

Productgroep

Analyse Woningen

Deelrapport - WP2 Circulaire maatregelen en
Toekomstbeelden

TNO 2024 R11610 – 28 augustus 2024

Productgroep Analyse Woningen

Deelrapport - WP2 Circulaire maatregelen en Toekomstbeelden

Auteurs	A.J. (Alexander) Bletsis, M.T. (Martijn) Kamps, J. (Jisca) van Bommel
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	105 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Planbureau voor de Leefomgeving
Programmanaam	Werkprogramma Monitoring & Sturing Circulaire Economie
Projectnaam	Productgroep Analyse Woningen
Projectnummer	060.55583

Verantwoording

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie 2019-2024. 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

De totstandkoming van het rapport is een samenwerking geweest tussen:

- Jisca van Bommel, Martijn Kamps en Alexander Bletsis, TNO
- Sanne Bours, UU
- Janneke van Oorschot, CML
- Anton van Hoorn, PBL

De volgende personen bijgedragen aan het rapport:

Remko Zuidema, Arjan van Horssen, Ming Chen, Kamiel Jansen, Jelmer Lennartz, Gabriela Gamarra Scavone, Rens Nijman, Romée de Blois, en Raquel Kuperus (TNO)

Alle rechten voorbehouden

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

© 2024 TNO

Inhoudsopgave

Begrippenlijst	4
1 Inleiding	6
1.1 Achtergrond	6
1.2 Aanpak productgroep analyse woningen	7
1.3 Leeswijzer	13
2 Verschillende toekomstbeelden voor een circulaire woningsector	14
2.1 Groen Land	14
2.2 Regionaal Geworteld	15
2.3 Mondiaal Ondernemend	15
2.4 Snelle Wereld	15
3 Circulaire maatregelen	17
3.1 Vier circulaire strategieën	17
3.2 Maatregelen onder ‘narrow the loop’	17
3.3 Maatregelen onder ‘slow the loop’	20
3.4 Maatregelen onder ‘close the loop’	22
3.5 Maatregelen onder substitutie	23
3.6 Aanvullingen en aanpassingen in circulaire maatregelen als gevolg van modellering	24
4 Potentiële impact van circulaire maatregelen	26
4.1 Methode	26
4.2 Gemiddelde materiaal- vraag en impact van de circulaire maatregelen	27
4.3 Potentiële impact van circulaire maatregelen ten opzichte van conventioneel bouwen	39
5 Combinatie van oplossingen: materiaal- gebruik en impact per toekomstbeeld	49
5.1 Methode	49
5.2 Resultaten	53
6 Van potentie naar realisatie	79
6.1 Onzekerheid vraagt om flexibiliteit	79
6.2 Stimulering van circulaire maatregelen	83
7 Conclusies	86
8 Literatuurlijst	91
Ondertekening	94
Bijlagen	
Bijlage A: Maximale toepassing maatregelen	95
Bijlage B: Proceskaart per materiaal	102
Bijlage C: Conceptueel model	104

Begrippenlijst

Circulariteit	Voor dit onderzoek wordt circulariteit wordt benaderd als het percentage vermeden primair materiaal van de totale vraag naar materialen in het Basispad scenario. Het gaat om inzet van recycleat in een gesloten kringloop – dus van sloopmateriaal weer een woning maken of een bestaande woning renoveren. Recycleat dat wordt ingezet als wegfundering wordt niet meegenomen in de berekening. Daarnaast betreft circulariteit ook het inzetten van andere materialen (zoals het gebruik van biobased materialen en materialen die duurzaam geproduceerd zijn) en het verminderen van materiaalgebruik.
Open loop recycling	Verwijst naar een kringloop van materialen waarbij het vrijgekomen materiaal (recycleat) wordt gebruikt in een andere sector. Hierdoor ontstaat er materiaalverlies binnen de woningsector.
Closed loop recycling	Verwijst naar een gesloten kringloop van materialen waarbij het vrijgekomen materiaal (recycleat) opnieuw wordt gebruikt binnen de woningsector.
Business as usual (BAU)	Het gebruik van traditionele materialen en bouwmethoden voor nieuwbouw en bestaande bouw volgens de hedendaagse praktijk.
Circulaire strategie	Vier strategieën ‘narrow the loop’, ‘slow the loop’, ‘close the loop’ en substitutie, die invulling geven aan het behalen van circulariteit gericht op verschillende ingrepen die het gebruik van materialen in een sector beïnvloeden, ook wel de R-strategieën genoemd. Zie verdere uitleg in sectie 3.1.
Circulaire maatregel (oplossing)	Een circulaire maatregel is een technisch of economisch concept, proces of product binnen een circulaire strategie, dat ingezet kan worden om meer circulariteit te behalen. Zie verdere uitleg in hoofdstuk 3
MKI	Milieukosten indicator. Zie verdere uitleg in 1.2.4.
MPG	Milieuprestatie gebouwen. Zie verdere uitleg in 1.2.4.
Basispad scenario	Gekwantificeerd toekomstbeeld waarin de huidige trends doorzetten en vastgesteld beleid wordt uitgevoerd. Dit wil zeggen zonder voorgenomen beleid dat nog in de pijplijn zit, omdat het nog door het parlement bekrachtigt moet worden rondom huisvesting en woningbouw). Zie verdere uitleg in 1.2.5

Toekomstbeelden	Hoe de wereld er in de toekomst uit <i>kan</i> zien in 2050. De gehanteerde toekomstbeelden zijn omschreven in hoofdstuk 2.
Circulaire scenario's	Een gekwantificeerd toekomstbeeld op basis van de in sectie 1.2.4 beschreven circulariteitsindicatoren.
Aangrijpingspunten voor beleid	Deel van de productketen waarop beleid van invloed is op het (meer/beter) circulair functioneren.
Missie gedreven innovatie systeem	Een innovatiesysteem bestaande uit actoren en instituties (wetten en regels) die actief bijdragen aan innovaties binnen een gestelde missie. Daar behoren zowel actoren uit de fysieke bouwketen als uit de institutionele structuur. Het innovatiesysteem richt zich op het aanpakken van een maatschappelijke uitdaging.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Aanleiding

Nederland streeft naar een circulaire economie in 2050. Op verzoek van het kabinet rapporteert het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) daarom elke twee jaar over de voortgang van deze transitie. Dit is de Integrale Circulaire Economie Rapportage (ICER). In voorbereiding op de ICER van 2025 bestaat de wens om in te zoomen op een aantal productgroepen. Op deze manier hopen we meer inzicht te krijgen in wat er nodig is voor een circulaire economie. Daarom is in 2023 gestart met analyses op de volgende productgroepen:

1. Woningen;
2. Kunststof verpakkingen en drankenkartons;
3. Hernieuwbare energietechnologie.

Deze keuze is gemaakt omdat de productieketen van deze groepen een relatief grote impact heeft op klimaatverandering, biodiversiteitsverlies en milieuvervuiling. Bovendien kunnen deze ketens geconfronteerd worden met leveringsrisico's. Daarnaast vertegenwoordigen deze productgroepen een substantieel aandeel in de totale stroom van grondstoffen, materialen, en producten die worden geïmporteerd, gewonnen, geproduceerd, geconsumeerd en uiteindelijk afgedankt.

Deze achtergrond rapportage is onderdeel van de Productgroep Analyse Woningen voor de ICER die in 2025 wordt uitgebracht. Deze rapportage omschrijft de modellering van de circulaire maatregelen en toekomstbeelden die zijn gebruikt om het materiaalprobleem van de productgroep woningen in de toekomst en de effecten van verschillende circulaire strategieën te verkennen.

De productgroep woningen

De ambitie is dat uiterlijk in 2050 ook de Nederlandse bouwsector volledig circulair is. Het doel voor 2030 is om de helft van de 2050 ambitie gerealiseerd te hebben. Voor 2030 geldt als tussendoel het halveren van het gebruik van primaire abiotische grondstoffen ten opzichte van 2016 (I&W, 2016). We hanteren de definitie voor een volledig circulaire bouweconomie zoals geformuleerd door het Transitieteam Circulaire Bouweconomie (2021):

“Het einddoel in 2050 – een bouweconomie die volledig circulair is – betekent dat we er dan in slagen om te voorzien in de sociaaleconomische behoeften aan huisvesting en infrastructuur zonder daarbij de draagkracht van de aarde te overschrijden in de vorm van uitputting, CO₂- uitstoot, vervuiling, biodiversiteitsverlies en andere milieuschade. Hierbij is er geen sprake van afwenteling in de tijd, naar andere landen of verlies van andere sociaaleconomische waarden, zoals leveringsrisico's, ten gevolge van de circulaire bouweconomie.”

Voor de bouwsector beperken we ons met de productgroep woningen tot huisvesting. De circulaire ambitie is een grote uitdaging waar Nederland voor staat, maar niet de enige. De woningbouwambitie (900 duizend extra woningen in de periode 2021-2030) en de

warmtetransitie (waarbij woningen goed geïsoleerd zijn en emissievrij verwarmd worden in 2050) zijn twee andere monsteruitdagingen. Het realiseren van de bouwopgave gaat moeizaam. Naast economische omstandigheden, heeft het onder meer last van het stikstofoverschot. Ook de warmtetransitie is nog niet vol op stoom.

De ambitie en noodzaak voor een groter volume aan woningen, voor een betere onderhoudsstaat van de voorraad, en voor de verduurzaming van de voorraad zorgen voor een grote verwachte vraag naar bouwmaterialen (van Oorschot & van der Voet, 2023) als gevolg hiervan kan de vraag naar materialen slechts gedeeltelijk gedekt worden door de vrijkomende materialen uit sloop (Timmermans et al., 2021; Arnoldussen et al., 2022; van Oorschot et al., 2022).

1.2 Aanpak productgroep analyse woningen

1.2.1 Positionering van dit achtergrond rapport

Om de specifieke eigenschappen van de productgroep woningen in kaart te brengen, beantwoorden we de volgende onderzoeksvraag:

Wat is het (verwachte) probleem van het materiaalgebruik in de keten van productgroep woningen, wat zijn mogelijke (technische) maatregelen/oplossingsroutes en wat zijn richtingen/interventiepunten waar beleid zou kunnen bijsturen?

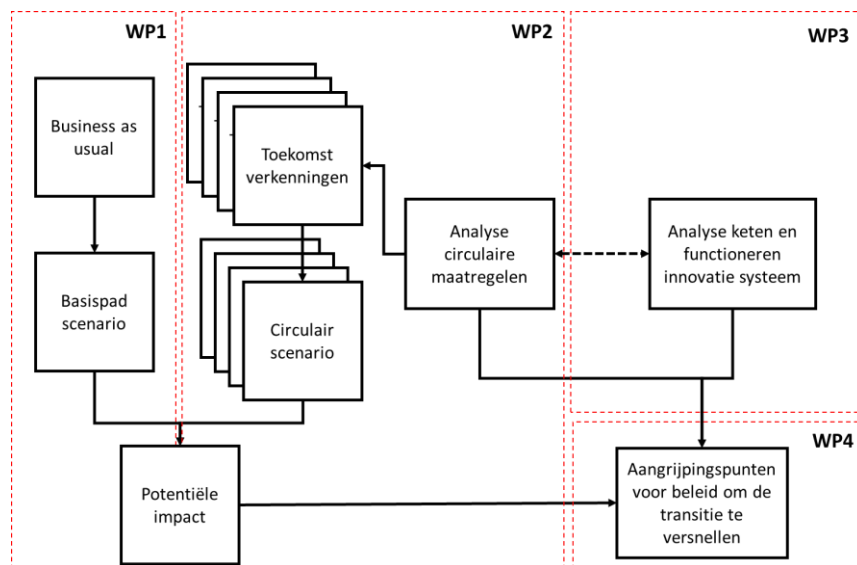
Om te komen tot een overzicht van de productgroep woningen en aangrijpingspunten voor beleid, maken we een synthese van bestaande inzichten, ordenen die opnieuw voor deze vraag, en doen aanvullend onderzoek. We gebruiken hiervoor een ‘mixed-methods’ benadering. Enerzijds een kwantitatief onderzoek naar het materiaalgebruik en impact van de woningsector tot 2050. En anderzijds een kwalitatief onderzoek naar de institutionele setting, en naar de huidige kansen en belemmeringen van circulariteitstrategieën in de transitie naar een circulaire woningsector.

De productgroep analyse is opgebouwd uit vier werkpakketten (WP's) (zie Figuur 1.1). In WP1 is het materiaalgebruik en effecten in de huidige situatie van de productgroep wonen in kaart gebracht. Daarnaast is er in WP1 een Basispad scenario tot 2050 gemaakt op basis van de huidige situatie (BAU, ‘business as usual’). In WP2 (dit werkpakket) zijn verschillende circulaire maatregelen geïnventariseerd en vertaald naar vier circulaire scenario's tot 2050. In WP3 is een missie-gedreven innovatie systeemanalyse gedaan waaruit huidige kansen en belemmeringen voor de circulaire strategieën volgen. In WP4 zijn de aangrijpingspunten voor beleid geformuleerd. Daarnaast is er nog aanvullend onderzoek verricht naar ZZS, dit onderzoek is parallel aan de productgroep analyse uitgevoerd. In totaal zijn er vier achtergrondrapportages geschreven en deze dienen als bijlage van het hoofdrapport. Voor WP4 is geen aparte achtergrondrapportage geschreven.

Dit resulteert in het volgende hoofdrapport en vier achtergrond rapporten:

- Hoofdrapport: *“productgroep analyse woningen: een productgroep analyse aanpak voor de monitoring en sturing in de transitie naar een circulaire economie”* (Bletsis et al., 2024)
- Achtergrondrapport WP1: *“Analyse huidige situatie en baseline scenario”* (van Oorschot & van der Voet, 2024)
- Achtergrondrapport WP2: *“Toekomstbeelden en circulaire maatregelen voor een circulaire woningsector”* (TNO, 2024)

- Achtergrondrapport WP3: “Transitie naar een circulaire woningsector: een missie-gedreven innovatie systeemanalyse” (Bours & Harmsen, 2024).
- Achtergrondrapport ZZS: “Zeer zorgwekkende stoffen in de materialen uit de woningbouw: adviezen voor de productgroep analyse woningbouw” (de Boer & Heens, 2024).



Figuur 1.1: Stroomschema van de Productgroep Analyse Woningen.

1.2.2 Onderzoeksvraag

In dit werkpakket staat de volgende onderzoeksvraag centraal:

Wat zijn mogelijke circulaire maatregelen en toekomstbeelden om te komen tot een volledig circulaire woningbouw?

Om deze vraag te beantwoorden zijn vijf deelvragen geformuleerd:

1. Wat is het wenselijke toekomstbeeld voor een circulaire woningsector?
2. Welke circulaire maatregelen in de bouwketen komen in beeld om richting de toekomst de benodigde materialen en bestaande bouwvoorraad circulair te gebruiken?
3. Wat zijn de randvoorwaarden en reikwijdte van elk van deze circulaire maatregelen en welke belemmeringen zijn direct al duidelijk?
4. Hoe komen we in die toekomstbeelden, langs welke paden (tijdlijnen) verloopt de transitie en welke systeemopties komen op tafel?
5. Hoe effectief zijn verschillende scenario's in relatie tot de indicatoren?

1.2.3 Afbakening

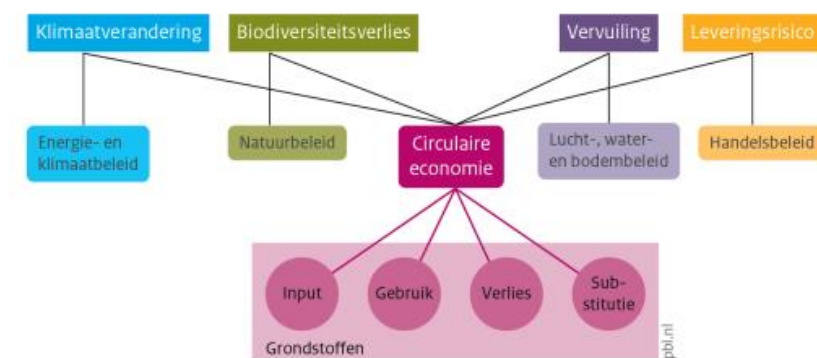
Dit onderzoek richt zich op materiaalstromen in de woningsector. Hiervoor maken we onderscheid in vier typen woningen (vrijstaand, appartement, rijwoning, twee onder een kap). We kijken enerzijds naar nieuwbouw, en anderzijds naar herstel-, verbouw-, en verduurzaming van bestaande woningen.

Voor nieuwbouw nemen we alleen de materialen van zogenaamde kale woningen mee. Dat wil zeggen dat we andere woning gerelateerde materiaalstromen die niet nagelvast zitten zoals voor vloerbedekking, meubilair et cetera buiten beschouwing laten. Dit is ook het geval voor herstel-, verbouw en verduurzaming. Deze ingrepen richten zich op grootschalig onderhoud, verbouw en renovatie van woningen waarbij verschillende samenstellingen materialen (voor de kale woning) benodigd zijn. Voor de verduurzaming van bestaande woningen kijken we, aanvullend op herstel- en verbouw, naar isolatie-gerelateerd materiaal en niet naar het vervangen van warmte- en koude installaties met duurzamere alternatieven¹. De materiaalvraag voor installaties² zijn wel geïnventariseerd voor nieuwbouw, optoppen, splitsen, transformatie en overige renovatiewerkzaamheden (de circulaire maatregelen worden uitgebreid omschreven in de volgende hoofdstukken). Voor materiaaluitstroom wordt naar sloop-nieuwbouw en naar materialen die vrijkomen als gevolg van herstel- en verbouw gekeken.

We maken een onderscheid tussen de volgende materialen: beton, baksteen en keramiek, overige constructiematerialen (verder onder te verdelen in gips, kalkzandsteen, zand, steen, mortel, bitumen), metalen (verder onder te verdelen in ijzer & staal, aluminium, koper en overige metalen), isolatiemateriaal, hout en overige biobased materialen, kunststoffen, glas en overig (verder onder te verdelen in verf en lijm, papier en elektronica).

1.2.4 Doelen en indicatoren voor circulariteit

Een circulaire economie kan bijdragen aan meerdere doelen, namelijk: klimaatverandering, biodiversiteitsverlies, milieuvervuiling en leveringsrisico's (Figuur 1.2). Hierdoor bestaat het risico op een afweging tussen de effecten van verschillende circulaire strategieën en de bijbehorende circulaire maatregelen. Bijvoorbeeld, substitutie van traditionele materialen zoals beton door biogene grondstoffen kan schadelijke gevolgen hebben voor de biodiversiteit en het klimaat (Hanemaaijer et al., 2021). Daarom is het belangrijk om de effecten van het toepassen van circulariteitsstrategieën te kwantificeren³.



Figuur 1.2: Positionering van circulaire economie ten opzichte van maatschappelijke opgaves en andere beleidsthema's (Hanemaaijer et al., 2021).

¹ Wegens onvoldoende beschikbare gegevens en beperkingen in de modellering.

² Bij de materiaalvraag voor installaties voor de circulaire maatregelen optoppen, transformatie en splitsen zijn de input-data aangepast. Vanwege een onrealistisch hoge materiaalvraag voor installaties wordt aangenomen dat dit hetzelfde is als de nieuwbouw van appartementen.

³ Het op een juiste manier meetbaar maken van circulariteit is een beleidsdiscussie op zich. De keuze voor de vier doelen is gebaseerd op het uitgangspunt van PBL.

Voor de beoordeling van de effecten richten we ons op de vier doelen van circulariteit (zie hierboven). Deze doelen worden gemeten aan de hand van de volgende indicatoren: materiaalgebruik, klimaat- en milieu-impact en het verlies aan biodiversiteit.

Materiaalgebruik

Het kwantificeren van materiaalgebruik kan op verschillende manieren om hiermee een accent te leggen op verschillende doorsnedes van de data. In dit onderzoek maken we onderscheid tussen:

- **Materiaalinstream in Mton/jaar:** absolute hoeveelheid materiaalgebruik.
- **Materiaalinstream (%):** Verdeling materiaalinstroom (in %) in niet-duurzaam geproduceerd primair materiaal, duurzaam geproduceerd primair materiaal, biobased materiaal en secundair materiaal.
- **Materiaaluitstroom in Mton/jaar:** absolute hoeveelheid materiaaluitstroom.
- **Materiaaluitstroom (%):** Verdeling materiaaluitstroom in secundair materiaal beschikbaar voor instroom, recycling buiten de bouwsector, stort en energiewinning.
- **Woonoppervlak per capita (m²/pp):** het totale beschikbare woonoppervlak in m² gedeeld door de populatie van Nederland. Deze indicator laat zien hoe efficiënt de woonvraag is verdeeld. Dit heeft uiteindelijk invloed op het materiaalgebruik.

Klimaat- en milieu impact

Circulariteit draagt bij aan het verminderen van de woningsector op zowel het klimaat (in het specifiek klimaatverandering en de uitstoot van broeikasgassen) als het milieu (zie BOX 1 voor een duiding van de milieueffecten):

- **Broeikasgasemissies (BKG) in Mton CO₂-equivalent Per Jaar:** 'Global Warming Potential' (GWP) in het Engels. Deze indicator geeft inzicht in de hoeveelheid broeikasgasemissies die afgeleid kan worden uit de jaarlijkse materiaalstroom in de woningsector.
- **Milieukosten Indicator (MKI) in miljoen euro/jaar:** deze indicator weegt meerdere milieueffecten (denk aan o.a. toxiciteit, verzuring en eutrofiëring) tot één score en wordt uitgedrukt in euro's. De MKI wordt ook wel de schaduwkosten van een product genoemd en wordt veelal in aanbestedingen gebruikt om de milieu-impact van producten of projecten te vergelijken. Deze indicator wordt specifiek gebruikt in de bouw om milieueffecten te kwantificeren.

BOX 1: Verschil tussen MKI, MPG en EPG

De Milieuprestatie Gebouwen (MPG) is een beoordeling van de materialen van een gebouw, dit is op basis van Levenscyclus Analyses (LCA's) waarbij in Nederland verplicht de Nationale Milieudatabase (NMD) moet worden gehanteerd. De MPG wordt uitgedrukt in schaduwkosten (MKI) per vierkante meter bruto vloeroppervlak per jaar. De MKI is een één punts-score die bestaat uit 11 relevante milieueffecten, denk hierbij aan klimaatverandering, ozonlaag aantasting, verzuring, humane- en Eco-toxiciteit en de uitputting van grondstoffen. Hiervoor wordt de gehele LCA (module A1 tot D, van de winning van de grondstoffen tot en met de einde levensfase) gehanteerd waarbij de gebouw-gebonden energieverbruik verbruik niet is meegenomen.

De MPG eis richt zich alleen op de milieubelasting van de materialen van een gebouw. Dit is slechts een onderdeel van de totale milieubelasting van een gebouw. De MPG eis houdt geen rekening met de energieprestatie van een gebouw (tijdens de gebruiksfase), oftewel hoeveelheid energie dat een gebouw verbruikt voor verwarming, koeling, ventilatie, verlichting en apparaten telt niet mee.

De energieprestatie gebouwen (EPG) wordt bepaald door middel van de BENG-methode (Bijna Energie Neutraal Gebouw). De BENG bestaat uit drie indicatoren waarop het gebouw wordt beoordeeld, te weten: de energiebehoefte, het primair fossiel energie verbruik en het aandeel hernieuwbaar energie.

De MPG eis en de EPG eis zijn niet altijd met elkaar in balans. Sommige maatregelen die gunstig zijn voor de EPG eis, zijn ongunstig voor de MPG eis en omgekeerd.

Bron: Kamiel Jansen – LCA expert, TNO.

Biodiversiteitsverlies

Er wordt momenteel gewerkt aan de ontwikkeling van robuuste indicatoren die aantonen dat circulariteit bijdraagt aan een vermindering van biodiversiteitsverlies. Desalniettemin, wordt in dit onderzoek landgebruik gehanteerd als proxy en geeft een grove indicatie voor biodiversiteitsverlies als gevolg van landexploitatie ten behoeve van grondstoffen inwinning. Hierbij moet benadrukt worden dat landgebruik niet per definitie zorgt voor biodiversiteitsverlies.

- **Landgebruik in 'Pt' per kg of per jaar:** in sommige grafieken wordt gebruik gemaakt van een indicator die refereert naar landgebruik gerelateerde impact op de bodemkwaliteit door middel van de bodemkwaliteitsindex. Deze index houdt rekening met vier bodemeigenschappen: biotische productie, erosieweerstand, grondwaterregeneratie en mechanische filtratie, en wordt uitgedrukt in punten als dimensieloze eenheid Pt per kilogram materiaal per m². In sectie 4.3 wordt landgebruik Pt per jaar uitgedrukt. Deze indicator is recent toegevoegd aan de bepalingsmethode, en zal in de toekomst gebruikt worden om de MKI te berekenen.
- **Landgebruik in km² per jaar:** een proxy voor biodiversiteitsverlies en legt het accent daarmee vooral op een nadeel van biobased grondstoffen. De indicator geeft inzicht hoeveel km² landoppervlak per jaar nodig is. In hoofdstuk 5 van dit onderzoek wordt landgebruik beperkt voor de houtinstroom.

1.2.5 Methode

Voor het beantwoorden van de deelvragen, en uiteindelijk de hoofdvraag, zijn er verschillende stappen ondernomen. Deze worden hieronder beschreven. Waar nodig wordt in het hoofdstuk van de desbetreffende stap de methode aanvullend toegelicht.

Stap 1: literatuuronderzoek

Allereerst is er literatuuronderzoek gedaan (in afstemming met WP3) om de verschillende trends, maatregelen en toekomstbeelden voor een circulaire woningsector op hoofdlijnen te identificeren en definiëren. Hierbij zijn eerdere studies geanalyseerd van Rebel & Drift (Barendregt et al., 2023), PBL (PBL, 2023; Rood & Evenhuis, 2023; van der Schuit et al., 2023), Copper8, Metabolic, NIBE & Alba (Copper 8 et al., 2023), EIB & Metabolic (Arnoldussen et al., 2022), en documenten zoals richtlijnen van CB'23 en het transitieteam Circulaire Bouweconomie (CBE). Daarnaast zijn er interviews geweest met experts van Copper8, Rebel, EIB, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en het Transitieteam CBE.

Stap 2: Inventarisatie van de vier verschillende toekomstbeelden

Op basis van het literatuuronderzoek uit de vorige stap hebben we gekozen om de vier toekomstbeelden uit de ruimtelijke verkenning van het PBL te gebruiken (PBL, 2023). In deze toekomstbeelden worden verschillende beslissingen gemaakt die cruciaal zijn voor de ontwikkeling van Nederland tot 2050. Deze toekomstbeelden hebben we bestudeerd en uitgewerkt specifiek voor thema's gerelateerd aan de woningsector.

Stap 3: inventarisatie circulaire maatregelen woningsector

Op basis van stap 1 is er een overzicht gecreëerd van beschikbare maatregelen voor een circulaire woningsector. Deze maatregelen zijn gekoppeld aan de vier overkoepelende circulaire strategieën uit het Nationaal Programma Circulaire Economie NPCE (I&W, 2023): 'narrow the loop', 'slow the loop', 'close the loop' en substitutie. De geïdentificeerde maatregelen zijn gekwantificeerd in termen van aantallen (reikwijdte) (hoeveel een maatregel naar verwachting wordt toegepast tussen 2020 en 2050, zie Bijlage a) en materiaalintensiteiten (welke materialen en met welke intensiteit deze worden gebruikt) op basis van beschikbare data uit literatuur.

Naast het identificeren en kwantificeren van de verschillende circulaire maatregelen is er een analyse gedaan om belemmeringen en drijfveren van deze maatregelen in kaart te brengen en op haalbaarheid en uitvoerbaarheid te valideren (op basis van 'expert judgement'). Al deze inzichten zijn aangevuld tijdens een interne brainstorm met het onderzoeksteam en expert-collega's. Vervolgens is deze lijst gevalideerd tijdens een workshop met externe experts.

Stap 4: Vertalen van de circulaire maatregelen naar circulaire scenario's

Voor het formuleren van de scenario's tot 2050 hebben we gewerkt met een Basispad en de vier toekomstbeelden. Deze zijn gebaseerd op de eerdergenoemde toekomstbeelden van het PBL. Elk scenario schetst een toekomstvisie die een denkbare normatieve interpretatie van de toekomst vormt.

Voor de inschatting van het materiaalgebruik en de klimaat- en milieu impact van de vier circulaire scenario's zijn circulaire maatregelen toegepast, zoals geformuleerd in stap 3 toegepast in het model. De mate van toepassing van deze maatregelen is gebaseerd op de toepassing van de vier circulaire strategieën in de vier toekomstbeelden, zoals geformuleerd in de ruimtelijke verkenning van PBL (PBL, 2023).

Stap 5: Inventarisatie kansen en barrières richting te toekomst

Om tot een circulaire woningsector te komen zijn de individuele circulaire maatregelen naast elkaar gelegd en geanalyseerd of ze elkaar aanvullen/verzwakken, hoe ze over de tijd heen kunnen verschillen in hoe goed ze bij de samenleving aansluiten en dus of ze geïmplementeerd zullen worden (door middel van de geïdentificeerde verschillende toekomstbeelden) en hoe gevoelig ze zijn voor wisselingen tussen maatregelen over de tijd heen.

Hiervoor hebben we op basis van de toekomstverkenningen van het PBL gekeken naar mogelijke ontwikkelingen zodra er van toekomstbeeld gewisseld wordt. Dit hebben we gedaan tijdens een workshop met experts uit het WMSCE met behulp van 'strategic foresight'. Dit is een methode die door de Europese Commissie wordt gebruikt om te anticiperen op mogelijke toekomstige ontwikkelingen.

Beperkingen onderzoek

Dit onderzoek maakt gebruik van veel verschillende informatiebronnen. Rapportages, databases, interviews en opbrengsten uit workshops. De kwaliteit en beschikbaarheid van data vormt een uitdaging. Voor zowel de bronnen zelf als de interpretatie geldt dat er een bepaalde mate van subjectiviteit mee gemoeid is:

- Kwalitatief: selectie van geïnterviewden, de bias van geïnterviewden en het verwerken en analyseren van de resultaten door de onderzoekers zelf.
- Kwantitatief: selectie en veelzijdigheid van bronnen, gemaakte aannames en keuzes in de modellering.

Ondanks dat de resultaten een representatief beeld geven van de richting en ordegrrootte, hebben de beperkingen invloed op de nauwkeurigheid van de uitkomsten. Logischerwijs kunnen afwijkingen tussen de uitkomsten van verschillende vergelijkbare rapporten geconstateerd worden.

1.3 Leeswijzer

Het rapport, is naast de inleiding, opgebouwd uit 6 inhoudelijke hoofdstukken.

- In hoofdstuk 2 worden de vier toekomstbeelden uit de ruimtelijke verkenning gepresenteerd, deze vormen uiteindelijk de basis voor zowel de modellering als de analyse om tot circulaire scenario's te komen.
- In hoofdstuk 3 worden de circulaire maatregelen geïnventariseerd uit de literatuur gekoppeld aan de vier circulaire strategieën uit de NPCE en verder verdiept.
- In hoofdstuk 4 worden deze maatregelen uitgedrukt in materiaalintensiteiten en de materiaalimpact van deze maatregelen beoordeeld op basis van de indicatoren. Vervolgens wordt de potentie van de individuele maatregelen beschouwd in relatie tot conventioneel bouwen.
- In hoofdstuk 5 wordt de scenarioanalyse uiteengezet. Allereerst worden de normatieve en ruimtelijke kenmerken van de scenario's toegelicht. Vervolgens vindt er een analyse plaats op basis van de materiaal in- en uitstromen en de materiaalimpact.
- In hoofdstuk 6 worden de oplossingsroutes en uitkomsten van de workshop gepresenteerd. Hier wordt nader ingegaan op de verschillende belemmeringen en drijfveren van de verschillende circulaire maatregelen (oplossingen).
- Tot slot worden de conclusies gepresenteerd in hoofdstuk 7.
- Aan het einde van het rapport zijn de literatuurlijst en bijlagen bijgevoegd.

2 Verschillende toekomstbeelden voor een circulaire woningsector

Er zijn verschillende paden mogelijk om van de 'Business-as-Usual' te bewegen naar een circulaire woningsector. Dit zorgt ervoor dat er verschillende mogelijke toekomstbeelden zijn. In deze toekomstbeelden kunnen andere waarden en normen belangrijk zijn (bijvoorbeeld individualisme versus collectivisme of lokaal georiënteerd versus globaal) en zodoende wordt er een andere invulling aan circulariteit gegeven. Om rekening te houden met deze verschillende mogelijkheden maken we gebruik van de viertoekomstbeelden die het Planbureau voor de Leefomgeving als onderdeel van de Ruimtelijke Verkenning heeft opgesteld voor een circulaire economie (PBL, 2023):

- Groen land;
- Regionaal geworteld;
- Mondiaal ondernemend;
- Snelle wereld.

Hieronder zullen deze toekomstbeelden verder toegelicht worden en gekoppeld worden aan de woningsector, voor meer details en achtergrondinformatie zie PBL (2023) of de webpagina van het PBL over de Ruimtelijke Verkenning.

2.1 Groen Land

In het scenario 'Groen Land' zien mensen zich als onderdeel van de natuur. Ze beschouwen vergroening als een collectieve publieke opdracht en sporen de Rijksoverheid aan om daarbij de regie te nemen. Er is prioriteit voor *planet*. In deze toekomst staat het respecteren van ecologische grenzen bovenaan, ook als dit ten koste gaat van de vrijheid om te consumeren. Natuurlijke oplossingen domineren, bijvoorbeeld door water meer ruimte te geven. Bebouwing vindt in deze toekomst zoveel mogelijk plaats binnen de bestaande stad en geconcentreerd rond openbaarvervoerknoppunten. Er sprake van veel verdichting binnen het bestaande stedelijke gebied. Hierdoor gaan mensen kleiner wonen of samen met meerdere gezinnen (woning deling).

In dit toekomstbeeld vindt de circulaire transitie in de woningbouw plaats door veel hoogbouw, stedelijke verdichting, opwaarderen en splitsen van woningen en transformeren van gebouwen naar woningen. Nieuwe normen maken gebouwen aanpasbaar, en elementen en materialen herbruikbaar. Voor de materiaalvraag voor nieuwbouw en verbouw wordt gekeken naar hergebruik van onderdelen, gerecyclede materialen en hernieuwbare biograndstoffen. Het gebruik van abiotische materialen wordt zo veel als mogelijk teruggedrongen.

2.2 Regionaal Geworteld

In het scenario 'Regionaal Geworteld' maken lokale en regionale gemeenschappen de dienst uit. Mensen kennen elkaar, voelen zich onderling verbonden en zijn trots op de buurt, de wijk en het landschap. Samen dragen ze zorg voor hun nabije omgeving. In deze toekomst is de verstedelijking verspreid over het land; grote steden zijn kleinschalig uitgebreid, kleinere steden en dorpen zijn organisch gegroeid. Kleinschaligheid en lokale en regionale functiemenging zijn de norm. Het uitgangspunt is zoveel mogelijk regionale zelfvoorziening (waar mogelijk). Hierdoor is er veel verstedelijking buiten bestaande gebouwde omgeving met veel variatie tussen regio's. Mensen wonen kleiner en neemt het samenwonen met meerdere generaties toe (generatie wonen).

Dit heeft verschillende implicaties voor de circulaire transitie in de bouw. In dit toekomstbeeld worden er regionaal veel woningen bij gebouwd met een relatief groot grondoppervlak. Hiervoor wordt ingezet op het hergebruiken van lokaal beschikbare bouwonderdelen of gerecyclede materialen. Ook biograndstoffen worden gebruikt, maar met name als deze lokaal voor handen zijn. Daarnaast zijn er lokale initiatieven om woningen te renoveren en is er een voorkeur van transformatie en renovatie ten opzichte van sloop.

2.3 Mondiaal Ondernemend

In het scenario 'mondiaal ondernemend' staat de markt centraal en is de samenleving individualistisch. Economische groei blijft belangrijk, grote internationale bedrijven nemen het voortouw. Hierdoor gaan mensen ook weer groter wonen. Eigen verantwoordelijkheid staat voorop, ook om te verduurzamen. Een van de kenmerkende ontwikkelingen in dit toekomstige Nederland is een groter contrast tussen verdergaande verstedelijking in het westen en midden van Nederland en minder stedelijke ontwikkeling en een meer op recreatie, zorg en landbouw gerichte economie elders in het land. Hierdoor is er in het midden van het land zowel sprake van verdichting van bestaande gebouwde omgeving als verstedelijking buiten bestaande gebouwde omgeving. In dit toekomstbeeld zorgt technologie voor meer welvaart en minder belasting van het milieu.

Voor de bouw betekent dit dat de circulaire transitie plaats vindt door technologische ontwikkelingen en meer standaardisatie en industrialisatie van processen. De nadruk ligt op recycling en (biobased) substitutie. Hergebruik en reparaties gebeuren mondjesmaat. Projectontwikkeling is in handen van private investeerders. De nadruk ligt op hoogbouw en klimaat neutrale bouw. Daarnaast worden betaalbare standaardwoningen op grote schaal toegepast aan de randen van steden.

