

Vorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie

deel II

met case studies op gebied van gebouwen, elektronische machines en textiel



CML: Janneke van Oorscot & Ester van der Voet
CBS: Vincent van Straalen, Vivian Tunn & Roel Delahaye

December 2020

Voorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie; met case studies op gebied van gebouwen, elektronische machines en textiel

Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie

Werkpakket 3 Grondstoffen en Effectmonitoring

T3.5 Dataverzameling voorraden

Universiteit Leiden, Centrum voor Milieuwetenschappen:

Janneke van Oorschot
Ester van der Voet

Centraal Bureau voor de Statistiek:

Vincent van Straalen
Vivian Tunn
Roel Delahaye

December 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, TNO en de Universiteit Utrecht (UU) 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.

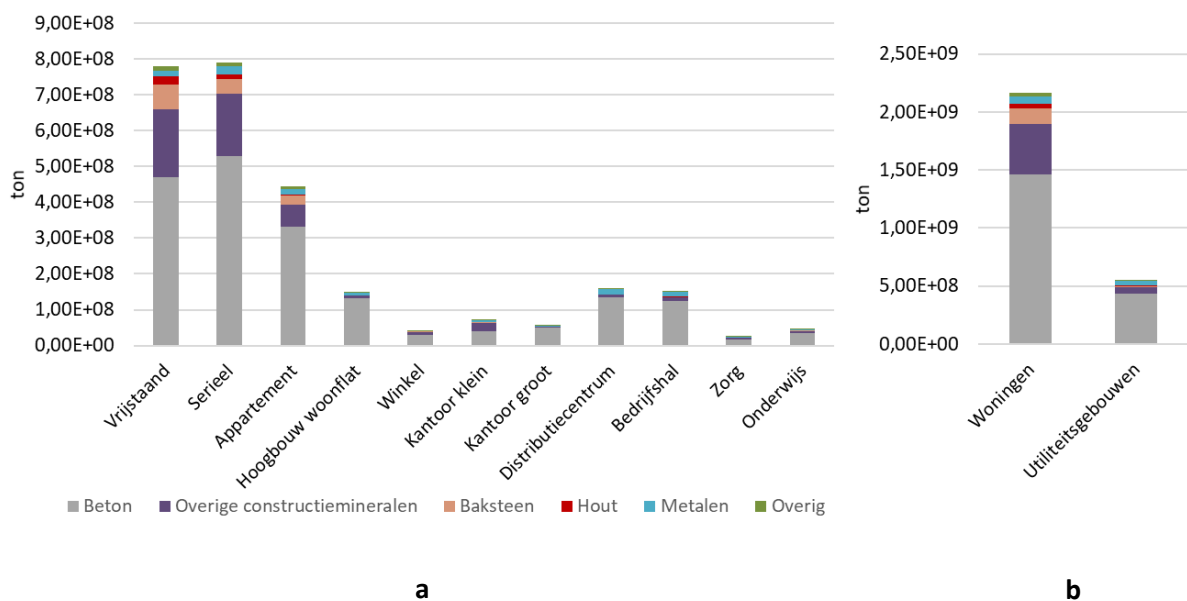
Dat maakt dat ook de exploitatie van de stedelijke mijn er anders uit zal zien dan die van een geologische mijn. Op dit moment echter bevindt het onderzoek naar *urban mining* zich in de fase van *prospecting*, het identificeren en kwantificeren van geschikte *deposits*. Vragen die zich voordoen zijn,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

In 2019 hebben we de voorraden van materialen in het elektriciteitssysteem, in elektronica en in voertuigen in kaart gebracht. Deze rapportage bevat de resultaten van de voorraadinventarisatie van 2020, met betrekking tot gebouwen, textiel en elektronische machines.

In 2020 hebben we ook onderzoek gedaan naar de tweede vraag: de beschikbaarheid van materialen uit de *urban mine* voor hergebruik of recycling. Dit onderzoek, uitgevoerd voor het elektriciteitssysteem, wordt apart gerapporteerd (van Oorschot et al., 2020b). Verder werd in 2020 ook onderzoek naar de uitvoer van afval en tweedehandse goederen gedaan. Want als materiaal uit de voorraden uitgevoerd wordt, is het niet meer (direct) voor de Nederlandse economie beschikbaar. In dit onderzoek, eveneens apart gerapporteerd, zijn enkele databronnen en benaderingen ter bepalingen van deze exporten getest (Tunn en Delahaye, 2020).

De in 2020 onderzochte voorraden zijn heel verschillend in omvang en samenstelling. Gebouwen vormen een enorme voorraad, naar alle waarschijnlijkheid de grootste, in termen van tonnen materiaal die erin zijn opgeslagen. De specificatie hiervan was een grote operatie, waarvoor gebruik is gemaakt van de GIS database van het Bestand Adressen en Gebouwen (BAG) van het Kadaster. Deze database bevat informatie over de gebouwde omgeving op een zeer gedetailleerd niveau, per geregistreerd adres. Door al deze gebouwen te classificeren en te koppelen aan data over de materiaal-intensiteit, kan een overzicht worden verkregen van de totale voorraad per bouwtype. Figuur S1 geeft dit weer.



Figuur S1 Materialen in gebouwen

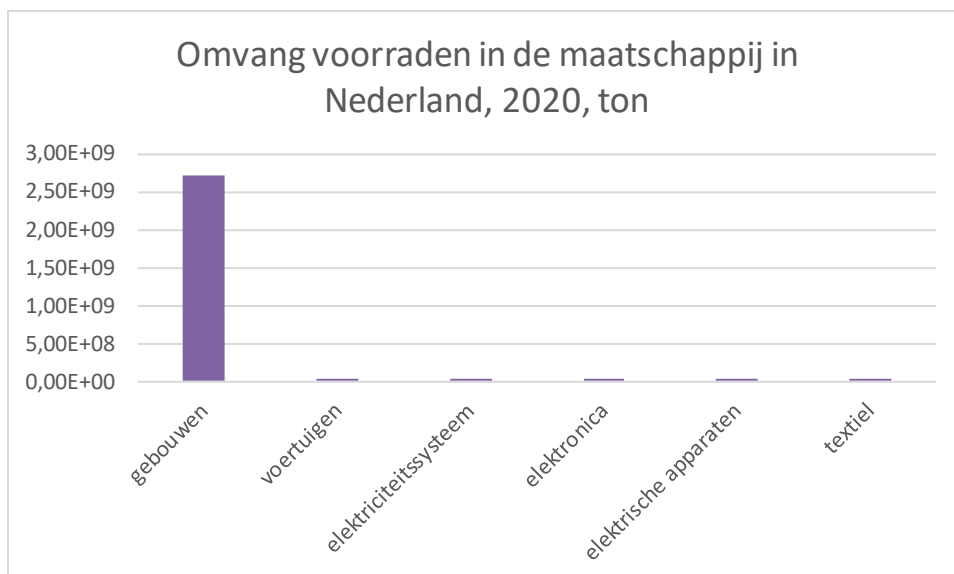
Constructiematerialen zoals beton, baksteen en cement vormen het grootste aandeel, maar er zijn ook grote hoeveelheden staal en andere metalen in deze voorraad te vinden. Woningen vormen een grotere voorraad dan de utiliteitsbouw. Metalen vinden we meer in de utiliteitsbouw. In een vervolgonderzoek gaan we in op de in- en uitstromen van deze voorraden: nieuwbouw, renovatie en sloop.

Elektronische machines is een voorraad die veel metalen bevat en vanuit dat oogpunt relevant is om mee te nemen. In 2019 is de omvang van die voorraad in Nederland geschat op 10.333 kiloton. Voor deze voorraad, en ook voor de voorraad textiel, is ook naar in- en uitstromen gekeken. De instroom van elektronische machines (vraag) is voor 2019 geschat op 1.041 kiloton, en de uitstroom (afdanking) op 684 kiloton. Zoals voor veel andere voorraden ook geldt, is ook deze voorraad dus groeiend. Helaas bleek het niet mogelijk om deze inventarisatie op productniveau te koppelen aan materiaalgehalten. Om toch een indruk te krijgen van de specifieke materiaalvoorraden hebben we voor Figuur S3 de materiaalintensiteiten toegepast met betrekking tot staal, koper en aluminium van de categorie "Equipment Large" uit het onderzoek naar de materiaalvoorraden in elektronica (van Oorschot et al., 2020a).

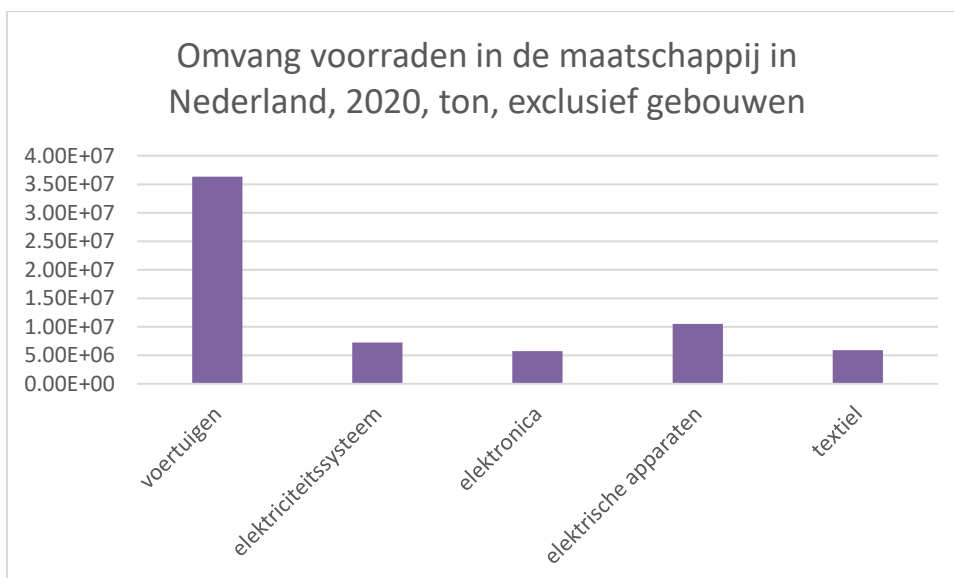
Textiel is een heel andersoortige voorraad. De materialen zijn gebaseerd op biomassa of kunststof, niet op metaal en beton. De dynamiek van deze voorraad is groot waardoor veranderingen snel kunnen gaan, in tegenstelling tot bijvoorbeeld gebouwen waar veranderingen tientallen jaren nodig hebben om een effect te laten zien. In 2019 bedroeg de omvang van de Nederlandse voorraad aan textiel 5.973 kiloton. In hetzelfde jaar was de instroom in de textiel voorraden ongeveer 707 kiloton en de uitstroom 609 kiloton.

Onderstaande figuur toont de omvang van de voorraden die we tot nu toe, in 2019 en 2020, hebben geïnventariseerd. Gebouwen domineren als we kijken naar het totaalgewicht. Om die reden tonen we dezelfde figuur nogmaals exclusief gebouwen.

Figuur S2a Omvang voorraden in gebouwen, voertuigen, het elektriciteitssysteem, elektronica, elektronische machines en textiel in Nederland, 2020



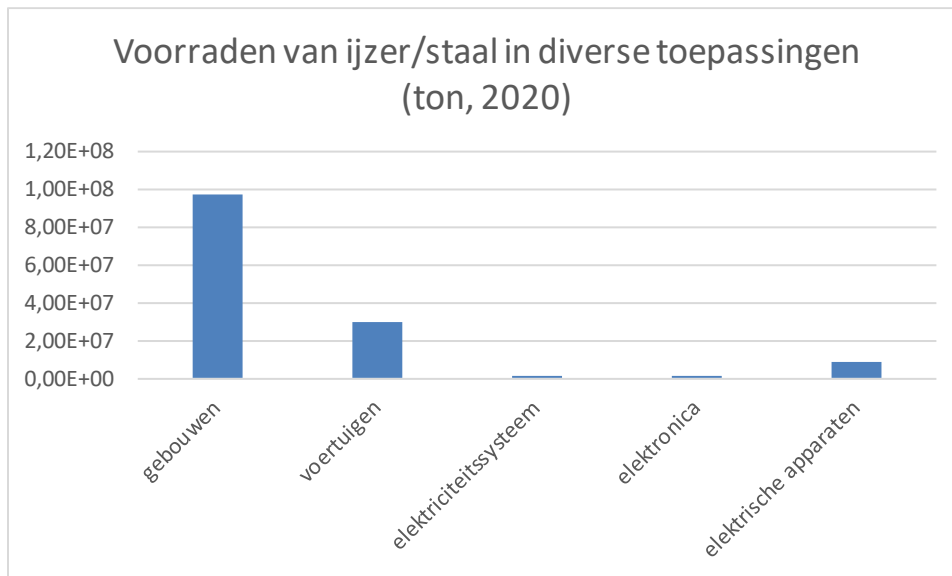
Figuur S2b Omvang voorraden in voertuigen, het elektriciteitssysteem, elektronica, elektronische machines en textiel in Nederland, 2020



Zonder gebouwen kunnen we concluderen dat voertuigen de grootste voorraad vormen. De overige vier bevinden zich in dezelfde ordegrrootte, tussen 5 en 10 miljoen ton.

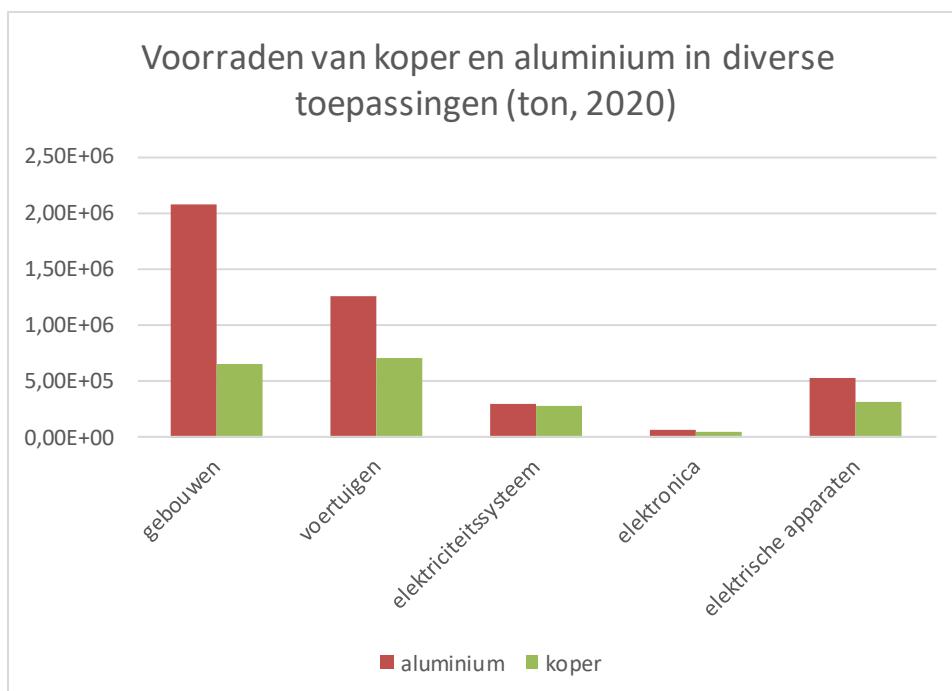
De omvang zegt nog weinig over de materialen die we in deze voorraden aantreffen. Met uitzondering van textiel zijn de voorraden grotendeels opgebouwd uit metalen en mineralen. Voor de bouw en het elektriciteitssysteem vormt beton het grootste onderdeel. We kunnen de vergelijking maken voor drie bulk-metalen: staal, aluminium en koper. Onderstaande figuren laten dit zien.

Figuur S3a Voorraden van ijzer en staal in gebouwen, voertuigen, het elektriciteitssysteem, elektronica en elektronische machines, Nederland, 2020.



Ijzer en staal wordt vooral in gebouwen aangetroffen. Het gaat met name om staal in de constructie, zoals in gewapend beton. Ook in voertuigen vinden we interessante hoeveelheden staal. De staalvoorraad in voertuigen is kleiner dan die in gebouwen, maar voor de stromen in en uit deze voorraad geldt dit mogelijk niet, vanwege de veel kortere levensduur.

Figuur S3b Voorraden van aluminium en koper in gebouwen, voertuigen, het elektriciteitssysteem, elektronica en elektronische machines, Nederland, 2020.



Voor koper en aluminium zien we een ander beeld. Deze metalen zijn verspreid over alle onderzochte voorraden, gebouwen vormen nog steeds een grote voorraad maar domineren niet.

Kritische materialen zijn te verwachten in elektronische machines, maar dit is niet onderzocht. Ook voor gebouwen is dit niet onderzocht, maar naar verwachting zijn kritische materialen in de bouw beperkt tot additieven in legeringen van staal. Onderzoek naar kritische materialen zou zich het best kunnen concentreren op elektronica, elektronische machines, elektriciteitsopwekking en –opslag, en elektrische voertuigen.

Er zijn nog meer relevante voorraden, die geïnventariseerd moeten worden om een totaalbeeld te krijgen van de stedelijke mijn. Bij de inventarisatie van het elektriciteitssysteem ontbreekt nog de opslag – deze voorraad is momenteel zeer klein maar in de toekomst zal hieraan grote behoefte zijn om de fluctuaties van de op hernieuwbare bronnen gebaseerde elektriciteitsvoorziening te kunnen opvangen. 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.

Uit het onderzoek van 2019 en 2020 blijkt dat het mogelijk en waardevol is het voorraden-onderzoek te koppelen aan geografische informatiesystemen. Voor immobiele voorraden zoals in bouw, infrastructuur en elektriciteitssysteem kunnen GIS systemen ook dienen als databron. Mobiele voorraden als voertuigen, apparaten en textiel zijn niet met behulp van GIS systemen geïnventariseerd, maar zijn daar eventueel wel aan te koppelen. Voertuigen staan geregistreerd op adressen en kunnen daarmee eenvoudig gekoppeld worden aan de BAG GIS. Voor consumentenproducten zou een koppeling gemaakt kunnen worden aan huishoudens. GIS is geografisch specifiek, en kan daarmee een goede basis vormen voor de opbouw van een database die op elk relevant schaalniveau gebruikt kan worden. Dit lijkt een relevante route om te verkennen in het kader van de afstemming van het circulaire economie beleid van de lokale, provinciale en nationale overheden.

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. Daarmee is al een begin gemaakt in een studie naar in- en uitstromen uit het elektriciteitssysteem (van Oorschot et al., 2020c). Hierin zijn verkenningen gemaakt van de (sterk groeiende) vraag naar materialen voor het elektriciteitssysteem onder verschillende scenario's tot 2050. Ook voor de bouw is dit een zeer relevante exercitie, die we in 2021 hopen aan te pakken.

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 | 12 |
| 2 Methode Inventarisatie Voorraden in de Maatschappij t.b.v. Ondersteuning van een Circulaire Economie beleid | 15 |
| 2.1 Het voorraad-stroom systeem van de maatschappij. | 15 |
| 2.2 “Prospecting the urban mine” | 15 |
| 2.2.1 Berekenen van voorraden uit stroomgegevens | 16 |
| 2.2.2 Rechtstreekse inventarisatie van voorraden..... | 17 |
| 3 Case study Gebouwen | 19 |
| 3.1 Inleiding | 19 |
| 3.2 Methode & Data | 19 |
| 3.2.1 Methode | 19 |
| 3.2.2 Data | 20 |
| 3.3 Resultaten & discussie..... | 26 |
| 3.3.1 Totalen materiaalvoorraden | 26 |
| 3.3.2 Hibernating stocks | 27 |
| 3.3.3 Ruimtelijke spreiding | 27 |
| 3.3.4 Vergelijking met andere voorraadgroepen | 33 |
| 3.3.5 Vergelijking materiaalintensiteiten met de literatuur | 33 |
| 3.3.6 Verhouding resultaten materiaalvoorraad tot andere rapportages | 36 |
| 3.3.7 Onderzoek onzekerheden en limitaties | 37 |
| 3.3.8 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek | 38 |
| 3.4 Conclusie | 39 |
| 4 Case studies Elektronische machines en Textiel | 41 |
| 4.1 Inleiding | 41 |
| 4.1.1 Achtergrond..... | 41 |
| 4.1.2 Doelen | 41 |
| 4.1.3 Leeswijzer | 42 |
| 4.2 Methode | 42 |
| 4.3 Resultaten..... | 44 |
| 4.3.1 Levensduur | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3.2 | Voorraden van textiel en elektronische machines..... | 47 |
| 4.3.3 | In- en uitstromen van de voorraden in 2019 | 50 |
| 4.4 | Vooronderzoek naar conversie materialen..... | 53 |
| 4.5 | Conclusies en aanbevelingen | 57 |
| 4.5.1 | Conclusies..... | 57 |
| 4.5.2 | Aanbevelingen | 58 |
| 5 | Conclusies, discussie, aanbevelingen | 59 |
| 5.1 | Conclusies..... | 59 |
| 5.2 | Discussie | 60 |
| 5.2.1 | Discussie: data en onzekerheden | 60 |
| 5.2.2 | Discussie: methode | 61 |
| 5.2.3 | Discussie: voorraden in de maatschappij..... | 62 |
| 5.3 | Aanbevelingen..... | 63 |
| 5.3.1 | Gebruik voorraad-informatie voor een circulaire economie beleid | 63 |
| 5.3.2 | Uitbreiding inventarisatie..... | 64 |
| 5.3.3 | Data en onzekerheden | 66 |
| 6 | Referenties | 68 |
| | Bijlagen | 71 |
| | Bijlage A ProSUM urban mining methode..... | 71 |
| | Bijlage B. Materiaalintensiteiten van verschillende gebouwtypen..... | 72 |
| | Bijlage C. Totalen materialen per gebouwtype en bouwcohort | 75 |
| | Bijlage D. Vergelijking benadering oppervlakteberekening | 76 |
| 1. | Bijlage 1 – Put-on-market tijdreeks Textiel | 78 |
| 2. | Bijlage 2 – Put-on-market tijdreeks Elektronische Machines..... | 79 |
| 3. | Bijlage 3 – Links alle IH met MM | 80 |

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 over voorraden van materialen in de maatschappij maakt onderdeel uit van Werkpakket 3: Grondstoffen en Effectmonitoring. Het is een vervolg op een eerdere studie naar voorraden, gepubliceerd in begin 2020 (van Oorschot et al., 2020a).

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 materiaalengebruik 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 gegeven 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 sinds het stoppen van afvalstort 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 vooral op vraag 1. Daarnaast is aandacht besteed aan vraag 2 voor de voorraden elektronische machines en textiel.

In de voorraden-studie van 2019 is een inventarisatie gemaakt van materialen in het elektriciteitssysteem, in elektronica en in voertuigen (van Oorschot et al., 2020a). Daaruit is gebleken dat deze voorraden op zichzelf al aanzienlijk zijn: een ordegrrootte die, per inwoner, overeenkomt met wat er nu bekend is over geologische voorraden. In 2020 is de voorraden-inventarisatie uitgebreid met drie nieuwe voorraden: gebouwen, elektronische machines en textiel. Deze kwamen in een scoping naar voren als voorraden die met prioriteit geïnventariseerd moeten worden.

De voorraad in gebouwen wordt ingeschat als de grootste voorraad die we hebben. Het leeuwendeel zal bestaan uit beton, baksteen en andere constructiematerialen. Naar verwachting zal ook de hoeveelheid staal, koper, aluminium, en andere bouw-gerelateerde metalen als zink en lood groot zijn. Kwantificering hiervan is om die reden erg interessant. Het is ook een uitdaging, vanwege de enorme aantallen gebouwen en de diversiteit daarin. Als basis voor deze analyse gebruiken we de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) die geïmplementeerd is in ArcGIS, een geografisch informatiesysteem. In toenemende mate constateren we dat GIS informatie een rijke bron kan zijn van data over de *urban mine*.

In de voorraden-studie van 2019 is geconstateerd dat elektronica een weliswaar relatief kleine, maar wel heel relevante voorraad is vanuit het oogpunt van kritische materialen. De dynamiek van die voorraad is hoog, vanwege de snel voortschrijdende technologieontwikkeling en de relatief korte levensduur van de producten in deze categorie. Dit rapport bevat de resultaten van een voorraadstudie over elektronische machines. Ook deze categorie kan zeer relevant zijn voor kritische materialen.

Textiel is een productcategorie die momenteel in de aandacht staat. Veel studies naar circulaire businessmodellen hebben textiel als onderwerp, van tweedehands kledingbedrijven tot *extended producer responsibility* (EPR) voor tapijt. Vanwege het grote aantal initiatieven en studies op dit gebied, is het relevant een database te produceren die voor al deze studies kan worden gebruikt, zoveel mogelijk gebaseerd op statistische gegevens.

In de voorraden-studie van 2019 is geconcludeerd dat het belangrijk is, de voorraden-inventarisatie uit te breiden met een studie naar instromen (vraag) en uitstromen (afval dat mogelijk weer teruggevoerd kan worden in de economie). Dit heeft geleid tot een tweetal studies die ook in 2020 zijn uitgevoerd en waarvan in een aparte rapportage verslag wordt gedaan Tunn en Delahaye (2020) hebben enkele databronnen en benaderingen getest om de export van verschillende uitstromen uit de voorraden te inventariseren. Van Oorschot et al. (2020c) hebben in- en uitstromen van het elektriciteitssysteem gemodelleerd uitgaande van verschillende energiescenario's tot 2050.

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 gebouwen. Hoofdstuk 4 bevat de rapportage van de case studies naar elektronische machines en textiel. In Hoofdstuk 5 worden de belangrijkste discussiepunten, conclusies en aanbevelingen uit het onderzoek gerapporteerd. Referenties zijn te vinden in hoofdstuk 6, 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 principiële 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 (zie 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:

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

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

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

Waarbij $F_{\text{in}}(t)$ de instroom is op tijdstip t , $F_{\text{out}}(t)$ de uitstroom op tijdstip t , L de levensduur is van de toepassingen van de grondstof in de maatschappij, $\text{NAS}(t)$ 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 stroom-gerelateerde benadering toegepast voor de elektronische machines en textiel case studies.

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 zinnvoller 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 gebouw-eigenschappen. Wellicht is het nuttig om bepaalde onderdelen apart te classificeren, zoals deuren of raamkozijnen. Deze zouden als geheel kunnen worden "geogst" 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 recyclings-potentieel. In de bijlage staat een beschrijving van de in ProSUM gehanteerde benadering.

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. Maar ook voor voorraden met een lange levensduur zoals de gebouwde omgeving is een rechtstreekse voorraad-inventarisatie een goed idee. Om deze voorraden via een stroom-benadering in te schatten moeten de tijdreeksen met gegevens over in- en uitstromen van 100 – 500 jaar compleet zijn. Dat is niet het geval.

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 gebouwen wordt een rechtstreekse inventarisatie van de voorraden in de maatschappij gemaakt. De case studies naar elektronische machines en textiel hanteren een op in- en uitstromen gebaseerde benadering.

