https://wisenederland.nl/groene-stroom/dossier-kolen>

Wise Nederland (n.d.). Kerncentrale Borssele. Verkregen van: <https://wisenederland.nl/kernenergie/kerncentrale-borssele>

Zaag, J. van der (2020). Understanding societies' metabolism: material stocks and flows for vehicles in the Netherlands. MSc thesis research report, MSc Industrial Ecology, Leiden/Delft.

Zonopkaart (n.d.). Statistieken. Verkregen van: <https://wisenederland.nl/groene-stroom/dossier-kolen>

Appendices

Appendix 1 Data en classificaties relevant voor de elektronica case study

Tabel A.1-UNU_Keys lijst en link met 6 groepen afval categorie uit WEEE Directive Annex III

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	WEEE Directive Annex III
0001	Central Heating (household installed)	large equipment
0002	Photovoltaic Panels	large equipment
0101	Professional Heating & Ventilation (excl. cooling equipment)	large equipment
0102	Dishwashers	large equipment
0103	Kitchen equipment (e.g. large furnaces, ovens, cooking equipment)	large equipment
0104	Washing Machines (incl. combined dryers)	large equipment
0105	Dryers (wash dryers, centrifuges)	large equipment
0106	Household Heating & Ventilation (e.g. hoods, ventilators, space heaters)	large equipment
0108	Fridges (incl. combi-fridges)	temperature exchange equipment
0109	Freezers	temperature exchange equipment
0111	Air Conditioners (household installed and portable)	temperature exchange equipment
0112	Other Cooling equipment (e.g. dehumidifiers, heat pump dryers)	temperature exchange equipment
0113	Professional Cooling equipment (e.g. large air conditioners, cooling displays)	temperature exchange equipment
0114	Microwaves (incl. combined, excl. grills)	small equipment
0201	Other small household equipment (e.g. small ventilators, irons, clocks, adapters)	small equipment
0202	Equipment for food preparation (e.g. toaster, grills, food processing, frying pans)	small equipment
0203	Small household equipment for hot water preparation (e.g. coffee, tea, water cookers)	small equipment
0204	Vacuum Cleaners (excl. professional)	small equipment

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	WEEE Directive Annex III
0205	Personal Care equipment(e.g. tooth brushes, hair dryers, razors)	small equipment
0301	Small IT equipment (e.g. routers, mice, keyboards, external drives & accessories)	small equipment
0302	Desktop PCs (excl. monitors, accessoires)	small equipment
0303	Laptops (incl. tablets)	screens and monitors (referred to as screens)
0304	Printers (e.g. scanners, multi functionals, faxes)	small IT and telecommunication equipment with an external dimension of less than 50 cm
0305	Telecommunication equipment (e.g. (cordless) phones, answering machines)	small IT and telecommunication equipment with an external dimension of less than 50 cm
0306	Mobile Phones (incl. smartphones, pagers)	small IT and telecommunication equipment with an external dimension of less than 50 cm
0307	Professional IT equipment (e.g. servers, routers, data storage, copiers)	large equipment
0308	Cathode Ray Tube Monitors	screens and monitors (referred to as screens)
0309	Flat Display Panel Monitors (LCD, LED)	screens and monitors (referred to as screens)
0401	Small Consumer Electronics (e.g. headphones, remote controls)	small equipment
0402	Portable Audio & Video (e.g. MP3, e-readers, car navigation)	small equipment
0403	Music Instruments, Radio, Hi-Fi (incl. audio sets)	small equipment
0404	Video (e.g. Video recorders, DVD, Blue Ray, set-top boxes) and projectors	small equipment
0405	Speakers	small equipment
0406	Cameras (e.g. camcorders, photo & digital still cameras)	small equipment

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	WEEE Directive Annex III
0407	Cathode Ray Tube TVs	screens and monitors (referred to as screens)
0408	Flat Display Panel TVs (LCD, LED, Plasma)	screens and monitors (referred to as screens)
0501	Small lighting equipment (excl. LED & incandescent)	small equipment
0502	Compact Fluorescent Lamps (incl. retrofit & non-retrofit)	lamps
0503	Straight Tube Fluorescent Lamps	lamps
0504	Special Lamps (e.g. professional mercury, high & low pressure sodium)	lamps
0505	LED Lamps (incl. retrofit LED lamps)	lamps
0506	Household Luminaires (incl. household incandescent fittings & household LED luminaires)	small equipment
0507	Professional Luminaires (offices, public space, industry)	small equipment
0601	Household Tools (e.g. drills, saws, high pressure cleaners, lawn mowers)	small equipment
0602	Professional Tools (e.g. for welding, soldering, milling)	large equipment
0701	Toys (e.g. car racing sets, electric trains, music toys, biking computers, drones)	small equipment
0702	Game Consoles	small IT and telecommunication equipment with an external dimension of less than 50 cm
0703	Leisure equipment (e.g. sports equipment, electric bikes, juke boxes)	large equipment
0801	Household Medical equipment(e.g. thermometers, blood pressure meters)	small equipment
0802	Professional Medical equipment (e.g. hospital, dentist, diagnostics)	large equipment
0901	Household Monitoring & Control equipment	small equipment