2.4 Snelle Wereld

In het scenario 'Snelle Wereld' valt de samenleving uiteen in allerlei leefstijlgroepen. Deze 'bubbels' vinden het belangrijk zich van elkaar te onderscheiden. Prioriteit voor *people*, *planet*, *profit* verschilt dan ook per bubbel. Het leven speelt zich grotendeels af in het digitale domein; de fysieke ruimte doet er minder toe. Allianties van kleinere, innovatieve bedrijven en leefstijlgroepen nemen in deze toekomst het voortouw. Zij vinden keuzevrijheid en flexibiliteit belangrijk. Een van de gevolgen hiervan is een wat rommelige en veranderlijke ruimtelijke inrichting van het land. Er is veel willekeurige verstedelijking (stedelijke wildgroei), mede door het afschalen van ruimtelijke ordening en keuze voor bouw op goedkope grond.

Voor de woningbouw betekent dit dat er veel prefab, demontabele en verplaatsbare woningen worden gebouwd om te kunnen voorzien in de gewenste flexibiliteit van bewoners. Daarnaast worden geleidelijk kantoorgebouwen getransformeerd naar woningen. Het karakter van woningen maakt minder uit, de digitale laag (bijvoorbeeld middels 'augmented reality') van woningen is belangrijker dan de architectuur in dit toekomstbeeld.

3 Circulaire maatregelen

In dit hoofdstuk omschrijven we de verschillende circulaire maatregelen die richting geven aan de invulling van een circulaire woningsector. Verder verdiepen we deze maatregelen door de reikwijdte, belemmeringen en kansen weer te geven.

3.1 Vier circulaire strategieën

We gebruiken in dit onderzoek de vier circulariteitstrategieën die, onder andere, worden gehanteerd in het Nationaal Programma Circulaire Economie, met uitzondering van substitutie:

- **‘Narrow the loop’**: minder (primaire) grondstoffen gebruiken door af te zien van produceren of kopen van producten, deze te delen of deze efficiënter te maken (I&W, 2023).
- **‘Slow the loop’**: producten en onderdelen langer en intensiever gebruiken (I&W, 2023).
- **‘Close the loop’**: kringloop sluiten door recycling van materialen en grondstoffen zodat er een hoogwaardig aanbod van secundaire grondstoffen en materialen ontstaat (I&W, 2023).
- **Substitutie⁴**: niet-duurzaam geproduceerde primaire grondstoffen vervangen door duurzame biograndstoffen of door duurzaam geproduceerde primaire grondstoffen met een lagere milieudruk.

Onder deze circulaire strategieën vallen meerdere circulaire maatregelen. Sommige maatregelen zouden onder meerdere categorieën kunnen vallen. Voor deze maatregelen hebben we gekozen om ze onder te brengen bij de circulaire strategie die het meeste aansluit (zie de hierboven genoemde omschrijving van de strategieën). Elke maatregel heeft is voorzien van een korte omschrijving om aan te geven en een verdieping.

3.2 Maatregelen onder ‘narrow the loop’

De maatregelen die toebehoren aan de strategie ‘narrow the loop’ zorgen voor het verminderen van materiaal gebruik. Dit kan bijvoorbeeld door het gebruiken van bestaande casco’s, maar ook door productinnovaties waardoor er efficiënter en met minder materiaal gebouwd kan worden.

Optoppen

Woningen toevoegen door ophogen van bestaande gebouwen. Hierdoor zal de behoefte aan volledige nieuwbouw minder zijn. Dit bespaart emissies in de aanlegfase en materiaal van bijvoorbeeld de fundering en benodigde (energie) infrastructuur. De maatregel richt zich op het creëren van meer wooneenheden en niet op uitbreiding van woningen.

⁴ De definitie voor substitutie wijkt hier af van de NPCE, het toepassen van secundair materiaal is hier bewust uitgehaald omdat dit voor en dubbeling zorgt in de analyse doordat het ook onderdeel is van ‘close the loop’.

Verdieping optoppen

- **Toepassing:** bestaande appartementen.
- **Betrokken partijen:** woning eigenaar/bewoner, VvE, woningcorporatie, constructeur, aannemer, projectontwikkelaar, gemeente.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Het verkrijgen van vergunningen.
 2. Het moet voldoen aan de veiligheidsnormen en aan de functionele eisen.
 3. Stedelijke verdichting met de bijkomende consequenties (zoals het benutten van bestaande infrastructuur en de toename van gebruik anderzijds).
 4. Huidige bewoners kunnen de realisatie optoppen tegenwerken.

Splitsen van woningen

Het technisch opsplitsen en ombouwen van een woning tot meerdere woningen. Dit zorgt ervoor dat er meer huishoudens kunnen wonen binnen de bestaande woningvoorraad en er minder nieuwbouwwoningen nodig zijn.

Verdieping splitsen van woningen

- **Toepassing:** alle type bestaande woningen.
- **Betrokken partijen:** woning eigenaar/bewoner, (o.a. woningcorporatie, VvE; erg afhankelijk van type woning), aannemer, projectontwikkelaar, gemeente.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Het verkrijgen van vergunningen.
 2. Het moet voldoen aan de veiligheidsnormen en aan de functionele eisen.
 3. Relatief snelle terugverdiensijd.
 4. Acceptatie door bewoners van overlast bij verbouwing en afstemming met bewoners.
 5. Project-specifieke aanpakken (dus geen gestandaardiseerde aanpak gericht op massaproductie).
 6. Stedelijke verdichting met de bijkomende consequenties (zoals het delen van infrastructuur).
 7. Behoeftte en bereidheid van bewoners om kleiner te wonen.

Kleiner wonen

Het ontwerpen en bouwen van woningen met een kleiner oppervlak per wooneenheid. Het gevolg is een efficiënter gebruik van de beschikbare ruimte en positieve gevolgen voor het materiaalgebruik, aangezien het materiaal gebruik per woning verminderd kan worden. Dit zorgt voor een verminderde materiaalvraag.

Verdieping kleiner wonen

- **Toepassing:** alle type nieuwbouw en bestaande bouw indien er gesplitst, opgetopt en/of getransformeerd wordt.
- **Betrokken partijen:** aannemer, gemeente, overheid, makelaar, Collectief Particulier Opdrachtgever (CPO).
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Lagere bouwkosten door minder materiaal (de kosten per woning zullen lager worden, maar de kosten per vierkante meter woning zullen naar verwachting omhoog gaan.)
 2. Behoefte/bereidheid van bewoners om in kleinere woningen te wonen.

Transformatie

Transformatie van niet-residentiële gebouwen (bijvoorbeeld kantoren) naar woningen. Hierdoor hoeft een gebouw niet gesloopt te worden als de functie niet meer nodig is maar wordt het gebouw gebruikt voor het realiseren van woningen. Hierdoor hoeft er geen nieuwbouw plaats te vinden om aan de vraag te voldoen en is er minder materiaal nodig.

Verdieping transformatie

- **Toepassing:** bij bestaande utiliteitsbouw.
- **Betrokken partijen:** aannemer, architect, projectontwikkelaar, grond eigenaar, gebouw eigenaar/belegger, bewoner, gemeente.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Relatief snelle terugverdiëntijd.
 2. Potentieel lagere bouwkosten (bijv. door kortere bouwtijd, gebruik van bestaand casco, of door lagere ETS kosten door CO₂ besparing).
 3. Project-specifieke aanpakken (dus minder gestandaardiseerde aanpak gericht op massaproductie).
 4. Het moet voldoen aan de veiligheidsnormen en aan de functionele eisen.
 5. Behoefte/bereidheid om in atypische woningen te wonen (omgebouwde kantoorpanden).
 6. De locatie van kantoorpanden zijn niet altijd ideaal en/of geschikt voor wonen.

Geprefabriceerd bouwen

Geprefabriceerde gebouwen worden van tevoren off-site in de fabriek vervaardigd, meestal in standaardsecties die gemakkelijk kunnen worden getransporteerd en gemonteerd. Naast efficiëntere bouwtijd kan er ook efficiënter worden omgegaan met bouwmaterialen en bespaart het verpakkingsmateriaal. Er is minder afval op de bouwplaats omdat het al op maat gemaakt is en is er minder materiaalverlies omdat het gestandaardiseerde processen zijn.

Verdieping geprefabriceerd bouwen

- **Toepassing:** alle type nieuwbouw.
- **Betrokken partijen:** aannemer, gemeente, overheid, makelaar, CPO, architect, leverancier, producent, projectontwikkelaar.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Meer ruimte nodig voor circulaire activiteiten (op bouwplaats en overige opslag).
 2. Meer afstemming en coördinatie nodig tussen partijen.
 3. Potentieel lagere bouwkosten (bijv. door kortere bouwtijd, gebruik van bestaand casco, of door lagere ETS kosten door CO₂ besparing).
 4. Verschuiving van rollen en belangen in het bouwproces (e.g. van de bouwplaats naar fabrieken).
 5. Minder overlast op de bouwplaats.
 6. Geprefabriceerde producten zijn niet altijd milieuvriendelijker, denk hierbij aan transportwapening, extra cement toevoeging omdat de producten snel uit de mallen moeten, over dimensionering door standaardisering.

3.3 Maatregelen onder ‘slow the loop’

De maatregelen die toebehoren aan de strategie ‘slow the loop’ zorgen voor het behouden van de bestaande woningvoorraad en het hergebruiken van materialen enerzijds en nieuwe woningen modulair ontwerpen en bouwen voor aanpasbaarheid en hergebruik in de toekomst anderzijds.

Hergebruik

Hergebruik gaat over het in dezelfde functie opnieuw gebruiken van gebouwen, gebouwelementen of bouwproducten, al dan niet na bewerking.

Verdieping hergebruik

- **Toepassing:** bestaande bouw en nieuwbouw.
- **Betrokken partijen:** producent, leverancier, aannemer, architect, gemeente, sloper (ontmantelaar).
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Meer afstemming en coördinatie nodig tussen partijen.
 2. Verschuiving van rollen en belangen in het bouwproces (e.g. van de bouwplaats naar fabrieken).
 3. Meer ruimte nodig voor circulaire activiteiten (op bouwplaats en overige opslag).
 4. Kwaliteit van de secundaire producten en het vertrouwen in de reeds gebruikte objecten/materialen.
 5. Veiligheid van bouwproducten, bijvoorbeeld asbest, maar ook of een bouwproduct constructief of bouwfysisch nog aan de huidige eisen voldoet.
 6. Functionele eisen, bijvoorbeeld deuren die momenteel vrijkomen uit sloop voldoen niet aan de huidige afmetingseisen.
 7. Kosten door een toename in manuren om elementen te oogsten en de producten op de juiste kwaliteit te schatten.

Renovatie in plaats van sloop

Levensduurverlenging door renovatie in plaats van vervanging van woningen. Renovatie verwijst naar het proces waarbij een nog goed functionerend product, zoals een gebouw, wordt gemoderniseerd en aan hedendaagse normen wordt aangepast door middel van grootschalige opknop- of verbeterwerkzaamheden. Dit proces herstelt niet alleen het

product, maar vergroot vaak ook de basisfunctionaliteit, waardoor de levensduur wordt verlengd. Een van de gebruikelijke vormen van modernisering is energierenovatie van woningen.

Verdieping renovatie

- **Toepassing:** op alle type bestaande bouw.
- **Betrokken partijen:** aannemer, architect, projectontwikkelaar, gebouw eigenaar, grond eigenaar, gemeente, bewoner.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Mismatch tussen bij welke partij de kosten liggen en degene (bijv. bewoner) die de baten ontvangt.
 2. Aanpassingen aan bestaande bouw vereist andere kennisbehoefte dan traditionele bouw.
 3. Beschikbaarheid van data over bestaande bouw (bijvoorbeeld bouwtekening, technische specificaties etc.).
 4. Acceptatie door bewoners van overlast bij verbouwing en afstemming met bewoners.
 5. Project-specifieke aanpakken (dus minder gestandaardiseerde aanpak gericht op massaproductie).

Adaptief (losmaakbaar) bouwen

Adaptief bouwen met losmaakbare details (modules) is gericht op het zodanig ontwerpen van een samengesteld bouwproduct of element dat het niet-destructief uit elkaar gehaald kan worden. Waarbij het de voorkeur geniet dat dit eenvoudig mogelijk is. Door deze manier van ontwerpen kunnen meer elementen of materialen die uit een gebouw worden geoogst worden hergebruikt en/of kunnen gebouwen langer blijven bestaan omdat bouwproducten gemakkelijker vervangen worden. Deze maatregel niet gaat om het sluiten van de kringloop op korte termijn, maar in de toekomst wanneer de producten in de einde levensfase terecht komen.

Verdieping adaptief (losmaakbaar) bouwen

- **Toepassing:** op alle type nieuwbouw.
- **Betrokken partijen:** architect, producent, leverancier, aannemer, recycler, sloper (ontmantelaar), gebouw eigenaar, grond eigenaar, gemeente
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Het verkrijgen van vergunningen.
 2. Het moet voldoen aan de veiligheidsnormen en aan de functionele eisen.
 3. Duurdere manier van bouwen met onzekerheid of de maatregel zich terugbetaald.
 4. Mogelijk initieel meer materiaal- gebruik en impact. De voordelen vinden pas plaats bij eindelevensduur
 5. Nieuwe en verschuivingen in rollen en belangen in het bouwproces (e.g. van de bouwplaats naar fabrieken).
 6. Minder overlast op de bouwplaats.
 7. Meer ruimte en tijd nodig voor circulaire activiteiten (op bouwplaats en overige opslag).
 8. Effecten worden pas in de toekomst behaald zodra de producten in de einde levens fase terecht komen.

(Toekomst-)Bestendige materialen

Deze maatregel gaat over het verlengen van de levensduur door gebruik te maken van duurzame (in de zin van lange levensduur) materialen en/of duurzaam ontwerp. Duurzaam betreft de eigenschap van een materiaal, bouwdeel of constructie om de in specifieke toepassingen optredende chemische, fysische en mechanische belastingen gedurende de technische levensduur in die mate te weerstaan dat geen achteruitgang optreedt in functionele eigenschappen.

Verdieping (toekomst-)bestendige materialen

- **Toepassing:** op nieuwbouw en bestaande bouw.
- **Betrokken partijen:** producent, leverancier, aannemer, architect, gemeente, overheid, projectontwikkelaars, bewoners.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:** betaalbaarheid van duurzame materialen (afweging tussen hogere kosten versus opbrengsten van materialen). De voordelen vinden pas plaats bij eindelevensduur.

3.4 Maatregelen onder ‘close the loop’

Bij ‘close the loop’ gaat het om hoogwaardige verwerking van (deel)producten of materialen. Dit zorgt ervoor dat er een aanbod van secundaire materialen en (deel)producten ontstaat die weer gebruikt kunnen worden om te voldoen aan de materiaalvraag.

Recycling

Het voorkomen van materiaalverlies (buiten de keten) door in te zetten op meer recycling binnen de woningsector. Recycling is het terugwinnen van materialen uit afgedankte producten, deze secundaire materialen kunnen vervolgens opnieuw worden ingezet bij de nieuwbouw of renovatie van woningen.

Verdieping recycling

- **Toepassing:** deze maatregel zal het meeste effect hebben bij bestaande bouw, omdat wanneer deze gesloopt wordt de grootste hoeveelheid materialen beschikbaar zal komen. Daarnaast ontstaat er ook afval tijdens nieuwbouw en productieafval, waarbij het ook belangrijk is dit weer hoogwaardig te verwerken.
- **Betrokken partijen:** recycler, sloper (ontmantelaar), gebouw eigenaar, grond bezitter, leveranciers.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Betaalbaarheid van recycling (afweging tussen hogere kosten vs opbrengsten van materialen/componenten).
 2. Meer afstemming en coördinatie nodig tussen partijen.
 3. Mismatch tussen bij welke partij de kosten liggen en degene (bijv. bewoner) die de baten ontvangt.
 4. Meer ruimte en tijd nodig voor circulaire activiteiten (op bouwplaats, opslag en opwerking).
 5. Kwaliteit en mogelijke vervuiling van gerecycled grondstofstromen.
 6. Hoge milieu impact vanwege benodigde energie, transport of hulpstoffen voor recycling.

Circulair slopen

Circulair slopen betreft het niet-destructief uit elkaar halen van een woning, waardoor er minder schade ontstaat aan de materialen en elementen. Waarbij het de voorkeur geniet dat dit eenvoudig mogelijk is. Door demontage kunnen materialen ergens anders worden ingezet als secundaire materialen waardoor de materialen langer mee. Door circulair slopen kan er op de verwerkingslocatie meer materiaal worden gescheiden waardoor er meer gerecycled en hergebruikt kan worden en minder verbrand of gestort zal worden. Daarnaast zorgt circulair slopen in het algemeen voor zuivere secundaire materiaalstromen, waardoor deze opnieuw ingezet kunnen worden binnen de woningsector.

Verdieping circulair slopen

- **Toepassing:** alle type bestaande bouw.
- **Betrokken partijen:** recycler, sloper (ontmantelaar), gebouw eigenaar, grond eigenaar.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Betaalbaarheid van circulair slopen (afweging tussen hogere kosten versus opbrengsten van materialen/componenten).
 2. Mismatch tussen bij welke partij de kosten liggen en degene (bijv. bewoner) die de baten ontvangt.
 3. Meer afstemming en coördinatie nodig tussen partijen.
 4. Meer ruimte en tijd nodig voor circulaire activiteiten (op bouwplaats en overige opslag).
 5. Kosten door een toename in manuren om elementen te oogsten en de producten op de juiste kwaliteit te schatten.

3.5 Maatregelen onder substitutie

Niet-duurzaam geproduceerde primaire grondstoffen vervangen door biogrdstoffen of door duurzaam geproduceerde grondstoffen met een lagere impact op klimaat en milieu.

Biobased materialen

Biobased materialen zijn gemaakt van organische, vaak hernieuwbare, grondstoffen in plaats van abiotische of fossiele grondstoffen.

Verdieping biobased materialen

- **Toepassing:** alle type nieuwbouw en bestaande bouw.
- **Betrokken partijen:** leverancier, agrarische sector, architect, aannemer, constructeur, bewoner, gebouwbezitter, overheid, bosbeheerder.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Meer afstemming en coördinatie nodig tussen partijen.
 2. Grote initiële investeringen nodig.
 3. Concurrentie voor nieuwe initiatieven met traditionele geoptimaliseerde ketens en processen.
 4. Stimulans Milieu Prestatie Gebouwen onvoldoende prikkelend.
 5. Het moet voldoen aan de veiligheidsnormen en aan de functionele eisen.
 6. Onzekerheden in de kwaliteit van biobased producten, en de milieu impact bij de productie.
 7. Industrie moet nog worden opgeschaald.

Groene materialen

Inzetten op materiaalinnovaties om de CO₂-uitstoot van materialen terug te brengen (bijv. cementloos beton). De CO₂-uitstoot bij de productie van materialen terugbrengen door materiaalinnovatie of groene energie (bijv. groen waterstof voor de productie van staal) en enkele reststoffen te verbranden als alternatief voor het gebruik van fossiele brandstoffen.

Verdieping groene materialen

- **Toepassing:** alle type nieuwbouw en bestaande bouw.
- **Betrokken partijen:** leverancier, architect, aannemer, constructeur, overheid.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Grote initiële investeringen nodig.
 2. Lagere bouwkosten (bijv. door kortere bouwtijd, gebruik van bestaand casco, of door lagere ETS kosten door CO₂ besparing).
 3. Energietransitie en implementatie vergt nog opschaling en kennisontwikkeling.

Gerecyclede materialen (onderdeel van definitie van NPCE)

Primaire grondstoffen van een product vervangen door een stroom gerecyclede materialen. Het gaat hierbij om het recyclen en opnieuw toepassen in een (bouw)product, dit kunnen ook stromen zijn afkomstig buiten de bouw.

Vanwege de keuze in definitie van Substitutie is deze maatregel in dit onderzoek meegenomen onder 'close the loop'.

Verdieping gerecyclede materialen

- **Toepassing:** alle type nieuwbouw en bestaande bouw.
- **Betrokken partijen:** recycler, Architect, ontmantelaar, leverancier, aannemer, constructeur, overheid.
- **Voornaamste barrières en drijfveren:**
 1. Grote initiële investeringen nodig.
 2. Meer afstemming en coördinatie nodig tussen partijen.
 3. Meer ruimte en tijd nodig voor circulaire activiteiten (op bouwplaats en overige opslag)
 4. Kwaliteit van de secundaire producten en het vertrouwen in de reeds gebruikte objecten/materialen.

3.6 Aanvullingen en aanpassingen in circulaire maatregelen als gevolg van modellering

Gedurende het onderzoek zijn er aanvullende circulaire maatregelen meegenomen of buiten beschouwing gelaten. De reden hiervan is dat deze maatregelen al onderdeel waren van de modellering (uit de toekomstverkenningen zijn bijvoorbeeld vormen van woningdeling meegenomen in de toekomstscenario's). Daarnaast is in voor de modellering (zie volgend hoofdstuk) van de circulaire maatregelen niet altijd gelukt om data te vinden. In dit geval is de maatregel niet, deels of op een andere wijze meegenomen.

Maatregelen toegevoegd tijdens de modellering:

- Woningdelen (generatiewonen in Regionaal Geworteld en woningdeling met meerdere gezinnen in Groen Land);
- Anders bouwen (appartementen (<5-laags) bijv. als gevolg van bijvoorbeeld meer binnenstedelijke verdichting in plaats van verstedelijking buiten bebouwd gebied).

Maatregelen die niet, deels of op een andere wijze zijn meegenomen:

- (Toekomst-)Bestendige materialen is niet meegenomen in de modellering vanwege gebrek aan data;
- De circulaire maatregel gelinkt aan biobased materialen is gemodelleerd als 'biobased bouwen'. Daarnaast wordt afzonderlijk gekeken naar het gebruik van biobased materialen in de materiaalstromen. Hierbij wordt met name gekeken naar houtgebruik als proxy.
- Groene materialen worden in de scenario's meegenomen als 'duurzaam geproduceerde primaire materialen'.
- De maatregel 'modulair en standaardisatie' werd aanvankelijk naast geprefabriceerd en adaptief (losmaakbaar) bouwen overwogen. Echter, vanwege een gebrek aan beschikbare data bleek het niet mogelijk om een duidelijk onderscheid te maken in de modellering van deze maatregel. Daarom is ervoor gekozen om 'modulair en standaardisatie' samen te voegen met adaptief (losmaakbaar) bouwen, gezien de grote overlap tussen beide concepten. Desondanks worden deze maatregelen in bepaalde delen van het onderzoek, zoals in hoofdstuk 6, nog afzonderlijk besproken. Hergebruik, circulair slopen en recyclen zijn meegenomen als 'closed loop' recyclen en vormen gezamenlijk de secundaire instroom. Hierbij is geen onderscheid gemaakt tussen een-op-een hergebruik van producten en recyclen van materialen.

4 Potentiële impact van circulaire maatregelen

In dit hoofdstuk worden de circulaire maatregelen uit het vorige hoofdstuk gekwantificeerd en uitgedrukt in materiaalintensiteit (materiaalgebruik) en impact aan de hand van de indicatoren omschreven in sectie 1.2.4. Vervolgens kijken we naar de potentiële impact van circulaire maatregelen, in deze stap wordt de verwachte mate van uitvoering (in aantallen) meegenomen.

4.1 Methode

Om invulling te geven aan deze analyse gebruiken we de circulaire maatregelen uit hoofdstuk 3. Voor zowel conventioneel bouwen als voor de afzonderlijke circulaire maatregelen wordt eerst het materiaalgebruik en de impact (in termen van BKG, MKI en landgebruik⁵) berekend per m². Dit wordt gedaan voor alle relevante woningtypen, indien van toepassing. Desalniettemin wordt in deze rapportage alleen de gemiddelde materiaalintensiteiten en impact vermeld. We maken grotendeels gebruik van de materiaalintensiteiten uit de studies van Van Oorschot (2021; 2023).

We gebruiken de historische materiaalgegevens, specifiek per bouwperiode en woningtype, en de intensiteiten voor nieuwbouw volgens de BENG norm, biobased bouwprincipes en circulaire bouwprincipes. Tot slot gebruiken we de gegevens voor transformatie van niet-woningen naar woningen, en optoppen (Copper 8 et al., 2023).

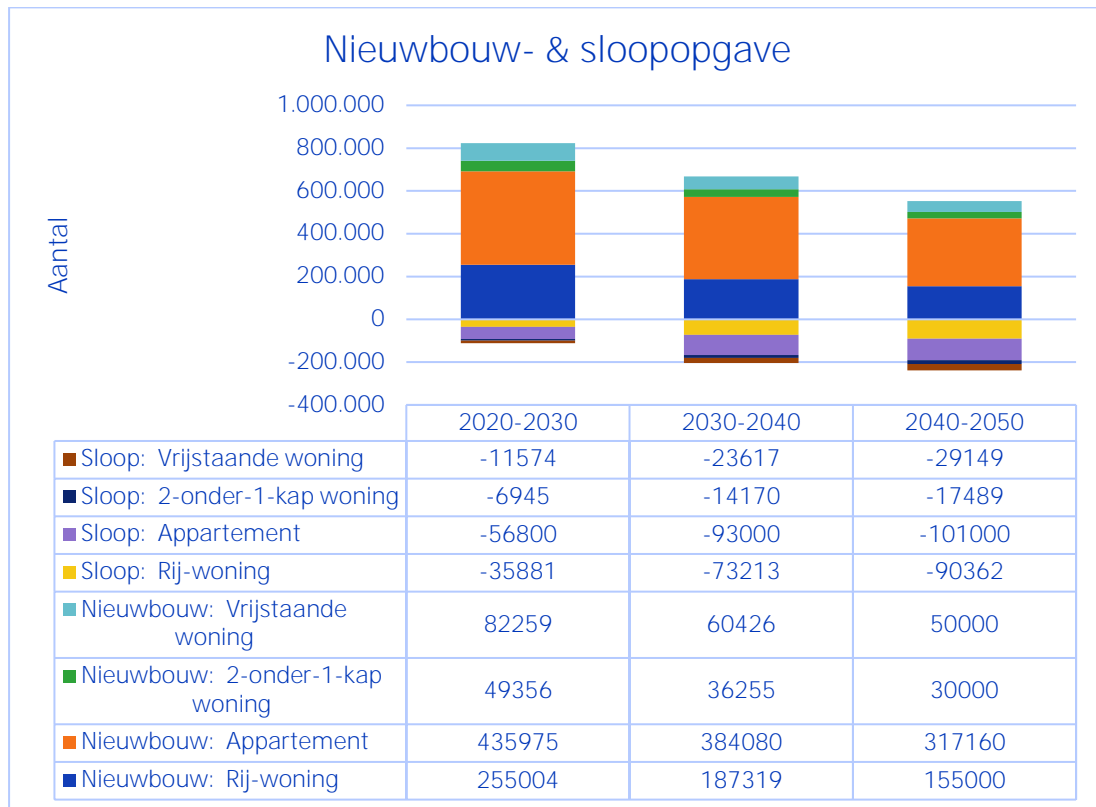
De materiaalintensiteiten van circulaire maatregelen zijn daarnaast gebaseerd op onderzoek EIB & Metabolic (van Arnoldussen et al., 2022) en intensiteiten voor modulaire bouw zijn aangevuld met data uit interviews met bouwbedrijven (Kuperus, 2023). (van Oorschot & van der Voet, 2024)

Om de gemiddelde impact van het materiaalgebruik per oplossing te kwantificeren zijn de ecoinvent database en de Nationale Milieudatabase (NMD) gebruikt (Zie Bijlage b). In deze databases zijn de materialen gekoppeld aan de impact categorieën voor de productie van de materialen conform de indicatoren uit sectie 1.2.4.

Om de potentie van een circulaire maatregel in de toekomst (tot 2050) te bepalen wordt deze afgezet tegen de huidige toekomstige trend⁶ waarin wordt aangenomen dat de (conventionele) bouwmethoden, materialenmix en de verdeling tussen de woningtypen ongewijzigd blijft. Deze nieuwbouw- en sloopopgave is te zien in Figuur 4.1: De komende jaren zal veel nieuw gebouwd worden, verder is te zien dat over de tijd nieuwbouw afneemt, terwijl sloop toeneemt.

⁵ In dit hoofdstuk wordt voor landgebruik de indicator 'Pt' gebruikt en berekend voor alle materialen. In het volgende hoofdstuk kijken we specifiek naar het landgebruik van houtproductie, hiervoor wordt de indicator km²/jaar gebruikt.

⁶ In dit hoofdstuk wordt Copper 8 et al. (2023) voor de geschatte nieuwbouw- en sloopaantallen tot 2050.



Figuur 4.1: Nieuwbouw en sloopopgave per woningtype en jaargang. Nieuwbouw is gevisualiseerd met positieve waarden, sloop met negatieve waarden. Op basis van Copper 8 et al. (2023).

Om de verwachte potentie van verschillende circulaire maatregelen in de toekomst te berekenen, zijn eerst aannames gemaakt om vast te stellen wat de reikwijdte van elke afzonderlijke maatregel is (aantallen over de tijd heen, opgedeeld in de decennia 2020-2030, 2030-2040 en 2040-2050). De aannames voor deze reikwijdte zijn gebaseerd op data uit literatuur en te vinden in Bijlage a. Vervolgens is deze reikwijdte gecombineerd met de materiaalintensiteit van de circulaire maatregel, waardoor de klimaat- en milieu-impact kan worden berekend.

Het relatieve verschil ten opzichte van de huidige trend, waarin conventionele bouwmethoden worden toegepast, geeft de potentiële impact (reductie) van elke maatregel in de loop van de tijd weer.

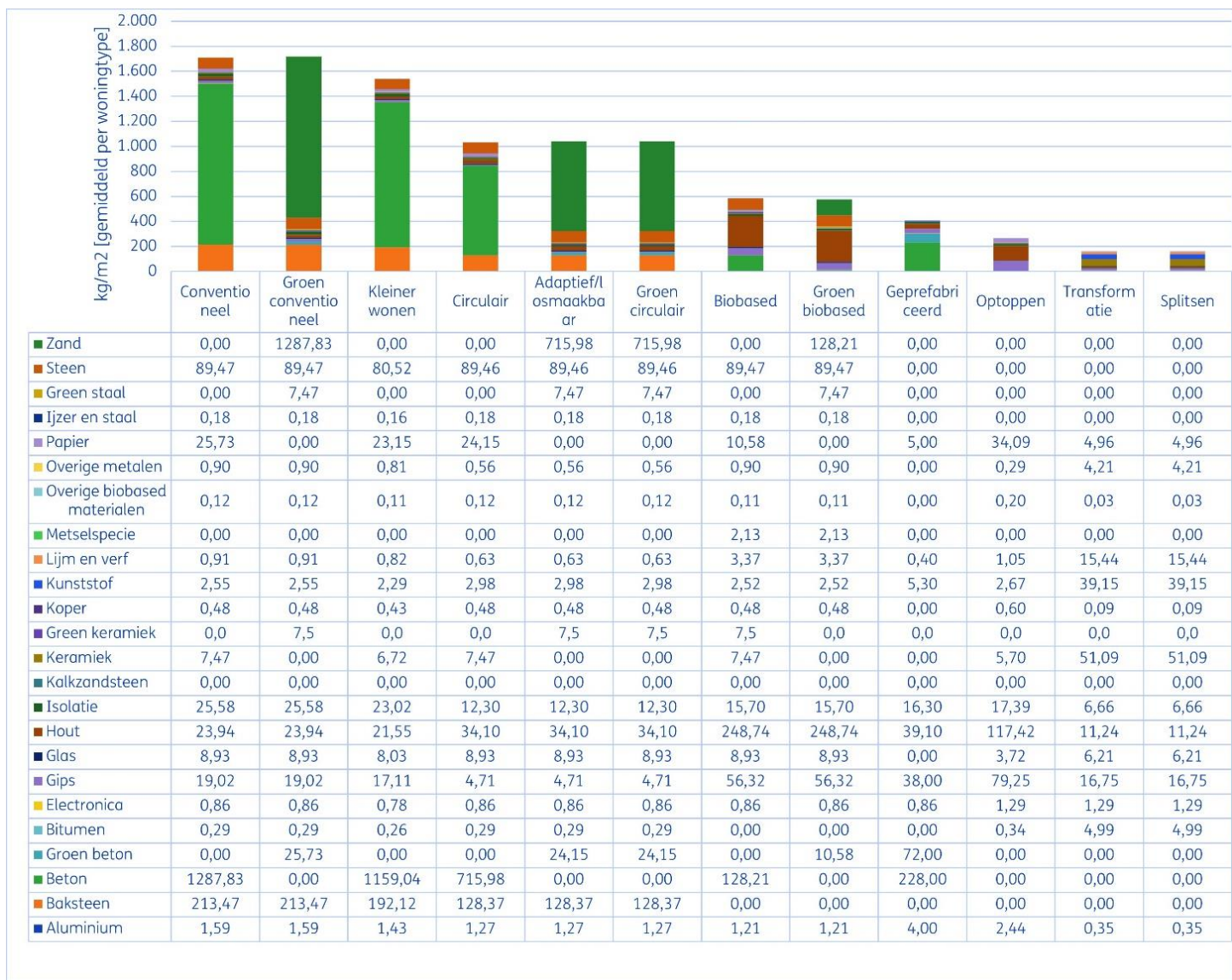
4.2 Gemiddelde materiaal- vraag en impact van de circulaire maatregelen

Voordat we de klimaat- en milieu impact van de circulaire maatregelen kunnen bepalen kijken we eerst naar de materiaalintensiteiten. Vervolgens kan de impact uitgedrukt worden aan de hand van de indicatoren.

4.2.1 Materiaalintensiteiten

Nieuwbouw

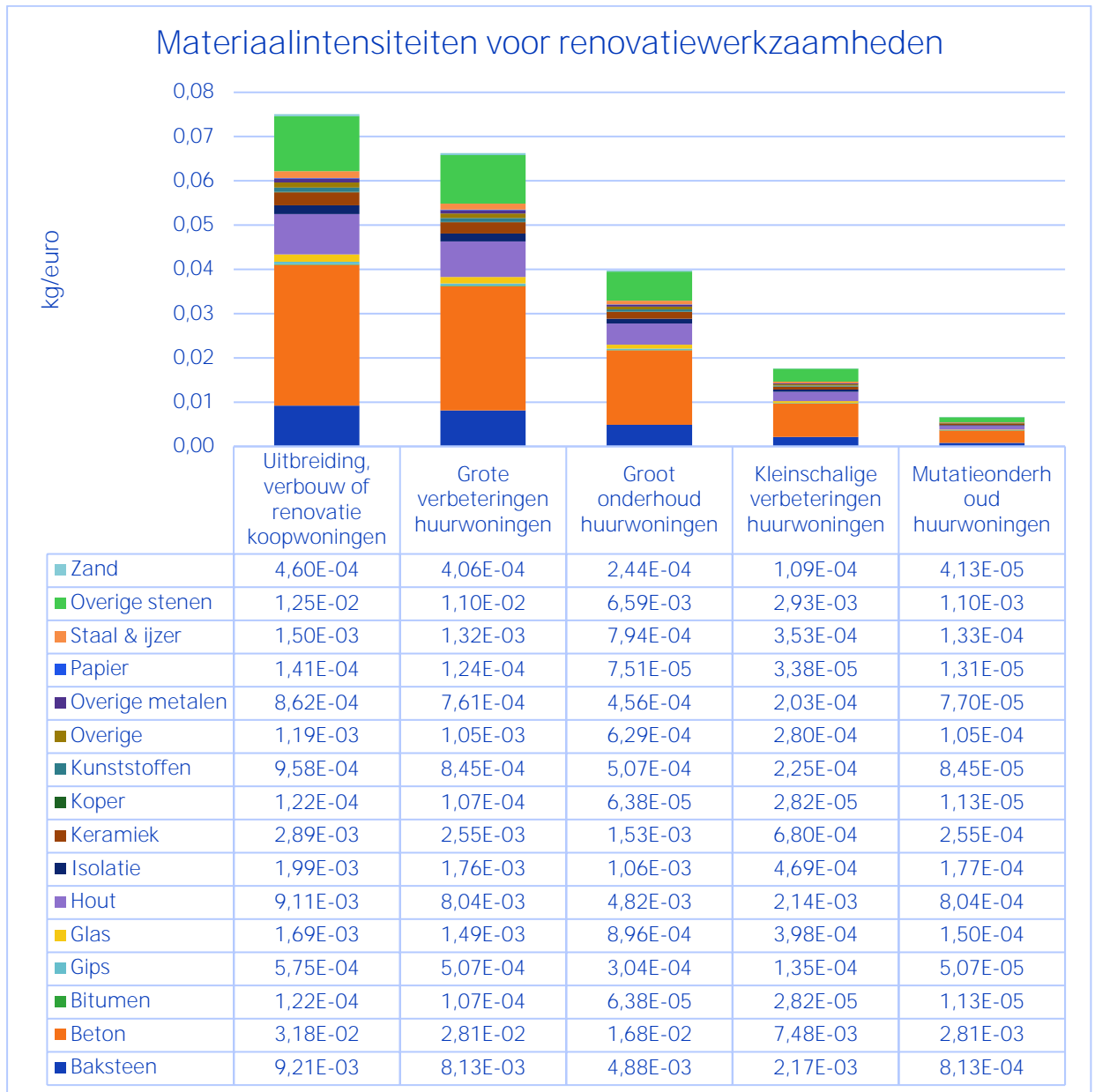
Figuur 4.2 laat een geaggregeerd beeld zien van de materiaalintensiteiten per circulaire maatregel. De materiaalintensiteiten in dit onderzoek hebben als eenheid: kg materiaal per vierkante meter woonoppervlakte per bouwtype en maatregel. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen de vier bouwtypes, maar een gemiddelde genomen. De maatregelen met betrekking tot sloop en 'closed loop' recyclen (recycling, hergebruik en circulair slopen) zijn ook niet weergegeven in Figuur 4.2 omdat de hieruit volgende materialen een afgeleide zijn van de uitstroom in een bepaald jaar.