3 Case study Gebouwen

3.1 Inleiding

Uit de scoping analyse (van Oorschot et al., 2020b) kwam naar voren dat er nog geen volledige voorraadinventarisatie is uitgevoerd voor de Nederlandse bouw. Met volledig bedoelen wij een beeld van heel Nederland en een totaalbeeld van de materiaalhoeveelheden in zowel de woning- als de utiliteitsbouw. De bouw vormt veruit de grootste materiaalvoorraad van de *urban mine*. Daarnaast leiden factoren zoals bevolkingsgroei, verstedelijking, en de benodigde sloop, restauratie en verduurzaming van gebouwen tot een groeiende materiaalvraag in de komende decennia. Om de Nederlandse CE doelstellingen te behalen is daarom inzicht in de omvang en dynamiek van deze voorraadgroep essentieel. In deze studie kijken we in detail naar de omvang van de huidige voorraad. Dit vormt de basis voor het maken van projecties voor de dynamiek van de voorraad, de bijbehorende vraag naar materialen en de (theoretisch) te behalen voorziening van die vraag met materialen uit de *urban mine*. Relevante materialen omvatten hier met name mineralen (zoals beton en baksteen), metalen (zoals staal, aluminium, koper), glas en hout.

Uit de scoping analyse bleek dat er voldoende aanknopingspunten zijn om een dergelijke analyse uit te voeren. Ten eerste op basis van de ruimtelijke datasets BAG en BAG3D (ArcGIS, 2020a,b). Deze datasets bevatten locatie specifieke informatie per pand met betrekking tot de oppervlakte, de hoogte, de gebruiksfunctie(s), en het bouwjaar. Daarnaast is een substantiële hoeveelheid aan literatuur beschikbaar waarin materiaalintensiteiten van gebouwen worden gerapporteerd. Over het algemeen zijn gegevens voor de materiaalintensiteiten ruim beschikbaar voor de woningbouw, maar zijn de databronnen voor de utiliteitsbouw schaarser, met name voor industriële gebouwen.

De structuur van dit hoofdstuk is als volgt: Ten eerste worden de materiaal-intensiteiten van de gebouwen bepaald, op basis van gebouwfunctie en bouwjaar. De resultaten zijn gecombineerd met de ruimtelijke data van de BAG en BAG3D om zo de totale materiaalvoorraad, met ruimtelijke component, te berekenen. Ten slotte worden de resultaten gecontrasteerd met de literatuur, worden de beperkingen van het onderzoek besproken, en worden mogelijkheden voor toekomstig onderzoek geïdentificeerd.

3.2 Methode & Data

3.2.1 Methode

Om tot de materiaalvoorraad in Nederlandse gebouwen te komen is de volgende benadering gehanteerd. Ten eerste is de ruimtelijke data bewerkt in ArcGIS versie 10.7.1. We gebruiken in deze studie de BAG (3D) data, een ruimtelijke dataset die voor heel Nederland de locatie, oppervlakte, hoogte, het bouwjaar en de gebruiksfunctie(s) voor elk gebouw bevat. Gezien de grootte van de data (17 GB), is deze eerst in ArcGIS opgesplitst per gemeente. De verkregen *ShapeFile data* is vervolgens in een Python model, met behulp van de *GeoPandas* en *Pandas* plug-ins verder verwerkt en geanalyseerd. Het model itereert door de data van elk gemeente om tot de totale omvang van de *urban mine* van Nederlandse gebouwen te komen.

Op basis van data uit een studie van EIB & Metabolic (Arnoldussen et al., 2019) is de materiaalintensiteit per gebouwtype en bouwcohort bepaald. De beschrijving van de classificaties wordt besproken in de volgende paragraaf. Wij hebben deze data ook naast de materiaalintensiteiten uit de literatuur gelegd. Hiertoe is de database van Heeren & Fishman (2019) geanalyseerd. Ook zijn de materiaalintensiteiten vergeleken met recente studies naar materialen in gebouwen van Deetman et al. (2020), Marinova et al. (2020) en Sprecher et al. (in review).

Aan de hand van de BAG data, het python model en de materiaalintensiteit data zijn de resultaten berekend per pand door de materiaalintensiteiten (specifiek per gebouwclassificatie en bouwcohort) te vermenigvuldigen met de totale gebruiksoppervlakte (in m²) van het pand. Het model houdt er rekening mee dat de materiaalintensiteiten zijn gespecificeerd in kg/m² bruto vloeroppervlak (BVO), terwijl de BAG data gebruiksoppervlak (GO) hanteert. Hiertoe zijn de materiaalintensiteiten uit EIB & Metabolic (Arnoldussen et al., 2019) omgerekend naar kg/m² GO met behulp van “vormfactoren” uit hetzelfde rapport.

De resultaten zijn gepresenteerd als de totaal massa in ton per materiaal, specifiek voor elk gebouwtype en bouwcohort. Daarnaast is de ruimtelijke dichtheid van de materialen gepresenteerd op kaarten in kilogram of ton per vierkante meter, of ton per pand, op verschillende schaalniveaus (per pand, per buurt, per gemeente en per provincie). Ten slotte zijn de totalen vergeleken met andere voorraadgroepen, om een beter inzicht te krijgen in het verschil in omvang van de verschillende *urban mines*.

3.2.2 Data

Classificaties gebouwen

In de BAG wordt een onderscheid gemaakt tussen de volgende gebouwfuncties: woonfunctie, bijeenkomstfunctie, cel functie, kantoorfunctie, industriële functie, gezondheidsfunctie, logiesfunctie, onderwijsfunctie, winkelfunctie en overig. In de literatuur wordt meestal een verder onderscheid in woningen gemaakt. Zo beschouwen Miatto et al. (2019) eengezinswoningen als kleine gebouwen, meersgezinswoningen (appartementen) tot een hoogte van 12 m (4 verdiepingen) als middelgrote gebouwen en woningen hoger dan 12 meter als grote woningen. Mastrucci et al. (2019) analyseren eengezinswoningen en meergezinswoningen. Ook in de database van Heeren en Fishman (2019) worden eengezinswoningen en meergezinswoningen onderscheiden. Marinova et al. (2020) analyseren seriële woningen, appartementen, vrijstaande woningen en woonflats vanaf vijf etages (ca. 15 meter). Arnoldussen et al. (2019) onderscheiden vrijstaande woningen, 2-onder-1 kap woningen, seriële woningen en appartementen tot 6 etages.

In het werk van Deetman et al. (2020) wordt naar een vijftal servicegebouwen gekeken: kantoren, winkels, hotels en restaurants en overige servicegebouwen. Er zijn meer studies die naast woningen ook materialen in commerciële en industriële gebouwen beschouwen. Kleeman et al. (2016, 2017) maken in een studie van Wenen (Oostenrijk) een onderscheid tussen residentiële, commerciële en industriële gebouwen, en Sprecher et al. (in review) analyseren commerciële gebouwen, kantoren en

overige gebouwen. Arnoldussen et al. (2019) beschouwen naast woningen ook kantoren (klein en groot), zorggebouwen, winkels, distributiecentra, bedrijfshallen en scholen (VO en basisschool).

In deze studie hebben wij de BAG-data geclassificeerd op basis van de gebruikte bouwtypen in Arnoldussen et al. (2019). Er is een onderscheid gemaakt tussen vrijstaande woningen, (zowel vrijstaande woningen als 2-onder-1 kap woningen), appartementen (tot en met 6 etages) en hoogbouw woonflats (vanaf 6 etages) (Tabel 3.1). Naast woningen zijn kantoorfunctie groot, kantoorfunctie klein, winkel, zorgcentrum, distributiecentrum, bedrijfshal en onderwijs onderscheiden. Tabel 3.1 laat een overzicht zien van de gebruikte classificaties met bijbehorende verwerking van de materiaalintensiteiten en de BAG data.

Tabel 3.1. Gebruikte bouwclassificaties in deze studie en de gebruikte aannames voor de materiaalintensiteiten uit Arnoldussen et al. (2019) en verwerking van de BAG data (2020).

| Gebruikte bouwclassificaties | Materiaalintensiteiten uit EIB & Metabolic (2019) | Classificering in de BAG |
|------------------------------|---|--|
| Vrijstaand | Gemiddelde van "2-1 kap 3 laags zadeldak" en "vrijstaande woningvilla zadeldak" | Woningtype = vrijstaand of woningtype = twee-onder-een-kap |
| Serieel | "Seriematige woning 3 laags zadeldak" | Woningtype = tussenwoning/geschakeld of woningtype = hoekwoning |
| Appartement | "Appartementenblok tot 6 lagen" | Woningtype = appartement & oppervlakte $\leq 5.000 \text{ m}^2$ |
| Hoogbouw woonflat | "Kantoorgebouw groot" | Woningtype = appartement & oppervlakte $> 5.000 \text{ m}^2$ |
| Winkel | "Winkel met appartementen" | Gebruiksdoel = winkelfunctie |
| Kantoor klein | "Kantoorgebouw klein" | Gebruiksdoel = kantoorfunctie & oppervlakte $\leq 5.000 \text{ m}^2$ of gebruiksdoel = zorgfunctie en oppervlakte $\leq 15.000 \text{ m}^2$ of gebruiksdoel = bijeenkomstfunctie en oppervlakte $\leq 5.000 \text{ m}^2$ |
| Kantoor groot | "Kantoorgebouw groot" | Gebruiksdoel = kantoorfunctie & oppervlakte $> 5.000 \text{ m}^2$ of gebruiksdoel = zorgfunctie en oppervlakte $> 15.000 \text{ m}^2$ of gebruiksdoel = bijeenkomstfunctie en oppervlakte $> 5.000 \text{ m}^2$ |
| Distributiecentrum | "Distributiecentrum" | Gebruiksdoel = industriefunctie & oppervlakte $> 10.000 \text{ m}^2$ of gebruiksdoel = overig & oppervlakte $> 1.500 \text{ m}^2$ |
| Bedrijfshal | "Bedrijfshal met kantoor" | Gebruiksdoel = industriefunctie & oppervlakte $\leq 10.000 \text{ m}^2$ of gebruiksdoel = overig & oppervlakte $\leq 1.500 \text{ m}^2$ |
| Zorg | "Woonzorgcentrum" | Gebruiksdoel = zorgfunctie en oppervlakte $> 15.000 \text{ m}^2$ |
| Onderwijs | Gemiddelde van "School VO" en "Brede school" | Gebruiksdoel = onderwijsfunctie |

Materiaalintensiteiten

Er zijn een aantal studies gevonden (waarvan één nog in review) die rapporteren over materialen in Nederlandse gebouwen. Müller et al. (2006) voerden een materiaalstroom analyse uit voor beton in de Nederlandse woningbouw. Sprecher et al. (in review) bestudeerden 17 materialen in woningen en utiliteitsgebouwen, specifiek per bouwjaarklasse, op basis van sloopdata van het bedrijf New Horizon. Ook in Arnoldussen et al. (2019) wordt naar een breed scala van materialen en bouwtypen gekeken; materialen in deze studie omvatten beton, hout, glas, gips, papier, zand, baksteen, keramiek, isolatie, bitumen, kunststoffen, koper, staal en ijzer, overige metalen, overig steen en overig. Materiaalintensiteiten zijn specifiek voor 5 bouwjaarklassen (<1945 , $1945-1970$, $1970-2000$, $2000-2014$, >2014). De data is verkregen uit gebouwinspecties en inventarisaties, de bouw- en sloopactiviteiten in 2014 en gegevens over de herstel en verbouwwerkzaamheden in dat jaar. Ook in het PUMA project (van der Voet et al., 2016) is de *urban mine* in kaart gebracht, maar alleen voor Amsterdam en gefocust op twee metalen. Ten slotte heeft TNO een studie uitgevoerd naar materialenstromen in en de milieu-impact van de Nederlandse bouw (TNO, 2017). Hierbij zijn

ook de materiaalvoorraden geanalyseerd, maar met relatief weinig detail in de materialisatie ten opzichte van Arnoldussen et al. (2019). TNO berekent de voorraad in woningen op basis van een gemiddelde materiaalintensiteit per pand in plaats van oppervlakte per gebouw, waardoor detail verloren gaat.

In deze studie is gekozen om het onderzoek van Arnoldussen et al. (2019) als primaire bron te gebruiken voor het definiëren van de materiaalintensiteiten, wegens de aansluiting van de studie bij de vraag vanuit beleid, het feit dat de gegevens gebaseerd zijn op recente en lokale (Nederlandse) data en het detail in geanalyseerde materialen en typen gebouwen.

Ter vergelijking en ter validatie zijn de materiaalintensiteiten van Arnoldussen et al. (2019) vergeleken met de waarden uit de wetenschappelijke literatuur. Voor de woningbouw is daarvoor een vrij breed aanbod van literatuur beschikbaar, specifiek per type woning en bouwjaar. Dergelijke data is nog beperkt voor de utiliteitsbouw. Ten eerste biedt een database samengesteld door Heeren & Fishman (2019) een ingang voor materiaalintensiteiten in de bouw. In de database zijn meer dan 300 datapunten verzameld, voor 32 materialen. De materialen kunnen worden geaggregeerd tot *bio-based* materialen (o.a., hout), metalen (o.a., staal, koper aluminium), constructiematerialen (o.a., beton, cement, aggregaat, baksteen) en overige materialen (o.a. keramiek, glas, plastic). Alhoewel de meeste datapunten voor woningen zijn, is er ook wat data beschikbaar voor commerciële en industriële gebouwen. Gebouwen met een niet commerciële functie zijn handmatig verder uitgesplitst tot commercieel (24 datapunten), kantoor (4 datapunten) en overig (niet-residentieel, kerk, onderwijs, zorginstelling: 6 datapunten). Industriële gebouwen omvatten 15 datapunten. Omdat de meest recente studies nog niet aan deze database zijn toegevoegd, hebben wij deze aangevuld met de werken van Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020). Deetman et al. (2020) onderscheiden kantoren, winkels, hotels en restaurants en overige service-gebouwen. Alhoewel recent werk van Miatto et al. (2019) ook een goede en gedetailleerde bron vormt voor materiaalintensiteiten voor woningen, komen de classificaties niet overeen met die gemaakt in dit werk en zijn daarom niet meegenomen. De materiaalintensiteiten van Arnoldussen et al. (2019) en Heeren & Fishman (2019) zijn ook vergeleken met de data van Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020) apart, omdat dit een recente en relevante databron is voor materiaalintensiteiten wereldwijd. Ten slotte zijn de materiaalintensiteiten met die van Sprecher et al. (in review) vergeleken. De laatste is met name interessant voor materialen in utiliteitsgebouwen, omdat hier over het algemeen weinig databronnen voor beschikbaar zijn, en Sprecher et al. (2020) data specifiek voor Nederlandse gebouwen leveren, op basis van empirische data (sloopgegevens). Echter is deze dataset voor veel gebouwclassificaties (gebouwtype en bouwcohort) nog incompleet door gebrek aan sloopdata.

In overeenstemming met de beschikbare literatuur zijn de volgende bouwcohorten gebruikt: bouwjaar tot 1945, bouwjaar tussen 1945-1970, bouwjaar tussen 1970-2000, en bouwjaar vanaf 2000. Voor de dataset van Arnoldussen et al. (2019) zijn voor de materiaalintensiteiten van de cohorten 2000-2014 en > 2014 de waarden van het cohort 2000-2014 genomen omdat de materiaalintensiteiten in deze cohorten grotendeels overeen komen, en de cohorten door deze aggregatie vereenkomen met die in de literatuur. Voor alle gebouw-classes was in de studies van Arnoldussen et al. (2019) en Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020) materiaal-intensiteit-data beschikbaar, al waren de laatste twee datasets niet specifiek per bouwjaarcohort. In de datasets van Heeren & Fishman (2019) en Sprecher et al. (in review) zijn niet voor alle classes waarden

gerapporteerd. Als in de analyse voor een bepaald cohort geen data beschikbaar was, is geïnterpoleerd tussen de jaren waar wel data voor beschikbaar is. Als er geen gegevens beschikbaar zijn voor het type woning dan blijven de waarden voor alle cohorten voor dat specifieke bouwtype ongespecificeerd (NaN).

In Arnoldussen et al. (2019), de database van Heeren & Fishman (2019) en de data van Sprecher et al. (in review) worden de materiaal intensiteiten gerapporteerd per m² bruto vloeroppervlak (BVO), terwijl de BAG het Gebruiksoppervlak (GO) rapporteert. Deetman en Marinova rapporteren de materiaalintensiteiten wel per m² GO. Om de BAG-oppervlakten aan te laten sluiten bij de materiaalintensiteiten, zijn vormfactoren gebruikt om de materiaalintensiteiten om te zetten van kg/m² BVO naar kg/m² GO (Tabel 3.2). Om de materiaalintensiteiten uit de literatuur te kunnen vergelijken is ook de data van Sprecher et al. (in review) en Heeren & Fishman (2019) met behulp van de vormfactoren omgerekend naar kg/m² GO (Bijlage A).

Tabel 3.2. Vormfactoren voor conversie van kg/m² GO naar kg/m² BVO op basis van Arnoldussen et al. (2019). De materiaalintensiteiten op basis van BVO gedeeld door de vormfactoren, specifiek voor het bouwtype.

| Gebouwtype | Vormfactor | Aanname |
|--------------------|------------|---|
| Vrijstaand | 0.71 | Gemiddelde van 2-onder-1 kap en vrijstaand |
| Serieel | 0.69 | Seriële woning |
| Appartement | 0.92 | Appartement |
| Woonflat | 0.91 | Gelijk aan kantoor groot |
| Kantoor klein | 0.92 | Gemiddelde van kantoor klein (gemiddelde kantoor klein en middelgroot), bijeenkomst klein (gemiddelde van bijeenkomst klein en middelgroot) en zorg klein |
| Kantoor groot | 0.91 | Gemiddelde van kantoor groot (gemiddelde kantoor groot en middelgroot) en bijeenkomst groot (gemiddelde van bijeenkomst groot en middelgroot) |
| Onderwijs | 0.93 | Gemiddelde van basisschool, middelbare school en hoge school/universiteit |
| Zorg | 0.88 | Zorg groot |
| Winkel | 0.91 | Winkel |
| Bedrijfshal | 0.94 | Gemiddelde van bedrijfsruimten klein en overig klein |
| Distributiecentrum | 0.97 | Gemiddelde van bedrijfsruimten groot en overig groot |

Zoals hierboven beschreven verschillen het aantal en de beschouwde materialen in de datasets. Om tot een overzichtelijke en uniformere classificatie te komen zijn de materialen geaggregeerd tot een maximum van 13 materialen. Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020) beschouwen 6 materialen en de data van Sprecher et al. (in review) is geaggregeerd tot 9 materialen. In de dataset van Arnoldussen et al. (2019) en Heeren & Fishman (2019) zijn de materiaalintensiteiten voor de volgende materialen(categorieën) bepaald: Staal, koper, aluminium, overige metalen, hout, beton, baksteen, overige constructiematerialen, glas, keramiek, plastic, isolatie en overig. Wel moet gerealiseerd worden dat er verschillen zijn in de beschouwde materialen voor de studies in de categorieën “overige metalen”, “overige constructiematerialen”, en “overig”, wat een vergelijking van deze materiaalgroepen niet mogelijk maakt. Zo zijn in overige constructiematerialen in de dataset van Heeren en Fishman (2019) aggregaten, mortel/gips, minerale vulling, gips, asfalt en asbest cement gerekend als overig constructiemateriaal. In de data van Arnoldussen et al. (2019) behoren

tot deze categorie: steen, zand, bitumen, kalkzandsteen en gips. In Arnoldussen et al. (2019) behoren elektronica, lijm en verf en papier tot de categorie "overig". In de dataset van Sprecher et al. (in review) zijn dakgrind, gips, en beton & baksteen (beton en baksteen komen hier ook als losse categorie voor), als overig constructieminaal genomen, en wordt bouw & sloopafval (BSA) tot de groep "overig" gerekend. Wegens de verschillen in de exacte compositie van deze materiaalgroepen in de datasets is in de analyse hier minder nadruk op gelegd. Ten slotte zijn in de dataset van Heeren & Fishman (2019) stro, adobe, linoleum, heraklith, tapijt, papier en gevelbedekking buiten beschouwing gelaten omdat hier onvoldoende of geen waarden voor waren gerapporteerd.

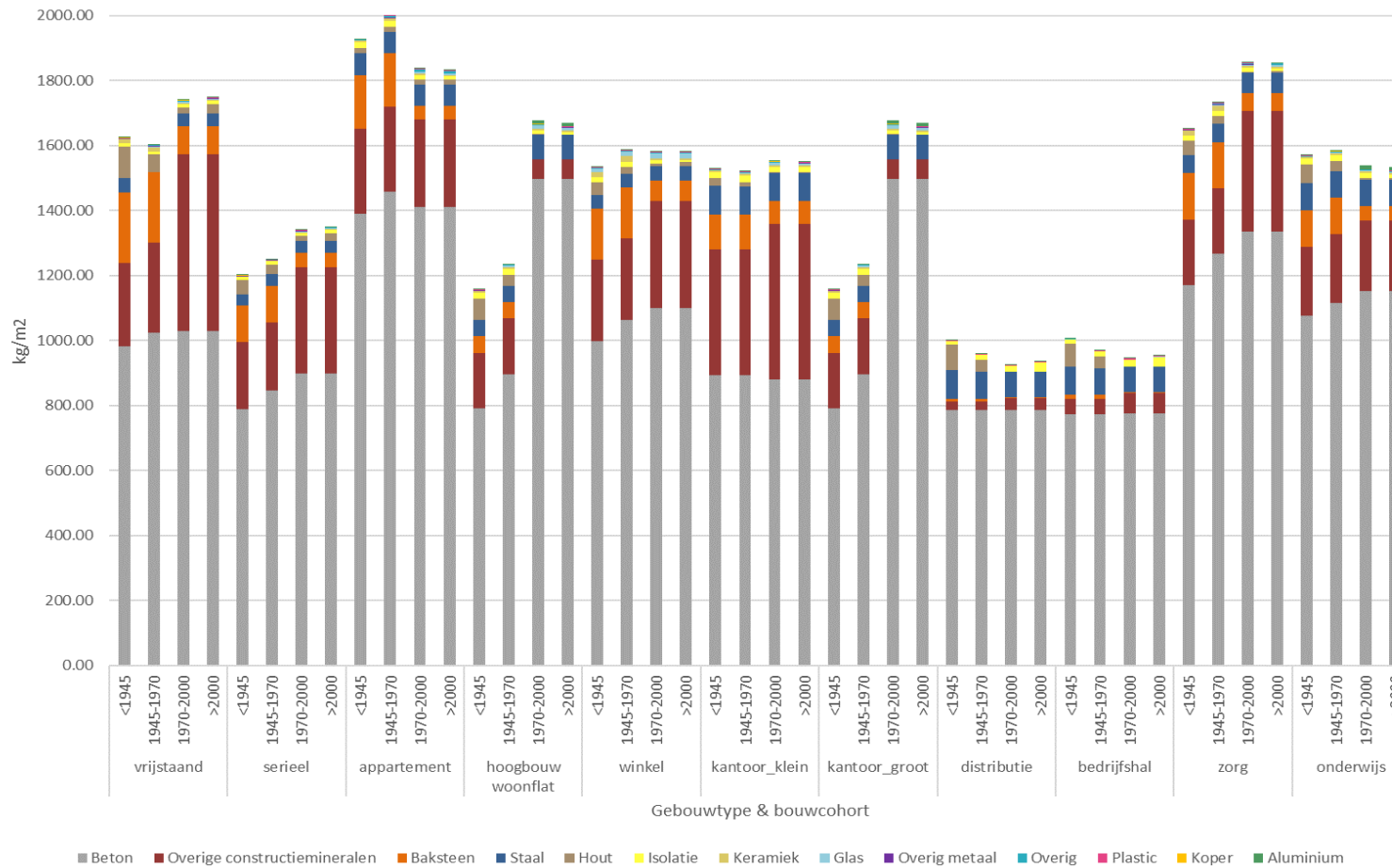
De materiaalintensiteiten uit Arnoldussen et al. (2019), geaggregeerd naar de hiervoor besproken materiaalgroepen en gebouwclassificaties zijn weergegeven in Figuur 3.1. De bijbehorende tabel is te vinden in Bijlage B. In dezelfde bijlage zijn de tabellen met de materiaalintensiteiten op basis van Heeren & Fishman (2019), Deetman et al. (2020), Marinova et al. (2020) en Sprecher et al. (in review) terug te vinden.

Over het algemeen vormt beton de grootste materiaalbulk van het gebouw, gevolgd door baksteen en overige constructiematerialen (Figuur 3.1, Tabel B1 in de Bijlagen). Met ruwweg een ordegrootte kleiner vormen ook staal en hout een aanzienlijk aandeel van de materialen in gebouwen, en tenslotte weer ongeveer een ordegrootte kleiner zijn de materiaalintensiteiten van koper, aluminium en glas ongeveer van eenzelfde grootte.

Van de woningen hebben appartementen de hoogste materiaalintensiteit, met een maximum rond de 2000 kg/m² voor het bouwcohort 1945-1970, gevolgd door vrijstaande woningen (een maximum rond de 1700 kg/m²) en seriële woningen (een maximum rond de 1300 kg/m²). Hier is aangenomen dat hoogbouw woonflats eenzelfde materiaalsamenstelling als grote kantoren hebben. Opvallend is het verschil in materiaalintensiteit van hoogbouw woonflats voor de verschillende bouwcohorten; deze varieert van ongeveer 1200 kg/m² tot 1970 tot 1700 kg/m² vanaf 1970. Het verschil kan worden verklaard door het toenemende gebruik van beton en staal in hoogbouw constructies, terwijl de inzet van traditionele materialen zoals baksteen juist afnemen. Deze trend is ook zichtbaar bij de andere woningtypen.

Winkels, kleine kantoren en onderwijs hebben grofweg eenzelfde totaal massa per vierkante meter, rond de 1600 kg/m². De intensiteit van zorggebouwen ligt wat hoger, rond de 1600 en 1700 kg/m², afhankelijk van het cohort. Bij deze gebouwen is ook een duidelijke trend te zien in de afname van het gebruik van baksteen, en een lichte toename in het gebruik van beton. De materiaalcomposities zijn grofweg vergelijkbaar, alhoewel verschillen duidelijk zichtbaar zijn tussen de bouwcohorten en verschillende gebouwtypen.

Distributiecentra en bedrijfshallen hebben de laagste materiaal massa. De waarden liggen hier rond de 900 en 1.000 kg/m². In deze constructies worden typisch minder materialen zoals beton toegepast. Het gebruik van baksteen is in dit soort gebouwen ook aanzienlijk lager dan in de andere gebouwen, terwijl de waarden voor isolatiemateriaal weer relatief hoog liggen.