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	WEEE Directive Annex III
	(alarm, heat, smoke, excl. screens)	
0902	Professional Monitoring & Control equipment (e.g. laboratory, control panels)	large equipment
1001	Non- cooled Dispensers (e.g. for vending, hot drinks, tickets, money)	large equipment
1002	Cooled Dispensers (e.g. for vending, cold drinks)	temperature exchange equipment

Tabel A.2-Voorraad in gewicht (t) per UNU_Key, 2017

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	Gewicht (t)
0001	Central Heating (household installed)	103.286
0002	Photovoltaic Panels	169.758
0101	Professional Heating & Ventilation (excl. cooling equipment)	15.823
0102	Dishwashers	218.162
0103	Kitchen equipment (e.g. large furnaces, ovens, cooking equipment)	100.970
0104	Washing Machines (incl. combined dryers)	507.634
0105	Dryers (wash dryers, centrifuges)	168.754
0106	Household Heating & Ventilation (e.g. hoods, ventilators, space heaters)	165.224
0108	Fridges (incl. combi-fridges)	512.420
0109	Freezers	129.638
0111	Air Conditioners (household installed and portable)	128.511
0112	Other Cooling equipment (e.g. dehumidifiers, heat pump dryers)	25.230
0113	Professional Cooling equipment (e.g. large air conditioners, cooling displays)	95.111
0114	Microwaves (incl. combined, excl. grills)	92.324
0201	Other small household equipment (e.g. small ventilators, irons, clocks, adapters)	63.570
0202	Equipment for food preparation(e.g. toaster, grills, food processing, frying pans)	361.946
0203	Small household equipment for hot water preparation (e.g. coffee, tea, water cookers)	182.548
0204	Vacuum Cleaners (excl. professional)	82.743
0205	Personal Care equipment(e.g. tooth brushes, hair dryers, razors)	26.917
0301	Small IT equipment (e.g. routers, mice, keyboards, external drives & accessories)	82.904
0302	Desktop PCs (excl. monitors, accessoires)	186.890
0303	Laptops (incl. tablets)	103.076
0304	Printers (e.g. scanners, multi functionals, faxes)	493.114
0305	Telecommunication equipment (e.g. (cordless) phones, answering machines)	26.083
0306	Mobile Phones (incl. smartphones, pagers)	20.913
0307	Professional IT equipment (e.g. servers, routers, data storage, copiers)	11.664
0308	Cathode Ray Tube Monitors	49.508
0309	Flat Display Panel Monitors (LCD, LED)	138.034

0401	Small Consumer Electronics (e.g. headphones, remote controls)	45.719
0402	Portable Audio & Video (e.g. MP3, e-readers, car navigation)	32.194
0403	Music Instruments, Radio, Hi-Fi (incl. audio sets)	114.225
0404	Video (e.g. Video recorders, DVD, Blue Ray, set-top boxes) and projectors	104.405
0405	Speakers	145.289
0406	Cameras (e.g. camcorders, photo & digital still cameras)	6.605
0407	Cathode Ray Tube TVs	23.068
0408	Flat Display Panel TVs (LCD, LED, Plasma)	111.600
0501	Small lighting equipment (excl. LED & incandescent)	10.443
0502	Compact Fluorescent Lamps (incl. retrofit & non-retrofit)	9.938
0503	Straight Tube Fluorescent Lamps	5.862
0504	Special Lamps (e.g. professional mercury, high & low pressure sodium)	1.529
0505	LED Lamps (incl. retrofit LED lamps)	26.096
0506	Household Luminaires (incl. household incandescent fittings & household LED luminaires)	398.575
0507	Professional Luminaires (offices, public space, industry)	8.721
0601	Household Tools (e.g. drills, saws, high pressure cleaners, lawn mowers)	227.117
0602	Professional Tools (e.g. for welding, soldering, milling)	33.928
0701	Toys (e.g. car racing sets, electric trains, music toys, biking computers, drones)	7.870
0702	Game Consoles	6.469
0703	Leisure equipment (e.g. sports equipment, electric bikes, juke boxes)	187.873
0801	Household Medical equipment(e.g. thermometers, blood pressure meters)	274
0802	Professional Medical equipment (e.g. hospital, dentist, diagnostics)	16.198
0901	Household Monitoring & Control equipment (alarm, heat, smoke, excl. screens)	55.153
0902	Professional Monitoring & Control equipment (e.g. laboratory, control panels)	16.818
1001	Non- cooled Dispensers (e.g. for vending, hot drinks, tickets, money)	1.914
1002	Cooled Dispensers (e.g. for vending, cold	24.339