Figuur 4.2: Gemiddelde materiaal intensiteit per maatregel

(Energie)renovatie

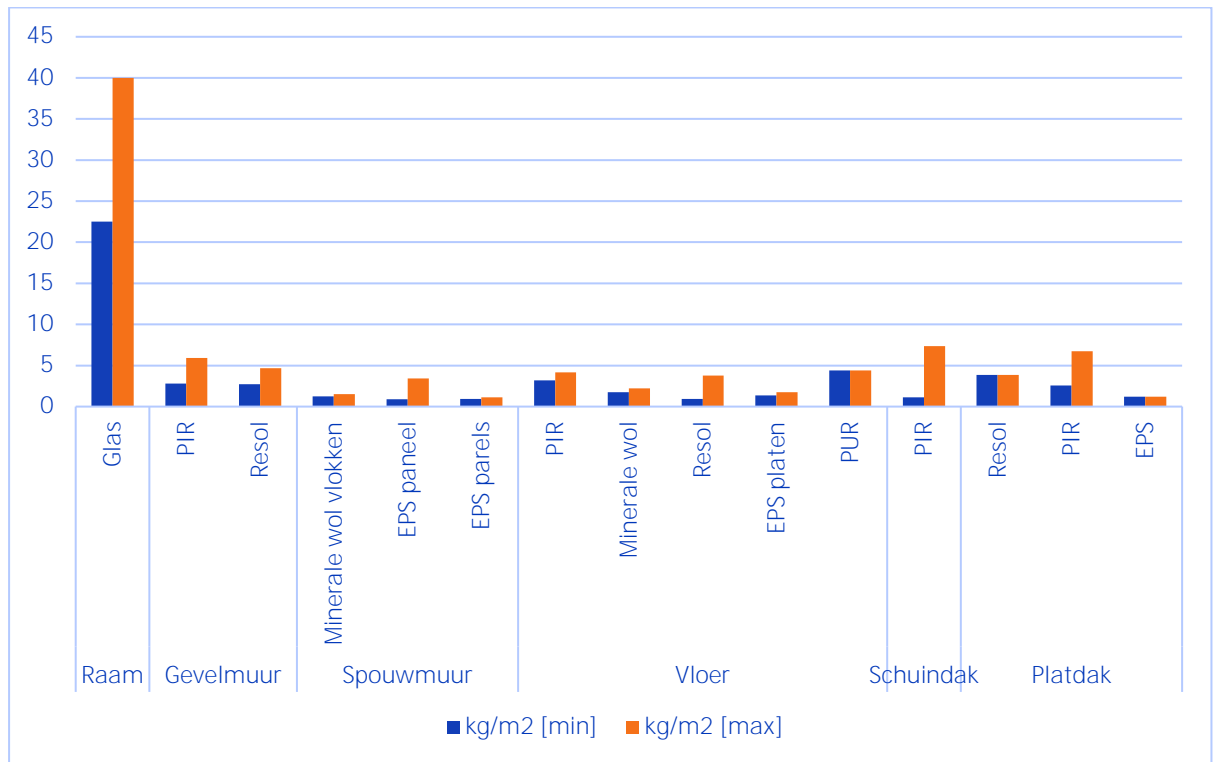
Het berekenen van de materiaal intensiteit bij renovatie vereist wat meer toelichting. Dit komt doordat er veel variaties van renovatie mogelijk zijn, met verschillend materiaalgebruik. Hierdoor wordt de materiaalintensiteit niet uitgedrukt in kilogram per m², maar in kilogram per geïnvesteerde euro. Figuur 4.4 biedt een overzicht van de materiaal intensiteiten van renovatie in kg per geïnvesteerde euro.



Figuur 4.4: Materiaalgebruik van renovatie per type ingreep in kilogram per euro

Als uiteindelijke afbakening voor renovatiemaatregelen worden alleen de grote ingrepen meegenomen. Kleinschalige verbeteringen en mutatieonderhoud zijn niet meegenomen in de uiteindelijke analyse. Dit vanwege het karakter van de ingreep en mogelijke overlap met energierenovatie.

Figuur 4.5 biedt een overzicht van het materiaalgebruik van energierenovatie per bouwdeel uitgedrukt in kilogram per vierkante meter. ‘Min’ refereert naar de hoeveelheid kilogram benodigd om een isolatieniveau 1 te behalen⁷. ‘Max’ is de hoeveelheid materiaal om isolatieniveau 2, 3 of 4 te behalen.



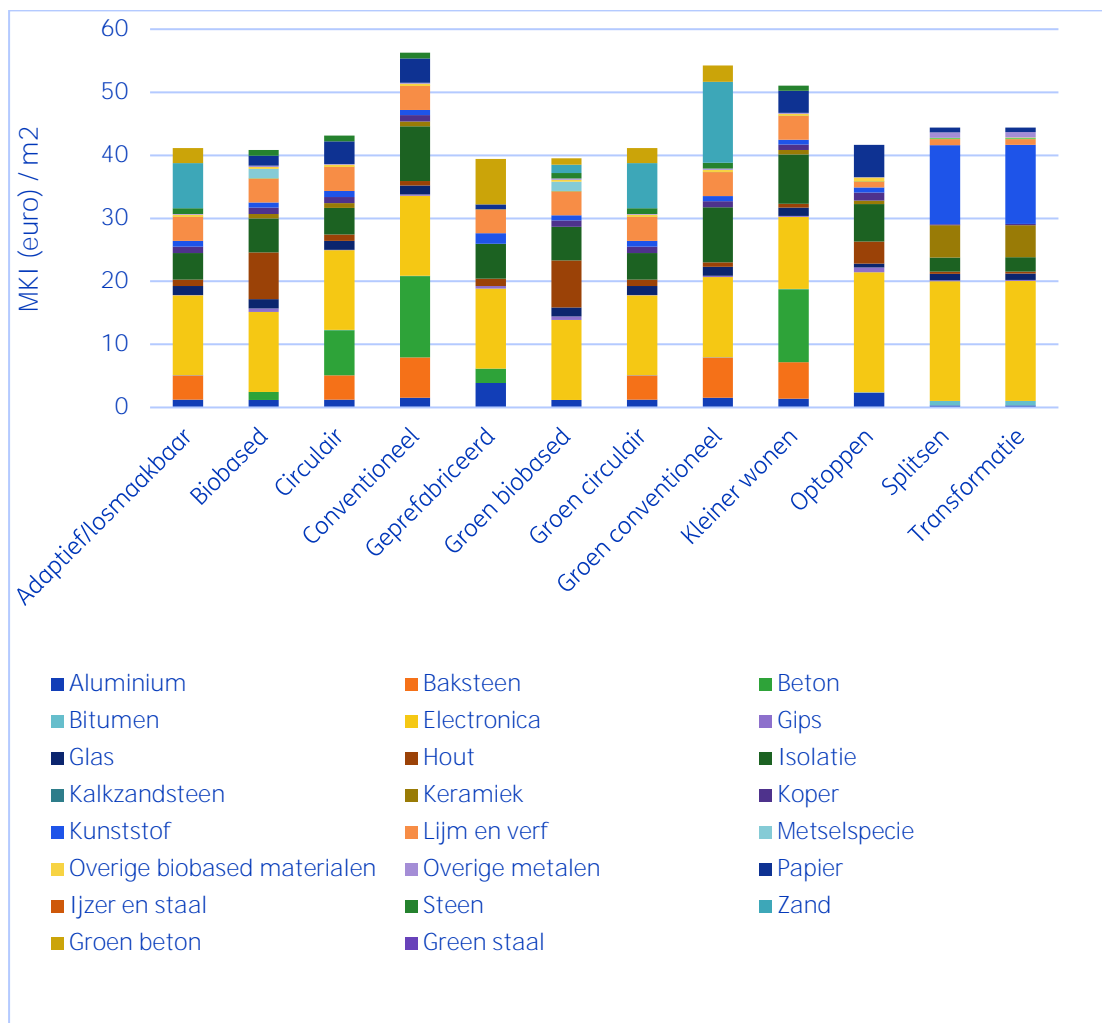
Figuur 4.5: Materiaalgebruik van energierenovatie per bouwdeel uitgedrukt in kilogram per vierkante meter. Min refereert naar de hoeveelheid kilogram benodigd om een isolatieniveau 1 te behalen. Max is de hoeveelheid materiaal om isolatieniveau 2, 3 of 4 te behalen. Gebaseerd op (van der Molen et al., 2023).

In de uiteindelijke analyse zijn renovatie en energierenovatie samengevoegd – hier wordt aangenomen dat deze maatregelen complementair zijn mede op basis van de omschrijving van Arnoldussen et al. (2022). Om de optelsom te maken worden de materialen uit Figuur 4.5 samengebracht onder de noemers isolatiemateriaal (EPS, PIR, glaswol en PUR) en glas.

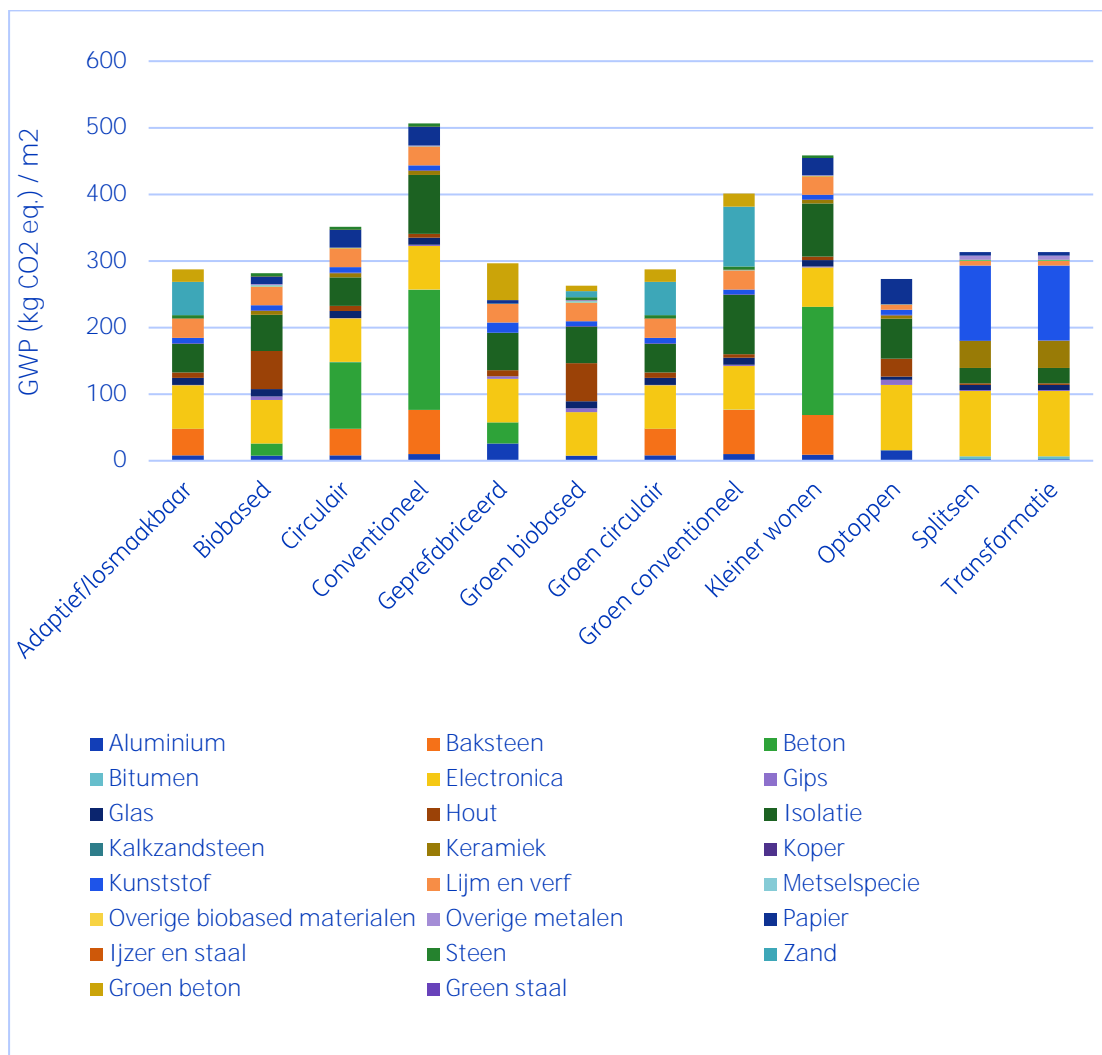
4.2.2 Klimaat- en milieu impact van circulaire maatregelen

Figuur 4.6, Figuur 4.7 en Figuur 4.8 bieden een overzicht van de materiaalimpact per vierkante meter vloeroppervlak, uitgesplitst per maatregel en materiaal. Figuur 4.9, Figuur 4.10 en Figuur 4.11 bieden inzicht in de materiaalimpact van renovatie. In Figuur 4.9 wordt opgemerkt dat overige metalen een grote bijdrage hebben in de totale milieu impact (MKI). Dit heeft te maken met metalen zoals aluminium, tin, lood en zink. Voor klimaat impact zijn dit isolatiematerialen (BKG) (Figuur 4.10).

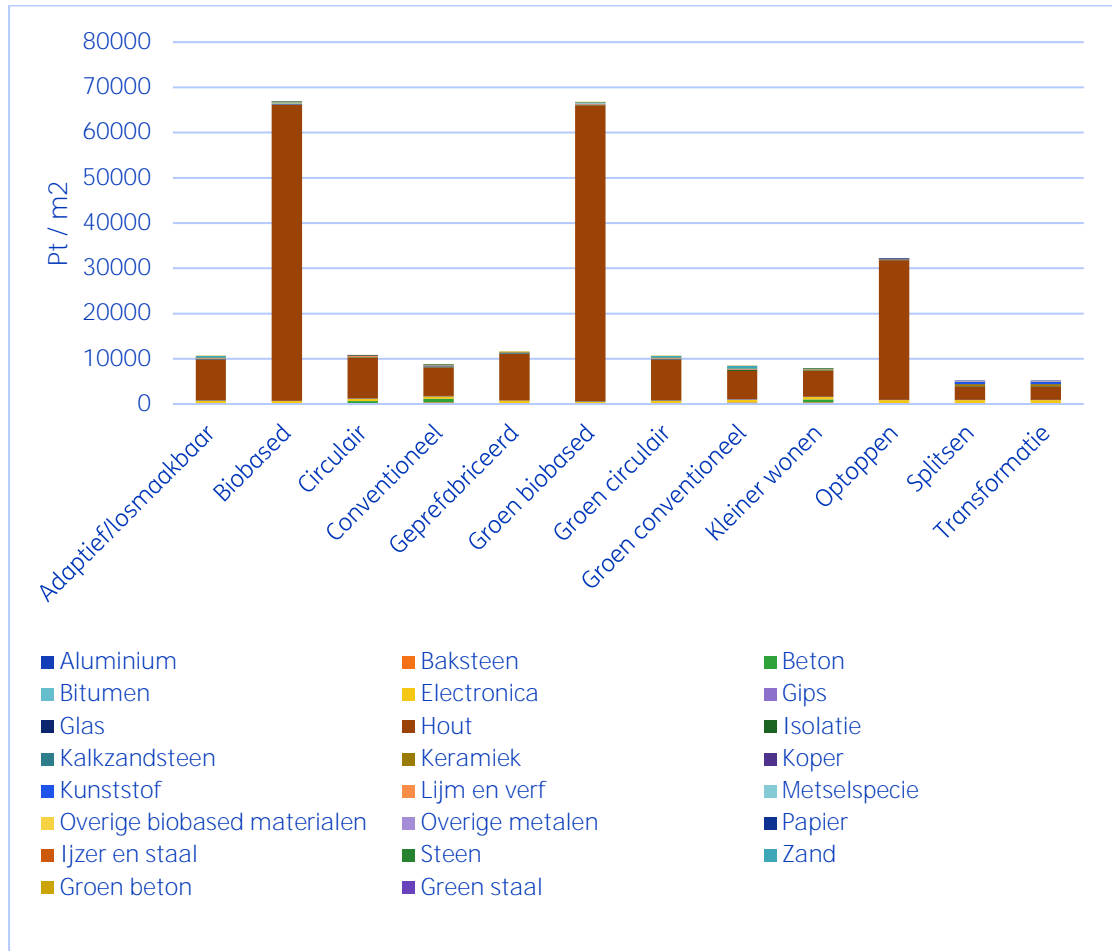
⁷ Isolatie-niveau zijn afkomstig uit het Hestia model: “Deze energetische kwaliteitsniveaus, uitgedrukt in Rc- of U-waarden, worden in Hestia geclusterd in vijf niveaus – waarbij voor elk bouwdeel apart een specifieke indeling is bepaald. Deze vijf niveaus (N0, N1, N2, N3, N4 genoemd) hebben oplopende kwaliteit: N0 is geheel ongeïsoleerd, N1 is de slechtst mogelijke isolatie en N4 het maximaal haalbare met verregaande maatregelen.” (van der Molen et al., 2023).



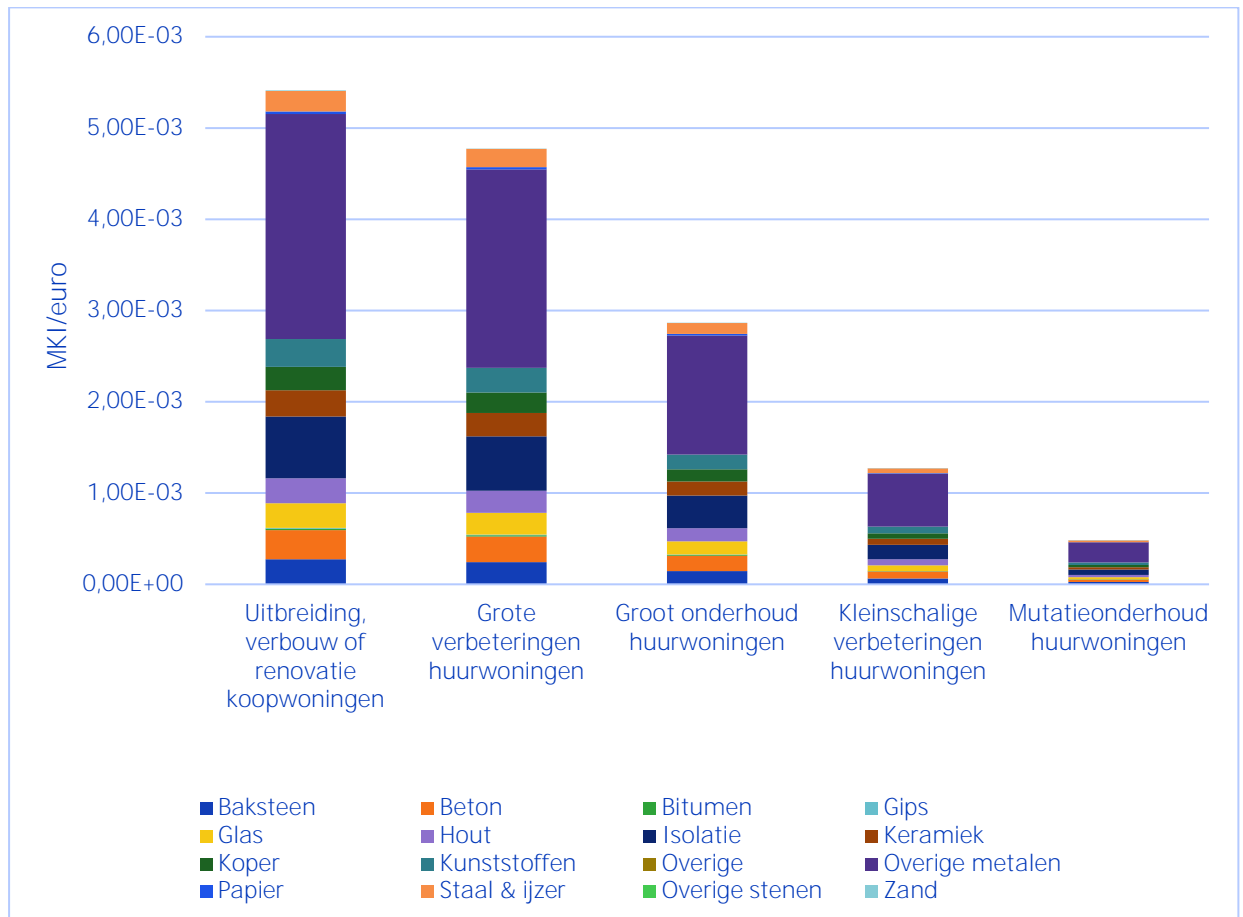
Figuur 4.6: MKI in euro's per vierkante meter vloeroppervlakte. Uitgesplitst per maatregel en materiaal.



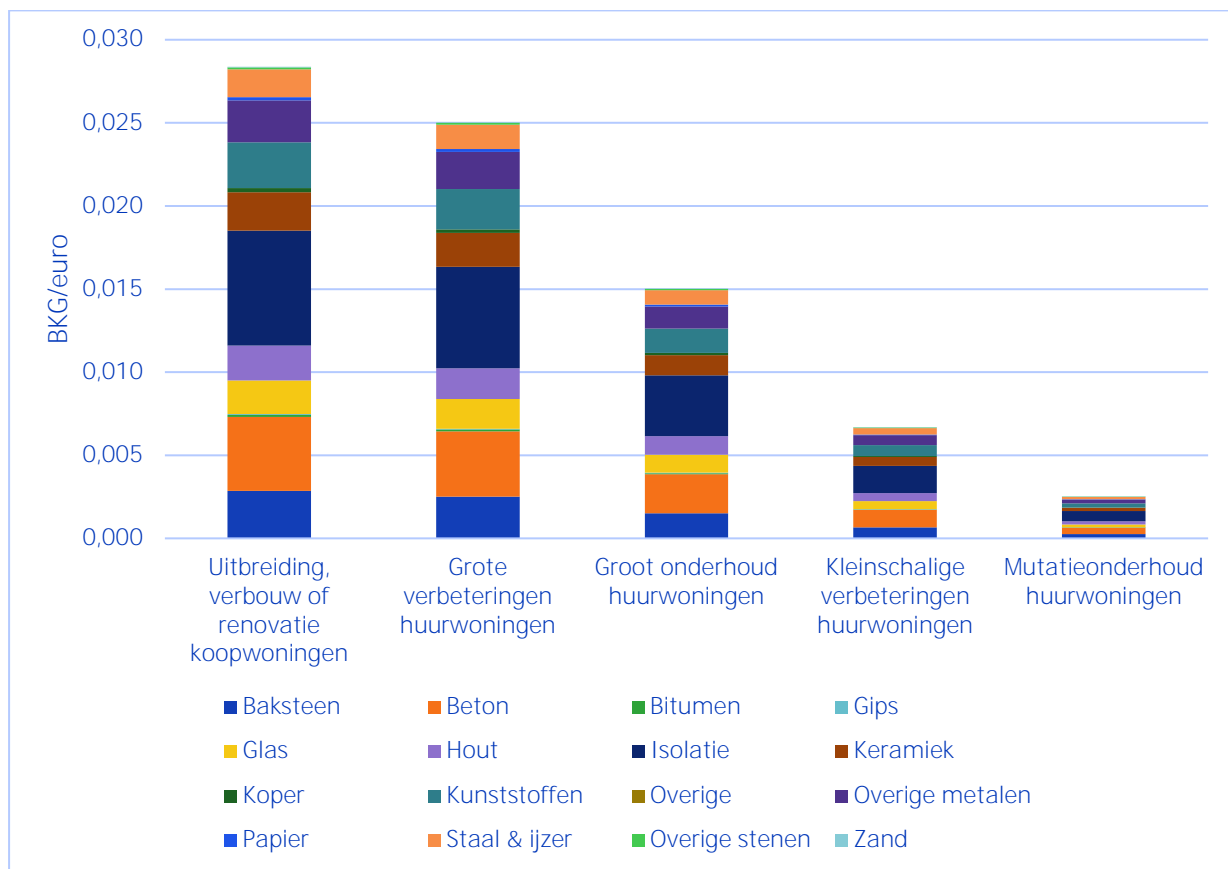
Figuur 4.7: Kg CO2-eq. per vierkante meter vloeroppervlakte. Uitgesplitst per maatregel en materiaal.



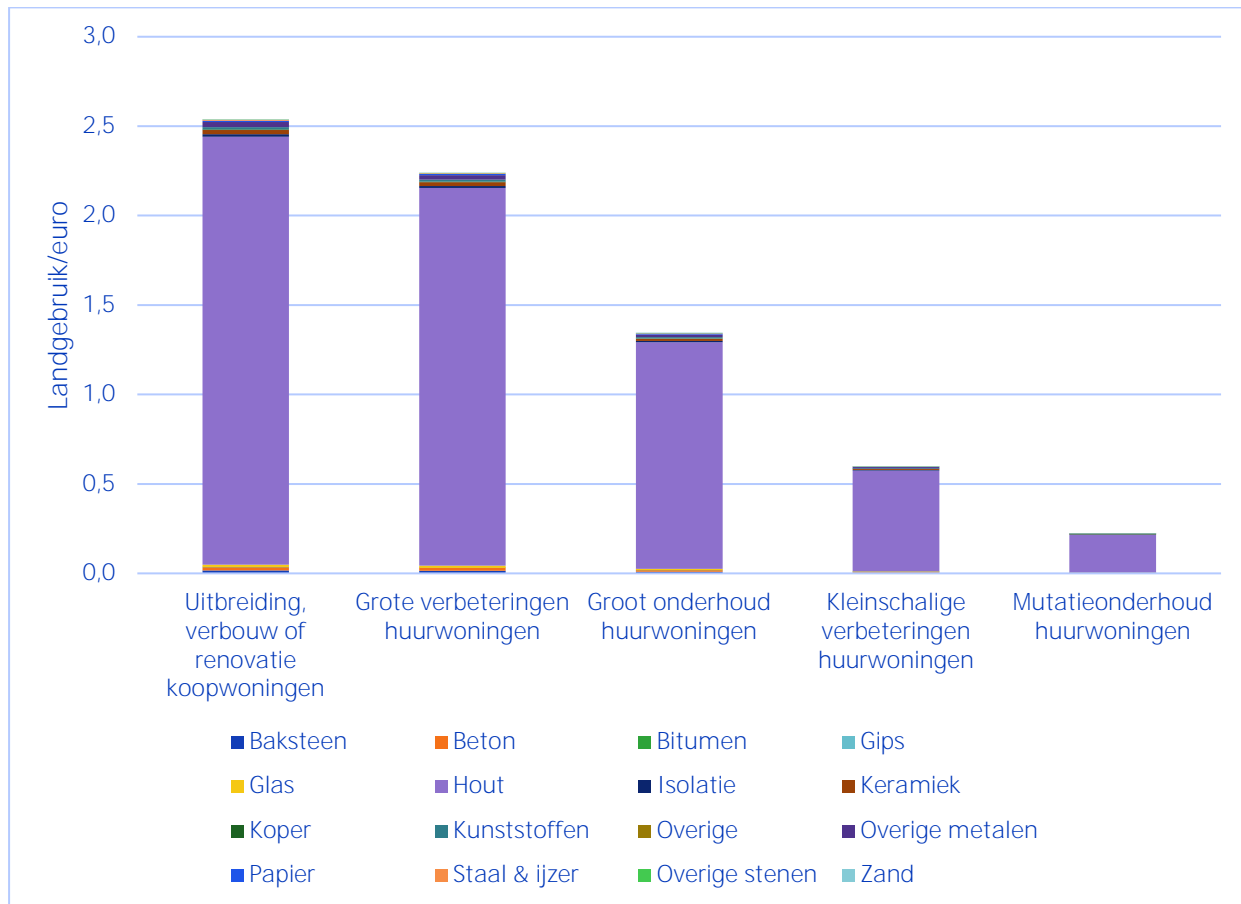
Figuur 4.8: Landgebruik uitgedrukt in 'Pt' per m2 vloeroppervlakte in een jaar. Uitgesplitst per maatregel en materiaal.



Figuur 4.9 MKI in euro's per euro renovatiekosten. Uitgesplitst per type ingreep en materiaal.



Figuur 4.10: BKG (kg CO2-eq.) per euro renovatiekosten Uitgesplitst per type ingreep en materiaal.

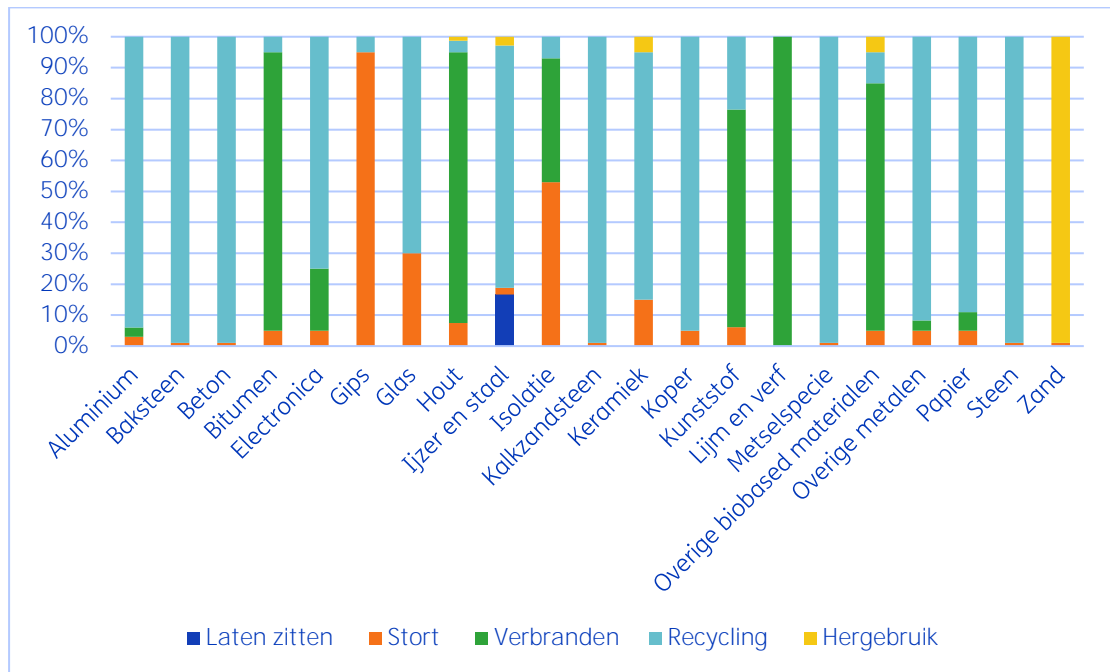


Figuur 4.11: Landgebruik (uitgedrukt in 'Pt' per euro renovatiekosten) Uitgesplitst per type ingreep en materiaal.

4.2.3 Einde levensduur van materialen

Figuur 4.12 biedt een overzicht van materialen als ze aan het einde van hun levensduur zijn gekomen. De figuur laat de genormaliseerde verdeling zien tussen de volgende einde levensduur opties per materiaalstroom: laten zitten, storten, verbranden, recycling en hergebruik. De ratio's zijn gebaseerd op de Forfaitaire waarden van de Nationale Milieu Database⁸. Deze waarden worden gebruikt om de aandelen 'closed loop' recycling en 'open loop' recycling te berekenen.

⁸ https://milieudatabase.nl/media/filer_public/e8/46/e846feb6-a1dd-4277-81d6-396799d7b3ff/forfaitaire_waarden_mei_2022.pdf



Figuur 4.12: Relatieve verdeling eindelevensduur per materiaal. Gebaseerd op de forfaitaire waarden van de Nationale Milieu Database. De producten en materialen uit de forfaitaire waarden zijn geaggregeerd tot bovenstaande materialen op basis van een ongewogen gemiddelde van de eindelevensduur fracties.

4.2.4 Reflectie op de circulaire maatregelen

Het splitsen van woningen, transformeren van bedrijventerreinen naar woningen en het optoppen leveren de meeste materiaalbesparing op. Anders bouwen (meer appartementenbouw) en losmaakbare woningen leveren per saldo het minst op aan materiaalbesparing. Over de breedte varieert de materiaalintensiteiten van de verschillende circulaire maatregelen sterk. ‘Traditionele’ materialen zoals beton, constructiematerialen (gips), metalen en isolatiemateriaal behouden een belangrijk aandeel in de materiaalmix van circulaire maatregelen. Het aandeel hout en biobased materialen neemt toe in meerdere circulaire maatregelen, zoals prefab bouwen en optoppen. Voor optoppen wordt gebruik gemaakt van relatief lichte constructies door middel van hout. Voor prefab bouwen is de keuze gemaakt voor hout in plaats van betonelementen.

De impact van de individuele circulaire maatregelen is afhankelijk van het type materiaal en de omvang van deze materialen. Zo heeft isolatiemateriaal een relatief klein aandeel in de materiaalintensiteit, gemiddeld 1%. Echter is de impact van isolatiemateriaal aanzienlijk, namelijk gemiddeld 10% van de milieukosten (MKI) en 14% van de broeikasgasemissies (BKG). Hetzelfde geldt voor overige materialen (elektronica, verf, kisten en lijmen) deze hebben hoge MKI en BKG per kilogram materiaal. Doordat er veel overige materialen gebruikt worden bij transformatie, splitsen en optoppen, hebben deze circulaire maatregelen ondanks dat deze relatief weinig materialen hebben een hoge MKI en BKG ten opzichte van andere circulaire maatregelen.

De een-op-een vergelijking tussen de materiaalvraag voor (energie)renovatie en voor nieuwbouw maatregelen is niet mogelijk vanwege de gehanteerde eenheden (euro’s versus vierkante meters). De omvang van de materiaalvraag voor (energie)renovatie van bestaande woningen varieert afhankelijk van het type werkzaamheden. Hierbij is onderscheid gemaakt in groot onderhoud van huurwoningen, uitbreiding, verbouw of

renovatie van koopwoningen, grote verbeteringen aan huurwoningen en (bijbehorende) energierenovatie.

Bij (energie)renovatie worden dezelfde materialen gebruikt als bij nieuwbouw, alhoewel in andere samenstelling. Beton, baksteen & keramiek en overige constructiematerialen beslaan het grootste deel van de materiaalintensiteit wanneer renovaties plaatsvinden. Er wordt veel gebruik gemaakt van hout en biobased materialen (12%) en isolatiemateriaal (4%), dit is logisch vanwege de aard van de werkzaamheden – namelijk het maken van aanpassingen aan bestaande woningen waardoor er minder constructieve materialen zoals baksteen en beton nodig zijn en meer materialen om de leefbaarheid te vergroten – denk hierbij aan de installaties (binnen dit onderzoek pv-panelen en passieve componenten) en isolatie van woningen.

Ook voor (energie)renovatie hebben isolatiematerialen een hoge impact op klimaat en milieu, en wegen relatief zwaar op de totale impact van de werkzaamheden – circa 10% van de totale milieukosten (MKI) en 11% van de broeikasgasemissies (BKG). Binnen de scope van dit onderzoek zijn voor renovatie technische installaties de pv-panelen en passieve componenten meegenomen, en niet de cv-installaties. Desalniettemin vormt dit, met 42% van de milieukosten en 36% van de broeikasgasemissies, een aanzienlijke impact op de totale effecten terwijl het slechts 2% van de materiaalintensiteit vertegenwoordigt. Hout & biobased heeft minimale milieukosten en broeikasgasemissies (beide ~1%, biogene emissies (CO₂ opname en afgifte door hout) zijn niet meegenomen), maar vertegenwoordigt het merendeel van landgebruik (96%).

Voor zowel circulaire maatregelen voor nieuwbouw als bestaande bouw zijn de relatieve verschillen tussen MKI en BKG vergelijkbaar op maatregel niveau. Echter is dit niet het geval op materiaalniveau. Ook is er gekeken naar de impact van landgebruik van materialen echter is dit in vergelijking tot hout minimaal (hout beslaat in totaal 96% van het landgebruik).