Figuur 3.1. Materiaalintensiteiten (kg/m² GO) gebaseerd op Arnoldussen et al. (2019), gegregreerd naar 11 gebouwtypen, 4 bouwcohorten en 13 materialen/materiaalgroepen

3.3 Resultaten & discussie

3.3.1 Totalen materiaalvoorraden

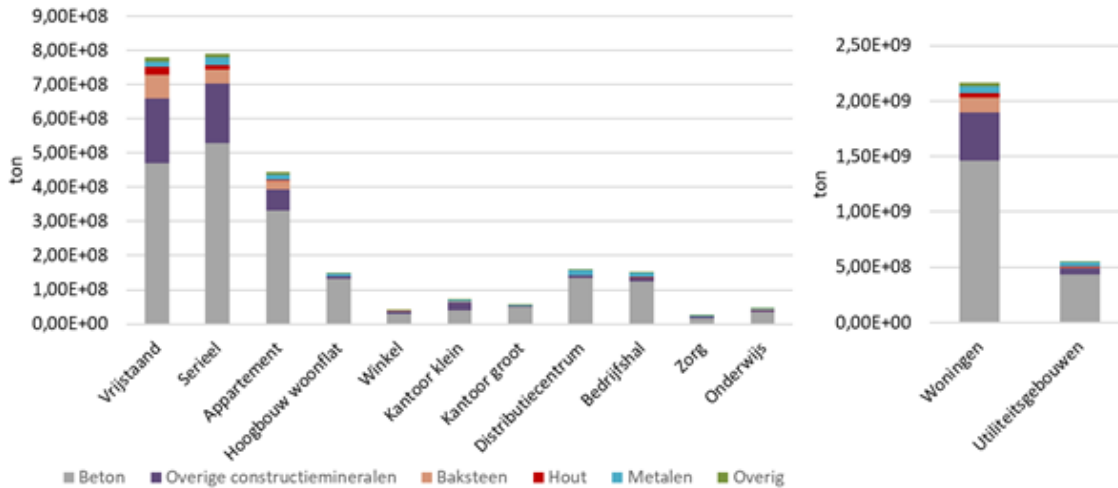
De totalen aan materialen, per bouwtype en bouwcohort voor Nederland zijn berekend en terug te vinden in Bijlage C. Figuur 3.2 laat de resultaten, geaggregeerd naar de zes belangrijkste materiaalgroepen, zien voor de bouwtypen. Rechts in de figuur zijn de waarden geaggregeerd tot residentiële gebouwen en utiliteitsgebouwen.

Beton vormt de grootste materiaalvoorraad, met 1,89 gigaton in totaal, gevolgd door overige constructiematerialen (0,49 gigaton), baksteen (0,15 gigaton), staal (0,10 gigaton), hout (0,05 gigaton) en isolatie (0,02 gigaton). Keramiek omvat 7,2 megaton, glas 5,4 megaton, plastic 2,6 megaton, overig materiaal 3,3 megaton, aluminium 2,1 megaton en overige metalen 1,8 megaton. Ten slotte vormt koper met 0,6 megaton de kleinste materiaalgroep in de bouw.

Het grootste deel van de materialen bevindt zich in de woningen, en met name in vrijstaande (of 2-onder-een kap), seriële woningen en (laagbouw) appartementen. Bij zowel vrijstaande als seriële woningen is het grootste aandeel gebouwd tussen 1970 en 2000 (Bijlage C). Bij hoogbouw woonflats blijkt het grootste deel na 1970 te zijn gebouwd. In totaal bevindt zich in vrijstaande woningen 0,78 gigaton, in seriële woningen 0,70 gigaton materiaal, 0,4 gigaton aan materiaal in appartementen, en 0,15 gigaton aan materiaal in hoogbouw woonflats. De bulk van het materiaal bestaat voor alle woningen uit beton, overige constructiematerialen en baksteen. Ten slotte valt op dat het percentage beton hoger en het percentage baksteen lager is in hoogbouw woonflats dan in de overige woningtypes.

Vergelijkbaar met de materialen in hoogbouw woonflats zijn de voorraden in distributiecentra en bedrijfshallen: 0,16 en 0,15 megaton respectievelijk. Onder deze groepen vallen zowel panden die in de BAG geclassificeerd zijn als industriefunctie, panden met een overige gebruiksfunctie, cel functie, bijeenkomstfunctie, sportfunctie en gebouwen met meerdere gebruiksfuncties (afhankelijk van de oppervlakte van het gebouw gerekend tot distributiecentrum of bedrijfshal). De voorraden in winkels, kantoren, zorgcentra en onderwijsgebouwen zijn, met hoeveelheden tussen de 24 megaton (zorgcentra) en 71 megaton (kantoren klein) substantieel lager dan in de overige bouwtypen.

Wanneer we het totaal voor residentiële gebouwen vergelijken met utiliteitsgebouwen (Figuur 3.2 rechts) dan blijkt de voorraad in residentiële gebouwen (2,2 gigaton) bijna vier groter dan utiliteitsgebouwen (0,6 gigaton). In woningen bestaat 68% uit beton, 20% uit overige constructiematerialen, 6% uit baksteen, 3% uit metalen, 2% uit hout en 1% uit overige materialen. In utiliteitsgebouwen ligt het aandeel beton, met een totaal van 78%, hoger. Verder omvatten de utiliteitsgebouwen 11% overige constructiematerialen, 7% metalen, 2% baksteen, 2% overige materialen, en 1% hout.



Figuur 3.2. Totalen, geaggregeerd naar 5 materialen, per bouwtype en geaggregeerd naar residentiële gebouwen en utiliteitsgebouwen.

3.3.2 Hibernating stocks

De omvang van “hibernating stocks”, voorraden die niet meer in gebruik zijn maar ook geen afvalverwerkingsstroom betreden, is in gebouwen relatief klein. In de BAG is een indicator voor dergelijke voorraden de status: “Pand buiten gebruik”. Dergelijke panden zijn in een dusdanige bouwkundige staat dat niet wordt verwacht dat het pand zal worden hersteld en weer in gebruik zal worden genomen. Echter zijn aan deze panden nog geen sloopvergunningen verleend. In de BAG zijn slechts 479 van dergelijke gebouwen geïdentificeerd. Hiervan heeft het grootste deel geen toegekende gebruiksfunctie (364), een groot deel een woonfunctie (113) en de overige panden ofwel een winkel-, industrie-, bijeenkomst- of logiesfunctie. Van de totale materiaalvoorraad in gebouwen bevindt zich slechts 0,004% in panden buiten gebruik. De omvang van de *hibernating stock* in gebouwen is daarmee irrelevant.

3.3.3 Ruimtelijke spreiding

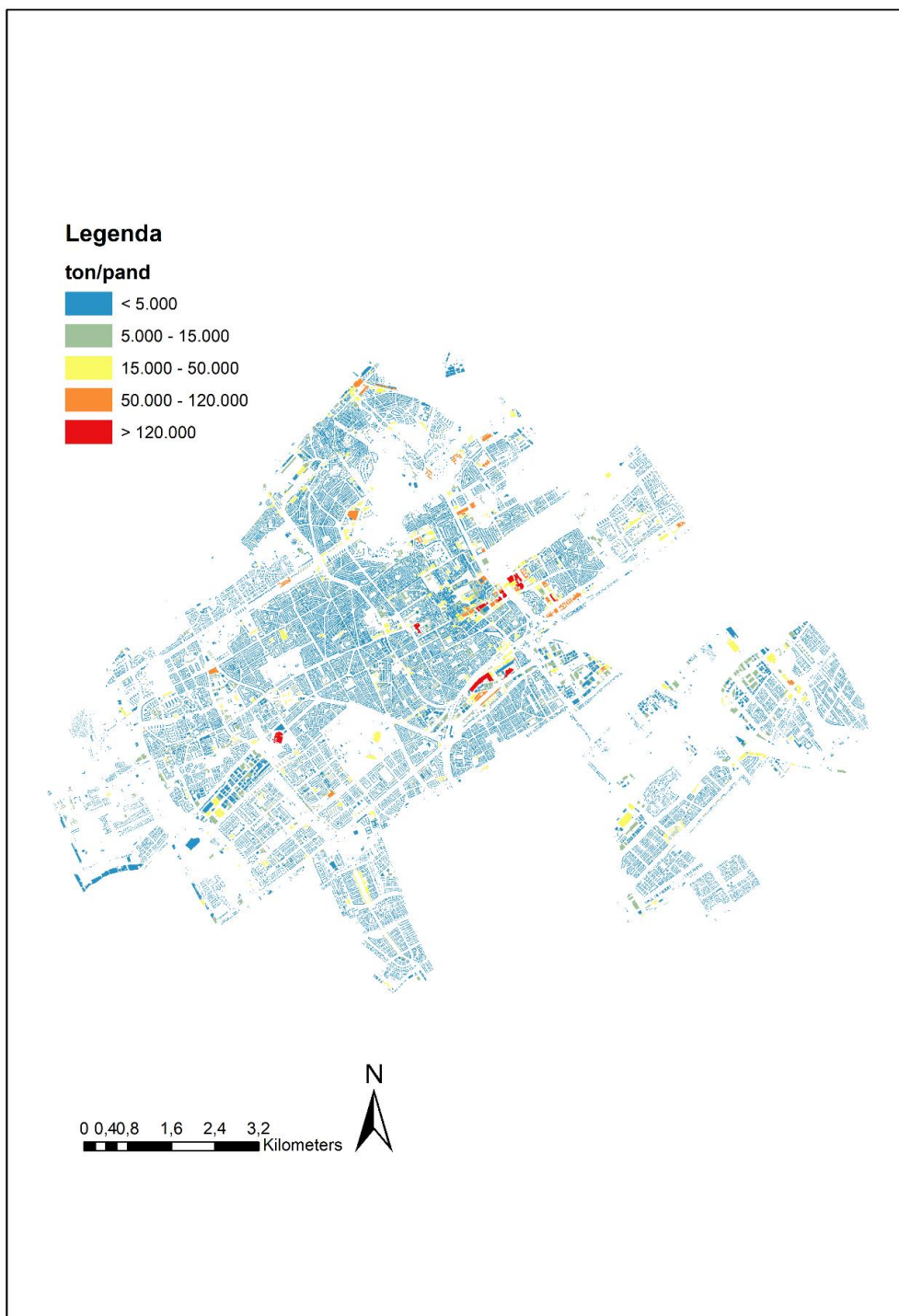
In deze paragraaf illustreren we de ruimtelijke spreiding van de materiaalvoorraden op verschillende schaalniveaus. Figuur 3.3 laat de totaal massa in ton per pand zien voor de beschouwde materialen in de gemeente Den Haag. Vergelijkbare kaarten kunnen gemaakt worden voor de individuele materialen of materiaalgroepen. Op de kaart in Figuur 3.3 zijn kernen met hoge materiaalintensiteiten zichtbaar, zoals bijvoorbeeld in het centrum. Het centrum kenmerkt zich door een hoge dichtheid van gebouwen en typisch grote gebouwen, wat de hogere materiaalintensiteiten verklaart. Materiaalhoeveelheden per pand variëren in de gemeente van minder dan 5.000 ton tot ruim boven de 120.000 ton per pand. De

resultaten zijn te aggregeren naar een gemiddelde materiaaldichtheid op buurtniveau¹ (Figuur 3.4). De kaart in Figuur 3.4 toont de gemiddelde materiaaldichtheid in kg/m² van de betreffende buurt, en geeft daarmee andere informatie dan de totaal massa op gebouwniveau. De materiaalintensiteit varieert per buurt van minder dan 900 kilogram per vierkante meter tot meer dan 5.000 kilogram per vierkante meter. Zowel de informatie op pand- als op buurtniveau kan relevant zijn voor beleid en planning met betrekking tot circulaire sloop- en bouwactiviteiten. Informatie op gebouwniveau kan waardevol zijn voor het plannen van specifieke sloop- en bouwactiviteiten, terwijl het geaggregeerde beeld een beter totaaloverzicht kan geven van de omvang van materiaalvoorraden.

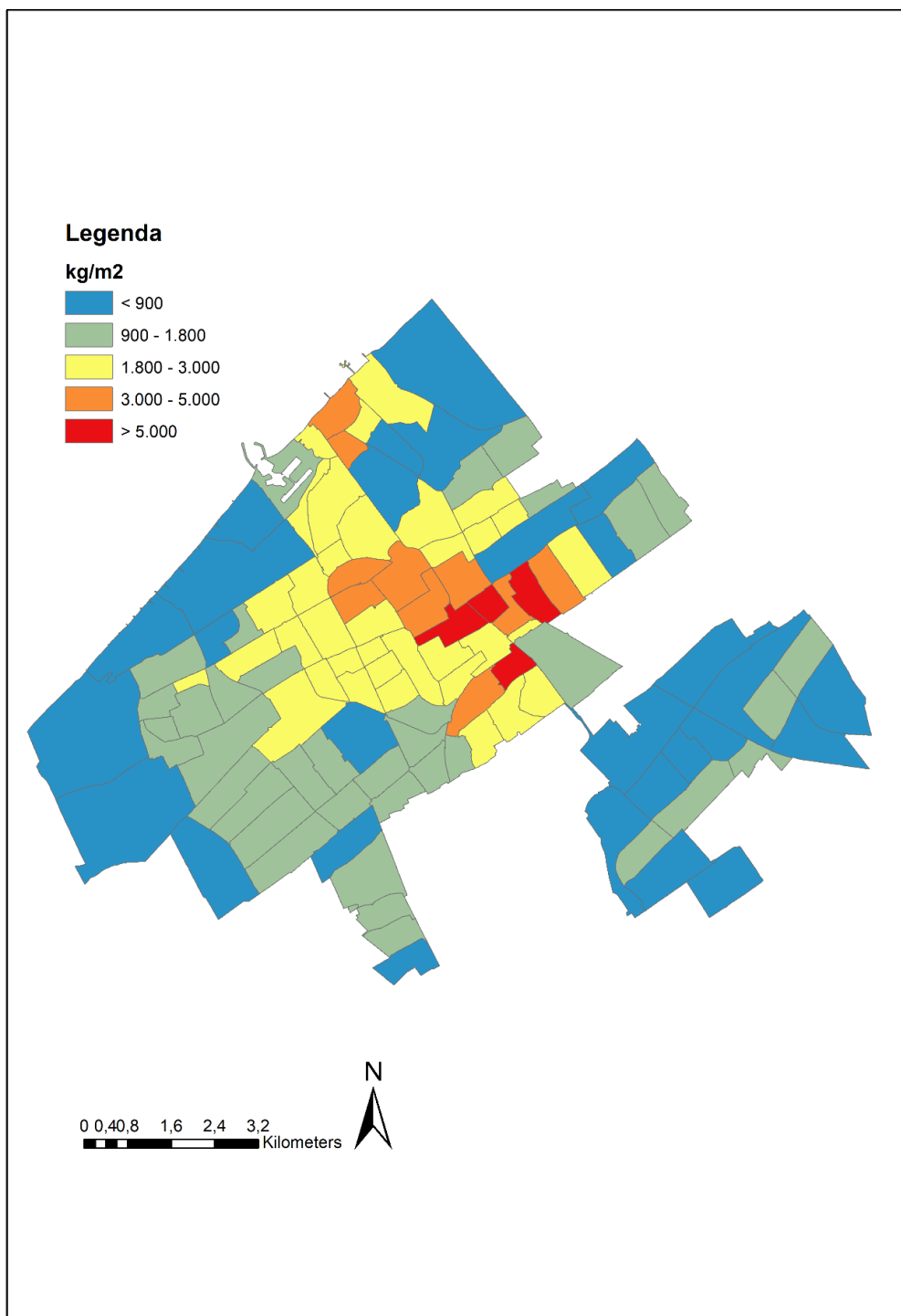
Als we verder uitzoomen kan ook een gemiddelde materiaalintensiteit per gemeente of zelfs per provincie worden weergegeven (Figuren 3.5 en 3.6). De grootste materiaaldichtheden bevinden zich in de randstad en rondom grote steden zoals Amsterdam, Den Haag, Utrecht en Eindhoven (meer dan 400 kg/m²). Wanneer we uitzoomen zien we dat de provincies Utrecht (276 kg/m²) en Zuid-Holland (208 kg/m²) de hoogste gemiddelde materiaaldichtheid hebben. De aggregatie van de resultaten naar verschillende administratieve grenzen maken het mogelijk de informatie aan te laten sluiten bij beleid op meerdere niveaus (gemeentelijk, provinciaal en landelijk).

Omdat in de BAG informatie wordt gegeven over het bouwjaar en de status (bouwvergunning verleend, pand in gebruik, pand buiten gebruik, sloopvergunning verleend,...), van het pand, kan een inventarisatie worden gemaakt van de locatie waar bepaalde materialen, binnen een bepaalde periode, vrijkomen voor hergebruik of recycling. Door deze informatie te koppelen aan de vraag naar materiaal in de maatschappij (niet alleen in de bouw) kan een belangrijke stap worden gezet naar circulariteit.

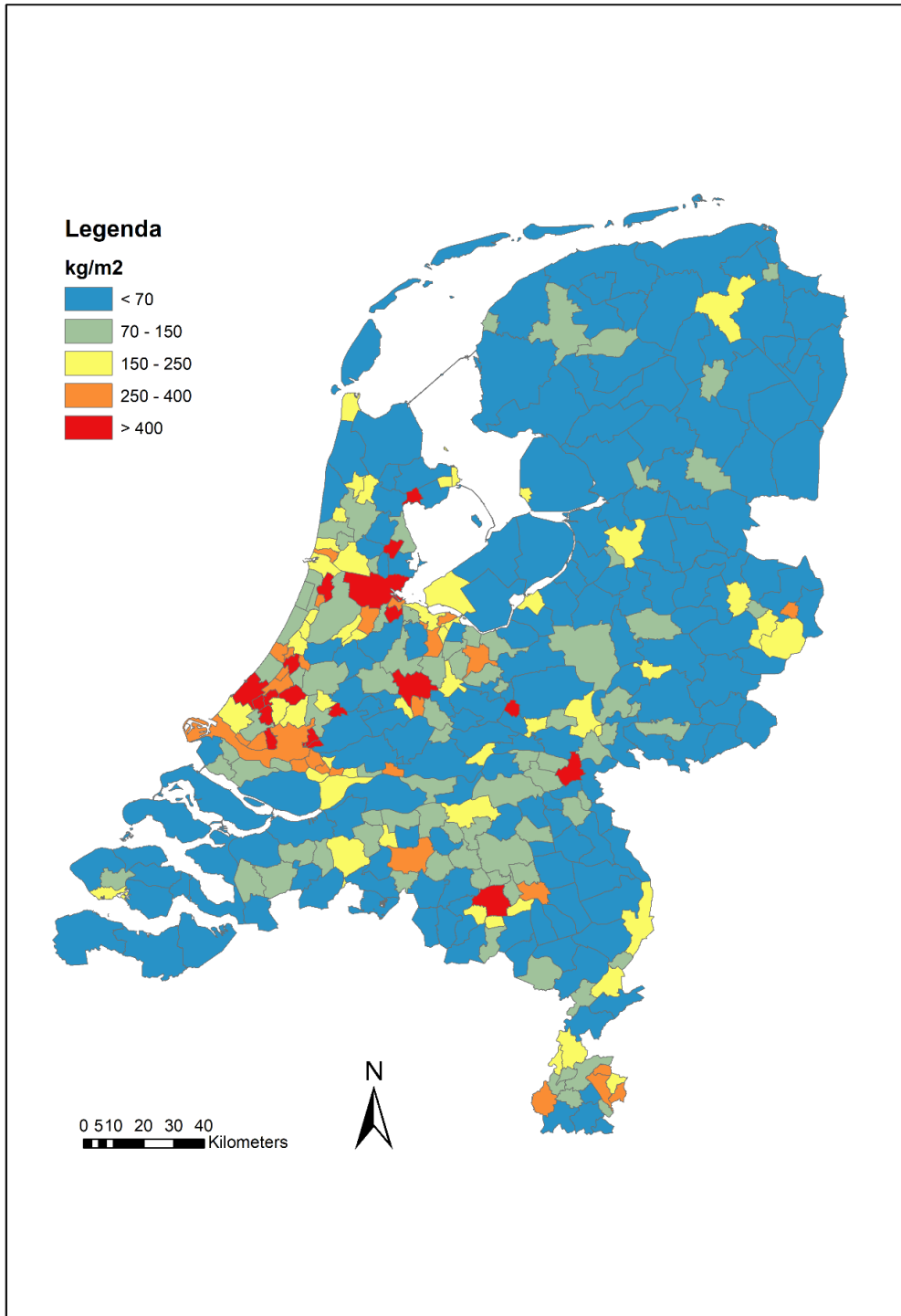
¹ Voor de materiaalintensiteiten op buurt- en gemeenteniveau is het totaaloppervlak, inclusief waterdelen, gehanteerd wegens gebrek aan landoppervlakte data op dit niveau. De oppervlakten van de gemeenten zijn geaggregeerd naar provincie niveau om de materiaaldichtheid op dit niveau in kaart te brengen



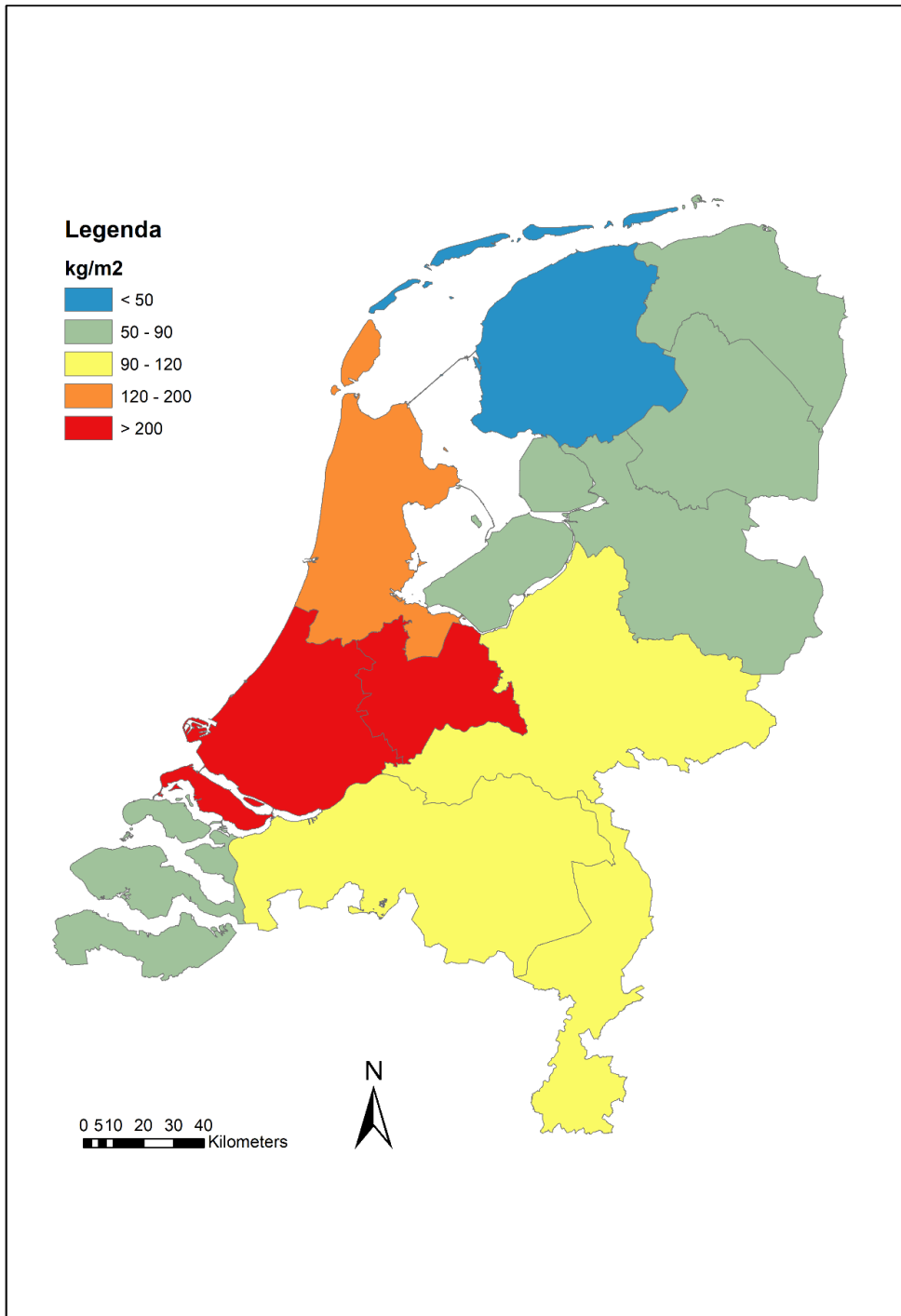
Figuur 3.3. Materiaalvoorraad (totalen) in ton per pand in de gemeente Den Haag.



Figuur 3.4. Materiaalintensiteit (totalen) in kg/m², gemiddelde per buurt in de gemeente Den Haag.



Figuur 3.5. Materiaalintensiteit (totalen) in kg/m², gemiddelde per gemeente in Nederland.



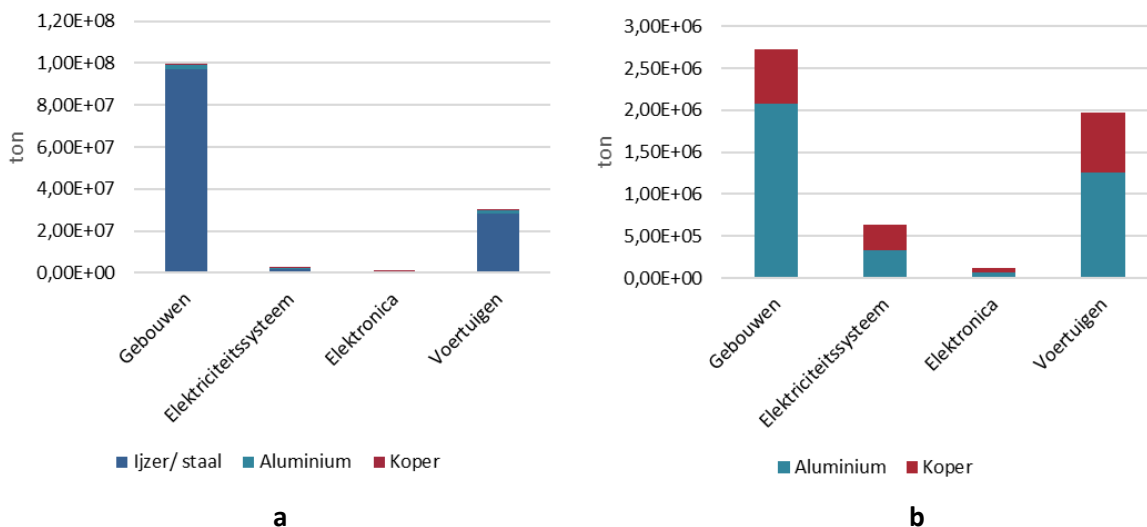
Figuur 3.6. Materiaalintensiteit (totalen) in kg/m², gemiddelde per provincie in Nederland.

3.3.4 Vergelijking met andere voorraadgroepen

De totalen voor staal, koper en aluminium zijn vergeleken met de voorraadomvang in het elektriciteitssysteem, voertuigen en elektronica (Figuur 3.7). Deze voorraden zijn in een voorgaande studie in kaart gebracht (van Oorschot et al., 2020a). Figuur 3.7a laat de resultaten voor alle materialen zien, Figuur 3.7b zoomt in op de relatief kleine omvang van de materialen koper en aluminium. De vergelijking heeft zich beperkt tot drie materialen omdat deze (1) in al deze vier voorraadgroepen zijn geanalyseerd, (2) relevante en waardevolle materialen vormen voor de Nederlandse (circulaire) economie en (3) aanzienlijk zijn in omvang.