	drinks)	
Totaal	Totaal	5.884.980

Tabel A.3-Stock in stuks per inwoner en per huishouden, 2017

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	Stock in stuks	Stuks per inwoner	Stuks per huishouden
0001	Central Heating (household installed)	3.324.738	0,19	0,43
0002	Photovoltaic Panels	9.985.779	0,58	1,28
0101	Professional Heating & Ventilation (excl. cooling equipment)	132.242	0,01	0,02
0102	Dishwashers	5.300.697	0,31	0,68
0103	Kitchen equipment (e.g. large furnaces, ovens, cooking equipment)	2.736.258	0,16	0,35
0104	Washing Machines (incl. combined dryers)	7.022.626	0,41	0,90
0105	Dryers (wash dryers, centrifuges)	3.854.372	0,22	0,49
0106	Household Heating & Ventilation (e.g. hoods, ventilators, space heaters)	13.689.530	0,80	1,76
0108	Fridges (incl. combi-fridges)	11.647.075	0,68	1,49
0109	Freezers	3.244.086	0,19	0,42
0111	Air Conditioners (household installed and portable)	3.508.561	0,20	0,45
0112	Other Cooling equipment (e.g. dehumidifiers, heat pump dryers)	603.026	0,04	0,08
0113	Professional Cooling equipment (e.g. large air conditioners, cooling displays)	1.910.606	0,11	0,24
0114	Microwaves (incl. combined, excl. grills)	4.867.224	0,28	0,62
0201	Other small household equipment (e.g. small ventilators, irons, clocks, adapters)	77.133.959	4,50	9,89
0202	Equipment for food preparation (e.g. toaster, grills, food processing, frying pans)	280.003.083	16,34	35,90
0203	Small household equipment for hot water preparation (e.g. coffee, tea, water cookers)	149.798.693	8,74	19,20
0204	Vacuum Cleaners (excl. professional)	13.435.265	0,78	1,72
0205	Personal Care equipment (e.g. tooth brushes, hair dryers, razors)	44.441.429	2,59	5,70
0301	Small IT equipment (e.g. routers, mice, keyboards, external drives &	208.710.471	12,18	26,76

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	Stock in stuks	Stuks per inwoner	Stuks per huishouden
	accessories)			
0302	Desktop PCs (excl. monitors, accessoires)	18.900.757	1,10	2,42
0303	Laptops (incl. tablets)	95.688.060	5,58	12,27
0304	Printers (e.g. scanners, multi functionals, faxes)	39.008.997	2,28	5,00
0305	Telecommunication equipment (e.g. (cordless) phones, answering machines)	55.960.050	3,26	7,17
0306	Mobile Phones (incl. smartphones, pagers)	242.907.167	14,17	31,14
0307	Professional IT equipment (e.g. servers, routers, data storage, copiers)	451.112	0,03	0,06
0308	Cathode Ray Tube Monitors	4.833.959	0,28	0,62
0309	Flat Display Panel Monitors (LCD, LED)	26.947.237	1,57	3,45
0401	Small Consumer Electronics (e.g. headphones, remote controls)	94.733.081	5,53	12,15
0402	Portable Audio & Video (e.g. MP3, e-readers, car navigation)	137.348.506	8,01	17,61
0403	Music Instruments, Radio, Hi-Fi (incl. audio sets)	29.299.838	1,71	3,76
0404	Video (e.g. Video recorders, DVD, Blue Ray, set-top boxes) and projectors	35.592.394	2,08	4,56
0405	Speakers	56.128.563	3,27	7,20
0406	Cameras (e.g. camcorders, photo & digital still cameras)	29.490.037	1,72	3,78
0407	Cathode Ray Tube TVs	1.436.785	0,08	0,18
0408	Flat Display Panel TVs (LCD, LED, Plasma)	12.443.849	0,73	1,60
0501	Small lighting equipment (excl. LED & incandescent)	124.101.602	7,24	15,91
0502	Compact Fluorescent Lamps (incl. retrofit & non-retrofit)	76.010.473	4,43	9,74
0503	Straight Tube Fluorescent Lamps	52.684.578	3,07	6,75
0504	Special Lamps (e.g. professional mercury, high & low pressure sodium)	21.260.691	1,24	2,73
0505	LED Lamps (incl. retrofit LED lamps)	311.145.757	18,15	39,89
0506	Household Luminaires (incl.	1.930.676.614	112,64	247,52

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	Stock in stuks	Stuks per inwoner	Stuks per huishouden
	household incandescent fittings & household LED luminaires)			
0507	Professional Luminaires (offices, public space, industry)	2.918.273	0,17	0,37
0601	Household Tools (e.g. drills, saws, high pressure cleaners, lawn mowers)	77.360.455	4,51	9,92
0602	Professional Tools (e.g. for welding, soldering, milling)	1.387.459	0,08	0,18
0701	Toys (e.g. car racing sets, electric trains, music toys, biking computers, drones)	14.479.869	0,84	1,86
0702	Game Consoles	13.900.372	0,81	1,78
0703	Leisure equipment (e.g. sports equipment, electric bikes, juke boxes)	24.400.435	1,42	3,13
0801	Household Medical equipment(e.g. thermometers, blood pressure meters)	1.728.574	0,10	0,22
0802	Professional Medical equipment (e.g. hospital, dentist, diagnostics)	248.472	0,01	0,03
0901	Household Monitoring & Control equipment (alarm, heat, smoke, excl. screens)	243.670.255	14,22	31,24
0902	Professional Monitoring & Control equipment (e.g. laboratory, control panels)	2.753.169	0,16	0,35
1001	Non- cooled Dispensers (e.g. for vending, hot drinks, tickets, money)	44.208	0,00	0,01
1002	Cooled Dispensers (e.g. for vending, cold drinks)	277.578	0,02	0,04