Materialen zijn in meer of mindere mate geschikt voor ‘closed loop’ recyclen. Dit heeft te maken met de eigenschappen van de materialen zelf, en de mate waarop materialen verwijderd en gescheiden worden tijdens het slopen (circulair slopen). Recyclen en hergebruik wordt niet direct uitgedrukt in materiaalgebruik. Dit is afhankelijk van de beschikbare materiaaluitstroom en de eindelevensduur bestemming zoals omschreven in de vorige sectie (4.2.3).

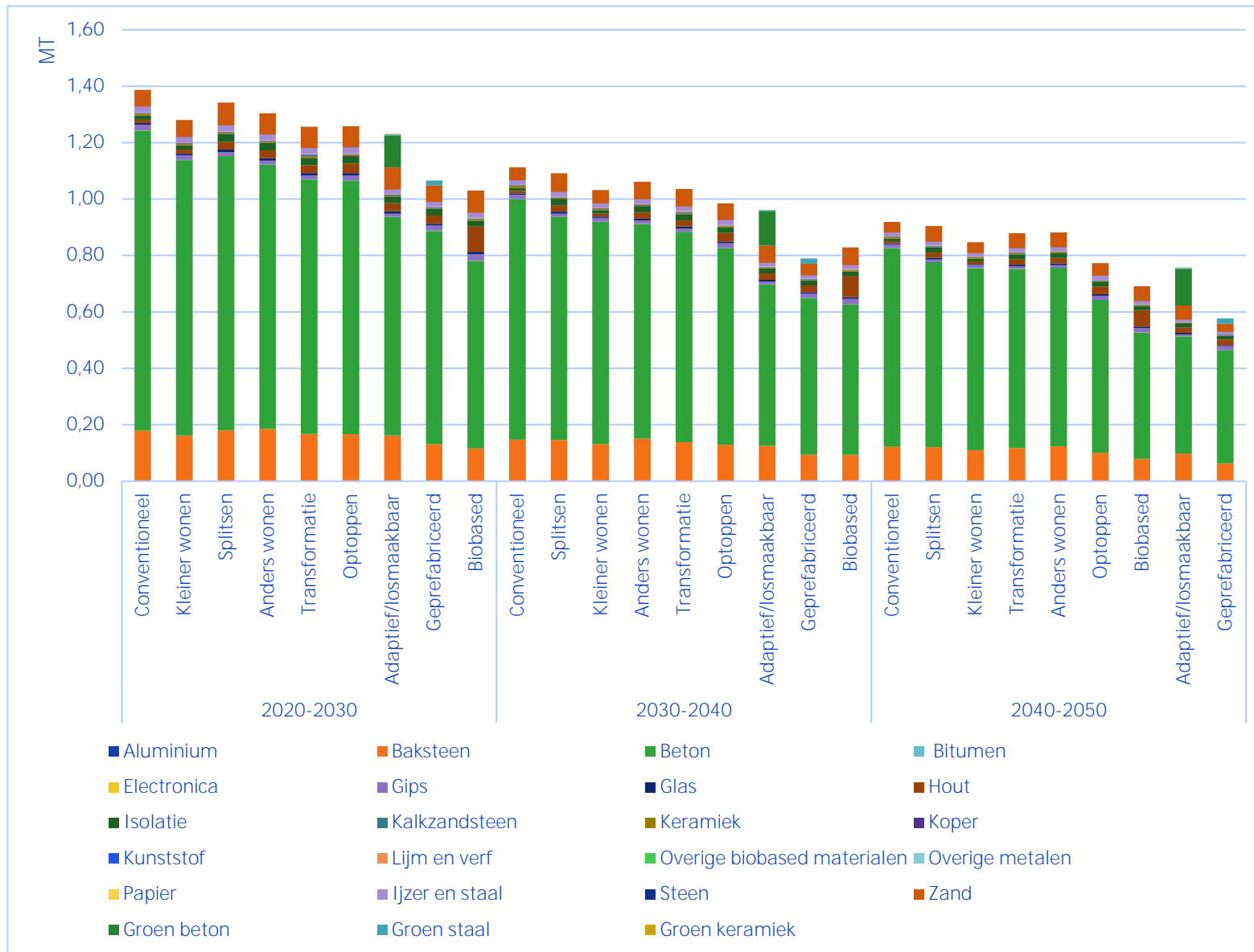
4.3 Potentiële impact van circulaire maatregelen ten opzichte van conventioneel bouwen

In de volgende paragrafen wordt beschreven welke potentiële impact de circulaire maatregelen hebben in de toekomst door het gemiddelde materiaalgebruik en de gemiddelde materiaalimpact te combineren met de reikwijdte van de circulaire maatregelen (voor de aantallen en aannames van de reikwijdte zie Bijlage a) binnen de nieuwbouwpoging geschetst in 4.1. Sectie 4.3.1 kijkt het materiaalgebruik, 4.3.2 naar de klimaat- en milieu impact, 4.3.3 kijkt naar de genormaliseerde indicatoren van de circulaire maatregelen en in 4.3.4 wordt gereflecteerd op de resultaten.

4.3.1 Materiaalgebruik

Figuur 4.13 biedt een overzicht van het materiaalgebruik tot 2050 per maatregel⁹ uitgesplitst naar decennia 2020-2030, 2030-2040 en 2040-2050.

⁹In deze exercitie zijn maatregelen zoals renovatie en 'closed loop' recyclen niet meegenomen.



Figuur 4.13: Materiaalgebruik uitgedrukt in Mton per maatregel uitgesplitst naar decennium.

Uit de figuur zijn de volgende observaties uit te halen:

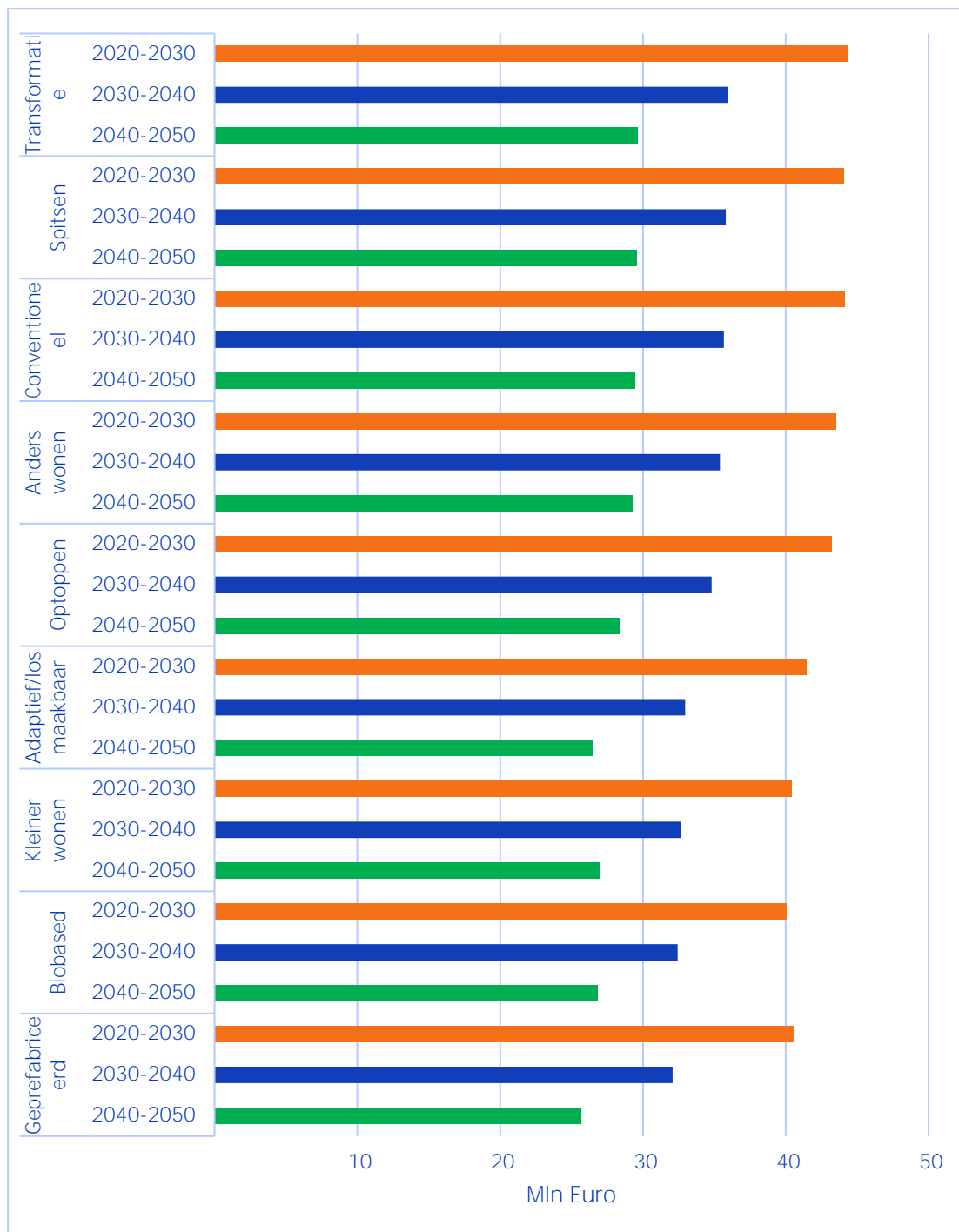
- **Conventioneel bouwen:** Deze maatregel heeft absoluut gezien het meeste materiaalgebruik in elke tijdsperiode. In de periode 2020-2030 ongeveer 1440 Kton aan materiaal. Hiervan is het merendeel beton (74%), gevolgd door bakstenen (12%), zand (4%) en metselspecie (4%). Voor elke maatregel geldt dat de absolute hoeveelheid materiaalgebruik afneemt over de tijd omdat de nieuwbouwpoging kleiner wordt.
- **Woning splitsen:** Deze maatregel bewerkstelligt een relatieve lage reductie in materiaalgebruik van circa 2% ten opzichte van conventioneel bouwen, dit komt doordat de absolute implementatie van de maatregel laag wordt geschat. Indien opschaling mogelijk is zou deze maatregel het materiaalgebruik significant kunnen verminderen.
- **Kleiner bouwen:** De potentie van kleiner bouwen wordt op ongeveer 10% geschat. Theoretisch is het mogelijk om de woonoppervlakte van elke nieuwe woning te verkleinen. Hiermee wordt een reductie van 8% materiaalgebruik gehaald. 10% reductie wordt niet gehaald omdat producten zoals installaties niet lineair geschaald worden.
- **Anders bouwen:** Meer appartementen bouwen in plaats van de andere woningtypes resulteert in een afname van 5% van het materiaalgebruik. Dit verschil zit voornamelijk in de relatief lage materiaal intensiteit van appartementen versus de andere bouwtypen.
- **Transformatie:** Deze maatregel zorgt voor een reductie in materiaalgebruik van 8% in 2020-2030 en 3% in 2040-2050. Bij transformatie worden relatief weinig constructieve bouwmaterialen zoals beton gebruikt om een wooneenheid te realiseren. Indien opschaling mogelijk is zou deze maatregel het materiaalgebruik significant kunnen verminderen.
- **Optoppen:** Deze maatregel heeft net zoals transformatie en woning splitsing een relatief laag materiaalgebruik vergeleken met het realiseren van een wooneenheid door middel van conventionele bouw. De maatregel resulteert in een reductie van 8% in 2020-2030 en 15% in 2040-2050. Voor optoppen wordt relatief veel hout en staal gebruikt. Indien opschaling mogelijk is zou deze maatregel het materiaalgebruik significant kunnen verminderen.
- **Adaptief en losmaakbaar bouwen:** Een demontabel ontwerp zorgt voor relatief lichte constructies⁷⁰ en een materiaalconsumptie reductie van ongeveer 10%.
- **Geprefabriceerd bouwen:** Deze maatregel gaat in dit onderzoek uit van relatief hoog houtgebruik (er zijn ook prefab constructies met juist veel staal en beton). De constructies zijn hierdoor erg licht. Daarnaast wordt deze maatregel vaak toegepast. Dit resulteert in een absolute reductie van 30% in het materiaalgebruik vergeleken met conventioneel bouwen.
- **Biobased bouwen:** Houten constructies zijn een stuk lichter dan de conventionele constructies. Ook deze maatregel wordt vaak toegepast. Hierdoor is de absolute hoeveelheid materiaalgebruik significant lager, met ongeveer 25%.

4.3.2 Klimaat- en milieu impact

Figuur 4.14, Figuur 4.15 en Figuur 4.16 laten respectievelijk de klimaat- en milieu zien uitgedrukt in de indicatoren BKG, MKI en landgebruik van de verschillende circulaire maatregelen en de conventionele bouwmethode. Figuur 4.14 biedt inzicht in de MKI van het toepassen van de afzonderlijke maatregelen. De MKI neemt voor elke maatregel af door de tijd heen. Dit is direct gerelateerd aan het feit dat in het model de woningbouw afneemt. Transformatie, splitsen en conventioneel bouwen hebben de hoogste MKI. Dit heeft te maken met de uitgangspunten van het model waardoor de besparing niet zo hoog als in

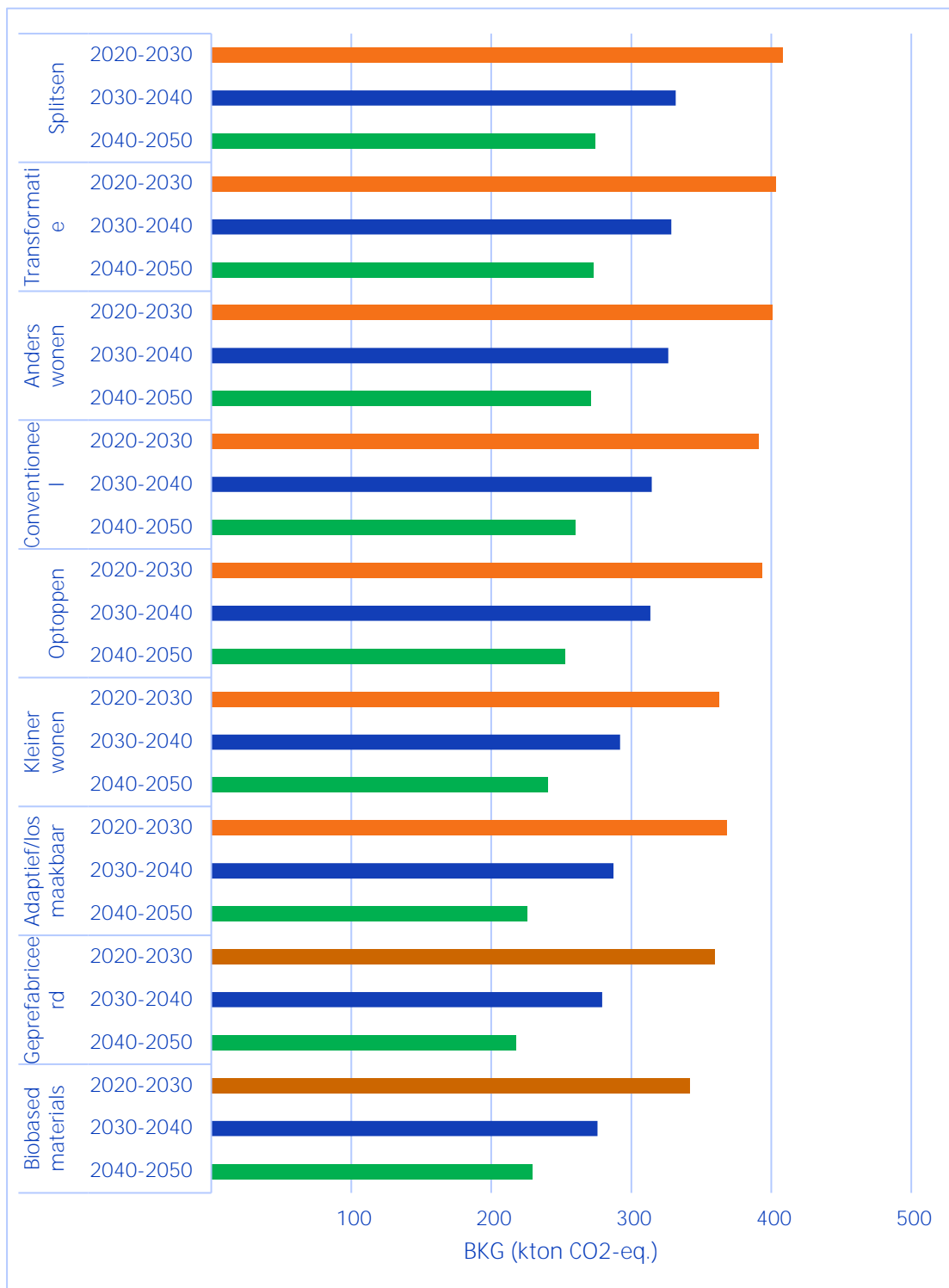
⁷⁰ Dit is niet per definitie zo. Bij deze maatregel was in eerste instantie ook uitgegaan van 'slimmer' bouwen, bijvoorbeeld door middel van biomimicry. Hiermee kunnen materiaalreducties behaald worden. De 10% reductie is daardoor een assumptie.

eerste instantie verwacht. Individueel gezien zijn transformatie en splitsen maatregelen met hoge potentie tot reductie in materiaalgebruik en milieu-impact, echter hebben deze maatregelen in deze exercitie weinig potentie doordat ze enerzijds relatief weinig toegepast worden en anderzijds materialen gebruiken met veel impact – zoals elektronica (installaties zoals pv-panelen en passieve componenten), lijm en kitten – ten opzichte van andere maatregelen. Voor andere maatregelen neemt de MKI af. Desalniettemin zorgt geen enkele circulaire maatregel op zichzelf voor een radicale vermindering van de impact indicatoren.



Figuur 4.14: Absolute milieu impacts voor de productie van materialen uitgedrukt in MKI.

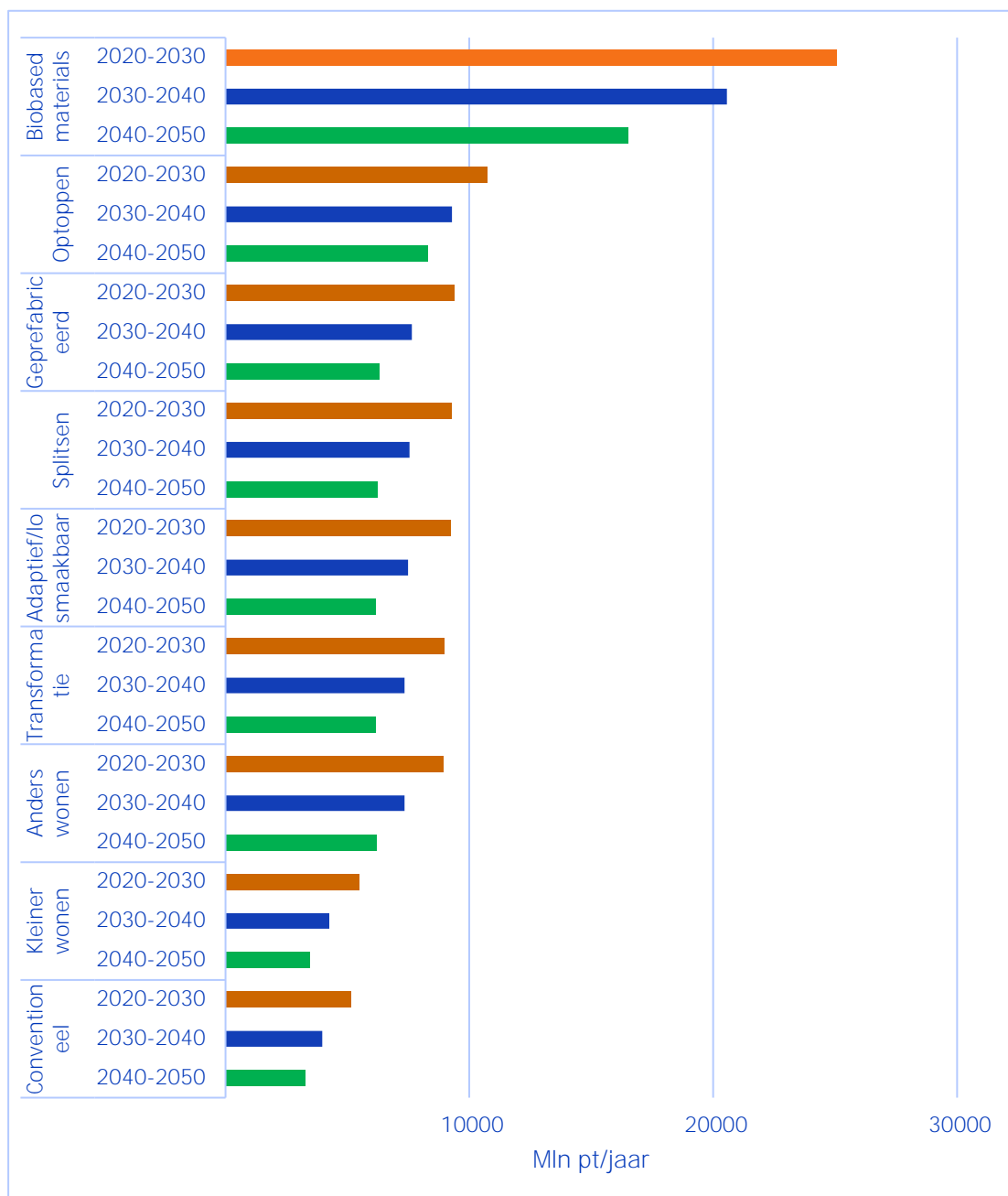
Figuur 4.15 laat zien dat de BKG voor elke maatregel afnemen over de tijd heen. Dit komt doordat de nieuwbouwpoging over de tijd heen kleiner wordt en de oplossingen in mindere mate ingezet worden over de tijd heen. Splitsen en transformatie en anders bouwen hebben de hoogste BKG-emissies. Voor alle andere maatregelen wordt een reductie in BKG-emissies behaald. De MKI en BKG vertonen gelijkenissen wat betreft impact patroon.



Figuur 4.15: Absolute milieu impacts voor de productie van materialen uitgedrukt in CO₂ eq. emissies.

Figuur 4.16 biedt inzicht in het landgebruik van het toepassen van de afzonderlijke maatregelen. Landgebruik als indicator neemt voor elke maatregel af door de tijd heen. Dit is direct gerelateerd aan het feit dat in het model de woningbouw afneemt.

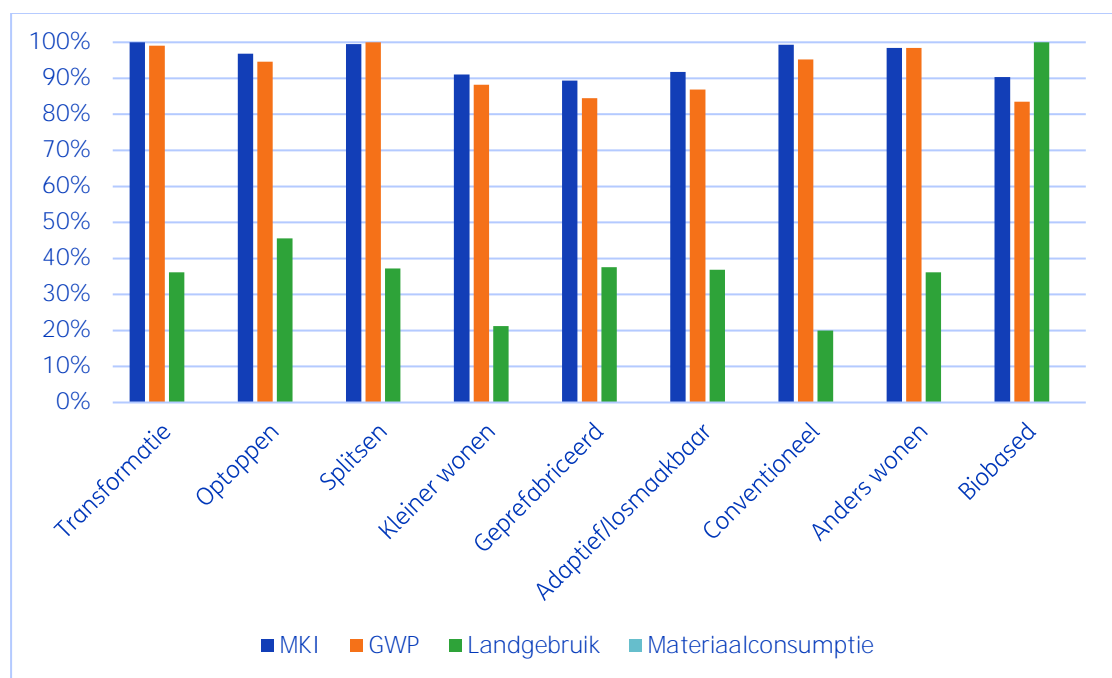
Biobased bouwen, optoppen en geprefabriceerd bouwen hebben het grootste impact op landgebruik doordat deze maatregelen veel hout (biobased materialen) gebruiken.



Figuur 4.16: Absolute milieu impacts voor de productie van materialen uitgedrukt in landgebruik. De indicator refereert naar randgebruik gerelateerde impact d.m.v. bodemkwaliteitsindex in de eenheid Pt (dimensieloos).

4.3.3 Genormaliseerde indicatoren

Figuur 4.17 laat de genormaliseerde materiaalvraag, MKI, BKG en landgebruik indicatoren zien. Hierdoor is in één figuur te zien wat de verschillende impact van de circulaire maatregelen zijn en hoe die zich tot elkaar verhouden. Wat opvalt is dat biobased bouwen veel landgebruik heeft vergeleken met de andere maatregelen. Het totale materiaalgebruik, MKI en BKG zijn echter relatief laag vergeleken met de andere maatregelen. Dit laatste is ook het geval voor prefab bouwen, dat op alle vier de indicatoren laag scoort. Voor transformatie, optoppen, splitsen en anders bouwen vallen de indicatoren MKI en BKG hoger uit ten opzichte van het conventioneel bouwen.



Figuur 4.17: Genormaliseerde milieu impact per maatregel.

4.3.4 Reflectie

De Circulaire maatregelen zijn uitgedrukt in materiaalintensiteit en verschillen per maatregel en per woningtype, waarvan appartementen (5 woonlagen of kleiner) het meest voordelig zijn in materiaalgebruik.

Maatregelen hebben maximale potentie (zie Bijlage a) onderverdeeld naar woningtype per tijdsperiode⁷⁷. De potentie van individuele maatregelen kan vergeleken worden met conventionele; bouw. De daadwerkelijke potentie van een maatregel is daarmee afhankelijk van de besparingen in materiaalgebruik en impact uitgedrukt in de indicatoren MKI, BKG, Landgebruik.

Over het algemeen levert elke maatregel een besparing op in materiaalgebruik vergeleken met ‘conventionele’ bouw. Conventioneel bouwen gebruikt absoluut gezien het meeste materiaal in elke tijdsperiode. In de periode 2020-2030 ongeveer 1,44 Mton aan materiaal. Hiervan is het merendeel beton (74%), gevolgd door bakstenen (12%), zand (4%) en

⁷⁷ in deze rapportage zijn alleen totalen weergegeven om overzichtelijkheid te borgen.

metselwerk (4%). Voor elke maatregel geldt dat de absolute hoeveelheid materiaalgebruik na 2030 afneemt over de tijd omdat de nieuwbouwpogave kleiner wordt. Welke afname van instroom het grootst is varieert per maatregel per tijdsperiode. Hieronder een korte reflectie op de potentie per maatregel in relatie tot ‘conventioneel’ bouwen.

De analyse laat zien dat voornamelijk splitsen van woningen, optoppen en transformatie een lage potentie hebben, ondanks de significante reductie in het materiaalgebruik van de maatregel per m². Wanneer we dit potentiële reikwijdte van deze maatregelen bekijken, zien we dat het materiaalgebruik en impact weinig reductie leidt. Het is dus niet mogelijk de benodigde impact te reduceren door alleen in te zetten op optoppen, renovatie en splitsen; mede omdat hiervoor niet voldoende geschikte gebouwen ter beschikking zijn (zie aannames in Bijlage a).

Voor de overige maatregelen in deze exercitie gaan het totale materiaalgebruik (kg), MKI (€) en BKG emissies (kg CO₂.eq) hand in hand. Bepaalde materialen zoals overige materialen (elektronica, kisten en lijm), metalen en isolatiematerialen hebben een grotere impact per kilo, echter is er op het niveau van de maatregelen is er weinig variatie waardoor er geen hele significante verschillen¹² zijn.

Wat ook opvalt is dat voor biobased bouwen veel landgebruik benodigd is vergeleken met de andere maatregelen. Het totale materiaalgebruik, MKI en BKG zijn echter een stuk lager dan de andere maatregelen. Dit laatste is ook het geval voor geprefabriceerd bouwen. In de reeks meest potentie worden deze maatregelen opgevolgd door adaptieve/losmaakbare woningen en kleiner wonen.

Met de implementatie van een enkele maatregel of een enkele circulaire strategie blijkt een woningsector die radicaal minder materiaal vraagt en daarmee een significante impactreductie weet te bewerkstelligen buiten bereik. De potentie en effecten van hierboven genoemde maatregelen zijn niet eenvoudig ‘optelbaar’. Desalniettemin zijn combinaties van maatregelen belangrijk om de transitie naar een circulaire woningsector effectief te maken (zie BOX 2 hieronder).

BOX 2 – Een voorbeeld waarbij verschillende circulaire maatregelen elkaar kunnen versterken tot een circulair concept:

de verdichting rondom een openbaarvervoerknooppunt door de transformatie en optopping van een kantorencomplex tot appartementsgebouwen. Dit wordt gerealiseerd met behulp van geprefabriceerde standaardmodules, vervaardigd uit lichtgewicht biobased en hergebruikte materialen. De nieuwe appartementen zijn kleiner van formaat om beter tegemoet te komen aan de grote vraag naar woonruimte.

Het implementeren van de circulaire maatregelen is complex en wordt van alle kanten beïnvloed. Maatregelen hebben een gevolg voor en zijn afhankelijk van, onder andere gedrag, kosten & financieringen, samenwerkingen, de fysieke ruimte (de bestaande gebouw voorraad en infrastructuur) en waarden. Ofwel de (positieve/negatieve) invloed van de maatregelen op de maatschappij. De vigerende normatieve beelden van de maatschappij en haar visie op de toekomst.

¹² Met uitzondering van transformatie, splitsen en optoppen waar de MKI en BKG hoog is i.v.m. materialen zoals elektronica, lijm en kisten.

5 Combinatie van oplossingen: materiaalgebruik en impact per toekomstbeeld

In dit hoofdstuk maken we gebruik van de vier geïntroduceerde toekomstbeelden in hoofdstuk 2 – Groen Land, Regionaal Geworteld, Mondiaal Ondernemend en Snelle Wereld – om de potentie van circulaire maatregelen (omschreven in hoofdstuk 3 en gekwantificeerd in hoofdstuk 4) binnen een context van onzekerheid te beoordelen. In deze vier ruimtelijke scenario's worden verschillende (ruimtelijke) beslissingen gemaakt die cruciaal zijn voor de ontwikkeling van Nederland tot 2050.

Elk scenario schetst een toekomstvisie die een denkbare normatieve interpretatie van de toekomst vormt. Zo beschrijven de toekomstbeelden allemaal een andere toekomst waarin verschillende circulaire maatregelen een belangrijke rol spelen. In dit hoofdstuk wordt gekeken in welke mate circulaire maatregelen in een toekomstbeeld naar voren komen en wat het effect is in termen van materiaalgebruik en impact. De uitkomsten zijn op basis hiervan gekwantificeerd.

5.1 Methode

5.1.1 Data input en parameterisatie

Om te bepalen welke set aan circulaire maatregelen onder een toekomstbeeld (Groen land, Mondiaal ondernemend, Regionaal geworteld, Snelle wereld) valt maken we gebruik van het de Ruimtelijke Verkenning waar de toekomstbeelden in staan omschreven waaronder (PBL, 2023). Waaronder in welke mate (intensiteit) de circulaire strategieën bij een bepaald toekomstbeeld passen. Dit is als uitgangspunt gebruikt om de vier circulaire scenario's te kwantificeren (Tabel 5.1).

In Groen land wordt elke circulaire strategie toegepast, met een focus op 'narrow the loop', 'slow the loop' en substitutie vanwege een sterke beweging richting minder consumptie en behoud van bestaande producten. In Regionaal geworteld wordt elke circulaire strategie gematigd uitgevoerd met een focus op lokale situaties en ketens, vanwege de regionale versnippering. Terwijl in Mondiaal Ondernemend de voorkeur het sterkst uitgaat naar het gebruik van duurzaam geproduceerde, biobased en gerecyclede materialen (oftewel een combinatie van 'close the loop' en substitutie) gebruikmakend van sterke internationale ketens. In Snelle wereld wordt met name gekeken naar substitutie, alhoewel andere circulaire strategieën niet achterwege gelaten worden. De focus ligt in dit toekomstbeeld

meer bij de virtuele (digitale) leefomgeving, waardoor de fysieke functioneler wordt ingericht.

Voor de inschatting van materiaalstromen in de scenario's nemen we het volgende aan:

- In het Basispad blijven de bouwmethoden, materialenmix en de verdeling tussen de woningtypen ongewijzigd ten opzichte van de 'business as usual' (zie van Oorschot & van der Voet, 2024).
- De mate van toepassing en het materiaalgebruik van circulaire maatregelen per woningtype zijn gebaseerd op beschikbare bronnen zoals wetenschappelijke en grijze literatuur, en beschikbare data van organisaties (zie hoofdstuk 4 en Bijlage a). Vervolgens wordt voor de vier toekomstbeelden de implementatie van circulaire maatregelen en verdeling tussen de woningtypen per scenario gedifferentieerd afhankelijk van de mate van uitvoering van de circulaire strategieën in de ruimtelijke verkenning van het PBL.

Door deze intensiteit te bepalen kan berekend worden in welke mate de circulaire maatregelen ingezet kunnen worden in een bepaald toekomstbeeld. Het resultaat van deze berekening (zie BOX3 voor een voorbeeld) is de hoeveelheid van het toepassen van elke maatregel per toekomstbeeld, bouwtype en jaargang. Deze input data ligt ten grondslag aan de berekeningen in de Ruimtescanner, Hestia en het materiaalstroom model.

Tabel 5.1: Vertaling van toekomstbeelden naar intensiteit van maatregelen. De tabel biedt een overzicht van de relatieve inzet van maatregelen per toekomstbeeld. De intensiteiten worden toegepast op de maximale potentie van maatregelen per toekomstbeeld, CE-strategie en jaargang. De mate van uitvoering is gebaseerd op de Ruimtelijke Verkenning (PBL, 2023). De intensiteiten behelzen een kwantificering van de mate van uitvoering uit de Ruimtelijke Verkenning ten behoeve van de modellering (zie ook BOX 3).

Toekomstbeelden	CE-strategie	Mate van uitvoering	Intensiteit
Mondiaal Ondernemend	Narrow the loop	--	10%
Mondiaal Ondernemend	Slow the loop	-	30%
Mondiaal Ondernemend	Close the loop	++	90%
Mondiaal Ondernemend	Substitutie	++	90%
Snelle Wereld	Narrow the loop	+	70%
Snelle Wereld	Slow the loop	0/+	60%
Snelle Wereld	Close the loop	+	70%
Snelle Wereld	Substitutie	++	90%
Groen Land	Narrow the loop	++	90%
Groen Land	Slow the loop	++	90%
Groen Land	Close the loop	+	70%
Groen Land	Substitutie	+ / ++	80%
Regionaal Geworteld	Narrow the loop	+	70%
Regionaal Geworteld	Slow the loop	+	70%
Regionaal Geworteld	Close the loop	+	70%
Regionaal Geworteld	Substitutie	- / 0	45%

5.1.2 Modelling

Ruimtescanner voor de nieuwbouwpoging en gerelateerde circulaire maatregelen

In dit onderzoek zijn verschillende combinaties van circulaire maatregelen per toekomstbeeld als input gebruikt in de Ruimtescanner van PBL (PBL, z.d.):

“De Ruimtescanner is ontwikkeld om toekomstige sectorale ruimteclaims te kunnen vertalen naar een geïntegreerd ruimtelijk toekomstbeeld van Nederland. Hierbij wordt gebruik gemaakt van verschillende (sociaaleconomische) toekomstscenario's om zodoende de bandbreedte van mogelijke ruimtelijke toekomstbeelden te verkennen. Op basis van de scenario's wordt de ruimtebehoefte van de verschillende ruimtelijke functies per regio bepaald met behulp van sectorale rekenmodellen.”

Voor dit onderzoek is gekozen om het Welvaart en Leefomgeving (WLO) Hoog scenario (Welvaart en Leefomgeving, 2015) te gebruiken. Dit scenario combineert een relatief hoge bevolkingsgroei met een hoge economische groei van ongeveer 2% per jaar. Op basis van dit scenario is de toekomstige bouw en sloopopgave ruimtelijk berekend voor de vier toekomstbeelden en een Basispad; op basis van verschillende keuzes in ruimtelijke ordening (zie hoofdstuk 2).