De voorraad staal is met 97 miljoen ton bijna drie keer groter in gebouwen dan in voertuigen, en vele malen (1-2 ordegrottes) groter dan de hoeveelheid staal in elektronica en het elektriciteitssysteem. Deze verhouding is anders voor aluminium en koper. Ook het meeste aluminium bevindt zich in gebouwen (2,1 miljoen ton), gevolgd door voertuigen (1,3 miljoen ton), het elektriciteitssysteem (0,3 miljoen ton) en elektronica (70 duizend ton). Opvallend is dat in Nederlandse voertuigen zich ongeveer 5 kiloton meer koper bevindt dan in gebouwen. De waarden voor gebouwen en voertuigen zijn met 0,6 en 0,7 miljoen ton respectievelijk wel vergelijkbaar. Ook blijkt een substantieel deel van de kopervoorraad zich in het elektriciteitssysteem te bevinden: 0,3 miljoen ton. De koperhoeveelheid in elektronica is met 50 duizend ton substantieel lager.

Figuur 3.7 Vergelijking voorraden in gebouwen met andere voorraden



3.3.5 Vergelijking materiaalintensiteiten met de literatuur

De materiaalintensiteiten uit Arnoldussen (2019) zijn vergeleken met de waarden gerapporteerd door (1) Heeren & Fishman (2019), (2) Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020) en (3) Sprecher et al. (in review), geaggregeerd naar de eerder besproken materiaalgroepen en bouwclassificaties, en omgerekend (op Deetman en Marinova na) naar kg/m² gebruiksoppervlak (GO). De

materiaalintensiteiten in de verschillende studies hebben veelal een acceptabele variatie en eenzelfde orde grootte. De uitzonderingen worden in deze paragraaf besproken. Een overzicht van de materiaalintensiteiten is te vinden in Bijlage B.

Verschillen kunnen ten eerste worden verklaard door het gebruik van andere gebouwclassificaties. Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020) onderscheiden bijvoorbeeld geen bouwcohorten. Ook was in beperkte mate en in sommige gevallen geen data beschikbaar voor bepaalde gebouwklassen in de studies van Sprecher et al. (in review) en Heeren & Fishman (2019). Verder resulteert de grote hoeveelheid bronnen, met data uit casestudy gebieden verspreid over de wereld, in de database van Heeren & Fishman (2019) soms in grote fluctuaties tussen de materiaalintensiteit data van verschillende bouwcohorten en gebouwtypen.

De materiaalintensiteiten van staal hebben in de verschillende studies veelal dezelfde orde grootte. Wel liggen de waarden verkregen uit de dataset van Heeren & Fishman (2019) vaak hoger ($> 100 \text{ kg/m}^2$) dan de waarden uit Arnoldussen et al. (2019), Deetman et al. (2020), en Marinova et al. (2020). Typisch liggen de staalwaarden van Arnoldussen et al. (2019) aan de lage kant ($< 100 \text{ kg/m}^2$), en liggen de waarden van Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020) daar tussenin of zijn vergelijkbaar met Heeren & Fishman (2019). Appartementen bevatten in alle datasets een hogere staalintensiteit dan eengezinswoningen. Hoogbouw woonflats lijken op basis van Heeren & Fishman (2019) en Arnoldussen et al. (2019) efficiënter gebruik maken van staal dan appartementen, terwijl Marinova et al. (2020) juist een hogere waarde rapporteert voor hoogbouw woonflats. Sprecher et al. (in review) rapporteren twee waarden voor staal, welke beiden aanzienlijk lager liggen dan bij dezelfde categorieën in de andere datasets ($39,0 \text{ kg/m}^2$ voor kantoren in het cohort 1970-2000, en $2,6 \text{ kg/m}^2$ voor appartementen gebouwd tussen 1945 en 1970).

In tegenstelling tot staal zijn de betonwaarden in de dataset op basis van Heeren & Fishman (2019) juist opvallend laag in vergelijking met Arnoldussen et al. (2019) en Marinova et al. (2020) (en Sprecher et al. (in review), echter maar één datapunt), met name voor woningen. De waarden voor kantoren komen, afhankelijk van het cohort, soms redelijk overeen met Arnoldussen et al. (2020) en Deetman et al. (2020). Over het algemeen is een toename te zien over de jaren in de betonintensiteit per woning, en een afname in de baksteenintensiteit (Heeren & Fishman, 2019; Arnoldussen et al., 2019). Vanaf 1970 lijken de intensiteiten redelijk stabiel te blijven of zelfs licht af te nemen voor appartementen, woonflats en commerciële gebouwen. Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020) onderscheiden geen bouwcohorten, maar de waarden komen over het algemeen goed overeen met de gemiddelden van Arnoldussen et al. (2019).

De waarden voor koper en aluminium komen voor veel gebouwtypen redelijk overeen, maar lopen voor een aantal gebouwtypen sterk uiteen. Zo rapporteren Deetman et al. (2020) voor kantoren een intensiteit van $4,80 \text{ kg/m}^2$ aluminium, terwijl Arnoldussen et al. (2019), afhankelijk van het bouwcohort en grootte van het kantoor, waarden variërend van $0,14$ tot $12,41 \text{ kg/m}^2$ rapporteren. De waarden voor koper en aluminium liggen bij Arnoldussen et al. (2019) typisch lager dan 1 kg/m^2 , met uitzondering van een paar cohorten waar 12 kg/m^2 voor aluminium wordt gerapporteerd (kantoren groot en onderwijsgebouwen vanaf 1970). Deze hoge waarden kunnen waarschijnlijk worden verklaard door een

trend in het gebruik van aluminium in de bouw (bijvoorbeeld wegens esthetische- of duurzaamheidsoverwegingen). De koper en aluminium intensiteiten van Arnoldussen et al. (2019) lijken redelijk overeen te komen met die van Heeren & Fishman (2019), al zijn in de laatste hogere waarden voor bepaalde cohorten te vinden voor zowel koper en aluminium te zien. De data van Marinova et al. (2020) en Deetman et al. (2020) varieert (een paar uitbijters van 0,01 kg/m² daargelaten) typisch tussen de 2 en 6 kg/m², en heeft daarmee hogere waarden. Het verschil kan deels worden verklaard door het ontbreken van een onderscheid in materiaalintensiteiten per bouwcohort. Mogelijk speelt ook het verschil in de scope een rol in de uiteenlopende waarden (bijvoorbeeld het wel of niet meenemen van elektriciteitskabels).

De materiaalintensiteiten van hout hebben in alle studies eenzelfde orde grootte. Over het algemeen is een trend te zien in de afname van de intensiteit van hout in gebouwen (Arnoldussen et al., 2019; Sprecher et al., in review). Opvallend is dat in het laatste cohort voor eengezinswoningen, appartementen en woonflats de houtintensiteiten juist toenemen in de dataset op basis van Heeren & Fishman (2019), wat waarschijnlijk verklaard worden door een verschil in het gebruik van constructiematerialen wereldwijd. Arnoldussen et al. (2019) gaan juist uit van een vervanging van hout door andere materialen (e.g., aluminium en staal in kozijnen en deuren).

Ook de waarden voor glas zijn redelijk vergelijkbaar in de verschillende studies. Een uitzondering hierbij zijn de glaswaarden voor kantoren tussen 1945 en 1970 in Sprecher et al. (review), die meer dan twee keer hoger uitvallen dan in de andere studies.

Opvallend is dat de materiaalintensiteiten op basis van Heeren & Fishman (2019) nog vrij sterk uiteenlopen afhankelijk van het type gebouw en de bouwjaarklasse. Dit is te verklaren door de vele bronnen die zijn gebruikt en het feit dat de gebruikte data niet toegespitst is op locatie. Deze keuze is gemaakt omdat onvoldoende datapunten beschikbaar waren voor de gebruikte classificaties specifiek voor Europa of nog specifiek Nederland. Dit resulteert bijvoorbeeld in een intensiteit voor staal in industrie voor het cohort tot 1945 van 30 kg/m², en een intensiteit voor het cohort 1945-1970 van 284 kg/m² en een waarde voor het cohort 1970-2000 van 150 kg/m². De hoge waarde in het tweede cohort is te verklaren door de waarde van 903 kg/m² staal in een studie van Cheng et al. (2018), terwijl de overige studies 13 studies waarden lager dan 350 kg/m² rapporteren. Er zijn meer van dit soort verklaringen te maken waardoor de intensiteiten per cohort en type gebouw fluctueren.

Op basis van deze vergelijking kunnen we concluderen dat de materiaalintensiteiten op basis van Arnoldussen et al. (2019) over het algemeen goed overeen komen met de literatuur. Deze data is ook het meest compleet wat betreft materialen, gebouwklassen en bouwcohorten. Een aantal materiaalintensiteiten zijn wel onzeker door grotere verschillen met de waarden uit de literatuur, zoals de waarden voor de koper intensiteiten. Verder missen in alle bronnen nog gedetailleerde materiaalintensiteiten voor industriële gebouwen. Deze zijn over het algemeen lastig te materialiseren wegens de grote variatie in het type gebouwen. Ten slotte is er nog een grote "overige" groep in de BAG die in meer detail zou kunnen worden gematerialiseerd. Wat voor soort gebouwen onder deze categorie valt blijft vooralsnog onduidelijk.

3.3.6 Verhouding resultaten materiaalvoorraad tot andere rapportages

In deze studie hebben we een *bottom-up* benadering gehanteerd om tot een totaalbeeld van de materiaalvoorraad in de gebouwde omgeving van Nederland te komen. In deze benadering wordt door het inventariseren van elk afzonderlijk pand, de totale voorraad in kaart gebracht. Het voordeel van een dergelijke benadering is het hoge detailniveau van elk afzonderlijk gebouw, waardoor we meer kunnen zeggen over de samenstelling van de *urban mine*. Sommige studies hanteren een *top-down* benadering, waarbij op basis van statistieken, bijvoorbeeld de jaarlijkse instroom en uitstroom van bouwmaterialen, voorraden worden berekend. Een voordeel van de *top-down* benadering is mogelijk de lagere data- en tijdsintensiviteit en in sommige gevallen de grotere databeschikbaarheid. In deze paragraaf vergelijken we onze resultaten en benadering met gegevens uit de literatuur om inzicht te krijgen in hoeverre de resultaten overeenkomen.

Ten eerste vormt Müller (2006) een interessante bron. Müller combineert een top-down en bottom-up benadering om de ontwikkeling van de betonvoorraad (en bijbehorende in- en uitstromen) in Nederlandse woningen te inventariseren en berekent een waarde van ongeveer 1,00 gigaton voor 2020. Wij komen in deze studie uit op een redelijk vergelijkbare, maar hogere waarde: Een totaal van 1,46 gigaton beton in woningen.

Verhagen et al. (2020) hebben met een bottom-up benadering de materiaalvoorraad van gebouwen in Leiden in kaart gebracht. Hierbij is sloopdata van het bedrijf New Horizon gebruikt (Sprecher et al., in review). Wanneer we op dit schaalniveau de resultaten vergelijken, blijkt dat de resultaten veelal eenzelfde orde grootte hebben, maar typisch lager liggen in onze studie, met uitzondering van beton, staal en overige constructiematerialen. De voorraden beton zijn in beide studies vergelijkbaar, terwijl de hoeveelheid staal en overige constructiematerialen in deze studie meer dan 2 en 5 keer groter zijn, respectievelijk, dan in het werk van Verhagen. De New Horizon data zijn gebaseerd op sloopdata en bevatten relatief veel kantoren. Het aandeel woningen is klein. De data is daarmee minder representatief dan de in dit rapport gebruikte data.

TNO (2017) rapporteert de voornaamste bouwelementen en materialen per gebouwonderdeel in Nederland. De hoeveelheid beton komt in deze studie bijna vier keer hoger uit, en ook de hoeveelheid staal is bijna vier keer groter in dit werk. De hoeveelheid hout en baksteen komen wel redelijk overeen en ook de andere materialen lijken eenzelfde orde grootte te hebben. De verschillen voor beton en staal kunnen mogelijk worden verklaard door verschil in de gebruikte aanpak (materialisatie per oppervlakte versus materialisatie per aantal bouwtypen), waar onze benadering waarschijnlijk een hoger detailniveau laat zien.

Tenslotte bespreken we de verschillen tussen de totale totaalvoorraad in onze studie en de in- en uitstromen uit het werk van Arnoldussen et al (2019). Alhoewel deze in- en uitstromen voor het jaar 2014 zijn bepaald, terwijl de onze gebaseerd zijn op cijfers uit het jaar 2019, geven de cijfers een goede indicatie van de mate van betrouwbaarheid van de resultaten. De totaal massa aan instroom in 2014 was 17,60 megaton (77% beton, 5% staal, 4% baksteen, 3% hout, 11% overige materialen), en de uitstroom 7,3 megaton (67% beton, 8% overig steen, 6% baksteen, 5% hout, 14% overige materialen) (Arnoldussen et al., 2019). De totale voorraad is in dit rapport berekend op 2,72 gigaton. De in- en uitstroom vormen

respectievelijk 0,65% en 0,27% van de totale voorraad. De resultaten lijken redelijk overeen te komen met de verhouding tussen de instroom, uitstroom en voorraad in het werk van Müller (2006), wanneer we alleen de waarden voor beton vergelijken. Verhagen et al. (in review) rapporteren een grotere uitstroom dan instroom voor de gemeente Leiden in 2019. De instroom bedraagt hier 0,48% en de uitstroom 0,69% van de voorraad. Gezien de percentages in voorgenoemde studies eenzelfde ordegrrootte bevatten en vrij dicht bij elkaar in de buurt liggen lijken onze resultaten aannemelijk.

We kunnen onze gegevens ook naast vergelijkbare studies in het buitenland leggen. Bijvoorbeeld, de gebouwvoorraad in Japan was in 2010 3,4 keer groter dan in de huidige Nederlandse gebouwvoorraad (Tanikawa et al., 2015), terwijl de oppervlakte van het land ongeveer 9 keer groter is dan Nederland. Dit geeft aan dat de bouwdichtheid in Nederland relatief hoog is. De Japanse bevolking is echter meer dan 7 maal zo groot als de Nederlandse, wat aangeeft dat de materiaalintensiteit per hoofd van de bevolking in Japan de helft lager ligt dan in Nederland. De huidige voorraad in woningen is in onze resultaten groter dan die van Zwitserland rond 2015 (2,2 versus 1,1 gigaton) (Heeren & Hellweg, 2018). Ook dit is een interessante bevinding, omdat Nederland ongeveer een twee keer grotere bevolking heeft, terwijl het oppervlak vergelijkbaar is in omvang. Wanneer we verder uitzoomen zien we dat de totale betonvoorraad in Nederlandse woningen 0,61% van de globale betonvoorraad in woningen omvat (Marinova et al., 2020). Per hoofd van de bevolking is de betonintensiteit in Nederland daarmee driemaal zo hoog als die van een gemiddelde wereldburger.

3.3.7 Onderzoek onzekerheden en beperkingen

Dit werk biedt inzicht in de volledige omvang en materiaalsamenstelling van Nederlandse gebouwen. De beschikbaarheid van gedetailleerde materiaalintensiteit data en ruimtelijke data maakte het mogelijk deze studie nauwkeurig uit te voeren. Echter blijven een aantal onzekerheden en beperkingen bestaan; deze bespreken we in deze paragraaf.

Ten eerste bestaat nog onzekerheid over de gebruikte aanpak op basis van de gebruiksoppervlakte. In deze benadering worden echter (delen van) panden die buiten gebruik zijn (geen verblijfsobject(en)) niet meegenomen in de analyse terwijl deze mogelijk wel een relevante hoeveelheid materiaal bevatten. Panden zonder toegekende gebruiksfunctie vormen een aanzienlijk aandeel van het aantal panden in de BAG: 39%. Echter, het aandeel oppervlak van panden zonder gebruiksfunctie ten opzichte van het geheel ligt waarschijnlijk een stuk lager (op basis van een alternatieve benadering (Bijlage C) slechts 20%). Het lagere percentage in vierkante meters kan worden verklaard doordat veel van de panden zonder gebruiksfunctie minder relevante gebouwen zijn met zeer kleine oppervlakten, zoals kleine schuurtjes in tuinen. Echter zijn een (waarschijnlijk klein) deel van deze panden wél gebouwen van substantiële omvang. Deze waren, om wat voor reden dan ook, op het moment van rapportage van de BAG gegevens niet in gebruik. Een deel van de gebouwvoorraad kon in deze analyse daarom niet worden gematerialiseerd.

In dit werk hebben we de materiaalintensiteiten van Arnoldussen et al. (2019) omgerekend naar kg/m² gebruiksoppervlak (GO). In de conversie van BVO (bruto vloeroppervlak) naar GO zit een onzekerheid, omdat de verhouding tussen deze oppervlakten in werkelijkheid specifiek zal zijn per pand. Deze stap

zou kunnen worden omzeild door op basis van de BAG-3D (BAG data met gegevens van zowel grondoppervlak als de hoogte van het pand) direct het BVO per pand te berekenen. Ook hier zitten echter onzekerheden met betrekking tot het bepalen van het BVO en de compleetheid van de BAG-3D gegevens. Een vergelijking van de resultaten uit deze studie met de resultaten op basis van de BAG-3D gegevens is te vinden in Bijlage C.

We bespraken eerder in de hoofdstuk de onzekerheden voor de materiaalintensiteiten. Opvallend was met name het verschil tussen de koperintensiteit in niet-woningen gebruikt in deze studie en de waarden uit de literatuur. De voorraad koper blijkt uit de huidige resultaten kleiner in gebouwen dan in voertuigen. Dit zou misschien anders zijn wanneer we de koperintensiteiten uit de literatuur zouden toepassen. Echter lopen ook in de literatuur de materiaalintensiteiten uiteen en is het aantal datapunten gelimiteerd (Marinova et al., 2020), waardoor onzekerheid blijft bestaan. De koperintensiteiten in de studie van Arnoldussen et al. (2019) zijn gebaseerd op de hoeveelheid koperhoudende producten per pand (warmtepomp of CV, elektriciteitsleidingen, warmtapwaterinstallaties, et cetera), en de dichtheid van deze producten per gebouw (aantal punten met warmtapwater of verwarmd oppervlakte per gebouw). De benadering van Arnoldussen et al. lijkt erg nauwkeurig en is daarom beschouwd als aannemelijker dan de andere waarden gevonden in de literatuur.

Ten slotte zijn er nog een aantal beperkingen te identificeren in de BAG data. Alhoewel met de BAG gegevens woningen over het algemeen in detail kunnen worden geclassificeerd, specifiek voor 4 woningtypen en per bouwcohort, bevatten met name de gebouwen met het gebruiksdoel overig, industrie en gebouwen met meerdere gebruiksfuncties onzekerheden. “Overige gebruiksfunctie” wordt in de BAG catalogus omschreven als: “Niet in dit lid benoemde gebruiksfunctie voor activiteiten waarbij het verblijven van personen een ondergeschikte rol speelt.” In dit werk zijn deze gebouwen, afhankelijk van het oppervlak, aangenomen vergelijkbaar te zijn met bedrijfshallen of distributiecentra. 3,2% van de gebouwen in de BAG heeft deze classificatie. Vergelijkbaar is 1,9% van de gebouwen meerdere gebruiksfuncties toegekend; in dit werk zijn deze ook beschouwd als “overige gebruiksfunctie”. Wegens de relatief kleine omvang van deze groepen zijn deze hier (nog) niet in meer detail geanalyseerd.

Ook over gebouwen met een industriële gebruiksfunctie bestaat nog onzekerheid. In de BAG catalogus wordt deze groep omschreven als: “*Gebruiksfunctie voor het bedrijfsmatig bewerken of opslaan van materialen en goederen, of voor agrarische doeleinden*”. De exacte compositie van het industriële pand zal afhangen van het soort bedrijfsactiviteit wat er plaats vindt; zo zal de compositie van een chemisch bedrijf bijvoorbeeld afwijken van een distributiecentrum of veeteelt bedrijf. Er was voor dergelijke gebouwen (nog) onvoldoende data beschikbaar om meer detail in de materialisatie toe te brengen.

3.3.8 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

In deze studie analyseerden we de omvang, samenstelling en locatie van Nederlandse gebouwen, wat een essentieel inzicht biedt in de relevantie van deze voorraadgroep voor een circulaire economie. Een volgende stap is het projecteren van de ontwikkeling van de voorraad en bijbehorende in- en uitstromen in de toekomst. Op basis van hiervan kunnen kansen voor circulariteit worden geïdentificeerd en benodigdheden vanuit beleid. Om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de vraag naar

bouwmaterialen en het aanbod van deze materialen uit de *urban mine* zullen eerst projecties voor de ontwikkeling van de voorraad tot 2050 moeten worden gemaakt. Dergelijke projecties lijken echter niet of beperkt beschikbaar. Belangrijke indicatoren hiervoor omvatten de bevolkingsgroei, de ontwikkeling van huishoudenssamenstelling en ontwikkelingen in het woonoppervlak per capita. Daarnaast kunnen factoren zoals de energietransitie en funderingsproblemen de voorraaddynamiek beïnvloeden. Dergelijke ontwikkelingen zullen moeten worden meegenomen in de scenario's. Mogelijke data ingangen hierbij zijn gegevens over het energiegebruik, het energielabel en het funderingslabel per pand. Naast de voorraaddynamiek is informatie nodig over de levensduur van gebouwen, en voor de kortere termijn over bestaande bouw- en sloopplannen. Een belangrijke ingang hiervoor vormt de studie van Arnoldussen et al. (2019). Ook vormen andere rapportages van het EIB een ingang.

Op basis van de dynamiekstudie kan een vergelijken worden gemaakt met de berekende uitstromen en de gerapporteerde hoeveelheden bouw- en sloopafval in nationale statistieken van bijvoorbeeld het CBS en Rijkswaterstaat (e.g., Afval Meldingen Informatie en Communicatie Elektronisch: AMICE). Eventuele onjuistheden of gebreken in de data en kansen voor verbetering van zowel de rapportage en recycling van bouw- en sloopafval kunnen op deze manier worden geïdentificeerd.

Naast nieuwbouw en sloop activiteiten dienen in een dynamiek studie ook de materiaalvraag en het materiaal aanbod gerelateerd aan verbouw en herstelwerkzaamheden te worden meegenomen. Hiertoe biedt Arnoldussen et al. (2019) wederom een belangrijke ingang. In de literatuur vormen onder andere Ostermeyer et al. (2018) en Heeren & Hellweg (2018) interessante bronnen. In de laatste worden scenario's geformuleerd en geanalyseerd voor het gebruik van constructiematerialen en renovatie. Door het formuleren van scenario's voor zowel de voorraadontwikkeling en herstel- en verbouwwerkzaamheden, en het definiëren van levensduren van de gebouwen, kan een analyse worden uitgevoerd naar de ontwikkeling van de materiaalvraag in de bouw, en de mate secundaire materialen deze vraag kan voorzien.

3.4 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de materiaalvoorraden in Nederlandse woning- en utiliteitsgebouwen in kaart gebracht. Gegevens over de omvang, samenstelling, en conditie van de gebouwen geven inzicht in de relevantie van de voorraadgroep voor een circulaire economie. Op basis van gedetailleerde ruimtelijke gegevens voor gebouwen en gegevens voor de materiaalsamenstelling van de gebouwen hebben we de totaal massa van Nederlandse gebouwen berekend, voor 13 materiaalgroepen, en specifiek voor 11 bouwtypen en 4 bouwcohorten. Deze gegevens bevatten ook een ruimtelijke component waarmee de materiaaldichtheid op verschillende schaalniveaus in kaart kan worden gebracht. Onze resultaten zijn locatie specifiek op het niveau van individuele gebouwen en kunnen daarmee opgeschaald worden naar elk relevant niveau: wijken, gemeentes, provincies, en het hele land.

Met een totale massa van 2,72 gigaton vormen gebouwen de grootste voorraadgroep van de tot nog toe onderzochte categorieën in de maatschappij. De voorraad bevat grote hoeveelheden mineralen (met

name beton), metalen (zoals staal, koper en aluminium) en andere materialen (waaronder hout en glas) en is daarom zeer relevant voor de circulaire economie. De hoeveelheid beton en staal zijn substantieel groter in gebouwen dan in de andere onderzochte voorraden. De voorraad koper en aluminium in voertuigen zijn vergelijkbaar met de hoeveelheden in gebouwen.

Onze resultaten tonen aan dat de materiaalsamenstelling van gebouwen uiteenloopt per bouwtype en bouwjaar. Wanneer we kijken naar de totalen aan materialen, zien we ook veel verschillen in de omvang per bouwtype en bouwcohort. Er lijken ook verschillen te zijn in de levensduur van verschillende typen en cohorten gebouwen. Deze verschillen tonen aan dat het cruciaal is om een dergelijk onderscheid in gebouwclassificaties te maken; strategieën voor hoogwaardige recycling en hergebruik kunnen ingericht worden op basis van deze gegevens.

De resultaten vormen een basis voor het monitoren van materialen relevant voor de circulaire economie en het maken van projecties voor de ontwikkeling van de gebouwvoorraad, en bijbehorende in- en uitstromen, in de toekomst. Hiertoe dienen scenario's voor de gebouwvoorraad te worden ontwikkeld, die vertaald kunnen worden in in- en uitstromen. Op basis van scenario's voor de ontwikkeling van de vraag naar bouwmaterialen en de beschikbaarheid daarvan uit de *urban mine* kan circulair beleid worden geformuleerd. Hierbij kan gedacht worden aan het formuleren van realistische doelstellingen voor een circulaire bouw, richtlijnen voor bouw- en sloop activiteiten, en het bewerkstelligen van geschikte recyclingroutes.

4 Case studies Elektronische machines en Textiel

4.1 Inleiding

4.1.1 Achtergrond

De 2020 rapportage van CML en CBS genaamd “Voorraden in de maatschappij: de grondstoffenbasis voor een circulaire economie” (van Oorschot et al., 2020a) beschreef de uitwerking van het onderdeel “Duurzame consumptiegoederen, met name elektronica”. Dit is één van de onderdelen van het onderzoeksprogramma “De materiële basis van de circulaire economie: de *urban mine* ofwel de voorraden in de maatschappij”. In dat rapport werden de voorraden elektronica uitgewerkt. Voor die productgroep was al een goede classificatie beschikbaar: de UNU_Key (Baldé et al., 2017).

Daarnaast werd in dat rapport een eerste aanzet gedaan om met die methodiek de voorraden voor overige duurzame consumptiegoederen te schatten. Voor deze overige producten wordt gebruik gemaakt van de MateriaalMonitor indeling van het CBS.

In dit hoofdstuk wordt de methodiek van die overige duurzame consumptiegoederen verbeterd. Hierbij is er specifiek gelet op de textiel groepen en elektronische machines. In vervolgprojecten kunnen andere MateriaalMonitor groepen verder uitgewerkt worden.

In een circulaire economie wordt onder andere 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 *urban mine*: 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?).

Dit hoofdstuk bevat data over de hoeveelheden textiel en elektronische machines in de voorraad. De mogelijkheden van conversie van producten naar materialen hebben wij bekeken en de mogelijkheden hiervoor zullen worden ook beschreven in dit rapport.

4.1.2 Doelen

Doel van dit hoofdstuk is een inschatting te maken van:

- De producten in de categorieën textiel en elektronische machines
- De hoeveelheden van deze producten die in gebruik zijn op dit moment
- Onderzoek naar mogelijkheden conversie producten naar materialen

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

- Methodiek voor bepalen voorraden (*urban mine*) in Nederland verfijnen.