Tabel A.4-Vergelijking met Nationaal (W)EEE Register, 2017

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	POM onze methodiek, 2017 (t)	Samentelling aansluiting W(EEE) Register	POM Nationaal (W)EEE Register, 2017 (t)
<i>Totaal</i>	<i>Totaal</i>	<i>638.530</i>		<i>418.541</i>
0002	Photovoltaic Panels	39.975		64.383
0108	Fridges (incl. combi-fridges)	35.385	42.868	45.577
0109	Freezers	7.484		
0201	Other small household equipment (e.g. small ventilators, irons, clocks, adapters)	12.023	107.652	37.623
0202	Equipment for food preparation(e.g. toaster, grills, food processing, frying pans)	39.174		
0203	Small household equipment for hot water preparation (e.g. coffee, tea, water cookers)	37.083		
0204	Vacuum Cleaners (excl. professional)	12.650		
0205	Personal Care equipment(e.g. tooth brushes, hair dryers, razors)	6.722		
0308	Cathode Ray Tube Monitors	0		0
0309	Flat Display Panel Monitors (LCD, LED)	16.740		8.515
0407	Cathode Ray Tube TVs	0		0
0408	Flat Display Panel TVs (LCD, LED, Plasma)	9.017		11.151
0507	Professional Luminaires (offices, public space, industry)	1.333		12.570
0601	Household Tools (e.g. drills, saws, high pressure cleaners, lawn mowers)	20.909	22.450	21.089
0602	Professional Tools (e.g. for welding, soldering, milling)	1.542		
0701	Toys (e.g. car racing sets, electric trains, music toys, biking computers, drones)	0	21.242	6.393
0702	Game Consoles	708		
0703	Leisure equipment (e.g.	20.534		

UNU_Key	UNU_Key Omschrijving	POM onze methodiek, 2017 (t)	Samentelling aansluiting W(EEE) Register	POM Nationaal (W)EEE Register, 2017 (t)
	sports equipment, electric bikes, juke boxes)			
0801	Household Medical equipment(e.g. thermometers, blood pressure meters)	36	1.841	1.497
0802	Professional Medical equipment (e.g. hospital, dentist, diagnostics)	1.804		
0901	Household Monitoring & Control equipment (alarm, heat, smoke, excl. screens)	14.933	17.225	5.290
0902	Professional Monitoring & Control equipment (e.g. laboratory, control panels)	2.292		
1001	Non- cooled Dispensers (e.g. for vending, hot drinks, tickets, money)	393		1.944
1002	Cooled Dispensers (e.g. for vending, cold drinks)	2.111		612

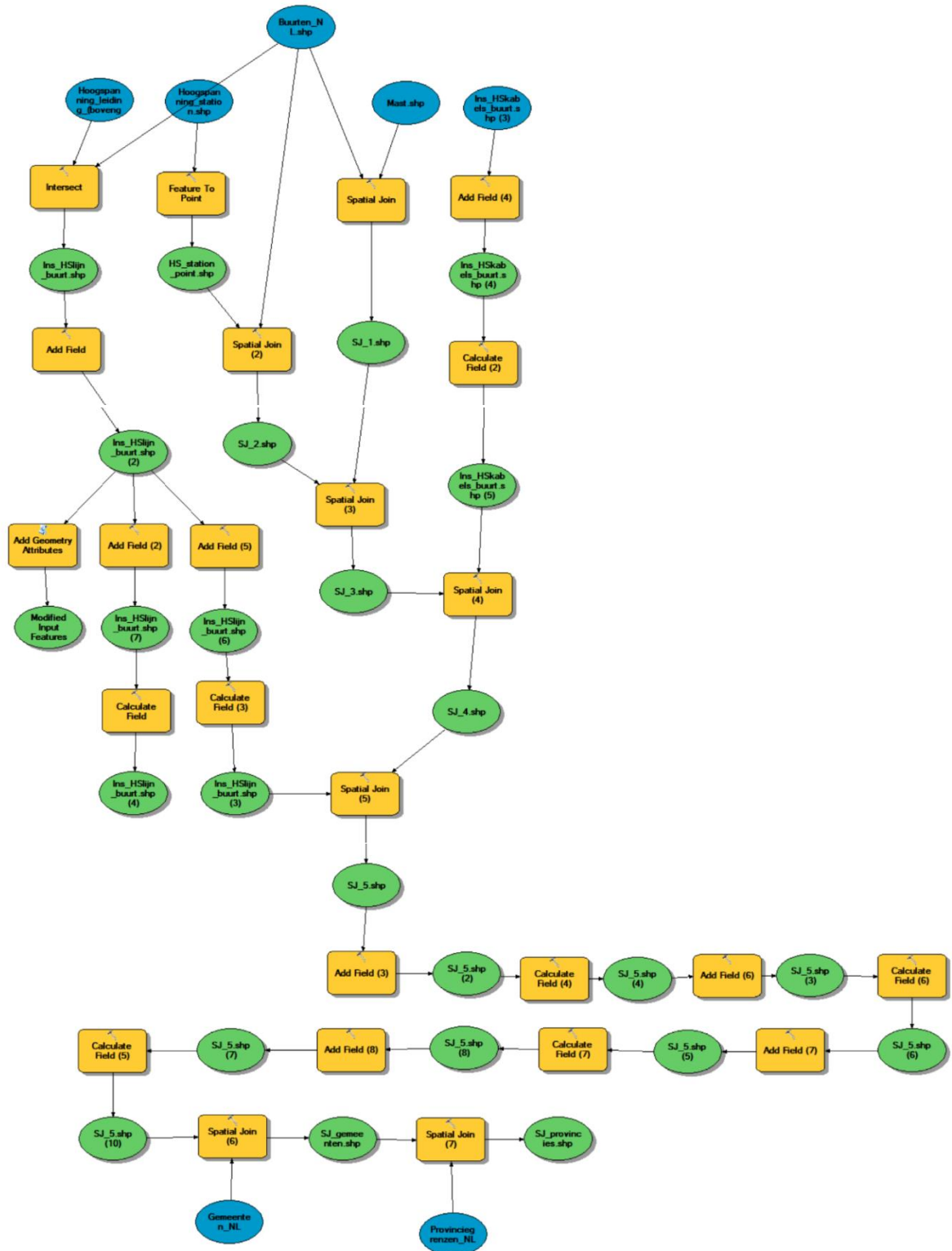
Tabel A.5 - Voorraden in gewicht(t) naar Materiaalmonitor, 2017, eerste schatting