De prognose voor woonvraag ontwikkeling in de vier toekomstbeelden is in een vorig onderzoek berekend met TIGRISXL (Significance, z.d.). Wat betreft ruimtelijke keuzes, de hoeveelheid nieuwbouw en sloop in vierkante meter woonoppervlak maken we gebruik van de Ruimtescanner (PBL, z.d.), hierbij zijn voor dit onderzoek variaties op de eerdere vier verkenningen uitgevoerd (PBL, 2023).

Niet alle oplossingen kunnen direct (expliciet) ingevoerd worden in de Ruimtescanner. Dit geldt voor transformatie en renovatie, deze zitten al impliciet verwerkt in het model. Bij transformatie is dit gedaan door kantoorgebouwen die beschikbaar zijn voor transformatie te identificeren en hier de materiaalintensiteiten van transformatie aan te koppelen. Levensduur verlengende renovatie zit al indirect verwerkt in de Ruimtescanner, aangezien er wordt aangenomen dat er alleen sloop-nieuwbouw plaats vindt en sloop als gevolg van einde levensduur niet.

In de vier toekomstbeelden zijn de maatregelen optoppen, splitsen van woningen, en anders bouwen expliciet meegenomen. Hiermee wordt bedoeld dat in de Ruimtescanner de daadwerkelijke hoeveelheid nieuwbouw en/of sloop aangepast zijn. Voor optoppen en splitsen is de totale hoeveelheid nieuwbouw per woningtype per 'gridcell (ruimtelijke eenheid)¹³ gereduceerd op basis van een gewogen gemiddelde per gemeente. In de materiaalstroom analyse worden deze woningen en hun materiaal intensiteiten later weer toegevoegd. Voor de maatregel 'anders bouwen' geldt ook dat de hoeveelheid nieuwbouw van de verschillende gebouwtypes aangepast zijn. Voor deze maatregel is de hoeveelheid nieuwbouw van appartementen verhoogd en zijn de andere gebouwtypes verlaagd. Deze maatregel is ook impliciet onderdeel van de Ruimtescanner, bijvoorbeeld in het scenario waar gekozen wordt om binnen bestaande gebouwde omgeving te realiseren (verdichting) worden er meer appartementen gerealiseerd.

¹³ Rasters zijn gemaakt van een matrix met pixels (ook wel cellen genoemd), die elk een waarde bevatten die de condities bevat voor het gebied dat wordt bedekt door die cel. ([6. Rastergegevens — QGIS Documentatie documentatie](#))

BOX 3 – Voorbeeld berekening voor woning splitsing in groen land in jaargang 2020-2030.

Formule:

$$H(m, i, ce, gt, t) = M(t, gt) * I(i, ce, m, t) * T(tm) * F(imm)$$

Beschrijving:

Het aantal *H* van de maatregel Woning splitsing (*m*), in het Groen Land toekomstbeeld (*i*), de Narrow the Loop circulaire strategie (*ce*), om appartementen te realiseren (*gt*), tussen 2020 en 2030 (*t*)

=

Het maximum aantal (*M*) appartementen (*gt*) tussen 2020 en 2030 (*t*) waarvoor woning splitsing als alternatieve maatregel kan zijn om aan de woningvraag te voldoen.

*

Intensiteit (*I*), in het Groen Land toekomstbeeld (*i*), voor de Narrow the Loop circulaire strategie (*ce*), voor de maatregel woning splitsing (*m*), tussen 2020 en 2030 (*t*)

*

Absolute toepassing maatregel (*tm*) ten opzichte van *M*

*

Een factor (*F*) voor de maximum intensiteit maatregel (*imm*)

Uitwerking:

822.594 * 90% * 1% * 125% = 5.251 appartementen ontstaan uit splitsing tussen 2020 en 2030.

Het getal 822.594 staat voor het totale aantal appartementen tussen 2020 en 2030 wat gerealiseerd dient te worden. In een absoluut maximum zouden al deze woningen door middel van splitsen gerealiseerd kunnen worden. In de praktijk is dit echter onrealistisch en zal een fractie van 1% van het maximum haalbaar zijn (Copper 8, et al. 2023). De 90% is gerelateerd aan het Groen Land toekomstbeeld in combinatie met de Narrow the Loop circulaire strategie. In dit toekomstbeeld wordt dus een significant deel van het maximaal te realiseren woningen door middel van woning splitsing gerealiseerd. Er wordt in dit toekomstbeeld dus sterk ingezet op ‘narrow the loop’. De 125% is een compensatie factor (o.b.v. expert judgement) om te borgen dat het te realiseren aantal woningen niet per definitie een fractie is van het maximum, maar afhankelijk van de inzet op de maatregel in het toekomstbeeld deze ook kan overstijgen.

Hestia: Ruimtelijk energiemodel voor de verduurzaming van woningen

Om het materiaalgebruik van de verduurzaming van woningen te berekenen zijn de resultaten van de Ruimtescanner geïmporteerd in Hestia. Hestia is een ruimtelijk energiemodel dat alle woningen in Nederland omvat. Het model kan worden gebruikt om analyses, simulaties en scenario's te maken over de energietransitie in de gebouwde omgeving (van der Molen et al., 2023).

Hestia maakt onderscheid tussen vijf energetische kwaliteitsniveaus- waarbij voor elk bouwdeel apart een specifieke indeling is bepaald. De vijf niveaus (N0, N1, N2, N3, N4 genoemd) hebben oplopende kwaliteit: N0 is geheel on-geïsoleerd, N1 is de slechtst mogelijke isolatie en N4 het maximaal haalbare met verregeande maatregelen. De bouwdeelen zijn: ramen (onder), ramen (boven), dak (plat), dak (schuin), deuren, paneel, vloer, gevel, spouwmuur, kieren.

Materiaalstroom analyse

De resultaten van zowel de Ruimtescanner als Hestia worden vervolgens gebruikt in het materiaalstroom analyse model om zo het materiaalgebruik en de materiaalimpact per maatregel per toekomstbeeld te berekenen. De gebruikte materiaalintensiteiten van circulaire maatregelen zijn afkomstig uit hoofdstuk 4. Voor een uitgebreide toelichting van de methode van de materiaalstroom analyse zie het achtergrond rapport van werkpakket 1 (van Oorschot & van der Voet, 2024) en het schema in bijgevoegd in Bijlage c.

Naast het Hestia model maken we gebruik van beschikbare literatuur (Arnoldussen et al., 2022) voor het bepalen van de aantallen en het materiaalverbruik voor (energie)renovatie. Specifiek betreft dit: groot onderhoud van huurwoningen, uitbreiding, verbouw of renovatie koopwoningen en grote verbeteringen van huurwoningen. Vergelijkbaar met circulaire maatregelen wordt de intensiteit van (energie)renovatie gevarieerd afhankelijk van de intensiteit van de circulaire strategie 'slow the loop' in de toekomstbeelden.

5.2 Resultaten

Keuzes in ruimte en wonen vormen samen met variërende samenstellingen van circulaire maatregelen oplossingsroutes richting een circulaire bouweconomie. De resultaten van deze verkenning wordt gedaan in deze sectie. Eerst worden de modeluitkomsten toegelicht in sectie 5.2.1 Vervolgens wordt in 5.2.2 het materiaalgebruik per toekomstbeeld toegelicht voor zowel nieuwbouw als bestaande bouw. In 5.2.3 wordt de impact (milieukosten, broeikasgasemissies en landgebruik) per toekomstbeeld in vergelijking tot het Basispad toegelicht.

5.2.1 Modeluitkomsten: vier circulaire scenario's vergeleken met het Basispad scenario

5.2.1.1 Bevolkingsgroei

De veronderstelde bevolkingsgroei is in de vijf scenario's nagenoeg gelijk, uitgangspunt zijn hierbij de volgende inwonersaantallen: 19 miljoen in 2030, 20 miljoen in 2040 en bijna 21 miljoen in 2050. De manier waarop deze worden gehuisvest verschilt tussen de scenario's.

Tabel 5.2 geeft een overzicht met kenmerken van de vijf scenario's gebaseerd op de vier toekomstbeelden en het Basispad.

5.2.1.2 Vraag naar woningen en woonoppervlak

In het Basispad worden in de periode 2019-2050 2,5 miljoen woningen gebouwd. In omvang is de nieuwbouw het grootst in Snelle wereld (2,9 miljoen) en het kleinst in Regionaal geworteld (rond de 2 miljoen).

De meeste woningen worden gebouwd in de periode 2019-2030, om de toekomstige vraag naar woonruimte te vervullen. In het Basispad zijn dit er 1,4 miljoen. In omvang is de nieuwbouw het grootst in Groenland en Mondiaal ondernemend (beide rond de 1,5 miljoen) en het kleinst in Snelle wereld en Regionaal geworteld (beide rond de 1,3 miljoen). In de scenario's zijn deze aantallen hoger dan de beleidsplannen in de Nationale woon- en bouwagenda (zie Bours & Harmsen, 2024) en de aantallen gebruikt in hoofdstuk 4.

Voor de periode 2030-2050 worden in het Basispad ruim 1,1 miljoen woningen gebouwd. In omvang is de nieuwbouw het grootst in Snelle wereld (1,6 miljoen) en het kleinst in Regionaal geworteld (rond de 700 duizend).

Tot 2030 zullen de meeste extra woningen worden gerealiseerd om aan de woningvraag te kunnen voldoen. In deze periode zouden veel maatregelen in theorie ingezet kunnen worden om circulariteit te borgen. De grootste uitdaging is echter of deze maatregelen in zo'n korte tijd gerealiseerd kunnen worden. Op dit laatste punt zal verder ingegaan worden in hoofdstuk 6 en in het achtergrond document van WP3 (Bours & Harmsen, 2024).

5.2.1.3 Normatieve verschillen en ruimtelijke keuzes tussen scenario's

Twee bepalende factoren voor het aantal nieuwbouwwoningen zijn de normatieve verschillen in woonvoorkeuren en de ruimtelijke keuzes die voortvloeien uit verschillende toekomstscenario's

Zo varieert het woonoppervlak per capita tussen de scenario's. In Groen Land neemt het aandeel woningdelen toe en in Regionaal Geworteld is er sprake van meer generatiewonen. Voor zowel Groen Land als Regionaal Geworteld zorgen deze verschuivingen uiteindelijk voor een aanzienlijke afname in het aantal benodigde woningen ten opzichte van het Basispad, alhoewel het aantal gerealiseerde nieuwbouwwoningen tot 2030 vergelijkbaar blijven met de andere scenario's. In beide scenario's neemt het woonoppervlak per capita af ten opzichte van het Basispad. In Snelle Wereld worden huishoudens kleiner en neemt het woonoppervlak per capita toe ten opzichte van het Basispad. In Mondiaal Ondernemend is er geen dergelijke trend, echter gaan mensen wel groter wonen (toename in woonoppervlak per capita ten opzichte van het Basispad).

In Groen land er sprake van veel verdichting doordat er niet buiten bestaand stedelijk gebied wordt gebouwd. In Regionaal geworteld is er sprake van verstedelijking doordat bestaande gebouwde gebieden breiden zich uit met veel variatie tussen regio's. In Mondiaal ondernemend is er zowel sprake van verdichting als verstedelijking, met name wordt er uitgebreid naar een grote metropoolregio in het midden van het land. In Snelle wereld: er is veel willekeurige verstedelijking ('urban sprawl'), mede door het afschalen van ruimtelijke ordening en keuze voor bouw op goedkope grond. Over het algemeen gaan mensen groter wonen.

In alle toekomstbeelden, met uitzondering van Groen Land, worden minder woningen gesloopt dan in het Basispad. In Regionaal Geworteld is de woningsloop minimaal (gemiddeld minder dan 1000 woningen per jaar) dit is ten dele te verklaren door de lagere nieuwbouwcijfers en de verstedelijking van autonome regio's. De meeste woningen worden gesloopt in Groen Land, dit komt vanwege de verdichting van bestaande gebouwde omgeving en een verbod op verstedelijking.

Tabel 5.2: Kenmerkenoverzicht van de vijf ruimtelijke scenario's.

	Basispad	Groen land	Regionaal Geworteld	Mondiaal ondernemend	Snelle wereld
Ruimtelijk patroon					
2019-2050	Verstedelijking & verdichting	Verdichting	Verstedelijking	Verstedelijking & verdichting	Verstedelijking
Woonoppervlak per capita (in m2 / pp)					
2019-2030	59,5	58,6	59,7	60,1	59,2
2030-2040	59,4	57,6	58,9	60,2	61,1
2040-2050	59,6	56,7	58,1	60,8	62
Nieuwbouw (in miljoenen woningen)					
2019-2030	1,39	1,51	1,28	1,54	1,3
2030-2040	0,63	0,54	0,42	0,64	0,95
2040-2050	0,5	0,37	0,3	0,56	0,61
Waarvan appartementen (als percentage van het totaal)					
2019-2030	42%	62%	43%	55%	56%
2030-2040	32%	50%	29%	45%	44%
2040-2050	29%	52%	27%	44%	31%
Waarvan rijwoningen (als percentage van het totaal)					
2019-2030	50%	32%	33%	39%	32%
2030-2040	65%	47%	32%	53%	45%
2040-2050	65%	45%	25%	52%	52%
Waarvan twee-onder-een-kap (als percentage van het totaal)					
2019-2030	5%	3%	21%	4%	9%
2030-2040	4%	3%	39%	2%	11%
2040-2050	6%	4%	47%	4%	18%
Waarvan vrijstaand (als percentage van het totaal)					
2019-2030	3%	3%	3%	3%	3%
2030-2040	<0,01%	<0,01%	0,14%	0,01%	0,01%
2040-2050	<0,01%	<0,01%	0,23%	<0,1%	0%
Sloop (in miljoenen woningen)					
2019-2030	0,2	0,31	0,07	0,19	0,11
2030-2040	0,12	0,10	0,01	0,08	0,06
2040-2050	0,09	0,06	0,01	0,04	0,01

Circulaire maatregelen gerelateerd aan nieuwbouw

Op basis van eerder onderzoek (Bijlage a) zijn schattingen van de toekomstige implementatie van circulaire maatregelen geïnventariseerd, welke per toekomstbeeld gedifferentieerd zijn in de mate van toepassing van de circulaire maatregelen (zie Tabel 5.3 en Figuur 5.1). De maatregelen in deze sectie zijn gerelateerd aan nieuwbouw (het faciliteren van een toename in de woningvraag)

Het aandeel appartementen toe in alle toekomstbeelden behalve Regionaal Geworteld (Tabel 5.3), dit heeft te maken met anders bouwen en het ruimtelijke patroon. Zowel in het Basispad (8%) als in de toekomstbeelden (0,2%-10%) levert transformatie van utiliteitsgebouwen naar woningen een bescheiden bijdrage aan de groei van het aantal woningen. Ook het optoppen van woningen levert een bescheiden bijdrage aan de groei van het aantal woningen (1-11%), daarentegen is het splitsen van woningen verwaarloosbaar (~0-1%). In alle toekomstbeelden blijven er woningen volgens conventionele methoden gebouwd worden¹⁴ (14-48%).

Andere circulaire maatregelen worden in verschillende mate toegepast in de toekomstbeelden (Tabel 5.3), deze variatie komt door de kenmerken van de toekomstbeelden. Biobased bouwen wordt gemiddeld het meest toegepast (17-37%), opgevolgd door losmaakbaar (adaptief) bouwen (8-25%) en prefab bouwen (4-34%).

Tabel 5.3: Verdeling aandeel conventionele bouw en het circulaire maatregelen voor het basispad en de vier toekomstbeelden.

Scenario	Conventioneel	Prefab	Optoppen	Splitsen	Transformatie	Losmaakbaar	Biobased
<i>Basispad</i>	92%	0%	0%	0%	8%	0%	0%
<i>Groen Land</i>	14%	34%	11%	0,5%	10%	25%	28%
<i>Regionaal Geworteld</i>	31%	23%	11%	0,6%	5%	17%	17%
<i>Mondiaal Ondernemend</i>	48%	4%	1%	0,1%	4%	8%	35%
<i>Snelle Wereld</i>	18%	27%	8%	0,4%	0,2%	17%	37%

In Figuur 5.1 wordt de ontwikkeling van de woningvoorraad en de toepassing van de verschillende circulaire maatregelen tussen 2019 en 2050 per scenario weergegeven. In het Basispad worden in de periode 2019-2050 2,5 miljoen woningen gebouwd. Het aantal gebouwde woningen zijn het grootst in Snelle wereld en Mondiaal ondernemend (rond de 2,9 en 2,7 miljoen respectievelijk) en het kleinst in Groenland en Regionaal geworteld (rond de 2,4 en 2 miljoen respectievelijk). De meeste woningen worden gebouwd¹⁵ in de periode 2019-2030, om de toekomstige vraag naar woonruimte te vervullen. In deze periode kunnen daardoor ook de meeste circulaire maatregelen worden toegepast. De grote

¹⁴ binnen conventionele bouw worden secundaire materialen en/of duurzaam geproduceerde primaire materialen toegepast.

¹⁵ In de scenario's zijn deze aantallen hoger dan de beleidsplannen in de Nationale woon- en bouwagenda.

verschillen tussen de nieuwbouwaantallen van de scenario's vormen zich pas in de periode na 2030.

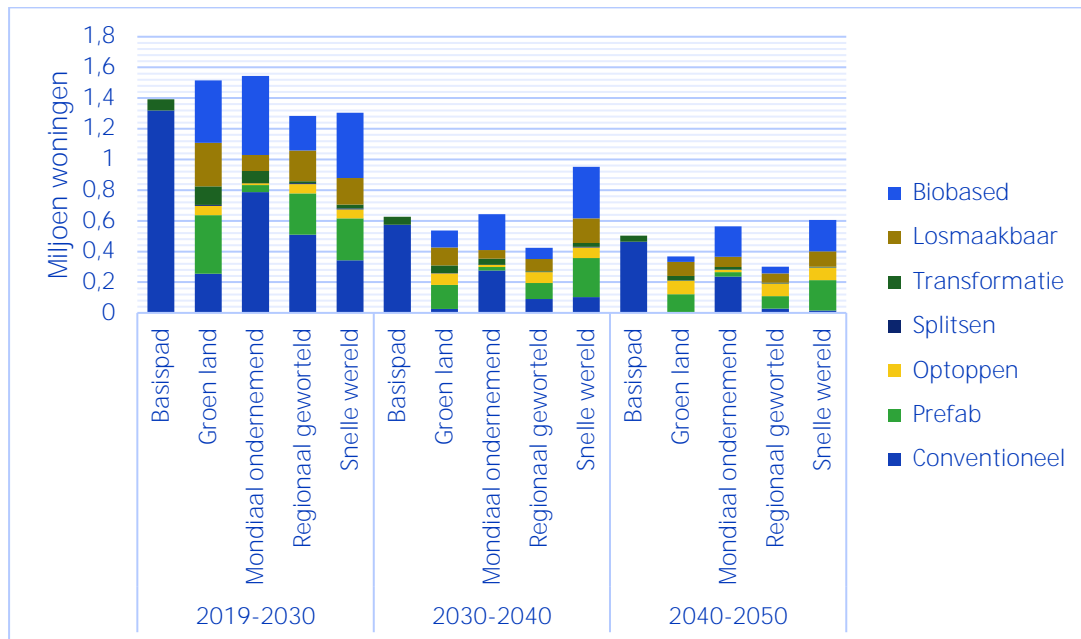
Voor zowel Groen land als Regionaal geworteld zorgen alternatieve visies op huisvesting uiteindelijk voor een aanzienlijke afname in het aantal benodigde nieuwbouwwoningen ten opzichte van het Basispad. Voor Groen land komt dit door een toename in het delen van een woning met meerdere huishoudens, voor Regionaal geworteld komt dit door een toename in generatie wonen. Beide zijn gemodelleerd als coëfficiënt dat het aantal huishoudens per woning toebedeeld. Doordat het totaal woonoppervlak kleiner is, varieert als gevolg hiervan het woonoppervlak per capita tussen de scenario's met een aantal procentpunten.

Daarnaast hebben visies op ruimtelijke ordening effect op de verdeling tussen woningtype en de hoeveelheid sloop-nieuwbouw dat plaatsvindt in de toekomstbeelden. Bijvoorbeeld, het aandeel appartementen neemt toe in alle toekomstbeelden behalve Regionaal geworteld. De meeste woningen worden gesloopt in Groen land vanwege een verbod op verstedelijking buiten bestaand bebouwd gebied waardoor alleen de bestaande gebouwde omgeving kan worden verdicht. In de rest van de toekomstbeelden, worden minder woningen gesloopt dan in het Basispad. In Regionaal geworteld is de woningsloop minimaal (gemiddeld minder dan 1000 per jaar), dit heeft enerzijds te maken met de lage nieuwbouwaantallen en anderzijds met de hoge mate waarop verstedelijking plaatsvindt buiten het bestaande gebouwde gebied. Ook deze dynamiek heeft invloed op het woonoppervlak per capita en uiteindelijk de materiaalstromen.

Met het narratief van de scenario's in het achterhoofd neemt het aandeel van de meeste circulaire maatregelen toe per decennium en wordt er minder conventioneel gebouwd. In Groen land wordt in 2040-2050 afgezien van conventioneel bouwen (0%). Daarentegen blijft conventioneel bouwen in Mondiaal ondernemend (met 0,24 miljoen woningen, circa 42%) een belangrijk aandeel van de gebruikte bouwmethoden.

In de circulaire scenario's worden prefab, losmaakbaar en (met name) biobased het meeste toegepast – in aantallen – in de periode 2019-2030. Dezelfde mate van toepassing van deze circulaire maatregelen blijft doorzetten naar 2030-2040 en 2040-2050. Tussen 2030-2040 neemt de toepassing¹⁶ van transformatie en optoppen toe (het meest bij Groen land en het minst bij Mondiaal ondernemend). Na 2040 neemt transformatie weer af, mede door een afname in de nieuwbouwaantallen en beschikbare bedrijfsterreinen. Het splitsen van woningen wordt in alle toekomstbeelden relatief weinig toegepast.

¹⁶ Dit verwijst naar de mate van toepassing in de scenario's. De potentie van circulaire maatregelen is het hoogst zodra het aantal beschikbare woningen en de vraag naar woonoppervlak het grootst is.



Figuur 5.1: Verdeling aandeel conventionele bouw en het circulaire maatregelen voor het Basispad en de vier toekomstbeelden

Bestaande bouw: (Energie)renovatie

De omvang van (energie)renovatie wisselt tussen de vier toekomstbeelden. Dit komt door de differentiatie in voorkeuren voor ‘slow the loop’ maatregelen. In alle vijf de scenario’s is (energie)renovatie van bestaande bouw meegenomen. De omvang van herstel en verbouw is per toekomstbeeld gedifferentieerd op basis van de schattingen uit het EIB en Metabolic onderzoek (Arnoldussen et al., 2022). Aangezien renovatie als (functionele-) levensduurverlengde maatregel past binnen de circulaire strategie ‘slow the loop’, is de omvang van deze maatregel geschaald naar de verwachte intensiteit binnen de toekomstbeelden. Hierdoor valt voor alle vier de toekomstbeelden de omvang van (energie)renovatie lager uit ten opzichte van het Basispad.

Voor de verduurzaming van de bestaande voorraad betreft het isolerende werkzaamheden aan ramen, spouwmuren, vloeren en daken. Deze werkzaamheden zijn afzonderlijk gemodelleerd in Hestia, de uitkomsten geeft een stabiel beeld tussen de toekomstbeelden, met minimale schommeling in de hoeveelheden. Dit heeft te maken met de omvang van de bestaande woningvoorraad, de woningvoorraad is vele male groter dan de cumulatieve instroom. Daarnaast neemt de bestaande voorraad nauwelijks af, dit verschil tussen de toekomstbeelden is verwaarloosbaar en komt vanwege de lage sloopcijfers.

Hestia laat zien dat verduurzaming van de bestaande voorraad als gevolg van energierenovatie niet gevoelig is voor keuzes¹⁷ in ruimtelijke ordening van nieuwbouw (ondanks variaties in de sloopcijfers).

¹⁷ De verduurzaming van bestaande bouw is gevoelig voor andere factoren dan ruimtelijke keuzes zoals bijvoorbeeld de energieprijzen. Dit is niet meegenomen in het huidige model en zou vervolgonderzoek meerwaarde kunnen hebben.

5.2.2 Materiaalstromen

De materiaalstromen van de verschillende toekomstbeelden (Groen Land, Regionaal Geworteld, Mondiaal Ondernemend en Snelle Wereld) en het Basispad worden omschreven in de volgende secties eerst voor nieuwbouw en vervolgens voor (energie)renovatie (5.2.2.1 en 5.2.2.2 respectievelijk).

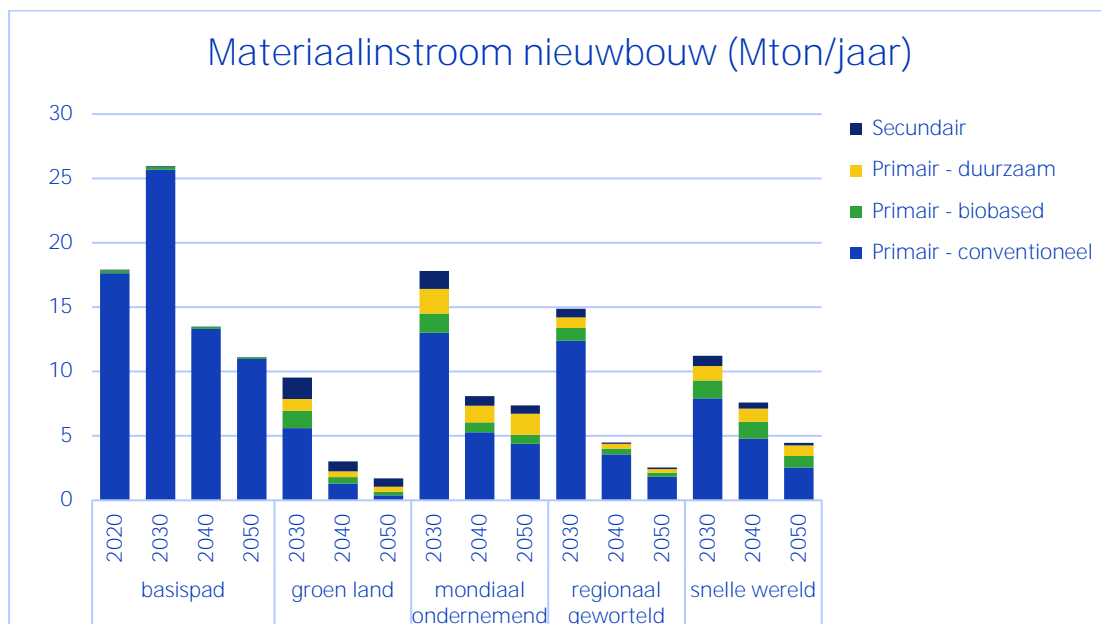
5.2.2.1 Nieuwbouw

Materiaalinstream

In alle vier de toekomstbeelden neemt de materiaalinstream aanzienlijk af ten opzichte van het Basispad (Figuur 5.2). De invloeden op deze afname heeft twee primaire aanleidingen. Allereerst, de keuzes rondom huisvesting en ruimtelijke ordening. Ten tweede, de bijdrage van de materiaalintensiteiten van circulaire maatregelen.

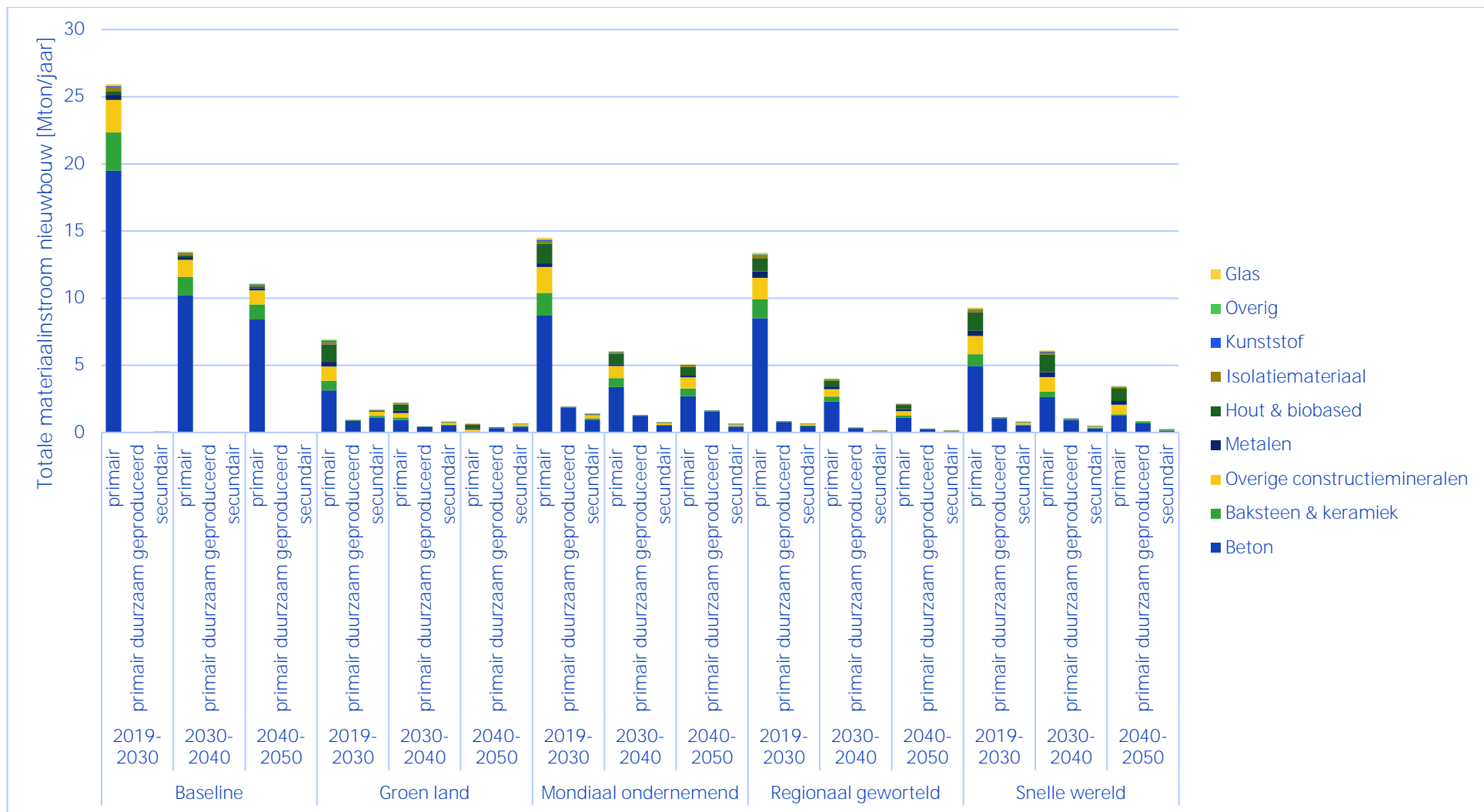
Keuzes rondom huisvesting en ruimtelijke ordening hebben een sterke invloed op materiaalstromen. In 2019-2030 is er een duidelijke piek in het aantal gerealiseerde woningen (Tabel 2), deze trend is duidelijk terug te zien in de materiaalinstream. Tussen het Basispad en de vier toekomstbeelden zijn verschillen in termen van de aantallen gerealiseerde woningen, type woningen en woonoppervlak per capita ook terug te zien over tijd. Ondanks de beperkte toepassing van circulaire maatregelen, heeft Regionaal geworteld na Groen land de laagste materiaalinstream tussen 2030-2050. In contrast zijn de jaarlijkse materiaalstromen voor Mondiaal ondernemend circa 50% groter tussen 2030-2050.

Naast de invloed van keuzes rondom huisvesting en ruimte heeft de combinatie van verschillende circulaire maatregelen voor nieuwbouw een aanzienlijke invloed op de materiaalinstream. Deze stapeling is met name te zien bij Groen land, in dit toekomstbeeld worden (op Mondiaal Ondernemend na) de meeste woningen gerealiseerd in 2019-2030. Desalniettemin heeft Groen Land de laagste instroom (gemiddeld 4,76 Mton / jaar). Tussen 2019 en 2050 heeft Snelle Wereld het hoogste aantal gerealiseerde nieuwbouw, dit valt echter niet terug te zien in de materiaalinstream (gemiddeld 7,76 Mton / jaar) vergeleken met Mondiaal Ondernemend (gemiddeld 11,09 Mton / jaar) doordat er meer is gedifferentieerd met circulaire maatregelen.



Figuur 5.2: Materiaalinstroom voor nieuwbouw

Figuur 5.3 weergeeft de materiaalinstroom voor nieuwbouw op materiaalniveau. Beton, baksteen & keramiek, en overige constructie mineralen blijven de primaire instroom domineren. Vanuit secundaire materialen is het grootste aandeel beton. Hetzelfde geldt voor duurzame/duurzaam geproduceerde materialen.



Figuur 5.3: Totale materiaalinstream van nieuwbouw in Mton/jaar.

Materiaaluitstroom

Een variërende herkomst van materialen kleurt de materiaalinstroom, de bepalende factoren zijn de materiaaluitstroom en het aandeel 'closed loop' recycling van de uitstroom. Naast primaire conventionele materialen, vormen ook secundaire, duurzame en biobased materialen een belangrijk aandeel van de instroom (Figuur 5.4). Het totale aandeel neemt voor alle toekomstbeelden toe over tijd (voor Groen land tot ~80% tussen 2040-2050).

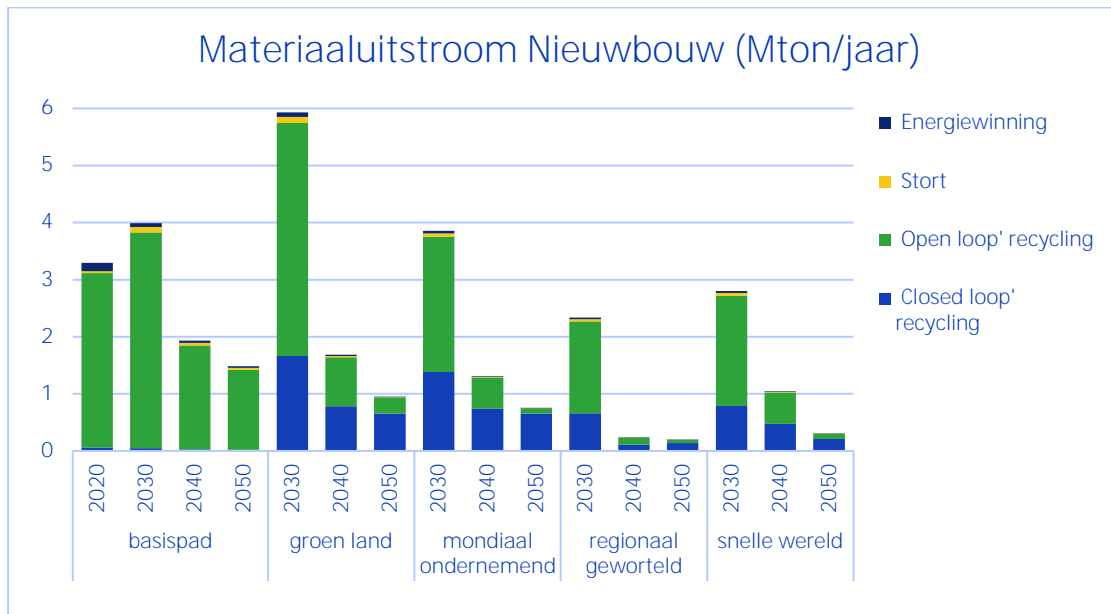
Het aandeel duurzame en biobased materialen neemt toe over tijd. Enerzijds komt dit door een toename in biobased bouwen – voor Snelle wereld is dit 0,81 Mton / jaar (20%) en voor Groen land is dit 0,39 Mton / jaar (23%) tussen 2040-2050. Anderzijds doordat het gebruik van duurzaam geproduceerde materialen toeneemt – voor Groen land is dit 0,27 Mton / jaar (23%) en voor Mondiaal ondernemend 1,65 Mton / jaar (22%) tussen 2040-2050.

Het aandeel secundair schommelt tussen 2019-2050. Voor sommige toekomstbeelden neemt het aandeel secundair toe, en voor sommige neemt het af. Dit is grotendeels afhankelijk van de hoeveelheid sloop. Het aandeel secundaire instroom is het hoogst bij Groen land (17-38%), dit komt door verdichting van het bestaand stedelijk gebied waardoor er meer sloop-nieuwbouw plaatsvindt. In Mondiaal ondernemend is het aandeel secundaire instroom slechts 9%.