- Gemiddelde levensduur berekend voor textiel en elektronische machines. Dit is de uitwerking van één van de aanbevelingen uit (van Oorschot et al., 2020a).
- Toepassing van de methodiek voor het bepalen van de voorraden textiel en elektronische machines in de Nederlandse economie.
-

4.1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 4.2 wordt de afwijking van de methodiek ten opzichte van (van Oorschot et al., 2020a) besproken. Dit is de uitwerking van het eerste doel.

In hoofdstuk 4.3 komen eerst de resultaten aan bod van wat de uitwerking is van doel 2. In het vervolg van dit hoofdstuk worden de uitkomsten van de voorraad textiel en elektronische machines gegeven naar MateriaalMonitor categorieën wat een uitwerking is van doel 3.

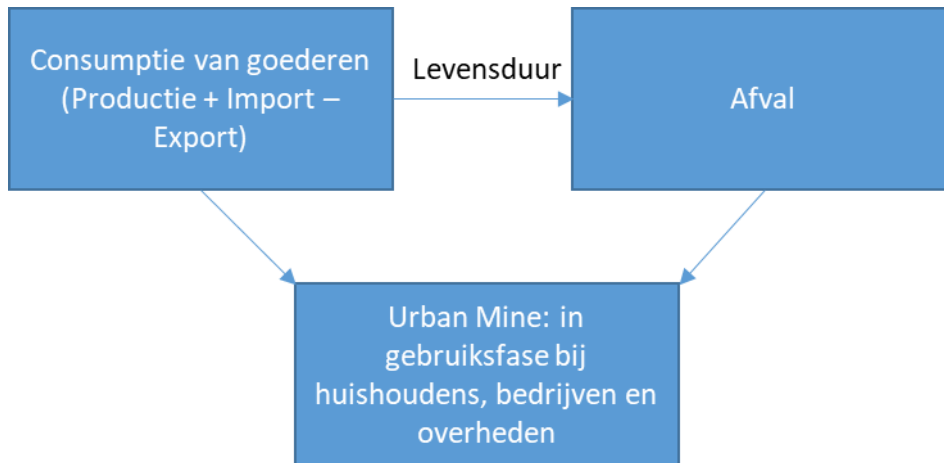
In hoofdstuk 4.4 staat het resultaat van het vooronderzoek naar de mogelijkheid om in de toekomst de voorraad materialen te berekenen uit de voorraad producten.

De conclusie geeft een overzicht van de resultaten en de potentie van de urban mine om secundair materiaal te leveren voor de productie.

4.2 Methode

De algemene methodiek is het bepalen van de op de markt gebrachte hoeveelheden door middel van data uit de CBS-productiestatistiek en Internationale Handel data. De CBS-productiestatistiek (Prodcop) bevat binnenlandse productiecijfers. De Internationale Handel statistiek bevat internationale handelscijfers. Deze bronnen bevatten alle Nederlandse data, ook die het CBS vanwege geheimhouding niet mag publiceren. De consumptie wordt bepaald door de productie op te tellen bij de import en daar vervolgens de export van af te trekken.

Conversietabellen zijn nodig om de goederenclassificaties uit deze bronnen om te zetten naar de publicatiegroepen van de MateriaalMonitor. Zie Tabel 4.1 en Tabel 4.2 voor de MateriaalMonitor groepen die in dit rapport onderzocht zijn. Deze data is beschikbaar vanaf 2007 en wordt verder terug geëxtrapoleerd (tot 1980). Per MateriaalMonitor groep maken we zo een tijdreeks van de op de markt gebrachte producten. Zie voorbeelden hiervan in Bijlage 1 – Put-on-market tijdreeks Textiel en Bijlage 2 – Put-on-market tijdreeks Elektronische Machines. Via levensduurprofielen wordt berekend wanneer dat afval wordt. De huidige voorraad kan berekend worden door de historische verkopen te verminderen met wat inmiddels afval is geworden.



De hoeveelheid afval die per jaar vrijkomt wordt bepaald door een normaal verdeling te zetten op de consumptiecijfers. De variabelen van de normaalverdeling zijn de gemiddelde levensduur en de standaarddeviatie.

Voor een gedetailleerde beschrijving van de diverse bronnen, zie van Oorschot et al. (2020a). Vergeleken met die methodiek zijn een aantal verbeteringen en extra onderzoeken doorgevoerd die hieronder beschreven staan.

De levensduur per MateriaalMonitor (MM) categorie is bepaald door online op zoek te gaan naar informatie. Vooral data van de Consumentenbond en afschrijvingslijsten van Verzekeringsmaatschappijen bleken hierbij behulpzaam. Om tot één waarde per MM categorie te komen hebben wij gekeken naar alle Internationale Handel goederencodes die onder een MM categorie vallen. Van die afzonderlijke codes hebben wij waar mogelijk de gemiddelde levensduur verzameld. Door deze gemiddelde levensduren per Internationale Handel code te wegen met de hoeveelheid aan importen hebben wij een gewogen gemiddelde levensduur berekend voor de hele MM categorie.

Om voor dit project betere data te maken hebben wij de Internationale Handel data volledig opnieuw opgebouwd uit de onderliggende brondata. De reden hiervoor is dat de data die we voorheen beschikbaar hadden van jaar op jaar in een ander format kon staan en correcties op de brondata was vaak niet verwerkt of niet eenduidig verwerkt. Zo leken in de oude data in sommige jaren duizendfouten te staan die in ene jaar wel en in ander jaar niet gecorrigeerd waren. Dat maakte het lastiger een betrouwbare tijdreeks te maken. In de oude data zat ook alleen informatie over het gewicht. Nu hebben we ook de supplementaire niet-gewicht eenheden erbij. Het voordeel is dat we daarom geen gebruik meer hoeven te maken van gemiddelde gewichten bij diverse omrekeningen.

Met de nieuw samengestelde Internationale Handel data zijn eventuele correcties die in de loop der jaren zijn aangebracht meegenomen en ook informatie over de niet-gewicht eenheid (stuks, m^2 , etc.) is nu bijgevoegd bij de Internationale Handel databron. Deze niet-gewicht eenheden zijn van mindere kwaliteit als de gewichtseenheden en gebruiken we alleen om een idee te krijgen of de resultaten logisch lijken. Bijvoorbeeld door te kijken naar het gemiddelde aantal stuks per persoon.

Verder moest de MateriaalMonitor classificatie aangepast worden. De reden hiervoor is dat deze classificatiecodes van jaar op jaar konden verschillen. Om vergelijking in tijd mogelijk te maken moet er een vaste categorie indeling zijn. Om dit mogelijk te maken, hebben wij de MateriaalMonitor indeling voor 2016 als vast beschouwd en koppelingen van de brondata naar MateriaalMonitor classificaties die bestaan in oudere of recentere jaren aangepast naar de 2016 indeling.

Onze methodiek kijkt naar tijdreeksen op het niveau van de MateriaalMonitor categorieën. Onrealistische uitkomsten worden gedetecteerd en via data correctietechnieken aangepast. Doordat de input data nu van betere kwaliteit is, hoeven er minder waarden gecorrigeerd te worden. Hiervoor hebben wij de detectie- en correctiefuncties aangepast ten opzichte van de methodiek die wij voorheen gebruikten.

In onze uitkomsten is een deel van de invoer die door huishoudens binnen Europa online zijn aangekocht (bijvoorbeeld Duitse webshops) niet opgenomen, omdat die informatie niet in de Internationale Handel data zit. Dit betreft nu slechts een heel klein deel van de totale invoer, maar voor de toekomst kan dit belangrijker worden. Binnen het CBS is er onderzoek bezig naar het maken van cijfers hierover. Wanneer deze beschikbaar komen, kunnen we die meenemen in vervolprojecten.

Met de verbeterde methodiek is het nu makkelijker om voor andere categorieën snel data te draaien. Dit heeft geen effect op het berekenen van de levensduren en de analyse van de resultaten, maar gaat om de berekeningen daartussen in.

4.3 Resultaten

Zoals in het vorige hoofdstuk besproken, is de gemiddelde levensduur van in het verleden op de markt gebrachte producten nodig om de voorraad te bepalen uit de consumptie in het verleden. Deze staan beschreven in paragraaf 3.1. In paragraaf 3.2 staan de voorraad uitkomsten over textiel goederen en elektronische machines. In paragraaf 3.3 staan de uitgaande stromen uit de voorraden in 2019. Bij deze uitkomsten is geen uitsplitsing naar gebruikte materialen gemaakt omdat er op dit moment geen informatie over de afzonderlijke materialen beschikbaar is. In hoofdstuk 4 wordt besproken welke mogelijkheden er zijn om de conversie naar materialen te gaan maken.

Om een idee te krijgen van wat voor goederen er in de MateriaalMonitor categorieën zitten staat in de volgende twee tabellen een aantal voorbeelden opgenomen.

Tabel 4.1 - Voorbeelden producten per Textiel groep

| MM_code | MM Omschrijving | Voorbeelden |
|---------|-----------------|---|
| 1320000 | Weefsels | Gewoven stoffen, onder andere katoen en synthetisch |
| 1392110 | Beddengoed | Lakens; Dekens |
| 1392500 | Woningtextiel | Gordijnen; Bedspreien |

| | | |
|---------|-------------------|---|
| 1393000 | Tapijten | Tapijten en andere vloerbedekking |
| 1395100 | Textielvlies | Niet gewoven textiel |
| 1399000 | Ov.textielwaren | Gecoate weefsels; Touw en kabels; Tassen |
| 1412000 | Werkkleding | Industriële kleding en beroepskleding; Schorten |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | Broeken; Jassen; Truien; Shirts |
| 1414931 | Onderkleding/Sok | Onderbroeken; Nachthemden; Badjassen |
| 1419000 | Overige kleding | Sjaals; Sluiers; Baby kleding; Handschoenen |

Tabel 4.2 - Voorbeelden producten per groep Elektronische machines

| MM_code | MM Omschrijving | Voorbeelden |
|---------|----------------------|---|
| 2811000 | Turbine/motor | Turbines en motoren |
| 2812000 | Pomp/compressor | Schroefcompressoren; dompelpompen; Pompen voor het afgeven van brandstof of smeermiddelen |
| 2814000 | KraanKlepAfsluiter | Apparaten en kogelkranen voor leidingen , ketelbuizen en tanks; Mengkranen voor gootstenen, wastafels, bidets, waterreservoirs |
| 2820900 | Ov.mach.v.alg.gebr. | Apparatuur voor de warmtebehandeling van materialen door inductie of diëlektrisch verlies; Weegmachines; Spuitpistolen |
| 2822100 | Takel/lier/Lift e.d. | Ruw terrein heftruck; Lieren en kaapstanders; Zelfrijdende bedrijfswagens |
| 2823000 | Kantoormachines | Machines voor het sorteren van munten; Printers, kopieermachines |
| 2824000 | Mech.handgereedsch. | Heggenscharen en graskantmessen; Boren; Kettingzagen |
| 2825000 | Machine koel/klimaat | Ventilatoren; Warmtewisselaars; Compressie-units |
| 2829129 | Filtertoestel | Machines en apparaten voor het filteren of zuiveren van water |
| 2829210 | Mach.rein./verp.fles | Machines voor het vullen, sluiten, verzegelen, capsuleren of etiketteren van flessen, blikken, dozen, zakken of andere containers |
| 2830000 | Mach.v.landbouw | Aardappelrooiers; Verticuteermachines; Bosbouwmachines |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | Werktuigmachines voor het bewerken van materialen; Slijp-, schuur- of polijstmachines; Buig-, vouw-, richt- of afvlakmachines |

In het bijgevoegde Excel bestand van Bijlage 3 – Links alle IH met MM staat een volledige tabel met alle koppelingen naar goederen uit de Internationale Handel data per MateriaalMonitor code die in dit rapport behandeld worden.

4.3.1 Levensduur

Voor elke categorie consumptiegoederen volgens de MateriaalMonitor indeling is een gemiddelde levensduur nodig. Deze hebben wij bepaald door te kijken welke goederencodes uit de Internationale Handel data bij deze categorieën horen. Vervolgens hebben wij gekeken via bronnen op internet (onder andere Consumentenbond, lijsten van verzekeringen) wat de gemiddelde levensduur is van die goederencodes. Door de hoeveelheid importen als weegfactor mee te nemen konden we daarna de gemiddelde levensduur per MateriaalMonitor groep berekenen.

Voor de normaal verdeling functie is vervolgens nog een standaarddeviatie nodig die de spreiding rond het gemiddelde weergeeft. Hier was geen informatie over te vinden. Deze parameter is daarom gevuld met een standaard waarde welke berekend wordt door de gemiddelde levensduur te delen door 2,5. Bij de normaal verdeling wordt verwacht dat 95% van de producten afval wordt tussen de gemiddelde levensduur – 2 x standaarddeviatie en de gemiddelde levensduur + 2 x standaarddeviatie. Wanneer er data beschikbaar komt om de standaarddeviatie op een betere manier te bepalen, kunnen wij deze eenvoudig invoegen.

De berekende gemiddelde levensduren staan in onderstaande tabellen.

Tabel 4.3 – Gemiddelde levensduur per Textiel categorie in jaren

| MM Code | MM Omschrijving | Levensduur gemiddeld |
|----------------|------------------------|-----------------------------|
| 1320000 | Weefsels | 10,08 |
| 1392110 | Beddengoed | 5,91 |
| 1392500 | Woningtextiel | 9,78 |
| 1393000 | Tapijten | 15,57 |
| 1395100 | Textielvlies | 16,50 |
| 1399000 | Ov.textielwaren | 15,01 |
| 1412000 | Werkkleding | 2,00 |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 3,01 |
| 1414931 | Onderkleding/Sok | 1,83 |
| 1419000 | Overige kleding | 3,25 |

4.3.2 Voorraden van textiel en elektronische machines

Textiel: resultaten

De voorraad van de diverse textiel groepen staat in onderstaande tabel. Hierbij is het gewicht in duizenden kilo's (ton) weergegeven, en ter indicatie ook het aantal kilo's per inwoner en de aantallen in hoeveelheid stuks of vierkante meter totaal en per inwoner.

Tabel 4.4 - Voorraad Textiel in tonnen, 2019

| MM Code | MM Omschrijving | Voorraad (t) | Voorraad (kg per inwoner) | Voorraad hoeveelheid | Voorraad (hoeveelheid per inwoner) |
|---------------|-------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1320000 | Weefsels | 534.269 | 31 | 3.453.434.212 stuks | 200 stuks |
| 1392110 | Beddengoed | 256.294 | 15 | 258.379.795 stuks | 15 stuks |
| 1392500 | Woningtextiel | 131.449 | 8 | 325.816.453 stuks | 19 stuks |
| 1393000 | Tapijten | 1.448.482 | 84 | 731.244.600 vierkante meter | 42 vierkante meter |
| 1395100 | Textielvlies | 1.071.180 | 62 | 1.291.644.545 stuks | 75 stuks |
| 1399000 | Ov.textielwaren | 2.135.371 | 124 | 3.221.587.291 stuks | 187 stuks |
| 1412000 | Werkkleding | 13.642 | 1 | 17.013.322 stuks | 1 stuks |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 230.303 | 13 | 840.182.720 stuks | 49 stuks |
| 1414931 | Onderkleding/Sok | 72.227 | 4 | 664.830.408 stuks | 39 stuks |
| 1419000 | Overige kleding | 79.427 | 5 | 290.267.612 stuks | 17 stuks |
| Totaal | | 5.972.643 | 346 | | |

Textiel: Sensitiviteitsanalyse en commentaar

De gevonden waarden geven waarschijnlijk een goede indicatie van de werkelijke voorraad aangezien de uitstroom vrij goed overeenkomt met andere bronnen. Zie verder toelichting na Tabel 5.

In de volgende tabel staat een sensitiviteitsanalyse van de impact van de berekende levensduur op de uitkomsten van de voorraad. Hierbij zijn de uitkomsten ook weergegeven indien de gemiddelde levensduur 30 procent lager en 30 procent hoger zou zijn als berekend. Dit zijn extreme verschillen. In de praktijk zullen slechts weinig werkelijke gemiddelde levensduren buiten dit bereik vallen.

Tabel 4.5 - Sensitiviteitsanalyse effect levensduur op voorraad Textiel in tonnen, 2019

| MM Code | MM Omschrijving | Voorraad(t), levensduur - 30% | Voorraad(t) | Voorraad(t), levensduur +30% |
|---------|-------------------|-------------------------------|-------------|------------------------------|
| 1320000 | Weefsels | 382.688 | 534.269 | 671.866 |
| 1392110 | Beddengoed | 181.353 | 256.294 | 325.254 |
| 1392500 | Woningtextiel | 96.742 | 131.449 | 162.892 |
| 1393000 | Tapijten | 1.096.111 | 1.448.482 | 1.736.424 |
| 1395100 | Textielvlies | 864.556 | 1.071.180 | 1.255.636 |
| 1399000 | Ov.textielwaren | 1.527.796 | 2.135.371 | 2.674.928 |
| 1412000 | Werkkleding | 8.646 | 13.642 | 18.311 |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 146.632 | 230.303 | 316.375 |
| 1414931 | Onderkleding/Sok | 41.674 | 72.227 | 103.241 |
| 1419000 | Overige kleding | 50.911 | 79.427 | 105.608 |

Elektronische machines: Resultaten

Deze groep bevat vele diverse soorten producten. In onderstaande tabel staat de voorraad in tonnen. De voorraad in niet-gewicht eenheden is niet weergegeven omdat het vaak samentellingen zijn van groepen welke in stuks, liters, vierkante meters zijn opgenomen. Dat samentellen heeft geen zin.

Tabel 4.6 - Voorraad Elektronische machines in tonnen, 2019²

| MM Code | MM Omschrijving | Voorraad (t) | Voorraad (kg per ...) | per |
|---------------|----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| 2811000 | Turbine/motor | 2.377.870 | 34.290 | per industrieel bedrijf |
| 2812000 | Pomp/compressor | 509.354 | 7.345 | per industrieel bedrijf |
| 2814000 | KraanKlepAfsluiter | 1.313.379 | 18.940 | per industrieel bedrijf |
| 2820900 | Ov.mach.v.alg.gebr. | 729.315 | 10.517 | per industrieel bedrijf |
| 2822100 | Takel/lier/Lift e.d. | 599.062 | 8.639 | per industrieel bedrijf |
| 2823000 | Kantoormachines | 113.893 | 1.642 | per industrieel bedrijf |
| 2824000 | Mech.handgereedsch. | 118.441 | 1.708 | per industrieel bedrijf |
| 2825000 | Machine koel/klimaat | 369.484 | 21 | per inwoner |
| 2829129 | Filtoestel | 37.628 | 543 | per industrieel bedrijf |
| 2829210 | Mach.rein./verp.fles | 14.386 | 207 | per industrieel bedrijf |
| 2830000 | Mach.v.landbouw | 1.693.169 | 22.547 | per agrarisch bedrijf |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 2.456.875 | 35.430 | per industrieel bedrijf |
| Totaal | | 10.332.856 | | |

² Aantallen bedrijven zoals op StatLine einde 2019 (CBS, 2020)

Hierbij is de datakwaliteit duidelijk minder als van Textiel. De uitkomsten van 2812000 – Pomp/compressor, 2820900 – Ov.mach.v.alg.gebr., 2822100 – Takel/lier/Lift e.d., 2829210 – Mach.rein./verp.fles , 2830000 – Mach.v.landbouw zijn een grove schatting omdat bij deze groepen slechts voor een aantal jaren data beschikbaar zijn. Dat betekent dat data voor overige jaren geschat moet worden aan de hand van de wel beschikbare jaren. Een toevallige hoge of late afzet in die jaren kan dan doorgetrokken worden om ontbrekende jaren mee te schatten.

Elektronische machines: Sensitiviteitsanalyse en commentaar

Bij de landbouwmachines (2830000) zijn 22.547 kg per agrarisch bedrijf uitgerekend. Volgens (Hoenderken, 2012) zijn aardappelrooiers ongeveer 10.000 kg per stuk. Als we dat als grove schatting hanteren dan zullen er gemiddeld ongeveer 2 en een kwart landbouwmachines per agrarisch bedrijf aanwezig zijn.

De totale voorraad aan elektronische machines weegt 10.332 kton. Hiermee is het groter dan de 5.885 kton aan elektronica die wij eerder hebben berekend in het kader van e-waste onderzoek (van Oorschot et al., 2020a). Dat onderzoek betrof een grote hoeveelheid elektronica zoals computers, wasmachines en koelkasten maar geen industriële machines. Industriële machines zijn doorgaans veel zwaarder als consumenten elektronica.

Hierna volgt een sensitiviteitsanalyse van de impact van de berekende levensduur op de uitkomsten van de voorraad Elektronische machines. Hierbij zijn de uitkomsten ook weergegeven indien de gemiddelde levensduur 30 procent lager en 30 procent hoger zou zijn als berekend.

Tabel 4.7 - Sensitiviteitsanalyse effect levensduur op voorraad Elektronische machines in tonnen, 2019

| MM Code | MM Omschrijving | Voorraad(t), levensduur - 30% | Voorraad(t) | Voorraad(t), levensduur +30% |
|----------------|------------------------|--|--------------------|---|
| 2811000 | Turbine/motor | 1.677.538 | 2.377.870 | 2.973.100 |
| 2812000 | Pomp/compressor | 254.302 | 509.354 | 760.892 |
| 2814000 | KraanKlepAfsluit | 1.213.694 | 1.313.379 | 1.381.812 |
| 2820900 | Ov.mach.v.alg.gebr. | 631.741 | 729.315 | 807.012 |
| 2822100 | Takel/lier/Lift e.d. | 481.570 | 599.062 | 685.474 |
| 2823000 | Kantoormachines | 91.397 | 113.893 | 135.332 |
| 2824000 | Mech.handgereedsch. | 84.745 | 118.441 | 156.757 |
| 2825000 | Machine koel/klimaat | 293.814 | 369.484 | 452.986 |
| 2829129 | Filtertoestel | 27.438 | 37.628 | 48.536 |
| 2829210 | Mach.rein./verp.fles | 10.381 | 14.386 | 17.765 |
| 2830000 | Mach.v.landbouw | 1.298.906 | 1.693.169 | 1.842.353 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 1.881.294 | 2.456.875 | 3.066.711 |

4.3.3 In- en uitstromen van de voorraden in 2019

Textiel

Instroom

De POM (put-on-market) is de instroom van de voorraad in 2019. Deze staat van de diverse textiel groepen in onderstaande tabel.

Tabel 4.8 - Ingaande voorraad Textiel in tonnen, 2019

| MM Code | MM Omschrijving | Instroom (t) | Instroom (kg per inwoner) | Instroom hoeveelheid | Instroom (hoeveelheid per inwoner) |
|---------------|-------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1320000 | Weefsels | 61.161 | 4 | | |
| 1392110 | Beddengoed | 46.168 | 3 | 47.208.751 stuks | 3 stuks |
| 1392500 | Woningtextiel | 18.722 | 1 | 39.244.508 stuks | 2 stuks |
| 1393000 | Tapijten | 96.179 | 6 | 58.307.244 vierkante meter | 3 vierkante meter |
| 1395100 | Textielvlies | 123.839 | 7 | 124.331.542 stuks | 7 stuks |
| 1399000 | Ov.textielwaren | 184.505 | 11 | 175.026.284 stuks | 10 stuks |
| 1412000 | Werkkleding | 9.590 | 1 | 12.036.936 stuks | 1 stuks |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 89.012 | 5 | 335.550.018 stuks | 19 stuks |
| 1414931 | Onderkleding/Sok | 50.961 | 3 | 470.816.961 stuks | 27 stuks |
| 1419000 | Overige kleding | 26.995 | 2 | 100.390.538 stuks | 6 stuks |
| Totaal | | 707.130 | 41 | | |

Uitstroom

De uitstroom van de voorraad in 2019 van de diverse textiel groepen staat in onderstaande tabel.

Tabel 4.9 - Uitgaande voorraad Textiel in tonnen, 2019

| MM Code | MM Omschrijving | Uitstroom (t) | Uitstroom (kg per inwoner) | Uitstroom hoeveelheid | Uitstroom (hoeveelheid per inwoner) |
|---------|-----------------|---------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
|---------|-----------------|---------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------------|

| | | | | | |
|---------------|-------------------|----------------|-----------|----------------------------------|-------------------------|
| 1320000 | Weefsels | 54.540 | 3 | | |
| 1392110 | Beddengoed | 42.026 | 2 | 44.651.829 stuks | 3 stuks |
| 1392500 | Woningtextiel | 13.357 | 1 | 41.270.779 stuks | 2 stuks |
| 1393000 | Tapijten | 90.919 | 5 | 48.116.478 vierkante meter | 3 vierkante meter |
| 1395100 | Textielvlies | 55.739 | 3 | 86.923.883 stuks | 5 stuks |
| 1399000 | Ov.textielwaren | 167.182 | 10 | 304.876.682 stuks | 18 stuks |
| 1412000 | Werkkleding | 7.863 | 0 | 9.656.592 stuks | 1 stuks |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 93.180 | 5 | 323.731.611 stuks | 19 stuks |
| 1414931 | Onderkleding/Sok | 56.135 | 3 | 518.598.621 stuks | 30 stuks |
| 1419000 | Overige kleding | 27.679 | 2 | 112.156.410 stuks | 7 stuks |
| Totaal | | 608.620 | 35 | | |

Commentaar

Volgens bovenstaande tabel is er dus 608 kton uitstroom in 2019.

Volgens de massabalans Textiel over 2018 van FFACT (Hopstaken et al., 2020) werd er 136 kton gescheiden ingezameld en kwam er 169 kton in het restafval terecht. Samen is dat 305 kton. Opgemerkt moet worden dat in dit onderzoek Textiel is afgebakend tot “kleding, linnengoed en schoeisel”. De MateriaalMonitor groepen Woningtextiel, Tapijten en Ov.textielwaren vallen daar niet onder. Als we deze cijfers niet meereken is het totaal van onze data 338 kton. Dat komt vrij dicht in de buurt van de 305 uit het rapport van FFACT. Er zullen ongetwijfeld nog andere kleinere verschillen in scope zijn. In onze Textiel cijfers zit echter geen data van schoenen. Volgens het FFACT rapport is dit echter slechts zo’n 6 kton.

Hierdoor lijken onze data van de uitstroom een goede indicatie van de werkelijkheid te geven waarmee dan ook de berekende voorraad aan textiel vrij betrouwbaar zal zijn.

Elektronische machines

Instroom

De POM (put-on-market) is de instroom van de voorraad in 2019. Deze staat van de elektronische machines in onderstaande tabel.