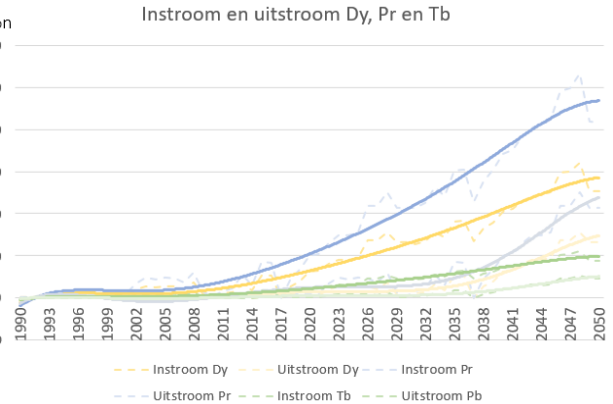
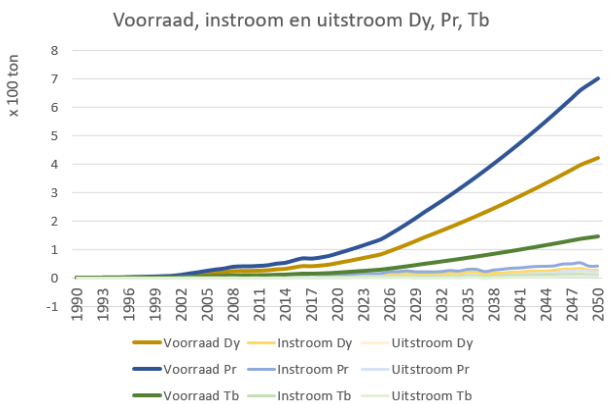
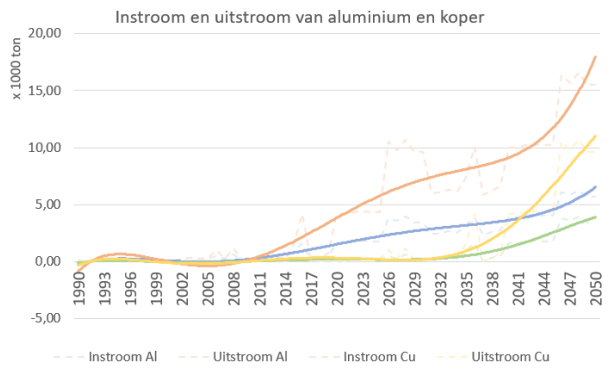
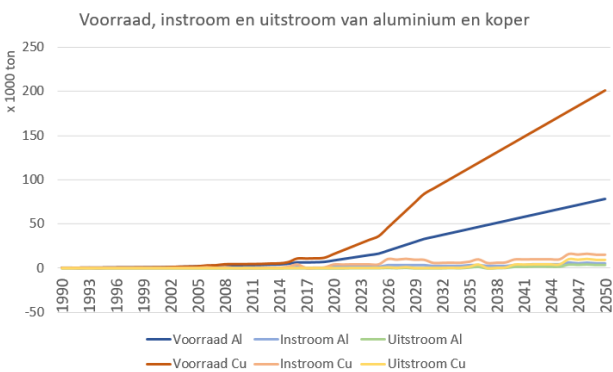
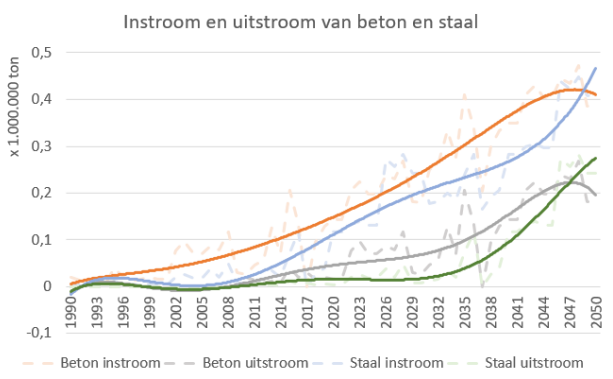
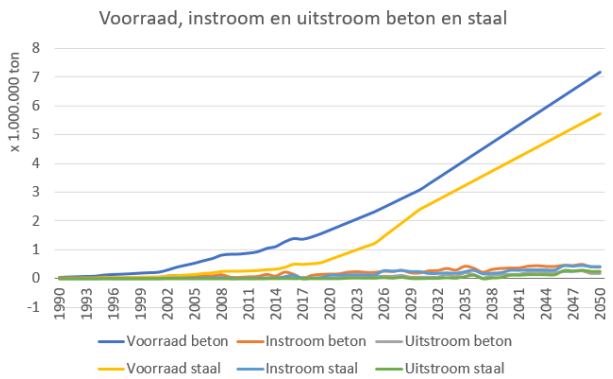
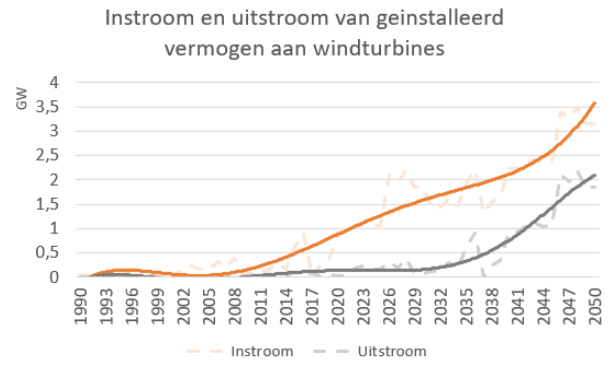
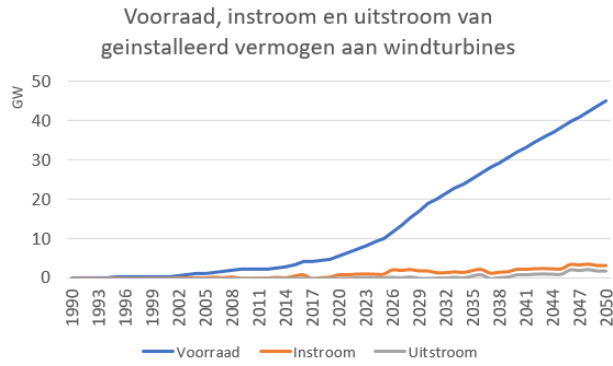
MM code	MM Omschrijving	Gewicht (t)
1392110	Beddengoed	122.312
1392500	Woningtextiel	25.904
1399000	Ov.textielwaren	212.912
1419000	Overige kleding	66.161
1510000	Leer/lederwaren	104.419
1520000	Schoenen ed.&onderd.	164.304
1610000	Hout primair	1.897
1621100	Triplex e.d.van hout	4.041.092
1621200	Fineer/plaat v.hout	9.527.685
1622000	Parket v.hout	166.442
1623120	Ov.timmerwerk	39.382
2219000	Ov.Rubberprod.	279.805
2223000	Bouwart.v.kunst.	1.424.424
2229000	Ov.product.v.kunst.	2.903.476
2312199	Vlakglasproducten	4.942.172
2313199	Glaz.FlesPotVaas ed.	2.127.614
2323400	Ov. Keramische prod.	844.621
2339000	Keram.Bouwmat/Tegels	5.902.438
2341000	Keram.sier/huish.art	2.180.389
2361900	Bouwelem.v.beton	116.319
2370000	Bewerkte natuursteen	3.361.563
2390000	Bouwmaterialen neg	2.569.003
2511000	Metal.constructiewerk	827
2512000	Metal.deuren/ramen	868.189
2521900	Metal.tanks/reserv.	98.349