Echter vertelt de materiaalinstroom slechts een deel van het verhaal. Om grip te krijgen op hoe de instroom van secundaire materialen ontwikkeld, moet naar de materiaaluitstroom gekeken worden. Een andere bepalende factor is dat het aandeel 'closed loop' recycling toeneemt over tijd. Deze trend wordt waargenomen bij alle vier de toekomstbeelden. In het specifiek is het aandeel 'closed loop' recycling bij Mondiaal ondernemend het hoogst (37% tussen 2019-2030 en 87% tussen 2040-2050).

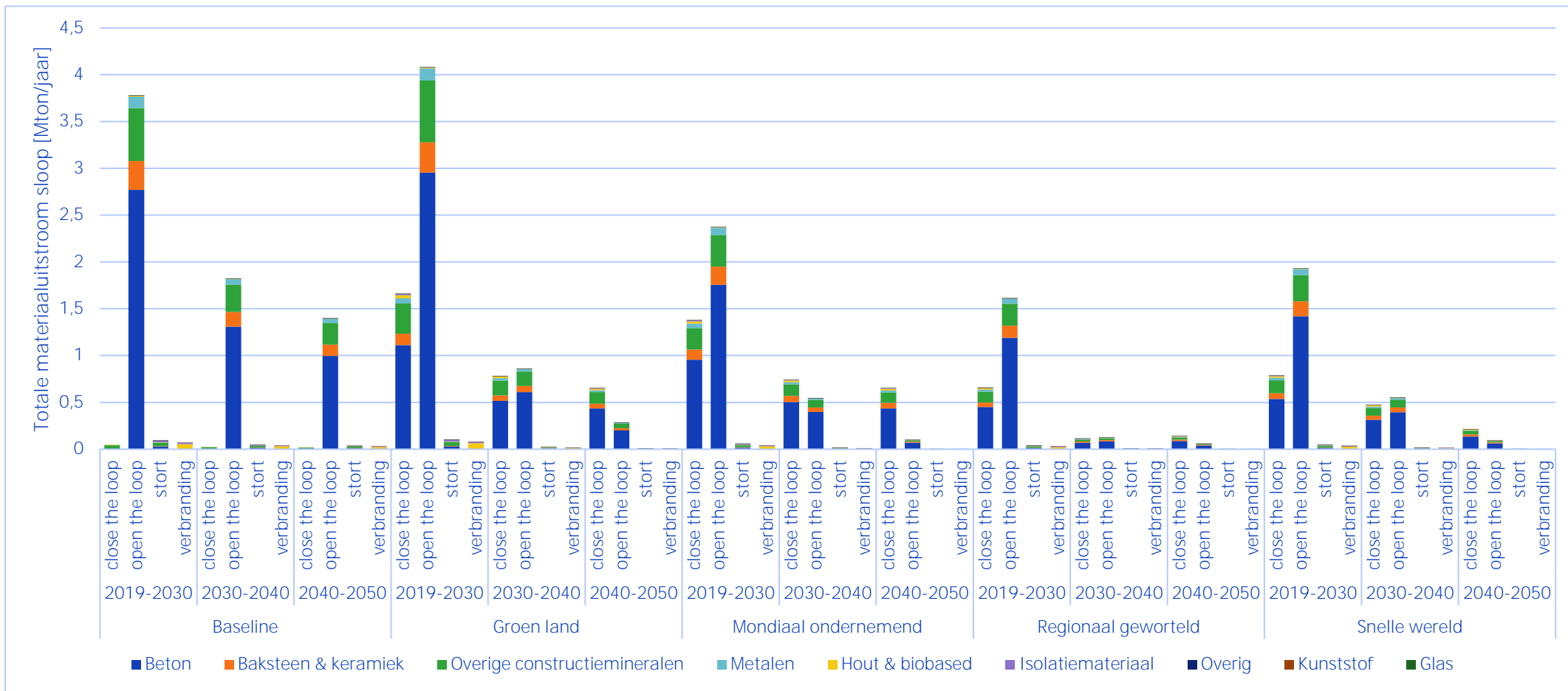
Kortom, met het sluiten van de kringloop kan slechts een bescheiden percentage van de materiaalinstroom vervuld worden bij Mondiaal ondernemend door de discrepantie tussen de materiaal- instroom en uitstroom (gemiddeld 11,09 en 1,97 Mton / jaar tussen 2030-2050) ofwel 17,8%. Ten opzichte van Groen Land met een kleinere discrepantie tussen materiaal- instroom en uitstroom (gemiddeld 4,76 en 2,85 Mton / jaar tussen 2030-2050) ofwel 60%.

Voor het Basispad blijft het aandeel 'closed loop' en 'open loop' recycling nagenoeg constant. In alle scenario's is sloop en energiewinning nihil.



Figuur 5.4: Materiaal uitstromen als gevolg van sloop-nieuwbouw.

Figuur 5.5 weergeeft de materiaalinstroom voor nieuwbouw op materiaalniveau. Beton, baksteen & keramiek, en overige constructiematerialen blijven de uitstroom domineren. Vanuit 'closed loop' recyclen is het grootste aandeel beton, opgevolgd door overige constructiematerialen en baksteen & keramiek.



Figuur 5.5: Totale materiaaluitstroom van nieuwbouw in Mton/jaar.

5.2.2.2 Bestaande bouw: (energie)renovatie

Materiaalinstroom

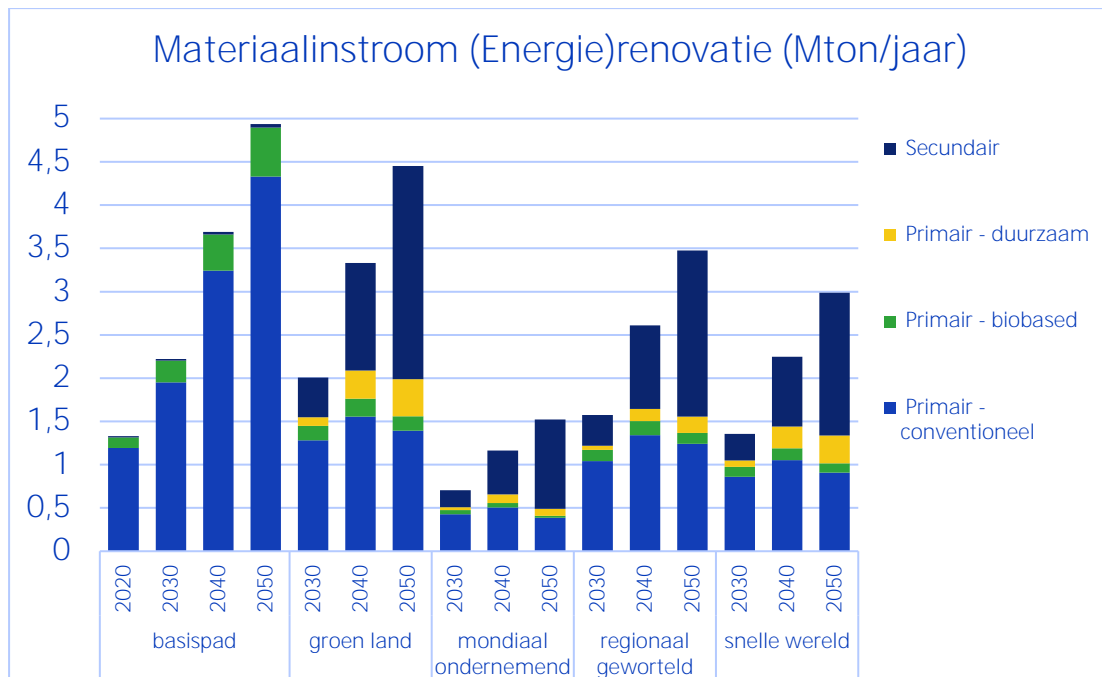
De hoeveelheid (energie)renovatie is het hoogst in het Basispad, de verklaring hiervoor is een keuze in de modellering. Kijkend naar de vier toekomstbeelden is de omvang van (energie)renovatie het hoogst in Groen Land, opgevolgd door Regionaal Geworteld, Snelle Wereld en het laagst in Mondiaal Ondernemend. Dit heeft te maken met de inzet van maatregelen gerelateerd aan 'slow the loop' in de toekomstbeelden.

(Energie)renovatie maakt een belangrijk deel uit van de totale materiaalstromen in de woningsector, renovatie in- en uitstromen hebben andere kenmerken dan nieuwbouw. In tegenstelling tot nieuwbouw neemt (energie)renovatie de komende decennia toe. Deze trend is terug te zien in de materiaalinstroom (Figuur 21). Hierdoor krijgt (energie)renovatie een steeds belangrijkere rol in de circulaire woningsector. Ook voor (energie)renovatie is er een mismatch tussen de materiaalinstroom en materiaaluitstroom, deze is echter klein en vergelijkbaar in ordegraate (75-80% van de instroom). Door het verbeteren van kringloopsluiting wordt het potentieel voor recycling en hergebruik aanzienlijk vergroot in vergelijking met nieuwbouw. In de praktijk zijn deze materialen echter niet of nauwelijks losmaakbaar (denk bijvoorbeeld aan PUR dat als opvulmateriaal wordt gebruikt en bindt aan hout).

Naast verschillen in de omvang zijn er ook verschillen aan te merken in de herkomst van de materiaalinstromen – conventionele, secundaire, biobased en duurzaam geproduceerde materialen. Voor het Basispad bestaat de materiaalinstroom uit primair conventionele materialen en biobased materialen (hout). In conventionele (energie)renovatie is het hout een veelvoorkomend materiaal en vormt circa 11% van de totale instroom. Doordat de omvang van de instroom toeneemt is dit bij het Basispad ook het geval voor biobased materialen.

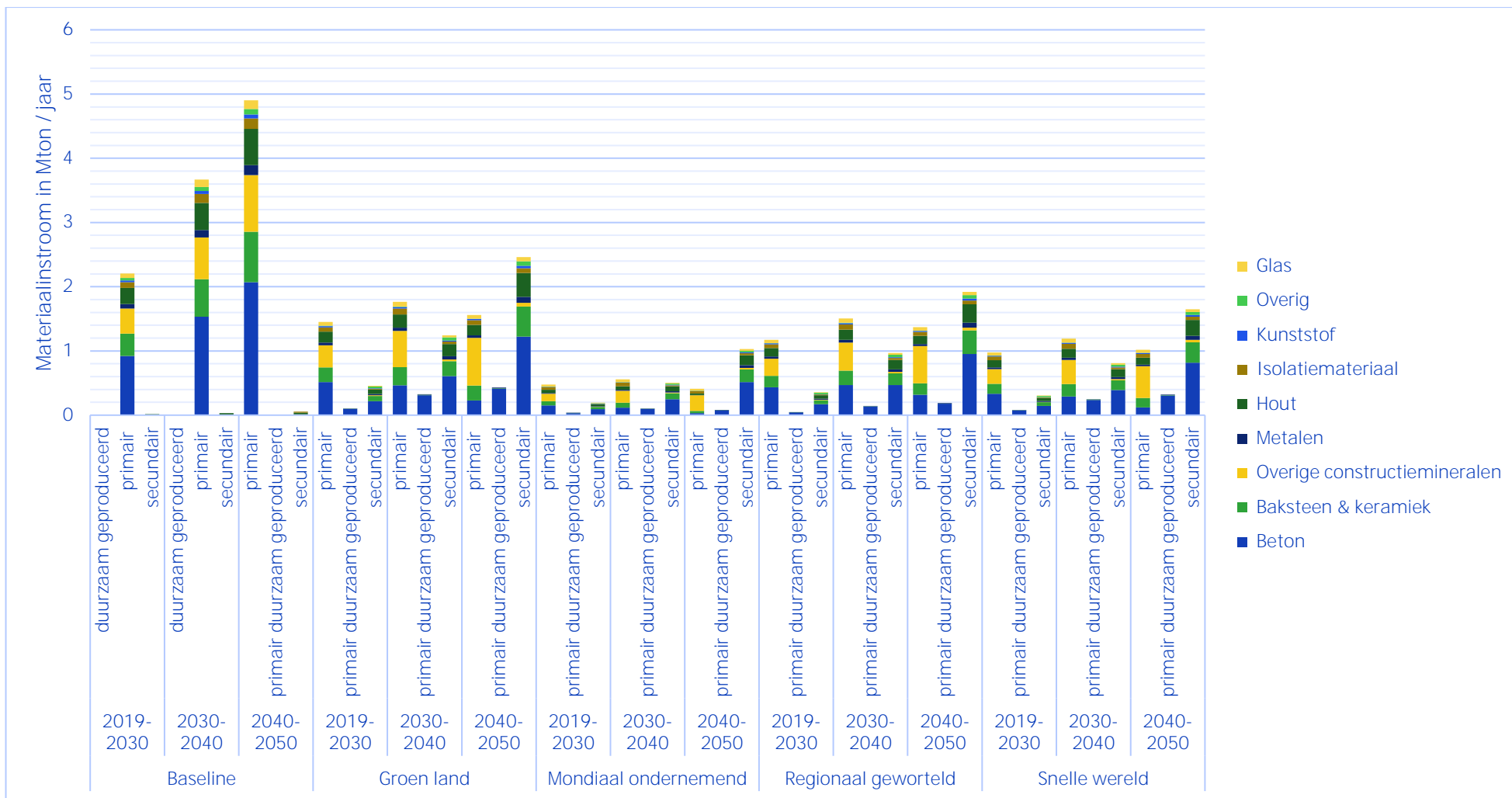
In de vier toekomstbeelden neemt het gebruik van secundaire materialen en duurzaam geproduceerde materialen toe. Het gebruik van duurzaam geproduceerde materialen is het grootst in Snelle Wereld opgevolgd door Groen Land. In alle vier de toekomstbeelden neemt de instroom van biobased materialen met een aantal procentpunten af. Dit heeft te maken met het gebruik van gerecycled hout om de vraag te vervullen. Deze materiaalstroom maakt onderdeel uit van de secundaire instroom. Daarnaast is er geen rekening gehouden met een verschuiving in het aandeel biobased materialen in de materialenmix, dit is wel te verwachten de komende decennia waardoor het aandeel zal toenemen, vergelijkbaar met nieuwbouw. In alle toekomstbeelden neemt het aandeel secundair in 2040-2050 toe en overstijgt de 50% grens (68% bij Mondiaal Ondernemend en circa 55% voor de andere toekomstbeelden).

Figuur 5.6 weergeeft de materiaalinstroom van (energie)renovatie op materiaal niveau. Doordat de mismatch tussen in- en uitstroom kleiner is bij (energie)renovatie ontstaat er een verschuiving in het materiaalgebruik.



Figuur 5.6: Materiaalinstroom van (energie)renovatie.

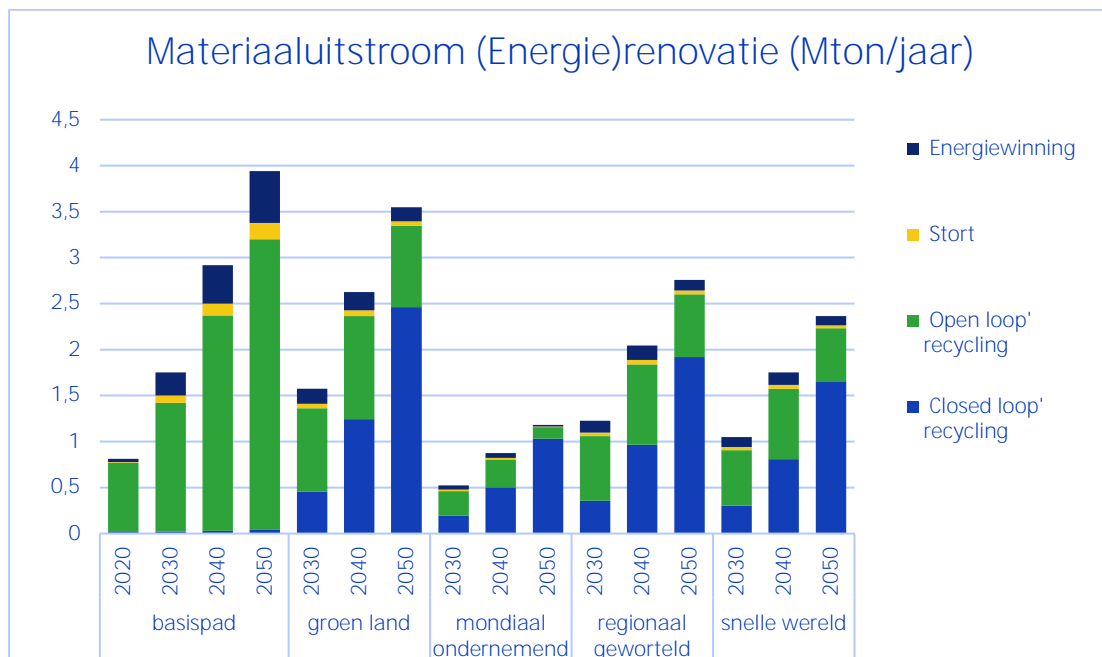
Uit Figuur 5.7 kan herleid worden dat naast eerder opgemerkte verschuiving in het gebruik van secundair hout, is deze verschuiving ook op te merken voor andere materialen zoals beton, baksteen & keramiek. Er wordt desondanks ook nog primair materiaalgebruik, waarbij het aandeel duurzaam beton aanzienlijk toeneemt over tijd.



Figuur 5.7: Totale materiaalinstroom van renovatie in Mton/jaar.

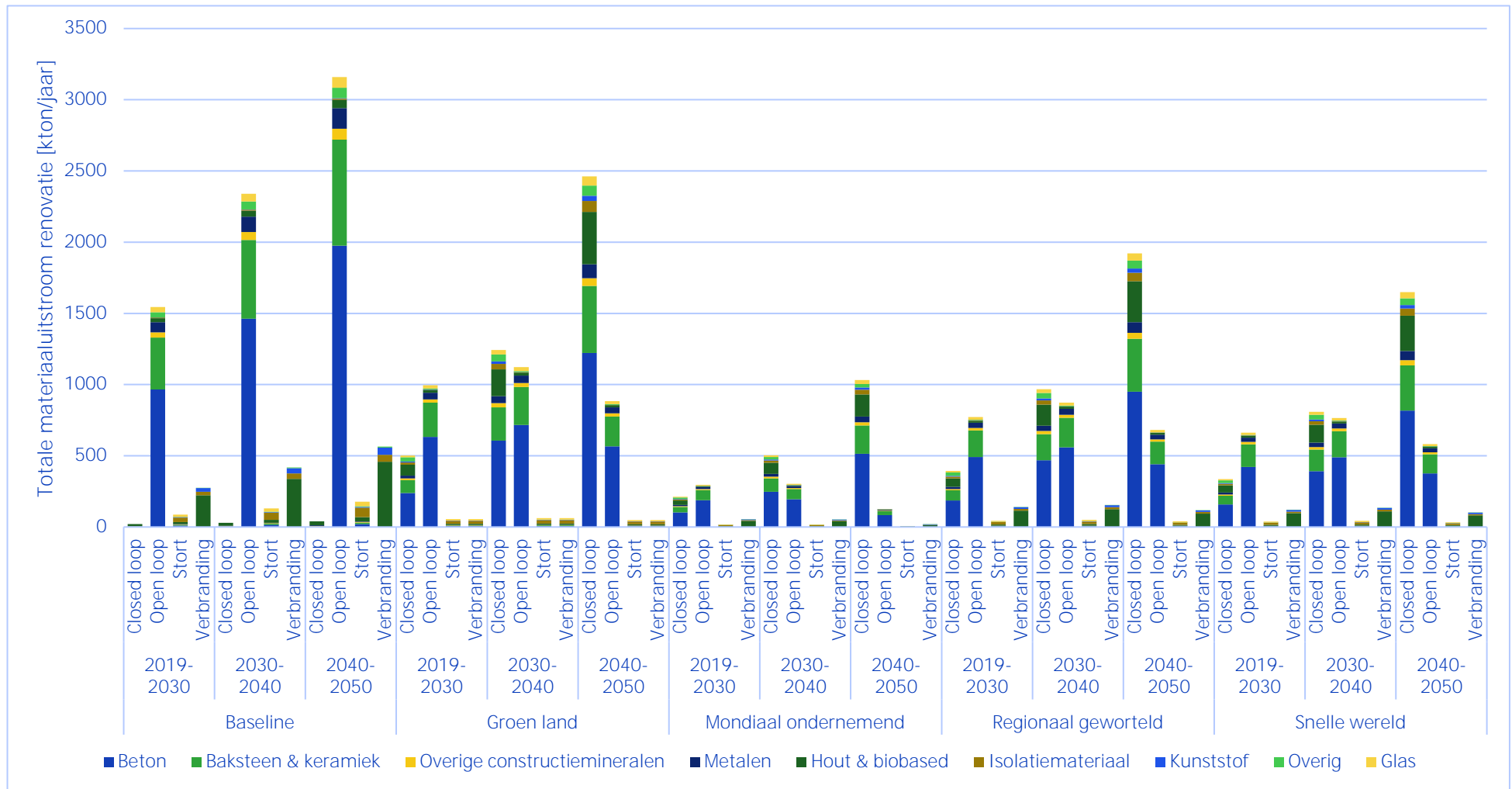
Materiaaluitstroom

Om meer inzicht te krijgen in hoe de instroom van secundaire materialen wordt gevormd, is de materiaaluitstroom van belang (Figuur 5.8). Voor Mondiaal Ondernemend is het aandeel ‘closed loop’ van de materiaaluitstroom het grootst (87% in 2040-2050). Voor Groen Land, Regionaal Geworteld en Snelle Wereld zijn de aandelen ‘closed loop’ recycling vergelijkbaar (70% in 2040-2050).



Figuur 5.8: Materiaaluitstroom van (energie)renovatie.

Naast ‘close the loop’ is de grootste uitstroom ‘open loop’ recyclen, echter is voor (energie)renovatie het aandeel stort en verbranding gezamenlijk 5-10% in 2030-2040 en 3-5% in 2040-2050 in de toekomstbeelden en 14% voor het Basispad. Dit heeft te maken met de hoeveelheid hout, isolatiemateriaal en kunststoffen dat onderdeel is van de materiaaluitstroom.

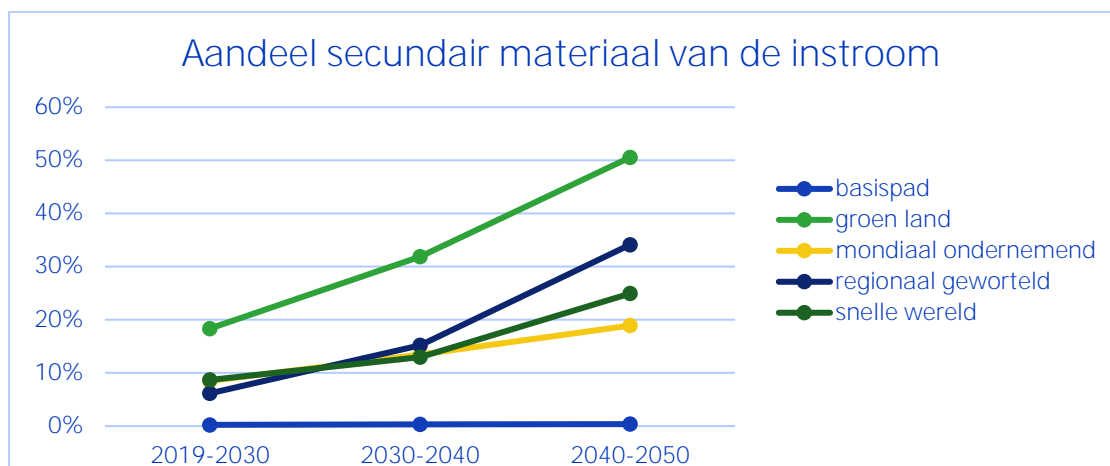


Figuur 5.9: Totale materiaaluitstroom van renovatie in kton/jaar onderverdeeld naar bestemmingen voor end-of-life.

5.2.2.3 Secundaire instroom vs ‘closed loop’ recylen

Zowel voor nieuwbouw als (energie)renovatie kan de secundaire instroom een belangrijk aandeel van de materiaalvraag vervullen. De Nationale ambitie om 50% minder primaire grondstoffen in 2030 en 100% reductie in 2050 blijkt binnen de modellering van dit onderzoek niet haalbaar te zijn. Van de toekomstbeelden behaald Groen Land het hoogste percentage secundaire materialen, met ongeveer 50% tussen 2040-2050.

Het aandeel closed loop recycling van de totale uitstroom neemt toe in alle toekomstbeelden ondanks grote spreiding. In het Basispad blijft het aandeel secundaire materialen nagenoeg stabiel op 0-0,3%. Van de vijf scenario's heeft Groen Land met 51% in 2040-2050 het grootste aandeel secundaire materialen van de materiaalinstroom. Opgevolgd door Regionaal Geworteld (34%), Snelle wereld (25%) en Mondiaal Ondernemend (19%) respectievelijk (Figuur 5.10). In de jaargangen 2019-2030 (6-9%) en 2030-2040 (13-15%) hebben Regionaal Geworteld, Snelle Wereld en Mondiaal Ondernemend een vergelijkbaar aandeel secundaire materialen van de totale materiaalinstroom. Groen Land heeft met 19% en 32% respectievelijk een voorsprong, mede door de lage omvang van de totale materiaalinstroom en hoge sloopecijfers.



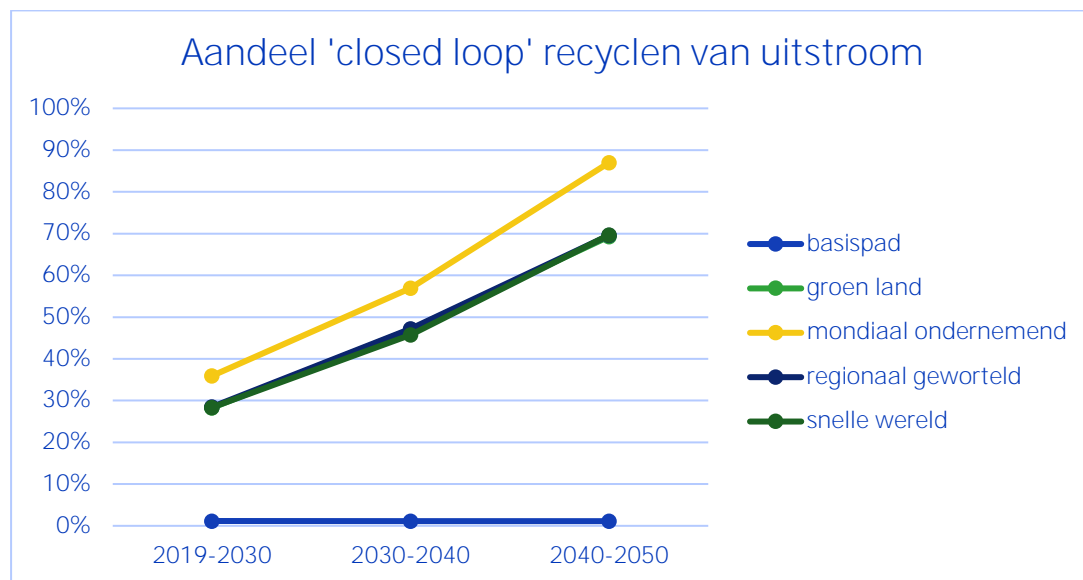
Figuur 5.10: Aandeel secundaire materialen van de totale materiaalinstroom.

De omvang van de secundaire instroom wordt bepaald door de omvang van de materiaaluitstroom en het aandeel ‘closed loop’ recylen daarin. Uiteindelijk is de verhouding tussen deze en de omvang van vraag (materiaalinstroom) wat de effectiviteit van ‘closed loop’ recylen bepaald.

In tegenstelling tot het aandeel van de instroom heeft Mondiaal Ondernemend het hoogste aandeel ‘closed loop’ recylen van de totale uitstroom (Figuur 5.11). De discrepantie tussen het aandeel secundaire materialen van de in- en uitstroom heeft grotendeels te maken met de omvang van de in- en uitstroom zelf. Mondiaal Ondernemend heeft een grote mismatch tussen de in- en uitstroom van de nieuwbouw, en een lage omvang van (energie)renovatie ten opzichte van nieuwbouw. Hierdoor kan slechts 19% van de totale vraag voorzien worden met secundaire grondstoffen, in tegenstelling tot Groen Land waar deze verschillen kleiner zijn (de omvang nieuwbouw versus de omvang (energie)renovatie enerzijds en de mismatch tussen de materiaal in- en uitstroom anderzijds).

Het aandeel secundaire instroom van Snelle Wereld is lager dan Regionaal Geworteld, dit heeft naast de kleinere omvang van (energie)renovatie ook te maken met de grotere

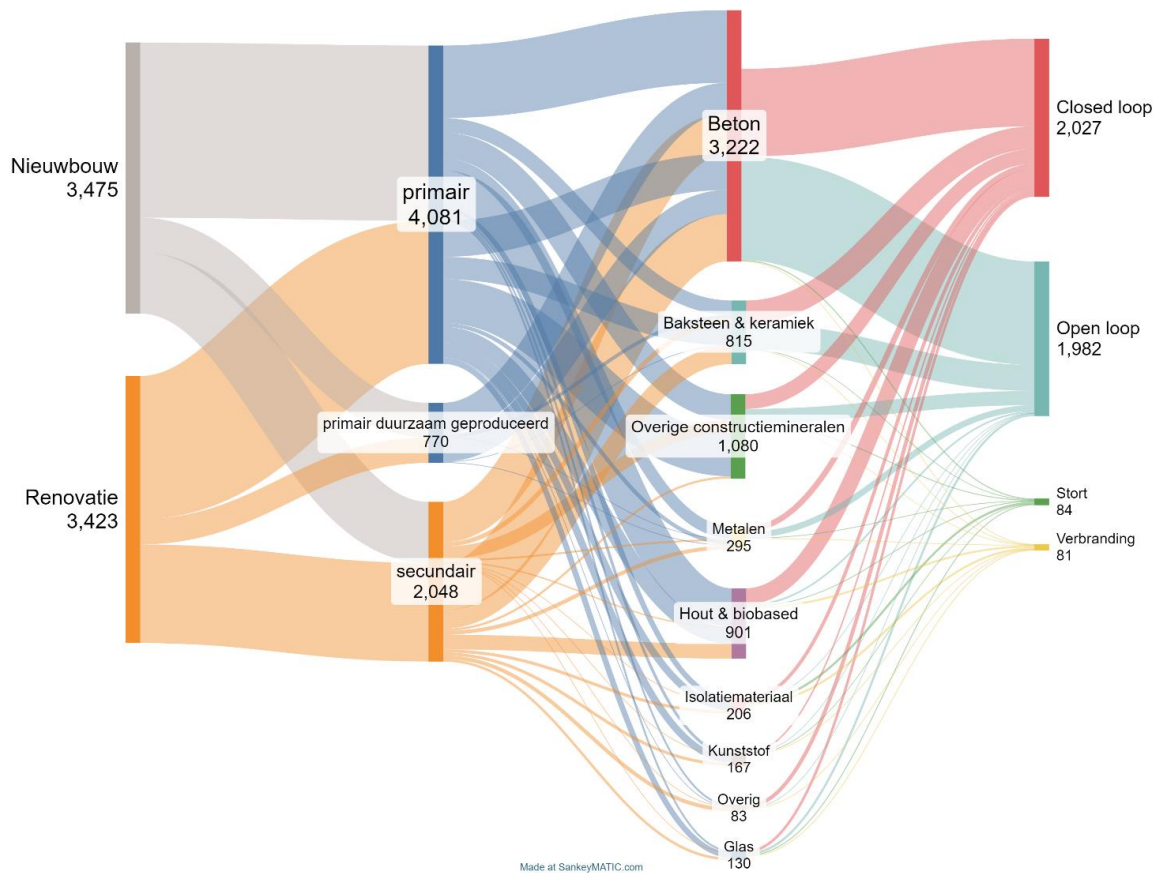
materiaalvraag van Snelle Wereld. Terwijl de uitstroom als gevolg van sloop-nieuwbouw bij Snelle Wereld groter is dan Regionaal Geworteld.



Figuur 5.11: Aandeel 'closed loop' recycelen van de totale materiaaluitstroom.

Het perspectief op gesloten kringlopen blijft tot 2050 buiten zicht. Dit heeft naast de effecten op milieu, klimaat en biodiversiteit (zie volgende secties) ook invloed op de leveringszekerheid van deze materialen in de toekomst. De beschikbaarheid van materialen voor de Nederlandse woningsector blijft afhankelijk van import uit het buitenland.

Figuur 5.12 laat een voorbeeld materiaalstroombiagram zien van het toekomstbeeld groen land tussen 2030 en 2040 [kton]. De ‘closed loop’ materiaalstroom stroomt in principe terug de nieuwbouw en renovatie in. De materiaalbalans is niet precies nul omdat de instroom groter is dan de uitstroom. De instroom is dan een netto toevoeging aan de materiaalvoorraad in de gebouwde omgeving. Het aandeel secundair is 23%.



Figuur 5.12: Voorbeeld materiaalstroombiagram van het toekomstbeeld groen land tussen 2030 en 2040 [kton].

5.2.3 Impact van de scenario's

De materiaalstromen van de vijf scenario's geven inzicht in de herkomst, omgang en omvang van materialen in de komende decennia als gevolg van veranderingen in de materialenmix door de implementatie van circulaire maatregelen, de toename van (energie)renovatie, de afname van nieuwbouw en keuzes rondom huisvesting en ruimtelijke ordening. Deze dynamiek heeft uiteindelijk invloed op de klimaat- en milieu- impact en het landgebruik van het materiaalgebruik in de woningsector (secties 5.2.3.1, 5.2.3.2 en 5.2.3.3).

5.2.3.1 Milieukosten

Een robuuste reductie in milieukosten ondanks verschillen tussen de toekomstbeelden. Voor een uitleg van milieukosten zie BOX 1 in sectie 1.2.4.

De effecten op milieu uitgedrukt in milieukosten nemen in het Basispad naar verwachting sterk toe tussen het referentiejaar 2020 en 2030, van € 512 miljoen per jaar naar € 1055 miljoen per jaar. Richting 2040 nemen de milieukosten af naar € 870 miljoen per jaar en na 2040 weer toe naar € 953 miljoen per jaar (Figuur 5.13).

In de vier toekomstbeelden nemen de milieukosten de komende decennia af (Figuur 5.13). In 2019-2030 pieken de milieukosten, deze nemen vervolgens sterk af op vergelijkbare wijze in 2030-2040. Behalve Snelle Wereld, de milieukosten nemen in dit toekomstbeeld minder snel af vanwege de hoge nieuwbouwcijfers en toename in (energie)renovatie. In de periode 2040-2050 nemen de milieukosten voor Groen land en Mondiaal Ondernemend lichtelijk af. In Snelle Wereld is deze afname groter. Voor Regionaal Geworteld volgt een vergelijkbare trend als het Basispad waar de milieukosten weer toenemen in het laatste decennium, met name vanwege (energie)renovatie.

Met huidige maatregelen en ruimtelijke keuzes lijken aanzienlijke besparingen mogelijk. Ook in de scenario's waar veel gebouwd wordt de komende decennia. De milieukosten voor nieuwbouw nemen de komende decennia af (Figuur 5.14). Dit heeft in eerste instantie te maken met de afname van de materiaalinstromen als gevolg van minder nieuwbouw en de invloed van circulaire maatregelen de samenstelling en omvang van de materiaalintensiteiten (zowel op ruimtelijk, gebouw en materiaalniveau). Voor nieuwbouw heeft Regionaal Geworteld de laagste milieukosten gevolgd door Groen Land, Snelle Wereld en Mondiaal Ondernemend.

De milieukosten van (energie)renovatie nemen toe de komende decennia (Figuur 5.14), in Groen Land, Regionaal Geworteld en het Basispad is het aandeel van (energie)renovatie in 2040-2050 al meer dan 50%. Ondanks het hoge percentage 'closed loop' recylen dat mogelijk is bij (energie)renovatie, drukt de toename van materiaalstromen van (energie)renovatie op de totale milieukosten.