Tabel 4.10 - Ingaande voorraad Elektronische machines in tonnen, 2019

| MM Code | MM Omschrijving | Instroom (t) | Instroom (kg per ...) | per |
|---------------|----------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|
| 2811000 | Turbine/motor | 56.401 | 813 | per industrieel bedrijf |
| 2812000 | Pomp/compressor | 5.668 | 82 | per industrieel bedrijf |
| 2814000 | KraanKlepAfsluiters | 167.927 | 2.422 | per industrieel bedrijf |
| 2820900 | Ov.mach.v.alg.gebr. | 140.091 | 2.020 | per industrieel bedrijf |
| 2822100 | Takel/lier/Lift e.d. | 6.377 | 92 | per industrieel bedrijf |
| 2823000 | Kantoormachines | 24.788 | 357 | per industrieel bedrijf |
| 2824000 | Mech.handgereedsch. | 15.939 | 230 | per industrieel bedrijf |
| 2825000 | Machine koel/klimaat | 68.296 | 4 | per inwoner |
| 2829129 | Filtoestel | 9.639 | 139 | per industrieel bedrijf |
| 2829210 | Mach.rein./verp.fles | 1.150 | 17 | per industrieel bedrijf |
| 2830000 | Mach.v.landbouw | 102.345 | 1.363 | per agrarisch bedrijf |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 442.018 | 6.374 | per industrieel bedrijf |
| Totaal | | 1.040.638 | 13.930 | |

Uitstroom

De uitstroom in tonnen van de elektronische machines staat in onderstaande tabel.

Tabel 4.11 - Uitgaande voorraad Elektronische machines in tonnen, 2019

| MM Code | MM Omschrijving | Uitstroom (t) | Uitstroom (kg per ...) | per |
|---------------|----------------------|----------------|------------------------|-------------------------|
| 2811000 | Turbine/motor | 146.346 | 2.110 | per industrieel bedrijf |
| 2812000 | Pomp/compressor | 67.428 | 972 | per industrieel bedrijf |
| 2814000 | KraanKlepAfsluiters | 29.518 | 426 | per industrieel bedrijf |
| 2820900 | Ov.mach.v.alg.gebr. | 29.855 | 431 | per industrieel bedrijf |
| 2822100 | Takel/lier/Lift e.d. | 35.039 | 505 | per industrieel bedrijf |
| 2823000 | Kantoormachines | 10.200 | 147 | per industrieel bedrijf |
| 2824000 | Mech.handgereedsch. | 14.793 | 213 | per industrieel bedrijf |
| 2825000 | Machine koel/klimaat | 28.205 | 2 | per inwoner |
| 2829129 | Filtoestel | 3.327 | 48 | per industrieel bedrijf |
| 2829210 | Mach.rein./verp.fles | 1.072 | 15 | per industrieel bedrijf |
| 2830000 | Mach.v.landbouw | 57.540 | 766 | per agrarisch bedrijf |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 260.689 | 3.759 | per industrieel bedrijf |
| Totaal | | 684.014 | | |

Net als bij de totale voorraad berekeningen is de datakwaliteit hier ook duidelijk minder als van textiel omdat bij een aantal groepen slechts enkele betrouwbare datapunten beschikbaar zijn.

4.4 Vooronderzoek naar conversie materialen

Het vorige hoofdstuk heeft de voorraad hoeveelheden naar producten laten zien. Voor de conversie naar materialen zijn tabellen nodig met samenstellingen van die producten. Wij hebben onderzocht of dit mogelijk is, maar op dit moment is daar geen data voor, zeker op gedetailleerd niveau van materialen.

Hieronder staan bijvoorbeeld de 12 belangrijkste categorieën uit de Internationale Handel brondata over textiel weergegeven. Bij een enkele categorie is uit de omschrijving te halen wat voor materiaal er in zit, maar meestal is weinig van bekend. Hier zou alleen een onderscheid tussen plantaardige, dierlijke en chemische materialen misschien mogelijk zijn.

Tabel 4.12 - Informatie over materialen in Textiel

| MM_code | MM Omschrijving | CN | CN Omschrijving | max import (kg) |
|---------|-------------------|----------|---|-----------------|
| 1399000 | Ov.textielwaren | 59031090 | Textile fabrics coated, covered or laminated with polyvinyl chloride (excl. wallcoverings of textile materials covered with polyvinyl chloride; floor coverings consisting of a textile backing and a top layer or covering of | 301.019.900 |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 63090000 | Worn clothing and clothing accessories, blankets and travelling rugs, household linen and articles for interior furnishing, of all types of textile materials, incl. all types of footwear and headgear, showing signs of appreciable wear and presented in bul | 168.649.505 |
| 1320000 | Weefsels | 52094200 | Denim, containing >= 85% cotton by weight and weighing > 200 g/m,, made of yarn of different colours | 86.584.600 |
| 1393000 | Tapijten | 57032099 | #N/B | 72.884.702 |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 62034231 | Men's or boys' trousers and breeches of cotton denim (excl. knitted or crocheted, industrial and occupational, | 72.794.300 |

| | | | | |
|---------|-------------------|----------|--|------------|
| | | | bib and brace overalls and underpants) | |
| 1399000 | Ov.textielwaren | 63079099 | Made-up articles of textile materials, incl. dress patterns, n.e.s. (excl. of felt, and knitted or crocheted) | 71.738.800 |
| 1320000 | Weefsels | 54073000 | Woven fabrics of synthetic filament yarn, incl. monofilament of ≥ 67 decitex and with a cross sectional dimension of ≤ 1 mm, consisting of layers of parallel textile yarns superimposed on each other at acute or right angles, the layers bein | 71.729.300 |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 62064000 | Women's or girls' blouses, shirts and shirt-blouses of man-made fibres (excl. knitted or crocheted and vests) | 65.905.300 |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 62034319 | Men's or boys' trousers and breeches of synthetic fibres (excl. knitted or crocheted, industrial and occupational, bib and brace overalls and underpants) | 65.428.400 |
| 1320000 | Weefsels | 51123010 | Woven fabrics containing predominantly, but $< 85\%$ combed wool or combed fine animal hair by weight, mixed principally or solely with synthetic or artificial staple fibres and weighing ≤ 200 g/m, (excl. fabrics for technical uses of heading 5911 | 63.192.900 |
| 1413939 | Bovenkleding/Trui | 62033100 | Men's or boys' jackets and blazers of wool or fine animal hair (excl. knitted or crocheted, and wind-jackets and similar articles) | 62.905.900 |
| 1419000 | Overige kleding | 62144000 | Shawls, scarves, mufflers, mantillas, veils and similar articles of artificial fibres (excl. knitted or crocheted) | 62.346.600 |

Als we naar de elektronische machines kijken, dan is er nog minder te vinden over de materialen. Eventueel kan onderzoek gedaan worden of onderscheid tussen ferro en non-ferro materiaal mogelijk is. Zie de volgende tabel voor de beschikbare informatie.

Tabel 4.13 - Informatie over materialen in Elektronische machines

| MM_code | MM Omschrijving | CN | CN Omschrijving | max import (kg) |
|---------|----------------------|----------|---|-----------------|
| 2811000 | Turbine/motor | 85023100 | Generating sets, wind-powered | 1.173.457.424 |
| 2812000 | Pomp/compressor | 84148075 | Screw compressors, multi-shaft (excl. compressors for refrigerating equipment and air compressors mounted on a wheeled chassis for towing) | 433.632.426 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 84573090 | Multi-station transfer machines for working metal, not numerically controlled | 326.177.190 |
| 2830000 | Mach.v.landbouw | 84335310 | Potatodiggers and Potato harvesters | 260.386.874 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 84609010 | Fitted with a micrometric adjusting system, in which the positioning in any one axis can be set up to an accuracy of at least 0,01 mm | 219.737.182 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 84561110 | Machine tools for working any material by removal of material, operated by laser, of a kind used solely or principally for the manufacture of printed circuits, printed circuit assemblies, parts of heading 8517, or parts of automatic data processing machines | 218.399.660 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 84659300 | grinding, sanding or polishing machines | 202.855.303 |
| 2822100 | Takel/lier/Lift e.d. | 84272011 | Rough terrain fork-lift and other stacking trucks, self-propelled, | 196.481.638 |

| | | | | |
|---------|----------------------|----------|---|-------------|
| | | | with a lifting height \geq 1 m | |
| 2830000 | Mach.v.landbouw | 84322910 | Scarifiers and cultivators for use in agriculture, horticulture and forestry | 163.290.001 |
| 2822100 | Takel/lier/Lift e.d. | 84253900 | Winches and capstans, non-powered by electric motor | 130.691.770 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 84621090 | Forging or die-stamping machines, incl. presses, and hammers, not numerically controlled | 123.797.229 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 84571010 | horizontal | 120.073.571 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 84659500 | Drilling or morticing machines for working wood, cork, bone, hard rubber, hard plastics or similar hard materials (excl. machines for working in the hand and machines of subheading 8465.10) | 112.036.309 |
| 2822100 | Takel/lier/Lift e.d. | 84271010 | Self-propelled works trucks powered by an electric motor, with a lifting height \geq 1 m | 105.769.800 |
| 2840000 | Gereedschapswerktuig | 84659900 | Machine tools for working wood, cork, bone, hard rubber, hard plastics or similar hard materials (excl. machines for working in the hand, machines of subheading 8465.10, sawing machines, planing, milling or moulding by cutting machines, grinding, sandin | 104.696.286 |

Als er al informatie over materialen is, dan is de hoeveelheid nog onzeker. Mocht een categorie bijvoorbeeld grotendeels katoen bevatten, kan je het dan meetellen als 100% katoen?

De data en andere bronnen van onze afvalspecialisten biedt dus maar beperkte informatie. Recentelijk hebben wij echter gehoord dat TNO bezig is met het uitsplitsen van alle CN (Internationale Handel)

categorieën naar materialen. Het is het wellicht meer waard om te onderzoeken of die data geschikt is of gaat worden voor de uitsplitsing van producten naar materialen.

4.5 Conclusies en aanbevelingen

4.5.1 Conclusies

In hoofdstuk 4 hebben we de gemiddelde levensduren van producten uit de productcategorieën textiel en elektronische machines gepresenteerd. Op basis van deze cijfers hebben we de hoeveelheden in de voorraden en de hoeveelheden aan uitstromen berekend. Deze benadering helpt om een schatting te maken van de uit de voorraden vrijkomende producten. Binnen de twee productcategorieën, textiel en elektronische machines, zijn er grote verschillen in levensduren omdat deze categorieën een heleboel verschillende producten bevatten. Het is belangrijk levensduren op een lager niveau te definiëren omdat de samenstelling van de hoeveelheden producten binnen de productcategorieën over tijd veranderen.

Onze resultaten geven aan dat de uitstroom van textiel en elektronische machines uit de voorraden in potentie grondstoffen had kunnen leveren voor een groot deel van de in Nederland op de markt gebrachte textiel producten en elektronische machines in 2019. Voor textiel is de uitstroom 88% van het gewicht van wat er op de markt gebracht is. Voor elektronische machines is de uitstroom 63% van wat er op de markt is gebracht. Deze percentages zijn gedeeltelijk gebaseerd op schattingen doordat de data kwaliteit van de elektronische machines in zijn geheel minder is als bij textiel.

Terwijl de *urban mine* secundair materiaal voor productie kan leveren is er op dit moment weinig productie van textiel en elektronische machines in Nederland. Het zal dus ook niet mogelijk zijn deze materiaalkringlopen op nationale schaal volledig te sluiten. Dit kan alleen globaal gedaan worden. Alleen in de groep 1393000 – Tapijten is veel binnenlandse productie aanwezig. Daarnaast kan het afhankelijk van het materiaal en productontwerp nog steeds een uitdaging zijn uit de voorraden vrijkomende producten en materialen her te gebruiken. De kwaliteit van de uitgaande stromen is vooraf onbekend en vaak is het moeilijk verschillende materialen die in een product verwerkt zijn weer te scheiden.

Voor de conversie naar materialen zijn tabellen nodig met samenstellingen van de producten. Wij hebben onderzocht of dit mogelijk is, maar op dit moment is de data daarvoor beperkt, waardoor alleen op heel grof niveau een aantal materialen enigszins te onderscheiden zijn. Bijvoorbeeld dierlijk/plantaardig/chemisch voor Textiel, of ferro/non-ferro voor elektronische machines. Wellicht dat nieuw onderzoek door TNO kan helpen om conversie tabellen samen te stellen, zodat het berekenen van de hoeveelheid materialen in de toekomst wel gedetailleerd gemaakt kan worden.

4.5.2 Aanbevelingen

MateriaalMonitor categorieën uitsplitsen

Er zijn groepen waarbij onderliggende categorieën in diverse supplementaire eenheden zijn weergegeven zoals stuks, liters, en vierkante meters. Onderzoek is nodig of het homogener maken deze betreffende MateriaalMonitor categorieën, bijvoorbeeld door ze in kleinere groepen te verdelen, zinvol is. Nadeel is dat ze dan niet meer zullen overeenkomen met de MateriaalMonitor indeling die verder gebruikt wordt.

Analyse van de gevonden uitkomsten

Verdere analyse van de resultaten kan meer inzicht geven in de betrouwbaarheid van de uitkomsten. Bijvoorbeeld door meer literatuur en andere data te vinden die deze resultaten kan bevestigen. Verder kunnen de uitkomsten in een vervolgonderzoek met de Materiaalmonitor vergeleken worden.

Voornamelijk bij de elektronische machines zou meer informatie over de betrouwbaarheid nuttig zijn.

Verder veranderen ook de gemiddelde levensduren van producten over tijd (Bakker et al., 2014). Het zou goed zijn om die uitkomsten na een aantal jaar te evalueren en als mogelijk dynamische levensduren gebruiken. De vraag is hoe deze dynamische levensduren bepaald kunnen worden.

5 Conclusies, discussie, aanbevelingen

5.1 Conclusies

Voor de drie voorraden die we dit jaar bekeken hebben in het kader van dit project – gebouwen, elektronische machines en textiel – leidt tot een zelfde conclusie als die uit het 2019 onderzoek: we zijn erin geslaagd tot een redelijke eerste schatting te komen van de aard en omvang. Voor gebouwen hebben we gebruik gemaakt van de enorme database van de BAG om informatie op “product”-niveau te vinden. Voor materialen hebben we de data uit de EIB-Metabolic studie gebruikt (Arnoldussen et al., 2019) om in lijn te blijven met eerdere studies ter onderbouwing van het Nederlandse circulaire economie beleid. Met deze twee databronnen hebben we op zeer gedetailleerd niveau een inschatting kunnen maken van de *urban mine* in gebouwen, geografisch expliciet, en voor een dozijn verschillende materialen.

De kwantificering van de andere twee voorraden zijn gebaseerd op statistieken verzameld door CBS, en geven een goed beeld van de voorraden op productniveau. Data over de materialensamenstelling van deze producten zijn niet verzameld - een voorstudie liet zien dat aanvullende onderzoek nodig is om voldoende informatie te genereren. Op dit moment worden data over hoeveelheden kritisch materialen in verschillende goederensoorten verzameld door CBS en TNO gezamenlijk. In een later stadium kan de vertaling naar materiaalvoorraden gemaakt worden voor elektronische machines. Textiel is een andersoortige voorraad – hierbij kan het vanuit oogpunt van een circulaire economie nuttig zijn een vertaling te maken naar verschillende typen vezels. De huidige inventarisatie biedt daarvoor onvoldoende aanknopingspunten.

Gebouwen vormen de grootste voorraad van de voorraden die we tot nu toe onderzocht hebben. In totaal vinden we daar 2,7 miljard ton aan materialen. Het leeuwendeel daarvan bestaat uit constructiematerialen zoals beton en baksteen, maar ook voor staal is deze voorraad zeer groot, bijna 100 miljoen ton. Daarmee is ook voor staal de gebouwde omgeving verreweg de grootste voorraad. Interessant is het om te constateren dat dit voor koper en aluminium niet geldt. Voor deze twee materialen is de voorraad in gebouwen weliswaar groot, maar in dezelfde orde grootte als die voor voertuigen, en in dezelfde grootte-orde als die in het elektriciteitssysteem en in elektronische machines.

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.

Met vraag (1) is een begin gemaakt: in een aparte rapportage wordt een beeld geschetst van de dynamiek van het elektriciteitssysteem en de in- en uitstromen van materialen (vraag en afdanking) onder verschillende scenario's tot 2050. In die rapportage (van Oorschot et al., 2020c) wordt ook enige aandacht besteed aan vraag (2). Dit blijkt een lastig en specialistisch onderwerp te zijn, waar materiaalwetenschappers een belangrijke rol te spelen hebben.

Voorraden in de maatschappij verdienen een centrale plaats in een monitorings- en modelleringsstelsel 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 stelsel 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.

5.2 Discussie

5.2.1 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. Op productniveau was dit voor deze specifieke voorraden zelfs mogelijk op basis van standaard verzamelde, goed gedocumenteerde data.

Op materiaalniveau is de database een stuk incompleter. Voor gebouwen bestaan enkele databases over materiaalintensiteiten, van een heel verschillende compleetheid en kwaliteit en met een heel verschillende scope. Door de bank genomen leiden deze databases op geaggregeerd niveau tot een zelfde grootte-orde van resultaten. Wel zijn er duidelijke verschillen op detail-niveau, bijvoorbeeld met betrekking tot de kleinere metalen. De door ons gebruikte database onderscheidt vier verschillende typen woningbouw, en zeven categorieën utiliteitsgebouwen. Deze data zijn bovendien historisch specifiek, i.e. geldig voor gebouwen uit een bepaalde periode. Helaas ontbreken gegevens over industriële gebouwen en structuren.

Een ander type data dat schaars is, is data over de levensduur van de toepassingen. In een rechtstreekse voorraad-inventarisatie zijn deze gegevens niet noodzakelijk. Wel is informatie over de levensduur nodig om iets te kunnen zeggen over de toekomstige uitstroom. In een stroom-gebaseerde benadering zoals gehanteerd voor textiel en voor elektronische machines zijn levensduurgegevens wel essentieel: de voorraad wordt berekend op basis van in- en uitstromen, en deze laatste worden berekend uit de instromen met behulp van een levensduur. Voor textiel en elektronische machines zijn daarom inschattingen gemaakt van de levensduur van de betreffende producten uit die categorieën. Deze benadering is echter lastig toe te passen voor een voorraad als gebouwen. Levensduren zijn zeer variërend en potentieel zeer lang, waardoor tijdreeksen geen soelaas bieden: niet lang genoeg, en geen voldoende indicatie voor een schatting van de levensduur. Dit punt zien we terugkomen in de literatuur. Voor extreem lang levende producten zoals gebouwen, wegen of elektriciteitskabels kan het beter zijn te werken met *obsolescence planning*: een geplande vervanging door de beherende instantie.

5.2.2 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 textiel en elektronische machines is deze benadering gehanteerd, en heeft als toegevoegde waarde ook nog informatie opgeleverd over levensduren.

De rechtstreekse benadering werkt het best voor voorraden met een lange levensduur, en voorraden waarvoor geldt dat de afdanking (en aanvulling) vooral planmatig verloopt. Dit is het geval voor gebouwen en infrastructuur. Data over in- en uitstromen zijn daarmee niet rechtstreeks te relateren aan voorraadgegevens, en daarmee is de stroom-gebaseerde 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? In elk geval is een modelmatige (en dus levensduur-gebaseerde) benadering nodig om stromen te specificeren in toekomstverkenningen, waar uit de aard der zaak geen data over beschikbaar zijn.

5.2.3 Discussie: voorraden in de maatschappij

Ook voor deze ronde voorraad-inventarisatie bleek het mogelijk een inschatting te maken van de omvang van de voorraden. Op productniveau hebben we ons kunnen baseren op goede bronnen van het Kadaster en het CBS. Deze bronnen worden ook langjarig bijgehouden. Op materiaalniveau is de database veel minder compleet. Hier is meer informatie echt wenselijk (zie Aanbevelingen).

Deze rapportage levert opnieuw enkele puzzelstukjes voor het kwantificeren van de Nederlandse *urban mine*. De bouw is een zeer grote voorraad, in de orde van miljarden tonnen materiaal, die voor het grootste deel bestaat uit constructiematerialen zoals beton. Maar ook voor staal is deze voorraad groot in vergelijking tot de voorraden die in 2019 zijn geïnventariseerd, 80 miljoen ton t.o.v. 30 miljoen ton in voertuigen en 10 miljoen in elektronische machines. Voor aluminium en koper geldt dat voertuigen de grootste voorraad blijft. Wel voegen gebouwen en elektronische machines een aanzienlijke hoeveelheid toe, eveneens in de orde van een miljoen ton. Kritische materialen zijn in deze ronde niet geïnventariseerd. Ze zijn te verwachten in elektronische machines.

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, twee ordegrottes 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 die, na het 2020 onderzoek, gekwantificeerd kan worden op een kleine 2 miljoen ton, in de orde van honderden kg per inwoner, hoger dan de reserves onder de grond. De Nederlandse kopervraag is in de orde van tienduizenden tonnen per jaar. Ook vanuit dat oogpunt is de kopervoorraad in de Nederlandse *urban mine* aanzienlijk: twee ordegrottes meer.

Het lijkt erop dat de constatering van Graedel et al. (2013), namelijk dat de bovengrondse voorraden voor koper momenteel in dezelfde ordegrutte 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.

5.3 Aanbevelingen

Ook de tweede fase van het onderzoek naar voorraden is succesvol geweest: we zijn erin geslaagd zinvolle kwantificeringen te maken voor de drie voorraden die in 2020 op het programma stonden: gebouwen, elektronische machines en textiel. Het beeld van de Nederlandse *urban mine* is daarmee weer een stukje completer.

5.3.1 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. Voorraden bepalen stromen, en niet andersom. 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 is het essentieel dat deze voorraaddynamiek in de modellen worden opgenomen. Daartoe zijn zeker aanknopingspunten, die o.i. 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-) 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 recycleren 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 inventarisatie van gebouwen is geheel GIS-gebaseerd: de BAG is geïmplementeerd in een GIS systeem. Ook de elektriciteits-infrastructuur is geheel in GIS voorhanden. Datzelfde geldt voor (nog niet onderzochte voorraden) transportinfrastructuur en gas-infrastructuur. Voor producten als voertuigen is een link te maken via de eigenaars. Consumentproducten kunnen wellicht op basis van huishoudens aan een locatie worden gekoppeld. De gegevensbasis is dan in elk geval op alle schaalniveaus dezelfde, een goed startpunt voor verdere beleidsvorming. Provinciale en gemeentelijke overheden kunnen op hun schaalniveau aanvullingen of nadere specificaties toevoegen.

5.3.2 Uitbreiding inventarisatie

Uitbreiding scope aan voorraden

In totaal zijn er nu zes voorraden geïnventariseerd: in 2019 het elektriciteitssysteem, voertuigen en elektronica, en dit jaar gebouwen, elektronische machines en textiel. Om een completer beeld te krijgen van de omvang van de stedelijke mijn is het noodzakelijk daar nog andere aan toe te voegen.

Wellicht de grootste nog niet geïnventariseerde voorraad betreft de transportinfrastructuur – wegen, rails, bruggen, tunnels. Deze voorraad zal met name uit zand, beton en asfalt en staal bestaan, met wat koper, 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 voorraad die zeker relevant zal zijn, 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, aankleding van huis en tuin, en gebruiksvoorwerpen van allerlei aard. De omvang hiervan is onbekend, maar mogelijk zeer relevant. 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 onzichtbaarheid. Uit het 2019 kwam naar voren dat een grote *hibernating stock* van koper en aluminium onder de grond ligt, in de vorm van elektriciteitskabels en –leidingen. Voor gebouwen lijkt de *hibernating stock* beperkt te zijn.

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 elektronische machines en textiel, omdat deze inventarisatie via een stroom-gebaseerde methode tot stand is gebracht. Voor het elektriciteitssysteem is een aparte rapportage gewijd aan in- en uitstromen (van Oorschot et al., 2020c).

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. Hieraan is in een aparte rapportage aandacht besteed (Tunn & Delahaye, 2020).

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 recycleren 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 ook de mogelijkheid om een koppeling te maken in het GRIS tussen de voorraden en ander onderzoek dat in het kader van het werkprogramma wordt uitgevoerd, zoals het onderzoek naar onze afhankelijkheid van import van kritische materialen, of de milieu-impact gerelateerd aan het Nederlandse grondstofgebruik.

Aandacht voor verwerkingsmogelijkheden van de uitstroom uit de urban mine

Of goed gebruik gemaakt kan worden van de materialen die uit de *urban mine* beschikbaar komen, hangt in hoge mate af van de verwerkingsmogelijkheden die er zijn. Het gaat daarbij om recycling van materialen, maar ook om hergebruik van producten, van refurbishing en remanufacturing, en van levensduurverlenging middels reparatie of middels een ander afdankgedrag bij consumenten en bedrijven. Deze circulaire sector staat nog in de kinderschoenen en is versnipperd. Er zijn technologische aspecten, die te maken hebben met scheiding en terugwinning van materialen, en met het ontwerp van producten en materialen. Er zijn organisatorische aspecten, die te maken hebben met logistiek. Er zijn economische aspecten, die te maken hebben met markten voor tweedehands producten en materialen. Er zijn sociale aspecten, die te maken hebben met gedrag, acceptatie en veiligheid. En tenslotte zijn er milieu-aspecten, die te maken hebben met emissies uit vervoers- dismantling- en recycling processen die nodig zijn voor het opnieuw op de markt zetten van deze producten en materialen.

5.3.3 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 ook dit jaar weer de eerste het best beschikbaar.

Met betrekking tot de materialensamenstelling van gebouwen zijn verschillende databases beschikbaar, allemaal nieuw, allemaal in opbouw, en elk met eigen definities en afbakeningen. Voor textiel en elektronische machines zijn geen gegevens gevonden. Voor gebouwen maakt de gebruikte database onderscheid in klassen van ouderdom. 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. Het onderzoek van dit jaar heeft levensduurschattingen geleverd voor textiel en elektronische machines, een waardevolle aanvulling op de schaarse database. Deze benadering zou ook op andere productcategorieën kunnen worden toegepast.

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. Voor toekomstverkenningen komt daar nog eens bij dat de toekomst inherent onzeker is. Het doorrekenen van verschillende scenario's kan inzicht bieden in de bandbreedte van de resultaten. Dit is in Van Oorschot et al. (2020c) ook gedaan.

Langzamerhand groeit het beeld van de Nederlandse urban mine als een belangrijke bron van materialen en producten voor de circulaire economie. Het is van belang dat dit onderzoek niet op zichzelf blijft staan maar geïntegreerd wordt in het grotere beeld: wat kunnen en willen we als Nederland om de beleidsdoelstellingen te realiseren?

6 Referenties

ArcGIS (2020a). BAG-Basisregistratie Adressen en Gebouwen. Geraadpleegd van:

<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=ec2f977b4d3c41d8967c36f9b99fd725>

ArcGIS (2020b). BAG 3D- Nederland. Geraadpleegd van:

<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=abd5e3c4b173417f8c14f1283dee33c6>

Arnoldussen, J., S. Errami, R. Semenov, G. Roemers, M. Blok, M Kamps & K. Faes (2019).

Materiaalstromen, milieuimpact en energieverbruik in de woning- en utiliteitsbouw. Uitgangssituatie en doorkijk naar 2030. Economisch Instituut voor de Bouw (EIB), Metabolic en SGS Search. Geraadpleegd van: <https://www.metabolic.nl/publication/materiaalstromen-milieu-impact-en-energieverbruik-in-de-woning-en-utiliteitsbouw/>

Bakker, C., Wang, F., Huisman, J., Den Hollander, M. (2014). Products that go round: Exploring product life extension through design. *Journal of Cleaner Production*, 69, 10-16.