2530000	Metal.stoomketels	3.669
2571390	Handgereedschap e.d.	324.448
2572000	Hang-&sluitwerk	486.407
2591290	Metalen vaten	1.417.799
2594900	Bout/schroef/moer ed	1.046.163
2599100	Metal.huish.sanit.	540.794
2599200	Ov.metaalproducten	1.081.908
2620000	ComputRandapp&onderd	681.516
2630200	Telefoontoest.	37.303
2640100	Radio's/telegrafie	47.430
2640200	Televisies/monitors	261.857
2640300	Audio-/video-appar.	286.184
2650000	Meet-®elappar.	227.487
2660000	Med.instrum./-app.	112.785
2711000	Elek.mot/trafo&ond.	1.080.987
2720000	Batterijen/accu's	477.265
2740000	Verlichtingsart/-ond	461.461
2751110	Koel-/vriestkasten	196.642
2751130	Was-/droogmachines	459.555
2751299	Elektr.kookappar.	505.038
2752000	Hh.VerwKook(nt-elek)	108.186
2759000	Ov.el.huish.app/ond.	285.233
2790000	Ov.elektr.appar.ed	119.535
2811000	Turbine/motor	1.713.785
2812000	Pomp/compressor	789.402
2814000	KraanKlepAfsluiter	137.590
2820900	Ov.mach.v.alg.gebr.	238.646