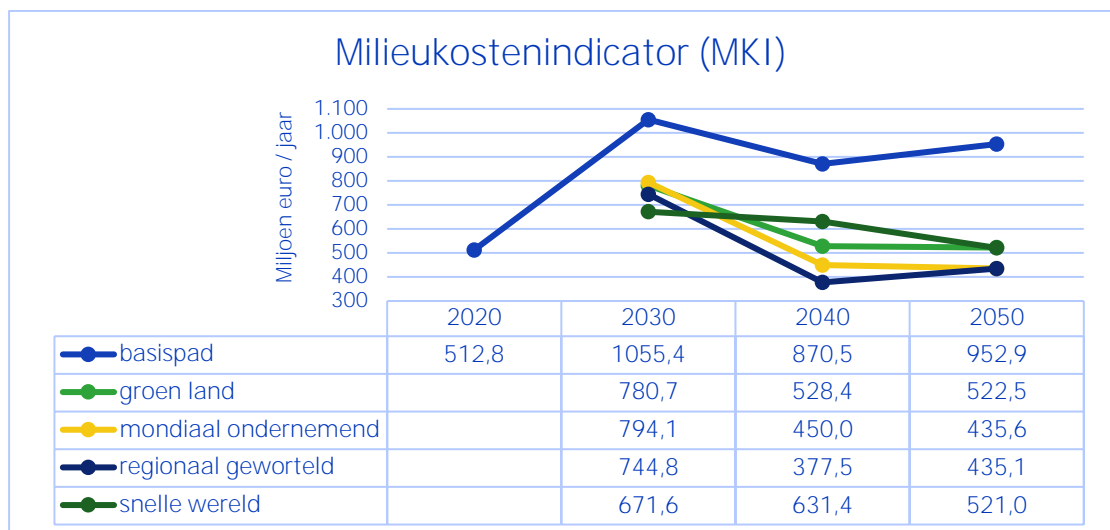
In het specifiek heeft de inzet op gerecycled hout¹⁸ een negatief effect op de milieukosten ten opzichte van primair hout. De milieukosten van secundair hout zijn 8 keer hoger dan primair hout. Dit komt doordat bij 'closed loop' recylen niet wordt gestuurd op de mogelijk hogere impact van secundaire materialen ten opzichte van primair materiaal. Hout krijgt hierdoor een groter aandeel in de totale milieukosten van (energie)renovatie. In de vier toekomstbeelden vormen hout, overige materialen (elektronica (waaronder pv-panelen en

¹⁸ Met de gekozen parameters binnen ecoinvent. Dit probleem is in de nieuwe versie van de Nationale Milieudatabase/ecoinvent en bepalingsmethode waarschijnlijk opgelost en zijn er geen negatieve waarden meer voor secundair hout.

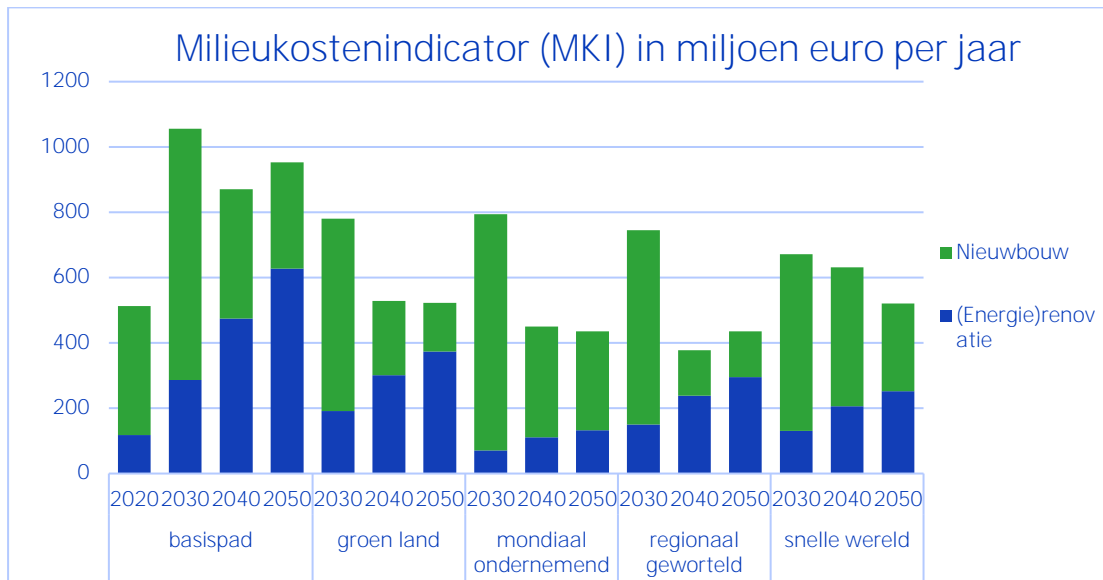
passieve componenten), lijm en kisten) en isolatiematerialen ongeveer de helft van de milieukosten. Beton, metalen, en baksteen en keramiek vormen de het grootste aandeel in de overige 50%.

Ondanks de milieueffecten van (energie)renovatie, blijft (functionele)levensduurverlenging een besparing op nieuwbouw. Een gerichtere aanpak voor het verduurzamen van (energie)renovatie kan bijdragen aan de nodig impactreductie. In het geval dat biobased materialen niet worden gerecycled binnen de woningsector heeft dit een positief effect op toekomstbeelden. Enkel deze aanpassing bespaart voor Groen land € 70,8 miljoen, Regionaal Geworteld € 56,9 miljoen, Mondiaal Ondernemend € 32,6 miljoen en Snelle wereld € 43,4 miljoen aan milieukosten per jaar tussen 2040-2050. Weliswaar met een toename in landgebruik als gevolg.

Bij Snelle Wereld en Mondiaal Ondernemend blijft het aandeel nieuwbouw groter dan (energie)renovatie. In deze toekomstbeelden drukken de hoge nieuwbouwcijfers en m² per capita (zie tabel 3) op de totale milieukosten, desalniettemin is het effect van circulaire maatregelen hier duidelijk zichtbaar. Bijvoorbeeld de toename in biobased, secundair en duurzaam geproduceerde materialen, en de afname in conventionele materialen als gevolg van onder andere meer substitutie. In beide toekomstbeelden zijn de milieukosten laag ten opzichte van Groen land en Regionaal Geworteld vanwege de omvang van (energie)renovatie. Desalniettemin heeft Regionaal Geworteld de laagste milieukosten (met uitzondering van Snelle Wereld tussen 2019-2030). Op de tweede plek komt *Mondiaal Ondernemend* vanwege lage energierenovatie.



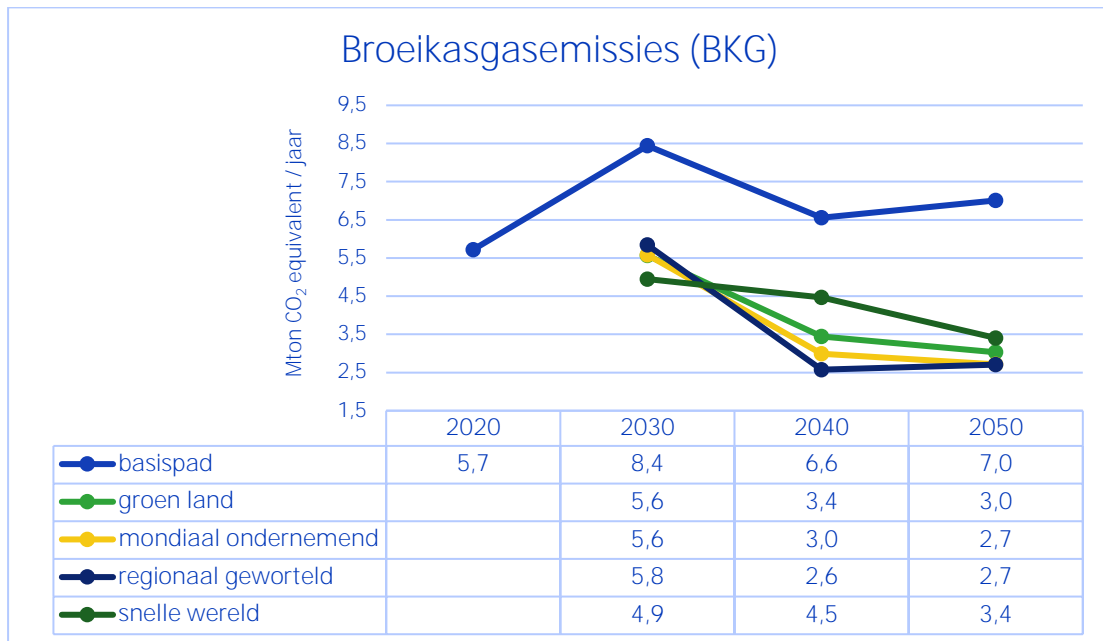
Figuur 5.13: Totale milieukosten (MKI) voor het Basispad en de vier toekomstbeelden.



Figuur 5.14: Verdeling van de totale milieukosten (MKI) tussen nieuwbouw en energie-renovatie.

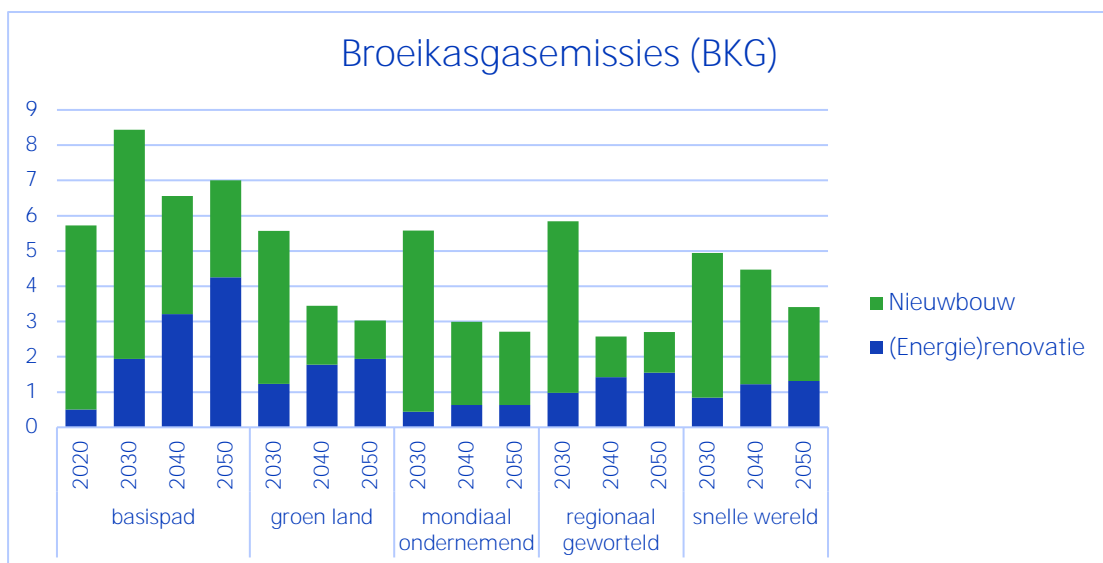
5.2.3.2 Broeikasgasemissies

Broeikasgasemissies en milieukosten laten een vergelijkbare trend zien richting 2050 (Figuur 5.15). We kunnen een aantal dingen constateren. Alle vier de circulaire scenario's laten een daling zien ten opzichte van het Basispad scenario. De BKG van de vier circulaire scenario's zijn in 2019-2030 vergelijkbaar met de situatie van het Basispad in 2020. Groen land heeft een lagere (cumulatieve) BKG ten opzichte van Snelle wereld. Mondiaal ondernemend en Regionaal geworteld komen met verschillende routes uit op de laagste BKG van 2,7 Mton CO₂-equivalent per jaar. De afname over tijd is groter voor de BKG dan voor de MKI. Dit komt door het verschil in impact per kilogram materiaal tussen de MKI en BKG. Zo heeft BKG relatief een grotere impact per kilogram beton, staal & ijzer dan de MKI van deze materialen. Omdat deze materialen een groot deel van de impact in 2020 vormen en de vraag richting 2050 afneemt in de circulaire scenario's, is de daling voor de BKG sterker.



Figuur 5.15: Totale broeikasgasemissies (BKG) voor het Basispad en de vier toekomstbeelden.

Figuur 5.16 laat zien hoe voor BKG de verhouding tussen nieuwbouw en (energie)renovatie verschuift in de tijd.



Figuur 5.16: Verdeling van de broeikasgasemissies (BKG) tussen nieuwbouw en energie-renovatie.

5.2.3.3 Landgebruik

Zoals aangetoond in hoofdstuk 4 is de primaire invloed op landgebruik afkomstig van de productie van biobased materialen. We beperken ons in dit hoofdstuk tot het berekenen van het landgebruik voor de productie hout en wordt uitgedrukt¹⁹ in km²/jaar. Dit is gerelateerd aan het aandeel biobased materialen van nieuwbouw (met name van maatregelen zoals prefab, optoppen en biobased bouwen) en (energie)renovatie.

In de periode 2020 en 2030 is de prognose dat landgebruik in het komende decennium van 3,6 km²/jaar zal toenemen naar 5,5 km²/jaar. In het Basispad zet deze trend door tot 7,4 km²/jaar tussen 2040-2050. Deze toename is met name gerelateerd aan het aandeel biobased materialen in (energie)renovatie, dat in omvang²⁰ toeneemt tot 2050 (Figuur 5.17).

Het landgebruik van andere materialen zijn buiten zicht geraakt in dit deel van het onderzoek doordat gekozen is alleen naar landgebruik van hout te kijken. Naar verwachting nemen deze af. Aangezien, naast biobased materialen, voor alle materialen de inwinning gepaard gaat met landgebruik (zoals aangetoond in hoofdstuk 4 met behulp van de bodemkwaliteitsindex 'Pt'). Het aandeel van deze materialen is echter klein ten opzichte van het landgebruik voor de productie van hernieuwbare grondstoffen en lastig uit te drukken in km². Doordat het aandeel 'close loop' recyclen toeneemt, is de verwachting dat landgebruik voor deze materialen afneemt. Deze trend is wel vastgesteld voor het gebruik van hout in (energie)renovatie (Figuur 5.18).

In vier toekomstbeelden wordt een scherpere toename verwacht in 2019-2030 vanwege het aandeel biobased materialen in de nieuwbouwvraag. Het gebruik biobased materialen is in Regionaal geworteld laag waardoor landgebruik lager circa 4000 km²/jaar lager is (Figuur 5.17).

In 2030-2040 neemt het landgebruik voor Groen land, Regionaal geworteld en Mondiaal ondernemend sterk af. Landgebruik verschilt enkele duizenden km²/jaar ten opzichte van het basispad (voor Regionaal geworteld zelfs enkele honderden). Voor Snelle wereld daalt het landgebruik lichtelijk. Vergelijkbaar met milieukosten en broeikasgasemissies.

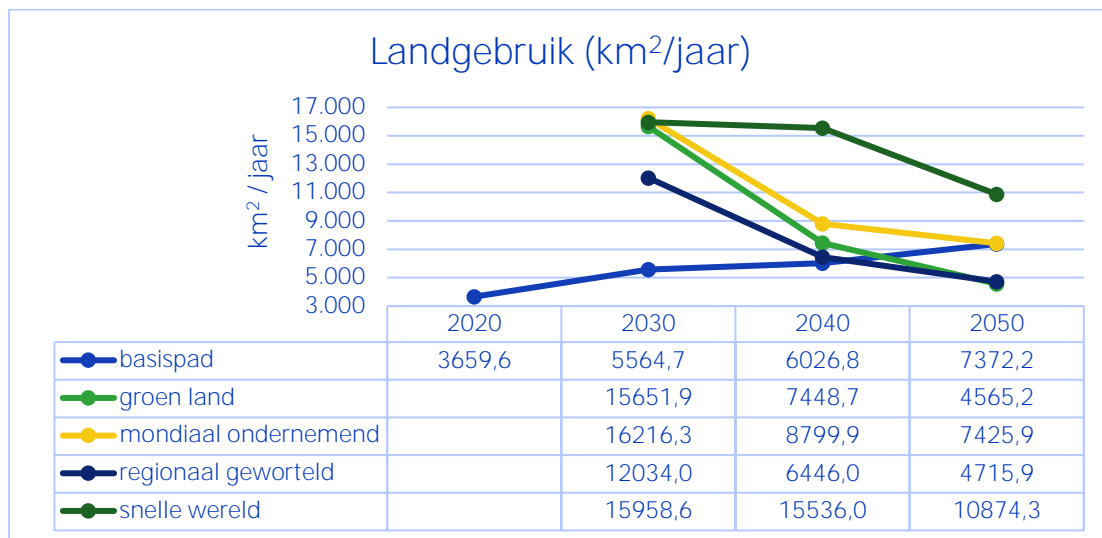
In 2040-2050 daalt het landgebruik van Groen land en Regionaal geworteld onder het Basispad. Dit heeft te maken met de lage nieuwbouwaantallen en het hoge percentage 'close loop' recyclen van hout voor (energie)renovatie. Mondiaal ondernemend evenaart het landgebruik van het Basispad. Dit heeft te maken met vergelijkbare nieuwbouw aantallen ten opzichte van het Basispad in 2040-2050 echter gerealiseerd met een hoog percentage biobased bouwen.

Een hogere vraag naar biobased materialen, neemt druk op productieketen toe en wordt het aanbod afhankelijker van het buitenland. Voor de piek vraag naar biobased materialen zal het landgebruik circa 39% van het totaaloppervlak van Nederland vragen. Hierbij is nog geen rekening gehouden met een toename van biobased materialen in de materialenmix van (energie)renovatie, waardoor dit percentage naar verwachting zal blijven toenemen.

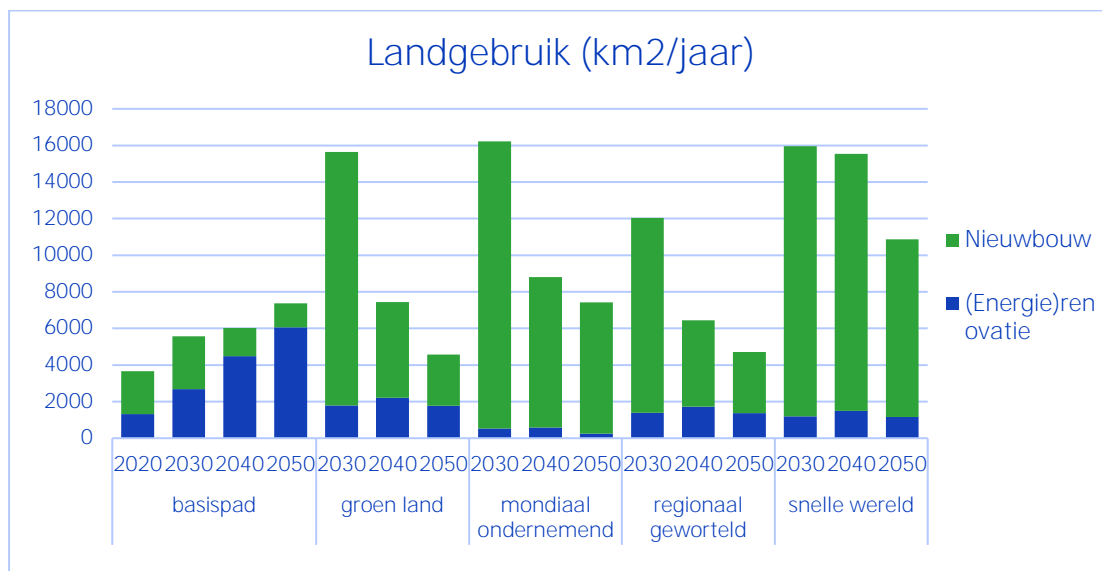
¹⁹In het vorige hoofdstuk is gebruik gemaakt van de eenheid 'Pt' gebaseerd op de bodemkwaliteitsindex. Zie ook sectie 1.2.4.

²⁰In de periode 2040-2050 is de materiaalinstroom van nieuwbouw ca. 10 Mton/jaar waarvan 0,125 Mton hout en (energie)renovatie ca. 5 Mton/jaar waarvan 0,565 Mton hout. In 2019-2030 was deze verdeling nagenoeg 25 Mton/jaar waarvan 0,30 Mton hout voor nieuwbouw en 2 Mton/jaar waarvan 0,25 Mton voor (energie)renovatie.

Volgens het CBS wordt op dit moment 54% van de totale oppervlakte in Nederland gebruikt voor landbouw (CBS, 2020) en lijkt de opgave theoretisch haalbaar te zijn. Desondanks is de verwachting dat er een blijvende afhankelijkheid op het buitenland zal aanhouden, onder andere voor materialen zoals hout, doordat landbouwgrond ook voor de voedselvoorziening nodig zal blijven. Grip op biodiversiteit valt alleen voor de binnenlandse en Europese productie binnen de invloedssfeer van Nederlandse overheid. Voor de Nederlandse materiaalvraag afkomstig van buiten Europa zal het effect op het (mondiale) biodiversiteitsverlies onzeker blijven.



Figuur 5.17: Totale landgebruik voor het Basispad en de vier toekomstbeelden.



Figuur 5.18: verdeling landgebruik tussen nieuwbouw en (energie)renovatie

6 Van potentie naar realisatie

Hoofdstuk 4 en 5 hebben inzicht gegeven in de materiaalintensiteit en gerelateerde impact per maatregel en per toekomstbeelden (oftewel verschillende combinaties van circulaire maatregelen). Om deze impact te behalen moeten de maatregelen (goed en tijdig) geïmplementeerd worden. In dit hoofdstuk gaan we in op de implementatie van deze maatregelen en welke uitdagingen en nuances hierbij relevant zijn. Deze inzichten bouwen voort op de uitdagingen en kansen van de verschillende maatregelen zoals omschreven in hoofdstuk 3. Daarnaast zijn additionele inzichten opgehaald en gevalideerd in een workshop die is gehouden op 24 januari, waarbij experts van PBL, TNO, RIVM en TU-Delft aanwezig waren.

6.1 Onzekerheid vraagt om flexibiliteit

Om tot robuuste implementatie van circulaire maatregelen te komen is het belangrijk om rekening te houden met ontwikkelingen over de tijd. De vier toekomstbeelden die we in dit rapport gebruiken zijn voorbeelden van hoe de toekomst eruit kan zien. Het is onwaarschijnlijk dat we in één rechte lijn op één van deze toekomstbeelden af zullen gaan. In praktijk kunnen verschillende toekomstbeelden naast elkaar bestaan en zal er over de jaren heen regelmatig gewisseld kunnen worden van visie (bijvoorbeeld door politieke veranderingen). Dit zal ertoe leiden dat circulaire maatregelen in de loop der tijd anders worden geprefereerd, en dat de uitvoering hiervan op verschillende manieren kan worden ingevuld over de tijd. Daarom is het belangrijk om te kijken naar hoe gevoelig de circulaire maatregelen zijn voor deze verandering.

Aan de ene kant kan dit door te kijken naar de wenselijkheid van een circulaire maatregel over verschillende scenario's heen. Als een oplossing in elk scenario geprefereerd wordt is de kans klein dat de maatregel niet meer gewenst is bij een verschuiving van de visie. Een ander aspect om mee te nemen is om te kijken wat er gebeurt als er wel van maatregel gewisseld wordt. Wanneer er overgegaan wordt naar andere maatregelen wordt dan de impact van de voorgaande maatregel weer teniet gedaan of zal deze (in hoge mate) intact blijven, oftewel hoe onomkeerbaar zijn de circulaire maatregelen?

6.1.1 Wenselijkheid van circulaire maatregelen

We gebruiken de vier toekomstbeelden om te bepalen hoe algemeen wenselijk de circulaire maatregelen zijn. De maatregelen passen in betere of mindere mate bij een bepaald toekomstbeeld. Sommige maatregelen zullen in elk toekomstbeeld heel anders gewaardeerd worden. In het PBL-rapport waar de vier toekomstbeelden uit komen is ook een analyse gedaan over welke circulaire strategieën goed passen in de verschillende toekomstbeelden. Die indeling hebben we in dit werkpakket als uitgangspunt genomen. Vervolgens hebben we dit gespecificeerd voor alle geïdentificeerde maatregelen voor de woningsector. Deze inzichten zijn gevalideerd in de workshop en de uitkomsten hiervan zijn te vinden in Figuur 6.1. Wanneer een maatregel goed in een toekomstbeeld past is dit aangeduid met een + of ++, wanneer dit niet goed aansluit is het aangeduid met een – of --.

Naast het volledige overzicht van hoe de maatregelen gewaardeerd worden per toekomstbeeld hebben we gekeken naar wat dat betekent voor de gemiddelde wenselijkheid en de gemiddelde kans op weerstand van de maatregel. Dit is berekend door voor elke maatregel te kijken hoe het in elk toekomstbeeld wordt gewaardeerd. Een + krijgt de score 1 en een – de score -1. Een 0/+ wordt beoordeeld als 0.5. Deze zijn bij elkaar

opgeteld en vervolgens gedeeld door 4 om tot het gemiddelde te komen. Ter illustratie de som voor de maatregel optoppen is als volgt: $(0.5+1+2+0.5)/4=1$.

In Tabel 5 staat het volledige overzicht van de maatregelen en hoe ze in de verschillende toekomstbeelden vallen. De kans op weerstand is bepaald door te kijken naar of een maatregel in één of meerdere toekomstbeelden als negatief (-) wordt beschouwd.

Deze analyse maakt inzichtelijk welke maatregelen breed gedragen zijn over alle toekomstbeelden heen en welke minder. Zo komt bijvoorbeeld de gemiddelde wenselijkheid van 'splitsen van woningen' lager naar voren, omdat deze minder goed aansluit bij het toekomstbeeld 'Mondiaal Ondernemend'. Recycling daarentegen wordt in alle toekomstbeelden als een positieve maatregel beschouwd, en sluit als maatregelen voornamelijk goed aan bij Mondiaal Ondernemend. Dit zorgt voor een hogere gemiddelde wenselijkheid.

Figuur 6.1 laat zien dat er acht circulaire maatregelen zijn met een gemiddelde wenselijkheid hoger dan 1. De kans op weerstand tegen deze maatregelen is ook erg laag, omdat geen van de toekomstbeelden negatief tegenover deze maatregelen staat. Daarnaast hebben ook optoppen, transformatie en renovatie een erg lage kans op weerstand. Terwijl de gemiddelde wenselijkheid een score van 1 of lager heeft gekregen. Dit zou kunnen betekenen dat zodra er op deze maatregelen wordt ingezet, er een kleine kans is dat hier weer vanaf wordt gestapt zodra er een verschuiving in toekomstvisie plaatsvindt (zie ook volgende sectie 6.1.2).

Er zijn dus relatief weinig maatregelen met een lage gemiddelde wenselijkheid en met een hoge kans op weerstand. Daarnaast zijn er geen maatregelen die een hele hoge kans op weerstand²⁷ hebben. Dit laat zien dat ondanks dat er een verschil is tussen de maatregelen er geen hele grote risico's uit deze analyse komen. Op basis van deze analyse maatregelen als robuust kunnen worden beschouwd. Desalniettemin betekent dat niet dat er geen wijzigingen kunnen plaatsvinden in de mate van toepassing.

²⁷ Volgens de gehanteerde methode waarmee de kans op weerstand is berekend wordt de kans weergegeven in discrete stappen van 0,25%. Zodra er binnen geen een toekomstbeeld een mate van uitvoering van - of - voorkomt wordt de kans op weerstand geduid 0%. Dit betekent echter niet dat de kans op weerstand in de werkelijkheid 0% is.

	Optoppen	Splitsen van woningen	Kleiner wonen	Prefab bouwen	Transformatie	Recycling	Circulair slopen	Hergebruik	Renovatie	Demontage	Modulair en standaardisatie	Durable materialen	Biobased materialen	Groene materialen	Gerecyclede materialen
Mondiaal ondernemend	0/+	-	-	++	0/+	++	++	-	0/+	+	+	++	++	++	++
Snelle wereld	+	+	+	++	0/+	+	++	0/+	0/+	+	++	++	++	++	+
Groen land	++	++	++	+	++	+	+	++	++	+	+	+	++	+	+
Regionaal geworteld	0/+	0/+	-/0	0	+	+	+	+	+	++	-	0	0/+	0	+
Gemiddelde wenselijkheid	1	0,625	0,625	1,25	0,75	1,25	1,5	0,625	1	1,25	0,75	1,25	1,625	1,25	1,25
Kans op weerstand	0%	25%	25%	0%	0%	0%	0%	25%	0%	0%	25%	0%	0%	0%	0%

Figuur 6.1: Overzicht van wenselijkheid van circulaire maatregelen in de verschillende toekomstbeelden. Daarnaast geeft het de gemiddelde wenselijkheid van de maatregelen over de toekomstbeelden heen weer en de kans op weerstand voor een bepaalde maatregel.

6.1.2 Onomkeerbaarheid van circulaire maatregelen

Vervolgens hebben we tijdens de workshop gekeken naar de gevolgen voor een maatregel wanneer er van toekomstbeeld gewisseld wordt. Wanneer er over de tijd heen andere visies zijn kan niet alleen gewisseld worden tussen maatregelen maar ook de manier waarop een maatregel wordt ingevuld. Deze nuancering helpt om te begrijpen of de impact en investeringen van/in een bepaalde maatregel behouden blijft bij wisseling of niet. Aan de hand hiervan kan er bepaald worden of je op de maatregel in wil zetten en hoe belangrijk het is om ervoor te zorgen dat er niet van afgeweken wordt. Tabel 6.1 geeft een korte omschrijving van mogelijke gevolgen van wisseling van scenario.

Tabel 6.1: Omschrijving van mogelijke gevolgen voor circulaire maatregelen van wisseling van scenario.

Optoppen	Opgetopte woningen kunnen behouden blijven, de locatie van huizen die opgetopt worden speelt vooral een rol in of ze over de toekomstbeelden heen in gebruik zullen blijven.
Splitsen van woningen	Inzetten op deze maatregel kan teniet gedaan worden in scenario's waarbij kleiner wonen niet gewenst is, dan is er een kans dat de woningen weer samengevoegd worden.
Kleiner wonen	In sommige scenario's is er geen behoefte aan kleine woonruimtes, de vraag is of kleinere woningen dan leeg komen te staan.
Prefab bouwen	De woningen die hiermee gebouwd worden zullen in gebruik blijven. In verschillende toekomstbeelden kunnen andere actoren verantwoordelijk zijn voor de inrichting van dit bouwproces (meer lokaal of juist mondiaal).
Transformatie	Getransformeerde woningen zullen behouden blijven, de locatie van huizen die getransformeerd zijn spelen vooral een rol in of ze over de toekomstbeelden heen in gebruik zullen blijven (is het toekomstbeeld gericht op de stad of de regio en combineert dat met de woningen).
Recycling	In verschillende toekomstbeelden kunnen andere actoren verantwoordelijk zijn voor de inrichting van dit proces. De vraag is of dit dan nog op een andere manier ingericht kan worden of dat wanneer de logistiek en onderliggende infrastructuur eenmaal georganiseerd is dit in stand zal blijven.
Circulair slopen	In verschillende toekomstbeelden kunnen andere actoren verantwoordelijk zijn voor deze inrichting. De vraag is of dit dan nog op een andere manier ingericht kan worden of dat wanneer de logistiek en onderliggende infrastructuur eenmaal georganiseerd is dit in stand zal blijven.
Hergebruik	De investering van het opzetten van de logistiek en onderliggende infrastructuur voor hergebruik kunnen teniet worden gedaan wanneer er niet meer ingezet wordt op hergebruik. Maar, de componenten die al eerder hergebruikt zijn in een nieuwe woning/renovatie zullen blijven. Dus die impact zal bewaard blijven.
Renovatie	De gerenoveerde woningen zullen ook bij een wisseling van maatregel hun doel behouden.
Demontage	Demontabel bouwen zal ook wanneer daar later van afgeweken wordt een bijdrage kunnen blijven leveren aan hergebruik, de vraag is wel of er in dat scenario wel nog op hergebruik ingezet wordt.
Modulair en standaardisatie	In verschillende toekomstbeelden kunnen andere actoren verantwoordelijk zijn voor de inrichting van dit bouwproces. Fabrieken die opgezet zijn voor het standaardiseren van processen kunnen dan anders ingericht worden.
Durable materialen	In verschillende toekomstbeelden kunnen andere actoren verantwoordelijk zijn voor de inrichting van dit proces. Voornamelijk of dit gebeurt op globale of lokale schaal.
Biobased materialen	In verschillende toekomstbeelden kunnen andere actoren verantwoordelijk zijn voor deze inrichting van dit proces.
Groene materialen	In verschillende toekomstbeelden kunnen andere actoren verantwoordelijk zijn voor deze inrichting van dit proces.
Gerecyclede materialen	In verschillende toekomstbeelden kunnen andere actoren verantwoordelijk zijn voor deze inrichting van dit proces.

6.1.3 Reflectie

Bovenstaande analyse maakt inzichtelijk in welke mate de maatregelen vatbaar zijn voor wisselingen over de tijd heen en hoe dat de effectiviteit van de maatregelen beïnvloed. Maatregelen implementeren die gevoelig zijn voor veranderingen vereisen dus extra aandacht om te waarborgen dat de impact van deze maatregelen niet teniet wordt gedaan. Dit geldt voor splitsen van woningen, kleiner wonen, hergebruik en modulair bouwen. Daarnaast is de gevoeligheid voor verandering van hoe de maatregel uitgevoerd en ingericht wordt belangrijk om mee te nemen. Maatregelen die erg gevoelig hiervoor zijn vereisen extra aandacht bij implementatie. Hierbij gaat het vooral om welke actoren verantwoordelijk zijn voor de maatregel en op welke schaal de infrastructuur wordt ingericht. Om impactverlies zoveel mogelijk te vermijden is het belangrijk om robuust beleid te hebben, zodat er zo min mogelijk nog gewisseld wordt tussen de maatregelen en manier van uitvoering hiervan.

6.2 Stimulering van circulaire maatregelen

Om tot een circulaire woningbouw te komen zullen meerdere maatregelen geïmplementeerd moeten worden. In hoofdstuk 5 is al gekeken naar de reductie in het materiaalgebruik en -impact die de combinatie van maatregelen behalen, gebaseerd op de vier toekomstbeelden.

Om maatregelen succesvol en tijdig te implementeren is het ook van belang om te kijken hoe maatregelen elkaar stimuleren. De uitdagingen per maatregel zoals omschreven in hoofdstuk 3 komen samen bij het implementeren van combinaties van maatregelen. Hierdoor kunnen bepaalde barrières elkaar verheffen of juist versterken. Om dit te bekijken is eerst een analyse gedaan van welke maatregelen goed samengaan. Er is veel interactie tussen de maatregelen, bijvoorbeeld omdat oplossingen elkaar versterken en/of stimuleren of omdat maatregelen met elkaar conflicteren. In Figuur 6.2 is een overzicht te zien van de verschillende maatregelen en hoe deze aan elkaar gekoppeld kunnen worden. Zo is er bijvoorbeeld te zien dat het splitsen van woningen versterkend werkt voor de maatregel om kleiner te gaan wonen en ook de maatregelen hergebruik (van ruimtes), renovatie en transformatie stimuleren.

Overzicht van maatregelen die elkaar versterken of juist niet	Narrow					Close		Slow					Substitute			+	-	+0	-0
	Oplossen	Splitsen van woningen	Kleiner wonen	Prefab bouwen	Transformatie	Recycling	Circulair slopen	Hergebruik	Renovatie	Demontabel bouwen	Modulair en standaardisatie	Durable materialen	Biobased materialen	Groene materialen	Gerecyclede materialen				
Optoppen	+0	+0	0	+		-0	'-0	0	0	0	0	0	+0	+0	+0	1	0	5	1
Splitsen van woningen	+0	+	-0	+		-0	'-0	0	+0	+0	0	+0	0	0	0	2	0	4	2
Kleiner wonen	+0	0	+	0	0	0	0	+0	0	+0	0	+0	+0	+0	+0	1	0	7	0
Prefab bouwen	0	0	0	0	0	0	0	+0	0	+	+	+	+	+	+	6	0	1	0
Transformatie	+	+	+0	+0		0	0	0	+	+	0	0	+0	+0	+0	4	0	5	0
Recycling	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0	+	1	6	0	0
Circulair slopen	0	0	0	0	0	0	+	0	+	+0	+	+	+	+	6	1	1	0	
Hergebruik	0	0	0	0	0	-	+	0	+	0	0	-0	-0	-0	2	1	0	3	
Renovatie	+	+	0	0	+	-	-	0	0	0	0	+	0	0	0	4	2	0	0
Demontabel bouwen	0	0	+0	+0	+	-	+	+	+	0/+	0	0	0	0	4	1	2	0	
Modulair en standaardisatie	0	0	+0	+	0	0	0	+	0	+	0	0	0	0	3	0	1	0	
Durable materialen	0	0	0	0	0	-0	+0	+0	0	0	0	-	-	-	0	3	2	1	
Biobased materialen	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	1	3	0	0	
Groene materialen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	3	0	0	
Gerecyclede materialen	0	0	0	0	0	+	-	-	0	0	0	0	-	-	1	4	0	0	

Figuur 6.2: Overzicht van samenhang tussen de verschillende maatregelen.

In Figuur 6.2 komt naar voren dat sommige oplossingen wel invloed hebben op een ander, maar dat dit niet per se wederzijds is. Zo zal het splitsen van woningen er bijvoorbeeld voor zorgen dat er kleinere woningen komen, maar kleiner wonen hoeft niet per definitie door het splitsen van woningen te komen, dat kan ook door de nieuwbouw van kleinere woonruimtes.