Baldé, K., Meeuwissen, H., Magalini, F., Wang, F. (2017). MANUAL for the use of the WEEE calculation tool, CBS / UNU.

Berkel, J. van, Schoenaker N., Steeg, A. van de, Jongh. L., Schovers, R., Pieters A., Delahaye, R. (2019) *Materiaalstromen in Nederland – Materiaalmonitor 2014-2016, gereviseerde cijfers*. CBS

CBS (2020). Aantal bedrijven per bedrijfstak. Zoals gevonden op <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/81589NED/table>

Deetman, S., Marinova, S., van der Voet, E., van Vuuren, D. P., Edelenbosch, O., & Heijungs, R. (2020). Modelling global material stocks and flows for residential and service sector buildings towards 2050. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118658.

Heeren, N., & Fishman, T. (2019). A database seed for a community-driven material intensity research platform. *Scientific data*, 6(1), 1-10.

Heeren, N., & Hellweg, S. (2018). Tracking construction material over space and time: Prospective and geo-referenced modeling of building stocks and construction material flows. *Journal of industrial ecology*, 23(1), 253-267.

Hoenderken, J. (2012). Getrokken rooiers: voor elke grond de juiste machine, WUR. Zoals gevonden op <https://edepot.wur.nl/222323>

Hopstaken, F., Van de Schalk, A., Van der Maesen, M., Custurs, F. *Massabalans Textiel 2018 (2020)*, FFACT.

Kleemann, F., Lehner, H., Szczypińska, A., Lederer, J., & Fellner, J. (2017). Using change detection data to assess amount and composition of demolition waste from buildings in Vienna. *Resources, conservation and recycling*, 123, 37-46.

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.

Marinova, S., Deetman, S., van der Voet, E., & Daioglou, V. (2020). Global construction materials database and stock analysis of residential buildings between 1970-2050. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119146.

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.

Müller, D. B. (2006). Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands. *Ecological economics*, 59(1), 142-156.

Rijksoverheid. (2016). Nederland circulair in 2050. Rijksbreed programma circulaire economie.

Van der Voet, E., R. Huele, A. Koutamanis, B. van Reijn, E. van Bueren, J. Spierings, T. Demeijer, G. Roemers, M. Blok (2016). Prospecting urban mines of Amsterdam (PUMA). Amsterdam Institute for advanced metropolitan solutions. Leiden Universiteit, TU Delft, de Waag & Metabolic. Geraadpleegd van: <https://www.ams-institute.org/urban-challenges/circularity-urban-regions/prospecting-urban-mines-amsterdam/>

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

Van Oorschot, J.; & van der Voet, E. (2020b). Voorraden in de maatschappij; scoping onderzoek 2020. CML Universiteit Leiden.

Van Oorschot, J., B. Roelofs, J. van der Horst & E. van der Voet (2020c). Dynamiek van de voorraden in het elektriciteitssysteem: scenario's voor in- en uitstromen tot 2050. CML Universiteit Leiden.

Sprecher, B., Verhagen, T. J., Sauer, M. L., Baars, M., & Fishman, T. (2020). Material intensity database for the Dutch building stock: Towards Big Data in material stock analysis. Manuscript ingediend voor publicatie.

Tanikawa, H., Fishman, T., Okuoka, K., & Sugimoto, K. (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*, 19(5), 778-791.

TNO. (2017). KIP Waste and Resource Platform. Utrecht: TNO.

Tunn, V.S.C., & Delahaye, R. (2020). Bepaling van de uitvoer van tweedehands- en afvalgoederen – haalbaarheidsstudie. Centraal Bureau voor de Statistiek.

Bijlagen

Bijlage A ProSUM urban mining 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.

Bijlage B. Materiaalintensiteiten van verschillende gebouwtypen

Tabel B1. Materiaalintensiteiten in kg/m² (GO) op basis van EIB & Metabolic (2019).

| Type gebouw | Cohort | Staal | Koper | Aluminium | Overig metaal | Hout | Beton | Baksteen | Overige constructiematerialen | Glas | Keramik | Plastic | Isolatie | Overig | Totaal |
|---------------|-----------|-------|-------|-----------|---------------|--------|---------|----------|-------------------------------|-------|---------|---------|----------|--------|---------|
| vrijstaand | <1945 | 64,54 | 0,88 | 0,15 | 2,64 | 134,59 | 1382,69 | 306,15 | 361,48 | 0,09 | 18,53 | 1,28 | 13,98 | 1,59 | 2288,59 |
| | 1945-1970 | 0,00 | 0,88 | 0,25 | 2,66 | 75,48 | 1442,06 | 306,15 | 390,85 | 2,86 | 18,53 | 1,56 | 14,46 | 1,93 | 2257,67 |
| | 1970-2000 | 53,76 | 0,88 | 0,22 | 2,66 | 26,86 | 1450,37 | 122,46 | 766,17 | 5,63 | 2,83 | 1,80 | 15,02 | 1,92 | 2450,59 |
| | >2000 | 53,75 | 0,88 | 0,22 | 2,66 | 39,05 | 1450,37 | 122,46 | 766,17 | 5,63 | 2,83 | 1,80 | 16,06 | 2,01 | 2463,90 |
| serieel | <1945 | 51,24 | 0,35 | 0,38 | 1,47 | 64,77 | 1144,32 | 162,87 | 297,17 | 0,23 | 2,76 | 0,82 | 13,22 | 1,37 | 1740,96 |
| | 1945-1970 | 53,19 | 0,35 | 0,48 | 1,52 | 40,86 | 1225,65 | 162,87 | 306,20 | 2,31 | 2,76 | 1,15 | 13,48 | 1,96 | 1812,77 |
| | 1970-2000 | 54,83 | 0,35 | 0,38 | 1,52 | 20,30 | 1304,48 | 65,15 | 470,95 | 4,40 | 2,76 | 1,87 | 13,84 | 1,96 | 1942,79 |
| | >2000 | 54,81 | 0,35 | 0,38 | 1,52 | 32,83 | 1304,48 | 65,15 | 470,95 | 4,40 | 2,76 | 1,87 | 14,51 | 2,05 | 1956,06 |
| appartement | <1945 | 73,57 | 0,31 | 0,32 | 0,48 | 17,81 | 1511,48 | 178,93 | 283,21 | 0,10 | 5,84 | 1,01 | 19,80 | 2,04 | 2094,89 |
| | 1945-1970 | 71,85 | 0,31 | 0,34 | 0,48 | 18,06 | 1585,41 | 178,93 | 282,95 | 2,50 | 5,84 | 1,27 | 20,64 | 7,35 | 2175,90 |
| | 1970-2000 | 72,36 | 0,31 | 1,50 | 0,49 | 18,14 | 1535,28 | 44,73 | 291,09 | 4,89 | 5,51 | 2,02 | 14,26 | 7,47 | 1998,04 |
| | >2000 | 72,34 | 0,31 | 1,50 | 0,49 | 18,14 | 1535,28 | 44,73 | 291,09 | 4,89 | 5,51 | 2,02 | 9,00 | 7,39 | 1992,68 |
| woonflat | <1945 | 52,92 | 0,27 | 0,06 | 0,87 | 73,81 | 870,54 | 56,72 | 187,55 | 1,60 | 5,57 | 1,01 | 19,11 | 1,92 | 1271,95 |
| | 1945-1970 | 54,50 | 0,27 | 0,05 | 0,87 | 36,84 | 985,94 | 56,72 | 187,55 | 5,75 | 5,57 | 1,39 | 19,26 | 1,84 | 1356,56 |
| | 1970-2000 | 83,94 | 0,27 | 12,41 | 0,88 | 1,59 | 1646,96 | 0,00 | 64,22 | 9,90 | 5,57 | 2,13 | 13,68 | 2,14 | 1843,68 |
| | >2000 | 83,92 | 0,27 | 12,41 | 0,88 | 1,59 | 1646,96 | 0,00 | 64,22 | 9,90 | 5,57 | 2,13 | 6,87 | 2,06 | 1836,78 |
| winkel | <1945 | 46,47 | 0,21 | 0,12 | 0,46 | 42,83 | 1097,86 | 171,37 | 276,00 | 11,02 | 18,82 | 1,50 | 16,88 | 2,01 | 1685,53 |
| | 1945-1970 | 46,57 | 0,21 | 0,13 | 0,49 | 24,41 | 1168,97 | 171,37 | 275,95 | 14,16 | 18,82 | 1,77 | 17,21 | 3,17 | 1743,22 |
| | 1970-2000 | 48,05 | 0,21 | 1,47 | 0,49 | 9,47 | 1208,63 | 68,55 | 363,12 | 17,30 | 4,84 | 1,81 | 12,36 | 3,13 | 1739,45 |
| | >2000 | 48,04 | 0,21 | 1,47 | 0,49 | 14,18 | 1208,63 | 68,55 | 363,12 | 17,30 | 4,84 | 1,81 | 7,85 | 3,11 | 1739,60 |
| kantoor_klein | <1945 | 95,00 | 0,40 | 0,14 | 0,68 | 25,77 | 971,11 | 116,36 | 421,39 | 1,73 | 5,00 | 1,63 | 20,66 | 2,30 | 1662,17 |
| | 1945-1970 | 93,59 | 0,40 | 0,12 | 0,68 | 13,87 | 971,01 | 116,36 | 421,39 | 4,73 | 5,00 | 1,96 | 22,45 | 2,18 | 1653,75 |
| | 1970-2000 | 92,83 | 0,40 | 1,88 | 0,69 | 4,73 | 955,97 | 77,57 | 520,49 | 7,73 | 5,00 | 1,43 | 17,49 | 2,27 | 1688,50 |
| | >2000 | 92,81 | 0,40 | 1,88 | 0,69 | 4,73 | 955,97 | 77,57 | 520,49 | 7,73 | 5,00 | 1,43 | 16,10 | 2,20 | 1687,01 |
| kantoor_groot | <1945 | 52,92 | 0,27 | 0,06 | 0,87 | 73,81 | 870,54 | 56,72 | 187,55 | 1,60 | 5,57 | 1,01 | 19,11 | 1,92 | 1271,95 |
| | 1945-1970 | 54,50 | 0,27 | 0,05 | 0,87 | 36,84 | 985,94 | 56,72 | 187,55 | 5,75 | 5,57 | 1,39 | 19,26 | 1,84 | 1356,56 |
| | 1970-2000 | 83,94 | 0,27 | 12,41 | 0,88 | 1,59 | 1646,96 | 0,00 | 64,22 | 9,90 | 5,57 | 2,13 | 13,68 | 2,14 | 1843,68 |
| | >2000 | 83,92 | 0,27 | 12,41 | 0,88 | 1,59 | 1646,96 | 0,00 | 64,22 | 9,90 | 5,57 | 2,13 | 6,87 | 2,06 | 1836,78 |
| distributie | <1945 | 91,20 | 0,24 | 0,12 | 0,11 | 79,46 | 810,86 | 7,69 | 28,24 | 0,04 | 0,14 | 2,29 | 11,51 | 0,41 | 1032,31 |
| | 1945-1970 | 84,87 | 0,24 | 0,12 | 0,11 | 39,92 | 810,41 | 7,69 | 28,24 | 0,09 | 0,14 | 2,50 | 14,83 | 0,41 | 989,57 |
| | 1970-2000 | 78,74 | 0,24 | 0,18 | 0,11 | 0,39 | 812,09 | 3,42 | 36,77 | 0,14 | 0,14 | 1,15 | 19,68 | 0,20 | 953,23 |
| | >2000 | 78,74 | 0,24 | 0,18 | 0,11 | 0,39 | 812,09 | 3,42 | 36,77 | 0,14 | 0,14 | 1,15 | 31,11 | 0,20 | 964,66 |
| bedrijfshal | <1945 | 93,01 | 0,25 | 0,14 | 0,26 | 75,57 | 822,48 | 12,35 | 51,52 | 0,12 | 0,26 | 1,48 | 13,27 | 0,38 | 1071,08 |
| | 1945-1970 | 86,99 | 0,25 | 0,17 | 0,26 | 38,31 | 822,07 | 12,35 | 51,52 | 0,95 | 0,26 | 1,74 | 16,44 | 0,37 | 1031,67 |
| | 1970-2000 | 81,60 | 0,25 | 0,72 | 0,26 | 1,23 | 826,41 | 4,63 | 64,97 | 1,77 | 0,26 | 3,07 | 20,70 | 0,43 | 1006,29 |
| | >2000 | 81,60 | 0,25 | 0,72 | 0,26 | 1,23 | 826,41 | 4,63 | 64,97 | 1,77 | 0,26 | 3,07 | 31,22 | 0,42 | 1016,80 |
| zorg | <1945 | 64,63 | 0,31 | 0,09 | 0,97 | 50,08 | 1331,75 | 160,95 | 228,91 | 0,36 | 18,70 | 0,98 | 17,11 | 2,13 | 1876,97 |
| | 1945-1970 | 65,33 | 0,31 | 0,09 | 1,00 | 27,97 | 1439,08 | 160,95 | 228,91 | 2,62 | 18,70 | 1,19 | 17,68 | 4,67 | 1968,48 |
| | 1970-2000 | 68,96 | 0,31 | 0,06 | 1,01 | 5,48 | 1517,71 | 64,38 | 420,86 | 4,88 | 5,89 | 1,75 | 12,92 | 4,55 | 2108,76 |
| | >2000 | 68,94 | 0,31 | 0,06 | 1,01 | 8,11 | 1517,71 | 64,38 | 420,86 | 4,88 | 5,89 | 1,75 | 8,70 | 4,50 | 2107,11 |
| onderwijs | <1945 | 88,11 | 0,33 | 0,13 | 0,53 | 63,15 | 1157,17 | 122,14 | 228,37 | 1,26 | 5,83 | 1,29 | 18,31 | 1,94 | 1688,56 |
| | 1945-1970 | 86,27 | 0,33 | 0,12 | 0,54 | 34,54 | 1199,28 | 122,14 | 228,37 | 2,64 | 5,83 | 1,48 | 18,65 | 1,86 | 1702,04 |
| | 1970-2000 | 85,88 | 0,33 | 12,22 | 0,54 | 6,72 | 1240,08 | 48,86 | 232,96 | 3,30 | 5,83 | 1,58 | 14,52 | 1,83 | 1654,63 |
| | >2000 | 85,90 | 0,33 | 12,22 | 0,54 | 6,72 | 1240,08 | 48,86 | 232,96 | 3,95 | 5,83 | 1,59 | 9,14 | 1,75 | 1649,87 |

Tabel B2. Materiaalintensiteiten in kg/m² (GO) uit Heeren & Fishman (2019), geaggregeerd naar 7 gebouwtypen, 4 bouwcohorten en 13 materialen/materiaalgroepen.

| Type gebouw | Cohort | Staal | Koper | Aluminium | Overig metaal | Hout | Beton | Baksteen | Overige constructie mineralen | Glas | Keramiek | Plastic | Isolatie | Overig | Totaal |
|---------------|-----------|--------|-------|-----------|---------------|--------|---------|----------|-------------------------------|-------|----------|---------|----------|--------|---------|
| eengezins | <1945 | 7,62 | 12,86 | 2,86 | 22,00 | 192,38 | 248,29 | 26,67 | 1767,71 | 3,33 | 63,54 | 5,06 | 26,86 | 35,05 | 2414,21 |
| | 1945-1970 | 41,72 | 8,11 | 2,86 | 22,00 | 124,29 | 423,95 | 333,96 | 1751,35 | 3,99 | 63,54 | 5,06 | 44,48 | 35,05 | 2860,36 |
| | 1970-2000 | 41,08 | 3,35 | 2,44 | 29,71 | 81,73 | 593,39 | 287,27 | 1401,80 | 3,48 | 63,81 | 5,06 | 82,53 | 55,73 | 2651,37 |
| | >2000 | 30,45 | 1,24 | 2,57 | 28,76 | 199,48 | 695,29 | 0,00 | 301,16 | 3,54 | 104,97 | 12,20 | 80,03 | 34,40 | 1494,10 |
| appartementen | <1945 | 61,21 | 0,34 | 2,11 | 28,15 | 108,61 | 279,95 | 468,41 | 647,87 | 4,12 | 55,13 | 2,67 | 6,71 | 143,64 | 1808,93 |
| | 1945-1970 | 127,04 | 0,34 | 2,11 | 43,41 | 37,48 | 703,04 | 230,01 | 428,41 | 3,80 | 55,13 | 2,67 | 21,45 | 68,37 | 1723,26 |
| | 1970-2000 | 199,37 | 0,34 | 2,11 | 85,21 | 18,79 | 844,60 | 200,28 | 311,91 | 3,41 | 55,13 | 2,65 | 46,95 | 46,24 | 1816,97 |
| | >2000 | 259,91 | 0,34 | 2,11 | 48,04 | 43,19 | 666,48 | 204,91 | 349,95 | 4,47 | 55,13 | 2,62 | 73,01 | 61,75 | 1771,91 |
| woonflat | <1945 | 73,63 | 0,01 | 2,42 | 107,25 | 60,07 | 261,54 | 808,79 | 616,04 | 3,66 | 20,68 | 2,46 | 11,12 | 18,46 | 1986,11 |
| | 1945-1970 | 112,64 | 0,01 | 2,42 | 107,25 | 19,89 | 617,03 | 335,71 | 307,25 | 3,30 | 20,68 | 2,46 | 14,42 | 18,46 | 1561,50 |
| | 1970-2000 | 152,53 | 0,01 | 2,42 | 107,25 | 14,43 | 853,93 | 60,44 | 312,59 | 3,74 | 20,68 | 2,18 | 26,29 | 18,46 | 1574,93 |
| | >2000 | 172,52 | 0,01 | 2,42 | 24,56 | 33,83 | 714,44 | 60,44 | 338,54 | 2,01 | 20,68 | 1,36 | 59,47 | 18,46 | 1448,72 |
| kantoor | <1945 | 188,59 | 4,26 | 2,76 | 0,00 | 4,39 | 1536,01 | 341,09 | 18,07 | 8,28 | 22,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2126,37 |
| | 1945-1970 | 188,59 | 4,26 | 2,76 | 0,00 | 4,39 | 1536,01 | 341,09 | 18,07 | 8,28 | 22,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2126,37 |
| | 1970-2000 | 188,59 | 4,26 | 2,76 | 0,00 | 4,39 | 1536,01 | 341,09 | 18,07 | 8,28 | 22,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2126,37 |
| | >2000 | 188,59 | 4,26 | 2,76 | 0,00 | 4,39 | 1536,01 | 341,09 | 18,07 | 8,28 | 22,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2126,37 |
| ommercieel | <1945 | 19,79 | 0,42 | 0,37 | 0,33 | 24,28 | 417,73 | 1106,03 | 357,62 | 1,91 | 2,81 | 3,15 | 0,00 | 6,29 | 1940,73 |
| | 1945-1970 | 43,69 | 0,32 | 0,54 | 0,01 | 20,65 | 1027,07 | 555,72 | 273,25 | 2,25 | 2,61 | 3,83 | 0,00 | 6,29 | 1936,21 |
| | 1970-2000 | 40,12 | 0,51 | 1,27 | 0,00 | 18,41 | 1453,12 | 23,70 | 74,00 | 3,25 | 2,57 | 5,34 | 0,00 | 6,29 | 1628,58 |
| | >2000 | 93,82 | 3,19 | 4,69 | 216,33 | 17,47 | 836,48 | 92,90 | 170,29 | 5,10 | 4,31 | 21,83 | 0,00 | 6,29 | 1472,69 |
| industrie | <1945 | 29,62 | 0,02 | 0,09 | 0,00 | 42,09 | 126,82 | 761,99 | 426,13 | 2,87 | 0,24 | 0,24 | 0,00 | 15,71 | 1405,82 |
| | 1945-1970 | 284,41 | 0,01 | 0,78 | 67,02 | 14,75 | 599,77 | 538,20 | 323,10 | 1,41 | 1,05 | 0,24 | 0,00 | 15,71 | 1846,45 |
| | 1970-2000 | 150,79 | 0,01 | 1,05 | 134,03 | 11,52 | 519,37 | 314,45 | 343,23 | 1,05 | 1,05 | 0,24 | 0,00 | 15,71 | 1492,48 |
| | >2000 | 377,24 | 0,01 | 0,83 | 201,05 | 15,18 | 589,64 | 90,70 | 322,93 | 3,25 | 1,05 | 0,24 | 0,00 | 15,71 | 1617,83 |
| overig | <1945 | 106,70 | 3,56 | 6,07 | 185,69 | 53,05 | 869,81 | 462,48 | 6,63 | 15,18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 450,61 | 2159,79 |
| | 1945-1970 | 106,70 | 3,56 | 6,07 | 185,69 | 53,05 | 869,81 | 462,48 | 6,63 | 15,18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 450,61 | 2159,79 |
| | 1970-2000 | 106,70 | 3,56 | 6,07 | 185,69 | 53,05 | 869,81 | 462,48 | 6,63 | 15,18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 450,61 | 2159,79 |
| | >2000 | 106,70 | 3,56 | 6,07 | 185,69 | 39,88 | 973,70 | 462,48 | 6,63 | 15,18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 450,61 | 2250,51 |

Tabel B3. Materiaalintensiteiten in kg/m² (GO) uit Deetman et al. (2020) en Marinova et al. (2020), geaggregeerd naar 7 gebouwtypen, 4 bouwcohorten (data is niet cohort specifiek) en 6 materialen.

| Type gebouw | Staal | Koper | Aluminium | Hout | Beton | Glas |
|-------------|--------|-------|-----------|-------|---------|-------|
| Vrijstaand | 35,63 | 1,73 | 3,56 | 53,07 | 846,33 | 2,68 |
| Serieel | 32,89 | 0,01 | 0,23 | 34,97 | 1208,13 | 1,07 |
| Appartement | 97,36 | 0,31 | 1,94 | 37,17 | 955,92 | 6,35 |
| Woonflat | 116,98 | 0,01 | 2,20 | 54,48 | 910,21 | 4,42 |
| Kantoor | 115,00 | 3,90 | 4,80 | 6,70 | 905,10 | 6,50 |
| Winkel | 78,50 | 2,30 | 2,40 | 11,20 | 700,10 | 5,90 |
| Hotel | 84,40 | 3,50 | 4,40 | 18,50 | 724,20 | 3,90 |
| Overig | 101,90 | 3,40 | 5,80 | 25,50 | 1029,10 | 14,50 |

Tabel B4. Materiaalintensiteiten in kg/m² (GO) Sprecher et al. (in review), geaggregeerd naar 6 gebouwtypen, 4 bouwcohorten en 9 materialen/materiaalgroepen.

| Type gebouw | Cohort | Staal | Hout | Beton | Baksteen | Overige constructie materialen | Glas | Keramik | Isolatie | Overig |
|-------------------------|---------|-----------|-------|--------|----------|--------------------------------|---------|---------|----------|--------|
| Utiliteit | kantoor | <1945 | | | | | | | | |
| | | 1945-1970 | | 26,23 | 678,91 | 33,55 | 1425,14 | 24,81 | | 84,37 |
| | | 1971-2000 | 39,02 | 22,84 | 716,50 | 651,37 | 1272,90 | 8,09 | 7,10 | 45,14 |
| | | >2000 | | 21,09 | | | 1449,40 | | | 40,44 |
| commercieel | <1945 | | | | | | | | | |
| | | 1945-1970 | | 57,36 | 652,64 | 163,19 | 12,42 | | | 83,08 |
| | | 1971-2000 | | 48,35 | | | 2700,00 | | | 131,10 |
| | | >2000 | | | | | | | | |
| overig | <1945 | | 33,85 | | | 1091,46 | 6,77 | | | |
| | | 1945-1970 | | 38,75 | 687,08 | 180,42 | 1479,69 | 9,27 | 19,48 | |
| | | 1971-2000 | | 43,02 | 531,35 | 479,90 | 1242,08 | 4,38 | | 26,98 |
| | | >2000 | | 21,67 | | | 1031,35 | 4,58 | | |
| Residentieel vrijstaand | <1945 | | | | | | | | | |
| | | 1945-1970 | | 304,93 | 1371,97 | 894,79 | | | | 114,37 |
| | | 1971-2000 | | | | | | | | |
| | | >2000 | | | | | | | | |
| serieel | <1945 | | 40,72 | | | 415,22 | | 23,33 | | 38,12 |
| | | 1945-1970 | | 77,68 | | | 994,35 | | | 71,59 |
| | | 1971-2000 | | | | | | | | |
| | | >2000 | | | | | | | | |
| hoogbouw wc | <1945 | | | | | | | | | |
| | | 1945-1970 | | | | | | | | |
| | | 1971-2000 | | 33,96 | | | | | | 46,37 |
| | | >2000 | | | | | | | | |
| appartement | <1945 | | | | | | | | | |
| | | 1945-1970 | 2,61 | 20,54 | | | | | | 39,67 |
| | | 1971-2000 | | | | | 1040,33 | | | |
| | | >2000 | | | | | | | | |