2822100	Takel/lier/Lift e.d.	31.341.920
2823000	Kantoormachines	58.230
2824000	Mech.handgereedsch.	86.034
2825000	Machine koel/klimaat	223.452
2829129	Filtertoestel	18.763
2829210	Mach.rein./verp.fles	616
2830000	Mach.v.landbouw	57.774
2840000	Gereedschapswerktuig	7.983.509
2910200	Personenauto's	5.250.928
2910400	Vrachtauto's e.d.	3.203.141
2910590	BusOpleggerContainer	40.022
2920220	Caravans e.d.	232.740
3011200	Vrachtschip/veerboot	989.265
3012000	Plezierboten	193.801
3020000	Trein/tram&onderd.	98.515
3091000	Motorfietsen&onderd.	415.630
3092000	Fietsen&ond(nt-mot.)	601.759
3099090	Ov.wagens/transp.mid	139.789
3100100	Zitmeubelen	1.206.778
3101000	Bedrijfsmeubelen	178.928
3102000	Keukenmeubelen	440.949
3103000	Matrassen	147.953
3109120	Slaapkamermeubel.	1.357.207
3109900	Overige meubelen	1.303.511
Totaal	Totaal	110.791.984

Appendix 2 Proces voor verwerking van de ruimtelijke data in GIS





Appendix 4 Berekening materiaalintensiteiten, met maximum en minimum waarden gevonden in de literatuur

Wind, bulk		Onshore			Offshore		
		Min	Max	Gemiddeld	Min	Max	Gemiddeld
Beton	Ton/MW	236,0	590,0	413,0	8,0	8,0	8,0
	Bron	Bonou & Olsen, 2016	USGS, 2011		Bonou & Olsen, 2016	Boneau & Olsen, 2016	
Staal	Ton/MW	72,4	148,3	110,4	132,0	141,0	137,0
	Bron	Bonou & Olsen, 2016	Haapala & Prempreeda, 2014		Elshkaki & Graedel, 201	Boneau & Olsen, 2016	
Al	Ton/MW	0,3	2,3	1,3	0,4	3,6	2,0
	Bron	Ecoinvent, 2011, report	Boneau & Olsen, 2013		Elshkaki & Graedel, 201	Haapala & Prempreeda, 2014	
Cu	Ton/MW	0,3	2,5	1,4	2,5	10,0	6,3
	Bron	Ecoinvent, 2011, report	USGS, 2011		Bonou & Olsen, 2016	Elshkaki & Graedel, 2013	
Wind, kritisch		Direct drive			Gearbox		
		Min	Max	Exter et al. (2019)	Min	Max	Exter et al. (2019)
Nd	Ton/MW	0,124	0,201	0,202	0,02	0,05	0,04
	Bron	Elshkaki&Graedel, 2013	Viebahn et al., 2015		Ohrlund, 2011	Viebahn et al., 2015	
Dy	Ton/MW		0,015	0,02	0,0017	0,025	0,003
	Bron		Viebahn et al., 2015		Viebahn et al., 2015	Viebahn et al., 2015	
Pr	Ton/MW	0,004	0,035	0,035	0,004	0,035	0,004
	Bron	Ohrlund, 2011	Ohrlund, 2011		Ohrlund, 2011	Ohrlund, 2011	
Tb	Ton/MW	0,0008	0,007	0,007	0,0008	0,007	0,001
	Bron	Ohrlund, 2011	Ohrlund, 2011		Ohrlund, 2011	Ohrlund, 2011	

Zon		a-Si	c-Si	CdTe	CIGS
Staal	Ton/MW	0,00E+00	7,60E-01	0,00E+00	0,00E+00
	Bron		Elshkaki & Gradel		
Cu	Ton/MW	0,00E+00	(0,589+3,442)/2	(0,02441+5,181)/2	(0,01697+0,2335)/2
	Bron		Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012	Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012	Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012
Al	Ton/MW	1,02E-01	1,02E-01	1,02E-01	0,00E+00
	Bron	Elshkaki & Graedel, 2013;Ohrlund, 2012; Exter et al., 2019	Elshkaki & Graedel, 2013;Ohrlund, 2012; Exter et al., 2019	Elshkaki & Graedel, 2013;Ohrlund, 2012; Exter et al., 2019	
Ag	Ton/MW	0,00E+00	5,17E-03	0,00E+00	0,00E+00
	Bron		Worldbank, 2017; Ohrlund, 2011		
Cd	Ton/MW	0,00E+00	0,00E+00	(0,08351+0,0812)/2	(0,00093+0,0011)/2
	Bron			Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012	Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012
Te	Ton/MW	0,00E+00	0,00E+00	(0,09038+0,084)/2	4,70E-03
	Bron			Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012	Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012
Se	Ton/MW	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	(0,08441+0,064)/2
	Bron				Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012
Ga	Ton/MW	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	(6,17+5,4)/2/1000
	Bron			Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012	Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012
In	Ton/MW	5,32E-03	0,00E+00	(7,95+13,1)/2/1000	(83,79+29,2)/2/1000
	Bron	Ohrlund, 2012		Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012	Exter et al., 2019; Ohrlund, 2012

Kolen		Min	Max	Gemiddeld
Beton	Ton/MW	165	352,8	258,9
	Bron	Sullivan et al., 2011	EcolInvent, 2007, Report 6, part XI, tabel 16.7	
Staal	Ton/MW	34,9	119	76,95
	Bron	Sullivan et al., 2011	EcolInvent, 2007, Report 6, part XI, tabel 16.7	
Al	Ton/MW		1	1
	Bron		EcolInvent, 2007, Report 6, part XI, tabel 16.7	
Cu	Ton/MW		1,5	1,5
	Bron		EcolInvent, 2007, Report 6, part XI, tabel 16.7	
Co	Ton/MW		0,01396	0,01396
	Bron		Moss et al., 2013 (Tabel 22)	
Ta	Ton/MW		0,00051	0,00051
	Bron		Moss et al., 2013 (Tabel 22)	

Gas		Min	Max	Gemiddeld
Beton	Ton/MW	31,5	38,22	34,86
	Bron	EcolInvent, 2007, Report 6, part V, tabel 11.7	EcolInvent, 2007, Report 6, part V, tabel 11.7	
Staal	Ton/MW	4,5	26,5	15,5
	Bron	Moss et al., 2013	EcolInvent, 2007, Report 6, part V, tabel 11.7	
Al	Ton/MW	0,75	1,1	0,925
	Bron	EcolInvent, 2007, Report 6, part V, tabel 11.7	EcolInvent, 2007, Report 6, part V, tabel 11.7	
Cu	Ton/MW	0,75	1,1	0,925
	Bron	EcolInvent, 2007, Report 6, part V, tabel 11.7	EcolInvent, 2007, Report 6, part V, tabel 11.7	
Co	Ton/MW		0,0018	0,0018
	Bron		Moss et al., 2013 (Table 25)	

Afvalverbranding/biom		Min	Max	Gemiddeld
Beton	Ton/MW	156	244	200
	Bron	Sullivan et al., 2011	EcolInvent, 2007, Report 6, part IX, tabel 8.3	
Staal	Ton/MW	8,6	58,5	33,55
	Bron	EcolInvent, 2007, Report 6, part IX, tabel 8.3	Sullivan et al., 2011	
Al	Ton/MW	0,05	0,46	0,255
	Bron	EcolInvent, 2007, Report 6, part IX, tabel 8.3	Sullivan et al., 2011	
Cu	Ton/MW		0,05	0,05
	Bron		Sullivan et al., 2011	
Co	Ton/MW		0,01396	0,01396
	Bron		Moss et al., 2013 (Table 22)	
Ta	Ton/MW		0,00051	0,00051
	Bron		Moss et al., 2013 (Table 22)	

Kerncentrale		Min	Max	Gemiddeld
Beton	Ton/MW		355,3	355,3
	Bron		EcolInvent, 2007, Report 6, part VII, tabel 9.6	
Staal	Ton/MW		61,161	61,161
	Bron		EcolInvent, 2007, Report 6, part VII, tabel 9.6	
Al	Ton/MW		0,2	0,2
	Bron		EcolInvent, 2007, Report 6, part VII, tabel 9.6	
Cu	Ton/MW		1,473	1,473
	Bron		EcolInvent, 2007, Report 6, part VII, tabel 9.6	
Ag	Ton/MW		0,0083	0,0083
	Bron		Moss et al., 2011	
Cd	Ton/MW		0,0005	0,0005
	Bron		Moss et al., 2011	
In	Ton/MW		0,0016	0,0016
	Bron		Moss et al., 2011	

Waterkrachtcentrale		Min	Max	Gemiddeld
Beton	Ton/MW			672
	Bron		Flury & Frischknecht (2012)	672
Staal	Ton/MW			213
	Bron		Flury & Frischknecht (2012)	213
Al	Ton/MW			0
	Bron			0
Cu	Ton/MW			3,5
	Bron		Flury & Frischknecht (2012)	3,5

<i>kg/m</i>		Stedin	Enexis	Enduris	Mean
LS	Cu	0,72	0,72	0,32	0,59
	Al	0,73	0,51	0,85	0,70
MS	Cu	0,33	0,95	0,44	0,57
	Al	0,87	0,71	1,03	0,87