Bijlage C. Totalen materialen per bouwtype en bouwcohort

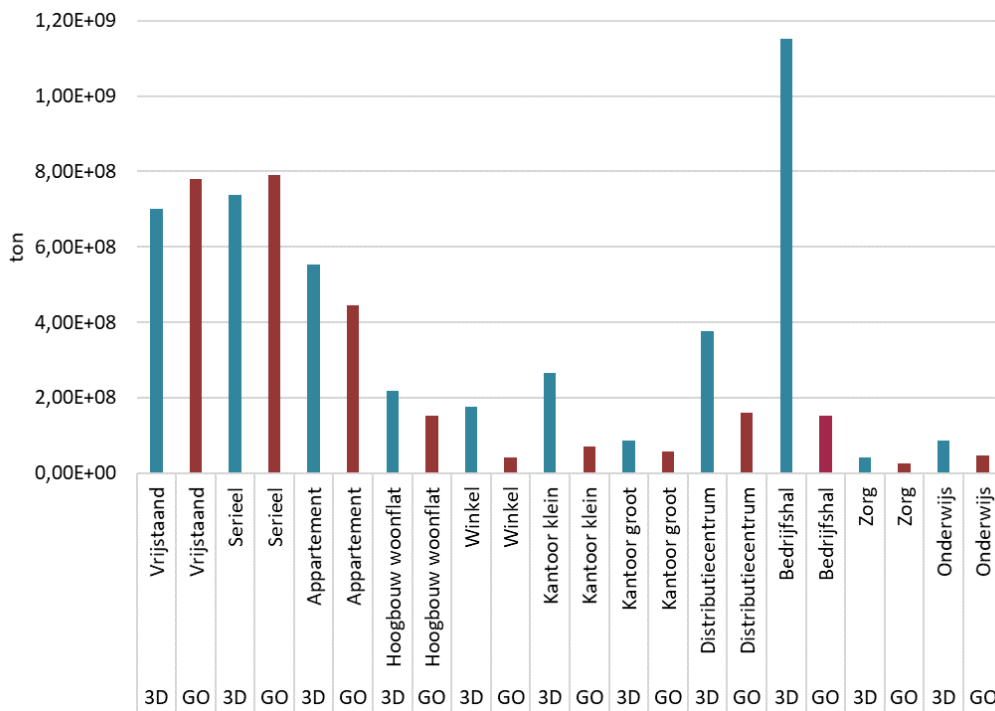
| | | Overige constructiematerialen | | | | | | | | | | | Totaal | | |
|--------------------|-------------|-------------------------------|----------|-----------|---------------|----------|----------|----------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | Staal | Koper | Aluminium | Overig metaal | Hout | Beton | Baksteen | Overige constructiematerialen | Glas | Keramiek | Plastic | | Isolatie | Overig |
| Vrijstaand | < 1945 | 5,97E+06 | 8,17E+04 | 1,39E+04 | 2,44E+05 | 1,24E+07 | 1,28E+08 | 2,93E+07 | 3,34E+07 | 8,35E+03 | 1,71E+06 | 1,19E+05 | 1,29E+06 | 1,47E+05 | 2,12E+08 |
| | 1945 - 1970 | 0,00E+00 | 5,67E+04 | 1,59E+04 | 1,71E+05 | 4,84E+06 | 9,25E+07 | 1,96E+07 | 2,51E+07 | 1,84E+05 | 1,19E+06 | 1,00E+05 | 9,28E+05 | 1,24E+05 | 1,45E+08 |
| Serieel | 1970 - 2000 | 6,17E+06 | 1,01E+05 | 2,56E+04 | 3,06E+05 | 3,08E+06 | 1,67E+08 | 1,41E+07 | 8,80E+07 | 6,46E+05 | 3,25E+05 | 2,07E+05 | 1,72E+06 | 2,20E+05 | 2,81E+08 |
| | > 2000 | 3,09E+06 | 5,08E+04 | 1,28E+04 | 1,53E+05 | 2,24E+06 | 8,33E+07 | 7,03E+06 | 4,40E+07 | 3,23E+05 | 1,63E+05 | 1,03E+05 | 9,22E+05 | 1,15E+05 | 1,42E+08 |
| Appartement | < 1945 | 3,20E+06 | 2,20E+04 | 2,36E+04 | 9,18E+04 | 4,05E+06 | 7,15E+07 | 1,02E+07 | 1,86E+07 | 1,44E+04 | 1,73E+05 | 5,11E+04 | 8,26E+05 | 8,58E+04 | 1,09E+08 |
| | 1945 - 1970 | 4,27E+06 | 2,82E+04 | 3,82E+04 | 1,22E+05 | 3,28E+06 | 9,85E+07 | 1,31E+07 | 2,46E+07 | 1,86E+05 | 2,22E+05 | 9,20E+04 | 1,08E+06 | 1,58E+05 | 1,46E+08 |
| Woonflat | 1970 - 2000 | 1,14E+07 | 7,31E+04 | 7,87E+04 | 3,16E+05 | 4,22E+06 | 2,71E+08 | 1,36E+07 | 9,80E+07 | 9,15E+05 | 5,75E+05 | 3,89E+05 | 2,88E+06 | 4,07E+05 | 4,04E+08 |
| | > 2000 | 3,71E+06 | 2,38E+04 | 2,56E+04 | 1,03E+05 | 2,22E+06 | 8,83E+07 | 4,41E+06 | 3,19E+07 | 2,98E+05 | 1,87E+05 | 1,27E+05 | 9,82E+05 | 1,39E+05 | 1,32E+08 |
| Winkel | < 1945 | 4,58E+06 | 1,90E+04 | 1,97E+04 | 3,00E+04 | 1,11E+06 | 9,41E+07 | 1,11E+07 | 1,76E+07 | 6,51E+03 | 3,63E+05 | 6,31E+04 | 1,23E+06 | 1,27E+05 | 1,30E+08 |
| | 1945 - 1970 | 3,28E+06 | 1,39E+04 | 1,53E+04 | 2,20E+04 | 8,24E+05 | 7,23E+07 | 8,16E+06 | 1,29E+07 | 1,14E+05 | 2,66E+05 | 5,78E+04 | 9,41E+05 | 3,35E+05 | 9,93E+07 |
| Kantoor groot | 1970 - 2000 | 4,94E+06 | 2,08E+04 | 1,02E+05 | 3,32E+04 | 1,24E+06 | 1,05E+08 | 3,05E+06 | 1,99E+07 | 3,34E+05 | 3,76E+05 | 1,38E+05 | 9,73E+05 | 5,09E+05 | 1,36E+08 |
| | > 2000 | 2,87E+06 | 1,21E+04 | 5,96E+04 | 1,93E+04 | 7,20E+05 | 6,09E+07 | 1,78E+06 | 1,16E+07 | 1,94E+05 | 2,19E+05 | 8,01E+04 | 3,57E+05 | 2,93E+05 | 7,91E+07 |
| Kantoor klein | < 1945 | 2,18E+05 | 1,13E+03 | 2,48E+02 | 3,60E+03 | 3,04E+05 | 3,59E+06 | 2,34E+05 | 7,73E+05 | 6,60E+03 | 2,29E+04 | 4,16E+03 | 7,87E+04 | 7,90E+03 | 5,24E+06 |
| | 1945 - 1970 | 7,57E+05 | 3,80E+03 | 6,74E+02 | 1,21E+04 | 5,32E+04 | 1,37E+07 | 7,88E+05 | 2,60E+06 | 7,99E+04 | 7,73E+04 | 1,92E+04 | 2,67E+05 | 2,56E+04 | 1,88E+07 |
| Winkel | 1970 - 2000 | 2,82E+06 | 9,17E+03 | 4,16E+05 | 2,94E+04 | 5,22E+04 | 5,52E+07 | 0,00E+00 | 2,15E+06 | 3,32E+06 | 1,87E+05 | 7,14E+04 | 4,59E+05 | 7,18E+04 | 6,18E+07 |
| | > 2000 | 2,97E+06 | 9,68E+03 | 4,40E+05 | 3,11E+04 | 5,62E+04 | 5,83E+07 | 0,00E+00 | 2,27E+06 | 3,51E+05 | 1,97E+05 | 7,53E+04 | 2,43E+05 | 7,30E+04 | 6,51E+07 |
| Kantoor klein | < 1945 | 7,17E+04 | 3,20E+02 | 1,80E+02 | 7,11E+02 | 6,61E+04 | 1,69E+06 | 2,64E+05 | 4,26E+05 | 1,70E+04 | 2,90E+04 | 2,31E+03 | 2,60E+04 | 3,10E+03 | 2,60E+06 |
| | 1945 - 1970 | 1,25E+05 | 5,55E+02 | 3,50E+02 | 1,33E+03 | 6,54E+04 | 3,13E+06 | 4,59E+05 | 7,39E+05 | 3,79E+04 | 5,04E+04 | 4,75E+03 | 4,61E+04 | 8,49E+03 | 4,67E+06 |
| Kantoor groot | 1970 - 2000 | 5,91E+05 | 2,55E+03 | 1,81E+04 | 6,09E+03 | 1,16E+05 | 1,49E+07 | 8,43E+05 | 4,47E+06 | 2,13E+05 | 5,96E+04 | 2,23E+04 | 1,52E+05 | 3,85E+04 | 2,14E+07 |
| | > 2000 | 3,54E+05 | 1,53E+03 | 1,08E+04 | 3,65E+03 | 1,04E+05 | 8,90E+06 | 5,65E+05 | 2,74E+06 | 1,12E+05 | 3,57E+04 | 1,33E+04 | 5,78E+04 | 2,29E+04 | 1,28E+07 |
| Kantoor klein | < 1945 | 6,17E+05 | 2,62E+03 | 8,86E+02 | 4,42E+03 | 1,67E+05 | 6,31E+06 | 7,56E+05 | 2,74E+06 | 1,12E+04 | 3,25E+04 | 1,06E+04 | 1,34E+05 | 1,49E+04 | 1,08E+07 |
| | 1945 - 1970 | 4,88E+05 | 2,10E+03 | 6,40E+02 | 3,55E+03 | 7,23E+04 | 5,06E+06 | 6,07E+05 | 2,20E+06 | 2,47E+04 | 2,61E+04 | 1,02E+04 | 1,17E+05 | 1,14E+04 | 8,62E+06 |
| Kantoor groot | 1970 - 2000 | 1,80E+06 | 7,84E+03 | 3,65E+04 | 1,35E+04 | 9,20E+04 | 1,86E+07 | 1,51E+06 | 1,01E+07 | 1,50E+05 | 9,72E+04 | 2,78E+04 | 3,40E+05 | 4,42E+04 | 3,28E+07 |
| | > 2000 | 1,06E+06 | 4,53E+03 | 2,14E+04 | 7,89E+03 | 5,39E+04 | 1,09E+07 | 8,83E+05 | 5,92E+06 | 8,80E+04 | 1,63E+04 | 1,83E+04 | 1,83E+05 | 2,50E+04 | 1,92E+07 |
| Distributiecentrum | < 1945 | 1,27E+05 | 6,59E+02 | 1,45E+02 | 2,10E+03 | 1,78E+05 | 2,10E+06 | 1,37E+05 | 4,52E+05 | 3,86E+03 | 1,34E+04 | 2,43E+03 | 4,60E+04 | 4,62E+03 | 3,06E+06 |
| | 1945 - 1970 | 1,97E+05 | 9,89E+02 | 1,76E+02 | 3,16E+03 | 1,33E+05 | 3,57E+06 | 2,05E+05 | 6,79E+05 | 2,08E+04 | 2,01E+04 | 3,05E+04 | 6,97E+04 | 6,66E+03 | 4,91E+06 |
| Bedrijfsaal | 1970 - 2000 | 1,20E+06 | 3,92E+03 | 1,78E+05 | 1,26E+04 | 2,28E+04 | 2,36E+07 | 0,00E+00 | 9,22E+05 | 1,42E+05 | 1,96E+04 | 5,01E+04 | 1,96E+05 | 3,07E+04 | 2,65E+07 |
| | > 2000 | 9,92E+05 | 3,23E+03 | 1,47E+05 | 1,04E+04 | 1,88E+04 | 1,95E+07 | 0,00E+00 | 7,59E+05 | 1,17E+05 | 6,58E+04 | 2,52E+04 | 8,13E+04 | 2,44E+04 | 2,17E+07 |
| Bedrijfsaal | < 1945 | 5,70E+05 | 4,49E+03 | 7,39E+02 | 6,85E+02 | 4,97E+05 | 5,07E+06 | 4,81E+04 | 1,77E+05 | 2,19E+02 | 8,91E+02 | 1,43E+04 | 7,20E+04 | 7,53E+03 | 6,46E+06 |
| | 1945 - 1970 | 1,56E+06 | 4,40E+03 | 2,17E+03 | 2,02E+03 | 7,36E+05 | 1,49E+07 | 1,42E+05 | 5,20E+05 | 1,57E+03 | 2,63E+03 | 4,60E+04 | 2,73E+05 | 7,53E+03 | 1,82E+07 |
| Distributiecentrum | 1970 - 2000 | 5,40E+06 | 1,64E+04 | 1,22E+04 | 7,52E+03 | 2,66E+04 | 5,57E+07 | 2,34E+05 | 2,52E+06 | 9,31E+03 | 9,78E+03 | 7,87E+04 | 1,35E+06 | 1,37E+04 | 6,54E+07 |
| | > 2000 | 5,76E+06 | 1,25E+04 | 1,30E+04 | 8,02E+03 | 2,83E+04 | 5,94E+07 | 2,50E+05 | 2,69E+06 | 9,93E+03 | 1,04E+04 | 8,40E+04 | 2,28E+06 | 1,43E+03 | 7,06E+07 |
| Bedrijfsaal | < 1945 | 5,30E+05 | 1,42E+03 | 7,80E+02 | 1,45E+03 | 4,30E+05 | 4,68E+06 | 7,03E+04 | 2,93E+05 | 7,08E+02 | 1,47E+03 | 8,41E+03 | 7,56E+04 | 2,17E+03 | 6,10E+06 |
| | 1945 - 1970 | 1,74E+06 | 4,98E+03 | 3,31E+03 | 5,09E+03 | 7,64E+05 | 1,64E+07 | 2,46E+05 | 1,93E+06 | 1,89E+04 | 5,14E+03 | 3,47E+04 | 3,28E+05 | 7,45E+03 | 2,06E+07 |
| Zorg | 1970 - 2000 | 6,34E+06 | 1,94E+04 | 1,98E+04 | 1,98E+04 | 9,57E+04 | 6,42E+07 | 3,60E+05 | 5,05E+06 | 1,38E+05 | 2,00E+04 | 2,38E+05 | 1,61E+06 | 3,32E+04 | 7,82E+07 |
| | > 2000 | 3,89E+04 | 1,19E+04 | 3,41E+04 | 5,87E+04 | 3,94E+04 | 3,94E+04 | 2,21E+05 | 3,09E+06 | 8,45E+04 | 1,23E+04 | 1,46E+05 | 1,49E+06 | 1,99E+04 | 4,88E+07 |
| Onderwijs | < 1945 | 6,91E+04 | 3,31E+02 | 9,35E+01 | 1,04E+03 | 5,35E+04 | 1,42E+06 | 1,22E+05 | 2,45E+05 | 3,83E+02 | 2,00E+04 | 1,04E+03 | 1,83E+04 | 2,28E+03 | 2,01E+06 |
| | 1945 - 1970 | 1,09E+05 | 5,18E+02 | 1,46E+02 | 1,67E+03 | 4,68E+04 | 2,41E+06 | 2,69E+05 | 3,83E+05 | 4,39E+03 | 3,13E+04 | 1,99E+03 | 2,96E+04 | 7,81E+03 | 3,30E+06 |
| Onderwijs | 1970 - 2000 | 4,14E+05 | 1,87E+03 | 3,79E+02 | 6,04E+02 | 3,29E+04 | 9,11E+06 | 3,86E+05 | 2,53E+06 | 2,99E+04 | 3,53E+04 | 1,05E+04 | 1,27E+07 | 1,27E+07 | 3,20E+07 |
| | > 2000 | 2,08E+05 | 9,38E+02 | 1,90E+02 | 3,03E+03 | 2,45E+04 | 4,57E+06 | 1,94E+05 | 1,27E+06 | 1,47E+04 | 1,77E+04 | 5,29E+03 | 2,62E+04 | 1,36E+04 | 6,35E+06 |
| Totaal | 1945 - 1970 | 1,82E+05 | 6,95E+02 | 7,21E+02 | 1,10E+03 | 1,30E+05 | 2,39E+06 | 2,52E+05 | 4,71E+05 | 1,61E+03 | 1,20E+04 | 2,67E+03 | 3,78E+04 | 4,00E+03 | 3,48E+06 |
| | 1970 - 2000 | 5,04E+05 | 1,93E+03 | 7,01E+02 | 3,13E+03 | 2,02E+05 | 7,01E+06 | 7,14E+05 | 1,33E+06 | 1,54E+04 | 3,40E+04 | 8,66E+03 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 9,94E+06 |
| Totaal | > 2000 | 1,06E+06 | 4,13E+03 | 1,51E+05 | 6,63E+03 | 8,30E+04 | 1,53E+07 | 6,04E+05 | 2,88E+06 | 4,08E+04 | 7,20E+04 | 1,95E+04 | 1,79E+05 | 2,26E+04 | 2,04E+07 |
| | > 2000 | 6,68E+05 | 2,60E+03 | 9,50E+04 | 4,17E+03 | 5,22E+04 | 9,64E+06 | 3,80E+05 | 1,81E+06 | 3,07E+04 | 4,53E+04 | 1,24E+04 | 7,11E+04 | 1,36E+04 | 1,28E+07 |
| Totaal | 1945 - 1970 | 9,65E+07 | 6,49E+05 | 2,07E+06 | 1,84E+06 | 4,56E+07 | 1,89E+09 | 1,46E+08 | 4,92E+08 | 5,35E+06 | 7,15E+06 | 2,58E+06 | 2,47E+07 | 3,28E+06 | 2,72E+09 |
| | > 2000 | 6,68E+05 | 2,60E+03 | 9,50E+04 | 4,17E+03 | 5,22E+04 | 9,64E+06 | 3,80E+05 | 1,81E+06 | 3,07E+04 | 4,53E+04 | 1,24E+04 | 7,11E+04 | 1,36E+04 | 1,28E+07 |

Bijlage D. Vergelijking benadering oppervlakteberekening.

In deze studie hebben we de oppervlakten van de panden berekend op basis van het gerapporteerde gebruiksoppervlakte per verblijfsobject. Panden zonder verblijfsobject zijn daardoor niet meegenomen in de analyse. 39% van de panden bevatte geen verblijfsobject. Al lijkt het merendeel te bestaan uit kleine irrelevante oppervlakten zoals schuurtjes, laten de resultaten daarom mogelijk een onderschatting zien.

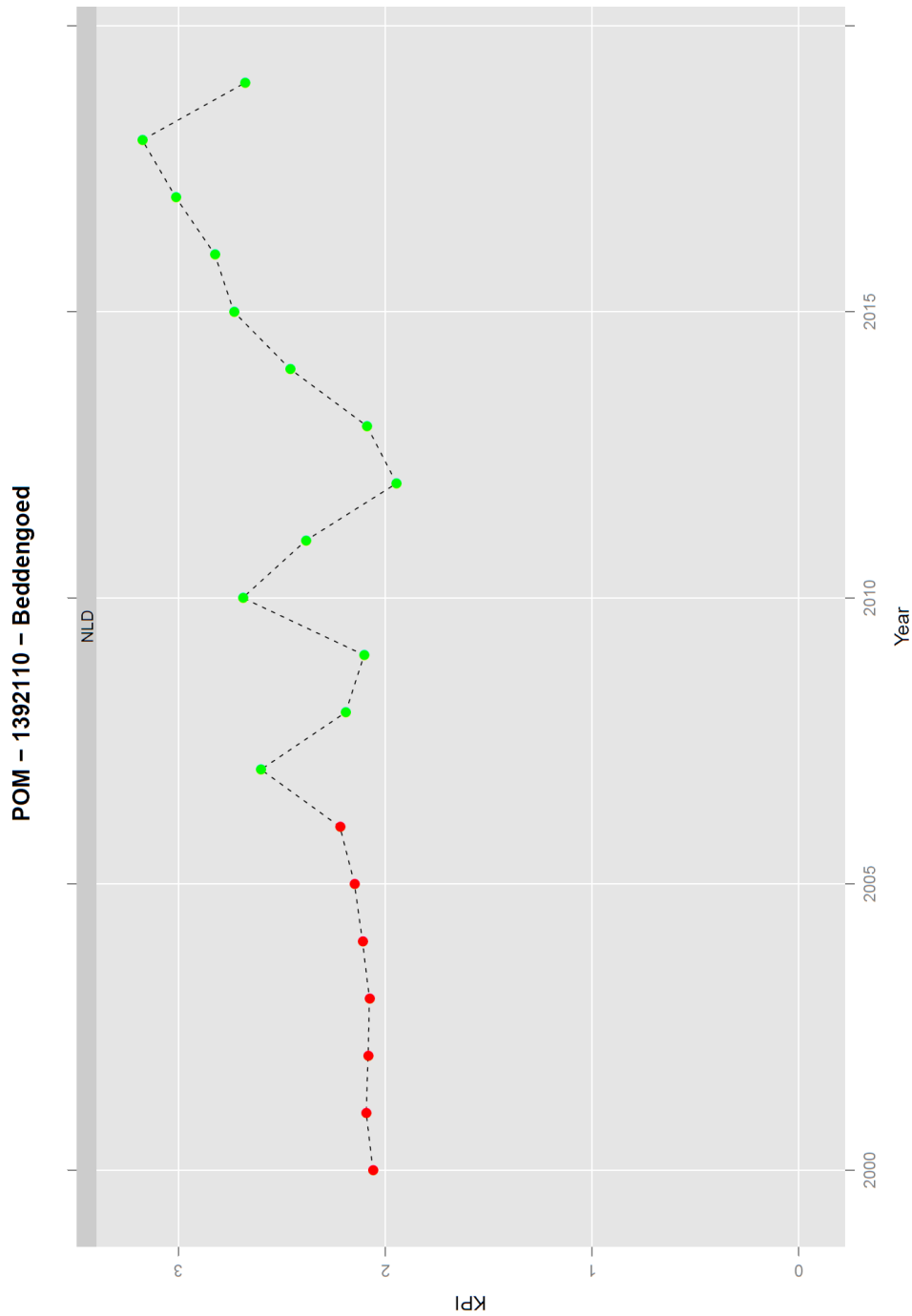
Een andere beperking in de hier gebruikte oppervlaktebenadering wordt gecreëerd door het gebruik van vormfactoren. Alhoewel de verhoudingen tussen gebruiksoppervlak en bruto vloeroppervlak zijn gebaseerd op empirische gegevens (EIB & Metabolic, 2019), zal deze verhouding in werkelijkheid specifiek zijn per gebouw. Om deze conversiestap te vermijden zou het bruto vloeroppervlak kunnen worden berekend op basis van grondoppervlakte en gebouwhoogte gegevens uit de BAG en de BAG-3D en een aanname voor de etagehoogte (bijvoorbeeld 3 meter hoogte per etage). In een dergelijke benadering wordt elk pand gerapporteerd in de BAG meegenomen, ook als het buiten gebruik is. Ter vergelijking en validatie zijn de resultaten op basis van het gebruiksoppervlakte per gebouw (GO benadering) vergeleken met de resultaten op basis van grondoppervlak en hoogte per gebouw (3D benadering). In de 3D benadering is een etagehoogte van 3 meter aangenomen. Figuur B1 laat de resultaten per gebouwtype zien voor beide benaderingen. De resultaten zijn redelijk vergelijkbaar voor woningen, maar lopen sterker uiteen voor utiliteitsgebouwen. De verschillen kunnen ten eerste worden verklaard door de oppervlakte benadering; het berekenen van het bruto vloeroppervlak op basis van grondoppervlakte en pandhoogte is een versimpelde benadering waarbij de waarden in werkelijkheid waarschijnlijk afwijken, bijvoorbeeld door variaties in de hoogte per etage. Ten tweede kan het verschil worden verklaard door het meenemen van panden zonder gebruiksfunctie in de 3D benadering. Dergelijke panden hebben geen gerapporteerd gebruiksoppervlak, maar wel een fysiek grondoppervlak en een hoogte. Panden zonder gebruiksfunctie zijn, afhankelijk van het oppervlak, geclassificeerd als distributiecentrum of bedrijfshal, wat de uitschieters verklaart bij deze categorien (Figuur B1). De waarden zijn waarschijnlijk een overschatting, omdat kleine gebouwen zoals schuurtjes in werkelijkheid waarschijnlijk minder materiaal bevatten dan hier berekend.

Samenvattend kan worden gesteld dat op basis van de hier gebruikte benadering mogelijk een onderschatting is gemaakt door de exclusie van woningen zonder gebruiksfunctie, terwijl op basis van het 3D benadering mogelijk een overschatting wordt gemaakt door het meenemen van constructies met irrelevante hoeveelheden materiaal (lager dan hier berekend). De materiaaltotalen voor de GO en 3D benadering zijn 2,72 en 4,39 gigaton respectievelijk. De waarden geven een bereik aan waartussen de materiaalvoorraad waarschijnlijk ligt, waarbij de benadering op basis van GO naar verwachting een betere representatie van de gebouwvoorraad geeft.



Figuur B1. Vergelijking resultaten op basis van het gebruiksovervlakte (GO, in rood), en op basis van grondoppervlak * hoogte / aantal etages (3D, in groen).

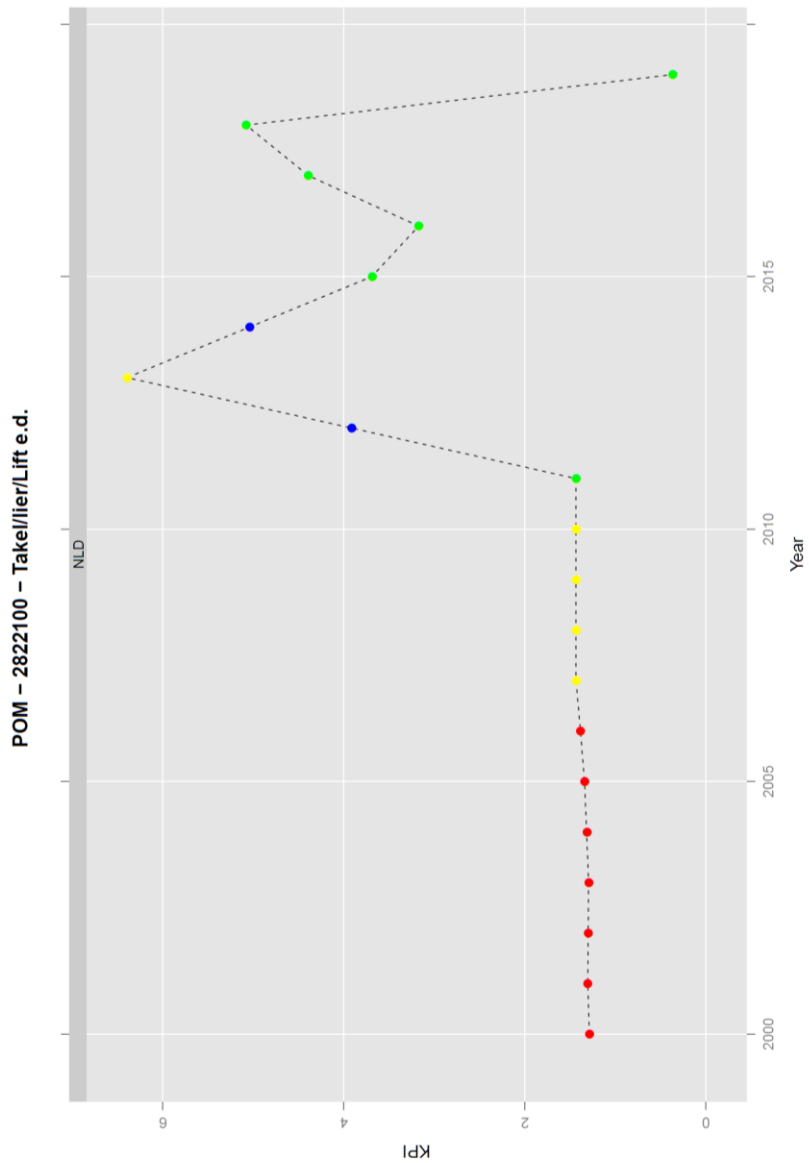
1. Bijlage 1 – Put-on-market tijdreeks Textiel



KPI = kilo's er inwoner

Groene bollen komen direct uit de brondata. Rode bollen zijn van jaren waarover geen brondata is. Deze zijn gemaakt door de tijdreeks door te trekken op basis van koopkracht.

2. Bijlage 2 – Put-on-market tijdreeks Elektronische Machines



KPI = kilo's er inwoner

Groene bollen komen direct uit de brondata. Rode bollen zijn van jaren waarover geen brondata is. Deze zijn gemaakt door de tijdreeks door te trekken op basis van koopkracht. Gele en blauwe bollen zijn door ons op diverse manieren aangepaste datapunten. De oorspronkelijke data zijn 0 of juist onrealistisch hoog.

3. Bijlage 3 – Links alle IH met MM

In het bijgevoegde Excel bestand staan alle koppelingen tussen de Internationale Handel goederengroepen en de MateriaalMonitor classificatie. Daarmee kan in detail gekeken worden welke producten onder de categorieën die in de rapport besproken zijn vallen.

Er zijn aparte tabbladen voor de Textiel groepen en voor de Elektronische Machines groepen.