Verder zien we dat oplossingen die van toepassing zijn op nieuwbouw, zoals geprefabriceerd bouwen (prefab) en optoppen, met verschillende substitutie materialen te combineren zijn. Optoppen kan bijvoorbeeld goed samengaan met lichte biobased materialen. De substitutie materialen zelf zijn wel concurrerend met elkaar. Ook zien we dat oplossingen in ‘close the loop’ conflicteren met oplossingen in ‘narrow the loop’, ‘narrow the loop’ zorgt voor minder sloop van woningen en dus voor minder circulair slopen en minder recycling. ‘Slow the loop’ gaat deels goed samen met ‘close the loop’ door circulair te slopen waardoor elementen hergebruikt kunnen worden. Echter is ‘slow the loop’ in conflict met recycling, omdat er minder recycling nodig is wanneer (delen van) gebouwen langer gebruikt worden.

Aan de hand van deze tabel zijn er combinaties van oplossingen te maken die elkaar stimuleren. Het combineren van deze maatregelen kan ervoor zorgen dat je makkelijker een aantal maatregelen gezamenlijk kan implementeren, omdat ze bijvoorbeeld vergelijkbare uitdagingen hebben die dan maar één keer aangepakt hoeven te worden. De uitdagingen en kansen per maatregel zijn te vinden in hoofdstuk 3.

Er zijn verschillende combinaties van maatregelen mogelijk, hieronder lichten we er ter illustratie drie uit en geven een korte toelichting per combinatie van maatregelen wat dat betekent voor de uitdagingen.

Combinatie 1: Splitsen van woningen + kleiner wonen + renovatie

Deze combinatie bestaat uit het kleiner wonen door middel van bestaande woningen te renoveren en te splitsen. De materialen die hiervoor benodigd zijn hebben een hernieuwbare, secundaire of duurzaam geproduceerde herkomst.

Het splitsen van woningen zal vaak leiden tot kleiner wonen. Daarnaast biedt het mogelijkheden voor renovatie, omdat er toch al werkzaamheden in de woning plaats gaan vinden. Deze combinatie van drie maatregelen resulteren in een aantal overlappende uitdagingen namelijk, de acceptatie van bewoners van overlast bij verbouwing (voor renovatie en splitsen). Het moet voldoen aan de veiligheidsnormen en (functionele) eisen. De behoefte dan wel bereidheid van bewoners om in kleinere ruimtes te wonen. Aanpassingen aan bestaande bouw vereist andere kennisbehoefte dan traditionele bouw. Daarnaast zijn er nog specifieke uitdagingen en kansen van de individuele maatregelen (zie hoofdstuk 3).

Combinatie 2: Transformatie + optoppen + renovatie

Deze combinatie bestaat uit de bestaande utiliteitsgebouwen renoveren, optoppen en transformeren tot woningen (appartementen). De materialen die hiervoor benodigd zijn hebben een hernieuwbare, secundaire of duurzaam geproduceerde herkomst.

Een andere set aan maatregelen kan voortkomen uit transformatie, waarbij je ook kan optoppen en renoveren. Deze maatregelen zijn vaak maatwerk en acceptatie van de bewoner voor overlast en atypisch wonen zijn ook belangrijke uitdagingen. Wanneer er op één van deze maatregelen ingezet wordt is het dus een mooie kans om dit te combineren met andere maatregelen omdat er al een verbouwing plaats gaat vinden.

Combinatie 3: Circulair slopen + hergebruik + demontabel bouwen + modulair en gestandaardiseerd bouwen + geprefabriceerd

Deze combinatie bestaat uit het realiseren van woningen bestaande uit geprefabriceerde standaard modules die losmaakbaar zijn. Deze woningen kunnen geogost worden en vervolgens eenvoudig hergebruikt worden.

Het combineren van circulair slopen, hergebruik en demontabel bouwen helpt om de afstemming en coördinatie tussen partijen te verbeteren en een duidelijke infrastructuur hiervoor op te zetten. Voornamelijk circulair slopen en hergebruik kennen uitdagingen rondom rolverschuiving, vertrouwen en betaalbaarheid. Dit gezamenlijk oppakken kan de kans op succes vergroten. Demotabel bouwen helpt om circulair slopen te faciliteren en kan ervoor zorgen dat deze maatregel betaalbaarder wordt.

6.2.1 Reflectie

Bekijken welke maatregelen elkaar stimuleren helpt om te zien welke maatregelen goed samen te implementeren zijn en hoe dit uitdagingen weg kan nemen en kansen kan bieden. Een aantal voorbeelden zijn genoemd, waarbij naar voren komt dat kansen ontstaan wanneer er verbouwingen plaatsvinden om deze dan meteen breder aan te pakken. Dit minimaliseert de noodzaak voor bewoners om herhaaldelijk overlast te ervaren. Het implementeren van een infrastructuur voor hergebruik of recycling heeft ook baat bij een gezamenlijke aanpak. Maatregelen combineren kan ook zorgen voor een kostenreductie, overlast reduceren en het benutten van koppelkansen.

7 Conclusies

In dit achtergrond rapport hebben we een set aan circulaire maatregelen geïdentificeerd die gecombineerd kunnen worden en in de komende jaren tot aan 2050 een rol kunnen spelen in het circulair maken van de woningsector. Hierbij hebben we gekeken naar kansen en uitdagingen en de potentiële impact (reductie) van de afzonderlijke circulaire maatregelen. Daarnaast hebben we aan de hand van vier toekomstbeelden gekeken hoe verschillende combinaties van modelparameters en circulaire maatregelen – de circulaire scenario's - bijdragen aan de doelen van een circulaire woningsector in 2030, 2040 en 2050. Tot slot hebben we overkoepelend gekeken hoe flexibel de maatregelen zijn en welke maatregelen elkaar stimuleren. Deze stappen hebben tot de volgende inzichten geleid:

Hoewel een breed scala aan circulaire maatregelen met verschillende materiaalintensiteiten en reikwijdten mogelijk zijn, blijven traditionele materialen een belangrijke rol vervullen. Het splitsen van woningen, transformeren van bedrijventerreinen naar woningen en het optoppen van woningen leveren per m² woonoppervlak de meeste materiaalbesparing op. Anders bouwen (meer appartementenbouw (onder vijf woonlagen)) en losmaakbare woningen leveren per m² woonoppervlak de kleinste materiaalbesparing op. Over de breedte zorgen alle circulaire maatregelen voor een reductie in het materiaalgebruik per m², ondanks dat materiaalintensiteiten van de verschillende circulaire maatregelen sterk variëren. De 'traditionele' materialen zoals beton, constructiematerialen (o.a. gips), metalen en isolatiemateriaal blijven een belangrijk aandeel houden in de materiaalmix. Het aandeel hout en biobased materialen neemt toe in meerdere circulaire maatregelen, zoals geprefabriceerd bouwen en optoppen, waarbij lichtgewicht materialen nodig zijn vanwege de eigenschappen van de maatregelen.

De materiaalvraag voor (energie)renovatie is naar verwachting lager dan de meeste nieuwbouw maatregelen per wooneenheid – deze vergelijking is echter niet direct gemaakt. De omvang van de materiaalvraag voor (energie)renovatie van bestaande woningen varieert afhankelijk van het type werkzaamheden. Bij (energie)renovatie worden dezelfde materialen gebruikt als bij nieuwbouw, alhoewel in andere verhoudingen. Beton, baksteen & keramiek en overige constructiematerialen beslaan het grootste deel van de materiaalintensiteit wanneer renovaties plaatsvinden.

Het recyclen en hergebruiken van secundaire materialen wordt niet direct uitgedrukt in materiaalgebruik. Dit is afhankelijk van de beschikbare materiaaluitstroom en de bestemming van materialen aan het einde van de levensduur. Materialen zijn in meer of mindere mate geschikt voor 'closed loop' recyclen. Dit heeft te maken met de eigenschappen van de materialen zelf, en de mate waarop materialen gescheiden worden. Om dit te beïnvloeden zijn naast de sloopwerkwijze ook keuzes nodig in het ontwerp van woningen en de manier waarop materialen worden gebruikt – zoals bijvoorbeeld losmaakbaar en adaptief bouwen.

Daadwerkelijke potentie van circulaire maatregelen geeft ander beeld vanwege verschillende toepassingsreikwijdte. Met losse maatregelen alleen is geen volledig circulaire woningsector haalbaar.

Op basis van beschikbare data uit literatuur is de daadwerkelijke potentie van individuele circulaire maatregelen vergeleken met conventioneel bouwen. De daadwerkelijke potentie van een maatregel is daarmee afhankelijk van de absolute besparingen in materiaalgebruik (andere materialen, minder materialen of anderszins) en de impact uitgedrukt in de indicatoren MKI, BKG, Landgebruik. Dit is afhankelijk van hoe veel woonoppervlak er uiteindelijk gerealiseerd kan worden met de maatregel in de decennia 2020-2030, 2030-2040 en 2040-2050.

De analyse laat zien dat voornamelijk splitsen van woningen, optoppen en transformatie een lage potentie hebben, ondanks de significante reductie in het materiaalgebruik van de maatregel per m². Wanneer we de potentiële reikwijdte van deze maatregelen bekijken, zien we dat zowel materiaal- gebruik als impact tot weinig reductie leidt. Het is dus niet mogelijk de benodigde impact te reduceren door alleen in te zetten op splitsen, optoppen, en transformatie; mede omdat hiervoor onvoldoende zicht is op bestaande gebouwen die geschikt en beschikbaar zijn. Daarnaast hebben deze maatregelen een relatief hoge MKI en BKG vanwege een toename in het gebruik van impactvolle materialen zoals elektronica, lijm en kisten. Een aangrijpingspunt voor beleid is dan ook het verhogen van inzicht rondom deze maatregelen en inzetten op materiaalinnovaties om de impact te verlagen.

Wat ook opvalt is dat voor biobased bouwen veel landgebruik nodig is vergeleken met de andere maatregelen. Het totale materiaalgebruik, MKI en GWP zijn echter een stuk lager dan de andere maatregelen. Dit is ook het geval voor geprefabriceerd bouwen. In de reeks maatregelen met de meest potentie worden deze maatregelen opgevolgd door adaptieve/losmaakbare woningen en kleiner wonen.

Voor de overige circulaire maatregelen gaan het totale materiaalgebruik (kg), de MKI (€) en BKG emissies (CO₂-eq.) hand in hand. Minder materiaalgebruik leidt tot reductie in klimaat en milieu impact. Ondanks dat bepaalde materialen zoals elektronica, kisten, lijm, metalen en isolatiematerialen een hoge impact per kilo hebben, is er op het niveau van de maatregelen weinig variatie in de verhoudingen waardoor er geen hele significante verschillen zijn. Om de impact van bepaalde materialen te verminderen blijft een materiaalgerichte benadering nodig.

Met de implementatie van een enkele maatregel of een enkele circulaire strategie blijkt een woningsector die radicaal minder materiaal vraagt en een significante impactreductie weet te bewerkstelligen buiten bereik. De potentie en impactreductie van de genoemde maatregelen zijn niet eenvoudig 'optelbaar'. Hieruit concluderen we dat combinaties van maatregelen belangrijk zijn om de transitie naar een circulaire woningsector te maken.

Verschillende combinaties van strategieën en maatregelen vormen kansrijke toekomstbeelden naar een circulaire woningsector. Circulaire scenario's worden gekenmerkt door meer dan alleen de optelsom van de circulaire maatregelen.

De vier circulaire strategieën dragen als volgt bij aan een circulaire woningsector. Ten eerste, het verkleinen ('narrow the loop') en verduurzamen (substitutie) van de materiaalinstroom. Ten tweede de bestaande voorraad behouden en nieuwe woningen bouwen voor toekomstig hergebruik ('slow the loop'). Ten derde, ook al is er sprake van weinig verlies van bouwmaterialen door stort en verbranding, valt ook op het gebied van recyclen ('close the loop') nog winst te behalen. De strategieën zijn toegepast door middel van circulaire maatregelen in vier verschillende toekomstbeelden om circulaire scenario's te formuleren naar 2050. Deze vier scenario's en het Basispad scenario zijn toegespitst in de decennia 2020-2030, 2030-2040 en 2040-2050.

De toekomstbeelden onderscheiden zich in verschillende voorkeuren met betrekking tot de inrichting van de samenleving en economie waardoor er andere keuzes rondom huisvesting en ruimtelijke ordening gemaakt worden. Dit heeft enerzijds invloed op de nieuwbouwpoging in decennia 2020-2030, 2030-2040 en 2040-2050 en anderzijds op de mate van uitvoering van circulaire strategieën. Hierdoor worden circulaire maatregelen voor nieuwbouw en bestaande bouw in verschillende mate toegepast. Doordat de meeste woningen in het decennium 2020-2030 gerealiseerd worden is de implementatie van circulaire maatregelen het meest van belang – mede ook vanwege het behalen van het tussendoel in 2030.

Keuzes rondom huisvesting en ruimtelijke ordening die leiden tot een efficiënter gebruik van woonoppervlak per capita – zoals bijvoorbeeld woningdeling en generatie wonen – hebben de grootste invloed op de vermindering van materiaalinstromen omdat er minder nieuwbouw nodig is. Daarbovenop dragen circulaire maatregelen voor nieuwbouw bij aan een algehele vermindering van het materiaalgebruik vergeleken met conventioneel bouwen.

Het optoppen, transformatie en splitsen bij elkaar opgesteld leveren een bescheiden bijdrage in het aantal nieuwe woningen – hierbij is het belangrijk om te kijken welke potentie onderbelicht en onbenut is, met name in het decennium 2020-2030.

Conventionele materialen zoals beton, baksteen, keramiek, staal en ijzer blijven belangrijk. Zo blijven stenige materialen het grootste aandeel in gewicht vertegenwoordigen. Waarvan steeds meer van deze materialen duurzaam worden geproduceerd (keramiek, staal & ijzer en beton). Daarnaast neemt het gebruik van biobased materialen toe in de vier circulaire scenario's.

Voor het behouden van de bestaande voorraad door middel van (energie)renovatie neemt de materiaalstroom de komende decennia toe. In sommige circulaire scenario's vertegenwoordigd (energie)renovatie op den duur de grootste materiaalvraag. Deze materiaalstroom is, gegeven de impact en omvang, in het algemeen onderbelicht. Er is bijvoorbeeld geen inzicht verkregen in dit onderzoek in de relatieve besparing ten opzichte van sloop-nieuwbouw en valt de afweging van de maatregel (besparen op emissies tijdens gebruik) buiten de scope van dit soort onderzoeken, waardoor (energie)renovatie een negatieve bijdragen levert in de circulaire scenario's. Om de potentie van (energie)renovatie te benutten zal het gebruik van circulaire vormen van renovatie zoals het gebruik van biobased materialen de impact op het gebied van BKG en MKI verlagen, weliswaar met meer landgebruik als gevolg.

Daarnaast worden, voor losmaakbaar bouwen, de effecten van toekomstig hergebruik na 2050 niet meegenomen. Losmaakbaarheid is een belangrijk ontwerpprincipes voor circulariteit in de toekomst. Desalniettemin draagt losmaakbaar bouwen wel bij aan korte termijn vermindering²² van materialen en impactreductie in vergelijking tot conventioneel bouwen.

In alle circulaire scenario's vindt er een verschuiving van 'open loop' naar 'closed loop' recyclen plaats. De discrepantie tussen het aandeel secundaire materialen van de instroom en het aandeel 'closed loop' recyclen van de uitstroom heeft grotendeels te maken met de omvang van de in- en uitstroom zelf. Daar waar een grote mismatch aanhoudt, heeft dit consequenties op het aandeel van de totale materiaalvraag dat voorzien worden met

²² Hierbij is uitgegaan van een variant met een lichtgewicht constructie, in sommige gevallen levert losmaakbaarheid juist geen materiaalbesparing op.

secundaire materialen. Tegelijkertijd varieert het aandeel secundaire materialen van de instroom sterk per circulair scenario, dit wijst op de invloed van de hoeveelheid sloop, zowel door nieuwbouw als (energie)renovatie. Sloop-nieuwbouw is afhankelijk van de hoeveelheid verdichting en daarmee weer gegrond in keuzes rondom ruimtelijke ordening.

De verschillende circulaire scenario's leiden niet tot een volledig circulaire woningsector in 2050, gestelde doelen raken uit het zicht.

De (toekomstige) keuzes in de woningsector beïnvloeden de materiaalstromen in termen van hoeveelheid als samenstelling. De circulaire scenario's variëren sterk in eigenschappen (denk hierbij aan de nieuwbouwaantallen en omvang van (energie)renovatie) echter liggen ze niet ver van elkaar in termen van impact.

Ondanks de vermindering in het materiaalgebruik, en de toename van biobased, secundaire en duurzaam geproduceerde materiaalstromen, worden de beleidsdoelstellingen met betrekking tot milieukosten en broeikasgasemissies in de gebruikte circulaire scenario's niet bereikt. De gestelde doelen zijn MKI en BKG naar 0 en halvering in 2030.

Vanwege het toenemende materiaalgebruik voor zowel nieuwbouw als bestaande bouw pieken de milieukosten in 2030 en dalen vervolgens richting 2050 naar een waarde in de buurt van de referentiewaarde van het Basispad in 2020 (gemiddeld tussen de € 435 - 522 miljoen per jaar). De broeikasgasemissies zijn in 2030 gelijk aan van de referentiewaarde van het Basispad in 2020 (gemiddeld 5,7 Mton CO₂-eq. per jaar) en leiden richting 2050 tot een halvering ten opzichte van 2020 in 2050 (gemiddeld tussen de 2,7 - 3,4 Mton CO₂-eq. per jaar).

Landgebruik neemt toe zodra er meer primair biobased materiaal wordt gebruikt. Binnen de scenario's is dit gerelateerd aan het gebruik van hout, waarvan maatregelen zoals biobased bouwen, optoppen, prefab bouwen en (energie)renovatie een groot aandeel hebben. Op basis van de nieuwbouwaantallen wordt er een scherpe piek voorzien in vraag naar biobased materialen in het komende decennium tot 2030. Biobased materiaalproductie zal gemiddeld 17.000 km² per jaar aan landgebruik vragen (circa 39% van het totaaloppervlak van Nederland). Hierbij is nog geen rekening gehouden met een toename van biobased materialen in de materialenmix van (energie)renovatie, waardoor in de toekomst landgebruik voor de productie van biobased materialen naar verwachting zal blijven toenemen.

Voor het overgrote deel van hout is Nederland afhankelijk van import, deze afhankelijkheid neemt toe in alle scenario's. De impact op landgebruik is niet per definitie nadelig maar hangt af van de manier van (hout-)productie en de effecten daarvan op biodiversiteit. Na 2030 neemt landgebruik weer af, dit heeft te maken met een afname in de nieuwbouw aantallen. In scenario's met veel (energie)renovatie neemt landgebruik af doordat het aandeel secundair hout toeneemt. Hieruit volgt dat landgebruik kan afnemen zodra 'closed loop' recylen en de herbruikbaarheid van hout (en andere biobased materialen) toenemen.

Een volledig circulaire woningsector vraagt om het (her)prioriteren van doelen waar een circulaire woningsector naar streeft. Daarnaast is een andere meer integrale aanpak nodig om tot een volledig circulaire woningsector te komen. Verschillende circulaire maatregelen dragen hier aan bij, desalniettemin blijkt het noodzakelijk om (nog) beter te sturen op combinaties van circulaire maatregelen. Daarnaast is de juiste sturing op doelen noodzakelijk en waar afruil optreedt zou het juiste beleid de potentieel negatieve effecten kunnen mitigeren. Denk hierbij aan het toenemende landgebruik van biobased bouwen dat kan leiden tot biodiversiteitsverlies.

Een integrale aanpak over verschillende beleidsthema's vormen aangrijpingspunten in de transitie naar een volledig circulaire woningsector.

Ondanks de inherente onzekerheid richting te toekomst, is het is duidelijk dat circulaire strategieën een sleutelrol spelen bij het sturen van materiaalstromen door middel van strategische beslissingen in huisvesting, ruimtelijke ordening en de toepassing van circulaire maatregelen op gebouw en materiaal niveau.

De productieketens van grondstoffen, materialen en bouwproducten (bijv. losmaakbare producten) vormen een belangrijk (centraal) onderdeel van de productgroep woningen. Deze ketens hebben echter uiteenlopende kenmerken. Het garanderen van de verduurzaming van deze ketens vormt een belangrijk aangrijpingspunt om de doelen te verwezenlijken.

De invloed van huisvestingskeuzes en ruimtelijke ordening op de materiaalstromen benadrukt het belang van een geïntegreerde benadering bij beleid en planning. De piek in het aantal gerealiseerde woningen tot 2030 vereist een afweging van hoe deze ontwikkelingen benut kunnen in zowel de planning als uitvoering van nieuwbouwprojecten om zo een circulaire en veerkrachtigere woningsector te bevorderen. Voor de uitvoering van nieuwbouwprojecten vormen de maatregelen met de hoogste potentie goede aangrijpingspunten voor beleid, echter zullen wel aangevuld moeten worden met andere circulaire maatregelen om dichterbij het behalen van de gestelde doelen te komen.

Om de beoogde impact van de circulaire maatregelen te behalen moeten deze succesvol en tijdig geïmplementeerd worden. Tijdig, omdat vooral veel nieuwbouw zal plaatsvinden tot 2030, wat betekent dat tot aan die periode vooral veel circulariteitspotentie is. De vraag is in hoeverre hier nog op in te spelen is vormt een aangrijpingspunt voor beleid.

Daarnaast zijn er verschillende uitdagingen per maatregel voor implementatie. Om hier mee om te gaan is het belangrijk om bij het implementeren van maatregelen de juiste maatregelen te combineren waardoor voor sommige uitdagingen koppelkansen ontstaan. Hierbij is het van belang maatregelen te combineren waarbij bewoners betrokken zijn (bestaande bouw) en maatregelen die een nieuwe afstemming tussen actoren vereisen. Zoals (logistieke) infrastructuur voor circulair slopen en het organiseren van secundaire materiaalstromen. Door deze maatregelen integraal (in samenhang) te implementeren kunnen er ook mogelijk kosten worden bespaard.

Ook is het belangrijk rekening te houden met dat in de toekomst nog van visie gewisseld kan worden waardoor sommige maatregelen irrelevant of juist relevanter kunnen worden en de invulling van maatregelen zal veranderen. Bijvoorbeeld, zodra vanuit ruimtelijke keuzes wordt ingezet in verstedelijking ontstaat het risico dat de instroom van secundaire materialen onder druk komt te staan – waardoor ketens voor het recyclen overbodig worden. Robuustheid van beleid is hiervoor essentieel om te voorkomen dat investeringen en impact teniet gedaan kunnen worden.

8 Literatuurlijst

Arnoldussen, J., Errami, S., Semenov, R., Roemers, G., Blok, M., Kamps, M., & Faes, K. (2019). Materiaalstromen, milieu-impact en energieverbruik in de woningen utiliteitsbouw. Uitgangssituatie en doorkijk naar 2030.

Arnoldussen, J., Endhoven, T., Kok, J., Groot, P., Blok, M. & Kamps, M. (2022), Materiaalstromen, milieu- impact en CO₂- emissies in 2019, 2030 en 2050. Amsterdam: Economisch instituut voor de Bouw & Metabolic

Barendregt, E., Gerritse, E., Raak, van R., Zelfde J. van 't & Ooms, J. (2023). Toekomstbeelden Bouw. Rotterdam: Rebel, Drift & TAUWBarendrecht & Raak ...

Bletsis, A., Bommel, J. van, Bours, S.A.M.J.V., Hoorn, A. van, Kamps, M. & Oorschot, J. van. (2024). Productgroep Analyse Woningen: Een productgroep Analyse Aanpak voor de Monitoring en Sturing in de transitie naar een Circulaire Economie. Den Haag: TNO.

Boer, L. de, Heens, F. (2024). Zeer zorgwekkende stoffen in de materialen uit de woningbouw: adviezen voor de productgroep analyse woningbouw. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

Bours, S.A.M.J.V. & Harmsen, R. (2024). Transitie naar een circulaire woningsector: een missie-gedreven innovatie systeem analyse. Utrecht: Copernicus instituut, Universiteit Utrecht

CBS. (2020). Nederland in cijfers: Hoe wordt de Nederlandse bodem gebruikt? Te vinden op: [Hoe wordt de Nederlandse bodem gebruikt? - Nederland in cijfers 2020 | CBS](#)

Copper 8, Metabolic, NIBE & Alba Concepts. (2023). Woningbouw binnen planetaire grenzen: materiaalvraag, CO₂-uitstoot & milieu-impact van de Nederlandse Woningbouw.

CPB. (2015). WLO: Welvaart en Leefomgeving 2015. Te vinden op: [Welvaart en Leefomgeving 2015 \(wlo2015.nl\)](#)

Hanemaaijer, A., Kishna, M., Koch, J., Prins, A. & Wilting, H. (2021), Mogelijke doelen voor een circulaire economie, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving

I&W. (2016). Nederland Circulair in 2050. Rijksbreed programma Circulaire Economie. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, en Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

I&W. (2023). Nationaal Programma Circulaire Economie 2023-2030. Den Haag: ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

Kuperus, R. (2023). Material flows and circular options for residential buildings in the Netherlands. Leiden University & Delft University of Technology. MSc thesis Industrial Ecology.

Molen, F. van, Poorthuis, W., Zwamborn, A., Tigchelaar, C., Niessink, R. & Rovers, V. (2023). Functioneel Ontwerp Hestia 1.0, Den Haag: PBL

Nationale Milieudatabase. (2022). Forfaitaire waarden voor verwerking-scenario's einde leven behorende bij: Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken. https://milieudatabase.nl/media/filer_public/e8/46/e846feb6-a1dd-4277-81d6-396799d7b3ff/forfaitaire_waarden_mei_2022.pdf

NMD (n.d.). Database. Nationale Milieudatabase <https://milieudatabase.nl/nl/>

Oorschot, J. van, Voet, E. van der, Blok, M., Schouten, N., Witteveen, P., Rijken, B., Hoorn, A. van. (2022). Scenariostudie materiaal-voorraad, vraag en secundair aanbod in gebouwen: Onderdeel van het werkprogramma Monitoring & Sturing Circulaire Economie. Leiden: CML Leiden Universiteit

Oorschot, J. van, & Voet, E. van der. (2023). Scenario's voor materiaalvoorraden en stromen in gebouwen: update recycling, aanvulling milieu-impact & uitbreiding naar verbouwwerkzaamheden. Leiden: CML Leiden Universiteit

Oorschot, J. van & Voet, E. van der. (2024). Analyse huidige situatie en baseline scenario. Leiden: CML Leiden Universiteit

PBL (2023), Vier scenario's voor de inrichting van Nederland in 2050. Ruimtelijke Verkenning 2023, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving

PBL. (z.d.). RS: RuimteScanner. Te vinden op: [RS: RuimteScanner | Planbureau voor de Leefomgeving \(pbl.nl\)](#)

Rood, T. & Evenhuis, E. (2023), Ruimte voor circulaire economie. Verkenning van de ruimtelijke voorwaarden voor een circulaire economie, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Schuit, J. van der, Hoorn, A. van, Sorel, N. & Rood, T. (2023), Kenmerken, voorraad en materiaalketens van de bouw, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving

Significance. (z.d.). TIGRIS XL land use transport interaction model. Te vinden op: [TIGRIS XL Land Use Transport Interaction model – Significance](#)

Timmermans, M., Weijer, J. van de & Thijssen, I. (2021). Beschikbaarheid en gebruik secundaire bouwmaterialen en producten; verkenning. Hoofdstuk 1 t/m 5. Den Haag: RVO

Transitieteam Circulaire Bouweconomie (2018). Transitieagenda: samen bouwen aan de circulaire bouweconomie voor Nederland in 2050

Transitieteam Circulaire Bouweconomie (2021), Einddoel 2050 Transitieagenda Circulaire Bouweconomie.

Transitieteam Circulaire Bouweconomie (2022). Doelenstrategie: naar een circulaire bouweconomie in 2050. Den Haag: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Ondertekening

TNO) Energy & Materials Transition) Utrecht, 28 augustus 2024

Gerard van der Laan
Research Manager

Arjan van Horssen
Project Manager

Bijlage A

Maximale toepassing maatregelen

De maximaal (theoretische) potentie van de implementatie van de maatregelen is gekwantificeerd op basis van eerder onderzoek. Onderstaande tabel biedt een geaggregeerd overzicht van de absolute hoeveelheden zoals die gebruikt zijn voor de theoretische exercitie.

Tabel 8.1 biedt inzicht in de ordergrootte van het toepassen van maatregelen door de tijd heen. Waar mogelijk is dit gebaseerd op eerder onderzoek en aangevuld doormiddel van extrapolatie en 'expert judgement'. Aanvullingen waren noodzakelijk vanwege de beschikbaarheid van data. De waardes simuleren een mogelijk toekomstscenario en zijn derhalve onderhevig aan onzekerheden.

Tabel 8.1: : Geaggregeerd overzicht van de absolute hoeveelheden van het toepassen van maatregelen per jaargang.

Strategie	Maatregel	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Interpretatie	Aannames
Close the loop	Circulair slopen	30580	104540	178500	Het aantal woningen dat circulair gesloopt wordt per periode.	Huidige situatie behelst ongeveer 5% circulaire sloop, vanaf 2030 wordt door de overheid verplicht om 50% circulair aan te besteden (zowel bouw als sloop), en de doelstelling van de overheid is om in 2050 100% circulair te slopen (PBL, 2021; Recyclepro, 2022)
	Recyclen	249740	267840	285940	Het aantal woningen dat bestaat uit gerecyclede materialen.	Volgens New Horizon (PBL, 2021) zou in de toekomst 40% van alle bouwmaterialen kunnen worden geproduceerd uit gerecyclede grondstoffen, 25% uit biobased materialen en hoogstens 30% uit primaire grondstoffen. Volgens Copper 8 et al. (2023) kan in 2030 ongeveer 58% van de materiaalbenodigdheden uit secundaire materialen bestaan.
Narrow the loop	Anders bouwen	-96655	-71000	-58750	De waardes zijn negatief, wat betekend een reductie in nieuwbouw.	Verschuiving van 25% van grondgebonden woningen (evenredig verdeeld over alle types) naar appartementen (Copper 8 et al., 2023).

	Geprefabriceerd bouwen	231.642	249.636	267.629	Het aantal woningen dat industrieel/modulair gebouwd wordt per periode.	Volgens Rutten (2023) is ongeveer 14% van de nieuwbouw in 2020 op industriële wijze gebouwd. Het doel van het Nationaal Programma Circulaire Economie is om in 2030 de helft van de nieuwbouw op industriële en digitale manier te produceren (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023). Uit interviews met bouwbedrijven gespecialiseerd in modulaire bouw lijkt 60% in 2050 haalbaar.
	Kleiner wonen	822.594	668.080	552.160	Het aantal nieuwbouwwoningen dat een oppervlaktereductie ondergaat per periode.	Er wordt uitgegaan van een reductie van 10% van het GBO van nieuwbouw en een 10% verkleining van elementen die direct verband houden met GBO (vloeren, daken etc.) (Copper 8 et al., 2023).
	Splitsen van woningen	5.834	3.774	1.714	De hoeveelheid appartementen dat ontstaat uit het splitsen van appartementen per periode.	De waardes zijn berekend o.b.v. de relatieve hoeveelheid van de vraag naar appartementen die voldaan kan worden door splitsing i.p.v. nieuwbouw appartementen (Copper 8 et al., 2023). Splitsen vindt alleen op appartementen plaats.

Slow the loop	Optoppen	67.377	82.221	97.065	De hoeveelheid appartementen dat ontstaat uit het optoppen van een appartement per periode.	De hoeveelheden zijn gebaseerd op Copper 8 et al. (2023) op basis van de volgende aannames: “het aantal woningen door middel van optoppen groeit van 0 (2023) tot 20.000 (2030), met een totaal van 95.000 (tot en met 2030). Bij optoppen wordt uitgegaan van een appartement met een staalconstructie (voor krachtafdracht naar de bestaande gebouwen), houten vloeren en HSB-wanden.” Van deze appartementen wordt 43% gebouwd op appartementen die tussen 1965 en 1992 gebouwd zijn. 40% op appartementen van tussen 1992 en 2008, en 17% op appartementen gebouwd na 2009 (Geuting et al., 2023). Optoppen vindt alleen op appartementen plaats omdat dat het enige bouwtype is waarop effectief optoppen mogelijk is.
	Transformatie	64.175	41.516	18.856	De hoeveelheid appartementen aan dat ontstaat uit de transformatie van niet-woningen per periode.	De volgende aannames zijn gehanteerd op basis van Copper 8 et al. (2023): “Van de jaarlijkse toevoeging aan de Nederlandse woningvoorraad wordt 9.500 (11%) gerealiseerd met transformatie. Het aantal woningen uit transformatie groeit van 9.000 per jaar (2023) tot 28.000 per jaar (2030). Bij transformatie wordt uitgegaan van vervanging van gevel, installaties en inrichting. De draagconstructie blijft intact.”
	Adaptief (losmaakbaar) bouwen	171.922	187.642	203.363	Het aantal woningen dat bestaat uit losmaakbare producten.	Momenteel is ongeveer 10% van de gebruikte materialen in de bouw losmaakbaar. Volgens Conde et al. (2022) is de maximale technische haalbaarheid 45%.

	Renovatie	-60.639	-105.019	-149.399	De hoeveelheid woningen die niet gesloopt worden doordat levensduurverlenging heeft plaatsgevonden per periode per toekomstbeeld. De negatieve waardes geven de reductie van de sloopopgave weer. Woningen die niet gesloopt worden hoeven derhalve niet gebouwd te worden, hierdoor vindt een reductie van de nieuwbouwopgave plaats evenredig aan de reductie van de sloopopgave.	Aanname dat alleen sloop-nieuwbouw plaatsvindt. Sloop vindt alleen plaats als verduurzaming/modernisering niet mogelijk is. Een grove analyse van de gebouwvoorraad wijst uit dat een contingentenaanpak geschikt is voor ongeveer 70% van de gebouwvoorraad. Bij de contingentenaanpak gaat het om het toepassen van een repeteerbare verduurzamingsoplossing op een grote hoeveelheid voldoende gelijksoortige gebouwen (TNO, 2022).
Substitutie	Biobased materialen	294.489	244.694	194.900	Het aantal grondgebonden woningen waarvan 50% van de gebruikte materialen biobased is.	Voor appartementen is dit 30% (Copper 8 et al. (2023), Conde et al. (2022), van der Velde & van Leeuwen (2019), NIBE (2019)).
	Groen keramiek	222.861	292.603	362.344	Het aantal woningen waar duurzaam (o.b.v. biogas, waterstof, groene elektriciteit) geproduceerde bakstenen worden gebruikt in plaats van reguliere bakstenen.	Kengetallen gebaseerd op de verwachte verduurzaming van het energienetwerk (Cerameunie, 2021).

Groen beton	129.604	156.488	183.371	Het aantal woningen waar gerecycled beton worden gebruikt in plaats van regulier beton.	<ul style="list-style-type: none"> - Gebaseerd op de hoeveelheid uitstroom versus instroom van beton in Nederland (EIB & Metabolic (2022). - 100% van al de betonreststromen wordt in 2030 toegepast op een wijze dat het blijvend toegepast kan worden in nieuw beton, m.a.w. dat door toepassing geen vervuiling e.d. optreedt die toekomstig hergebruik in de weg staat (Betonakkoord, 2018). - 100% terugname door de betonketen van al de vrijkomende betonreststromen per 2030 (Betonakkoord, 2018)
-------------	---------	---------	---------	---	--

	Groen staal	144.777	244.938	345.100	<p>Het aantal woningen waar duurzaam (o.b.v. biogas, waterstof, groene elektriciteit) geproduceerd staal worden gebruikt in plaats van regulier staal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 28% van al het staal in NL wordt toegepast in de bouw (Bouwakkoord staal, 2023) - 10% van de totale staalvraag in NL komt op dit moment uit ingezameld schroot in NL (Bouwakkoord staal, 2023) - Het is mogelijk om de gehele marktvoor vraag voor staalproducten in de bouw (1660 kton) te dekken met (een deel van het) schroot ingezameld in Nederland voor export (Bouwakkoord staal, 2023) - 22% van de marktvoor vraag in de bouw kan worden afgedekt met schroot afkomstig uit de bouw volgens de uitgaande materiaalstroom analyse van Metabolic. (Bouwakkoord staal, 2023) - Staal is 100% recyclebaar. En dat gebeurt ook met zo'n 95% van al het staal dat na demontage (sloop) van gebouwen en bouwwerken vrijkomt (Bouwakkoord staal, 2023). - Ambitie Tata Steel: "Met de verduurzaming van onze staalproductie kunnen we in 2045 een CO₂-neutrale staalproducent zijn. Dat doen we in twee fases. Zo streven we ernaar om in 2030 de eerste hoogoven te vervangen door DRI-installaties en elektrische ovens. Daardoor verminderen we de CO₂-uitstoot al met 35-40%. Na 2035 willen we de laatste hoogoven vervangen en de laatste aanvullende maatregelen nemen om voor 2045 in IJmuiden CO₂-neutraal staal te kunnen produceren (Bouwakkoord staal, 2023)"
--	-------------	---------	---------	---------	--	---

Bijlage B

Proceskaart per materiaal

Tabel B.1: Ecoinvent proceskaart gekoppeld aan de materialen.

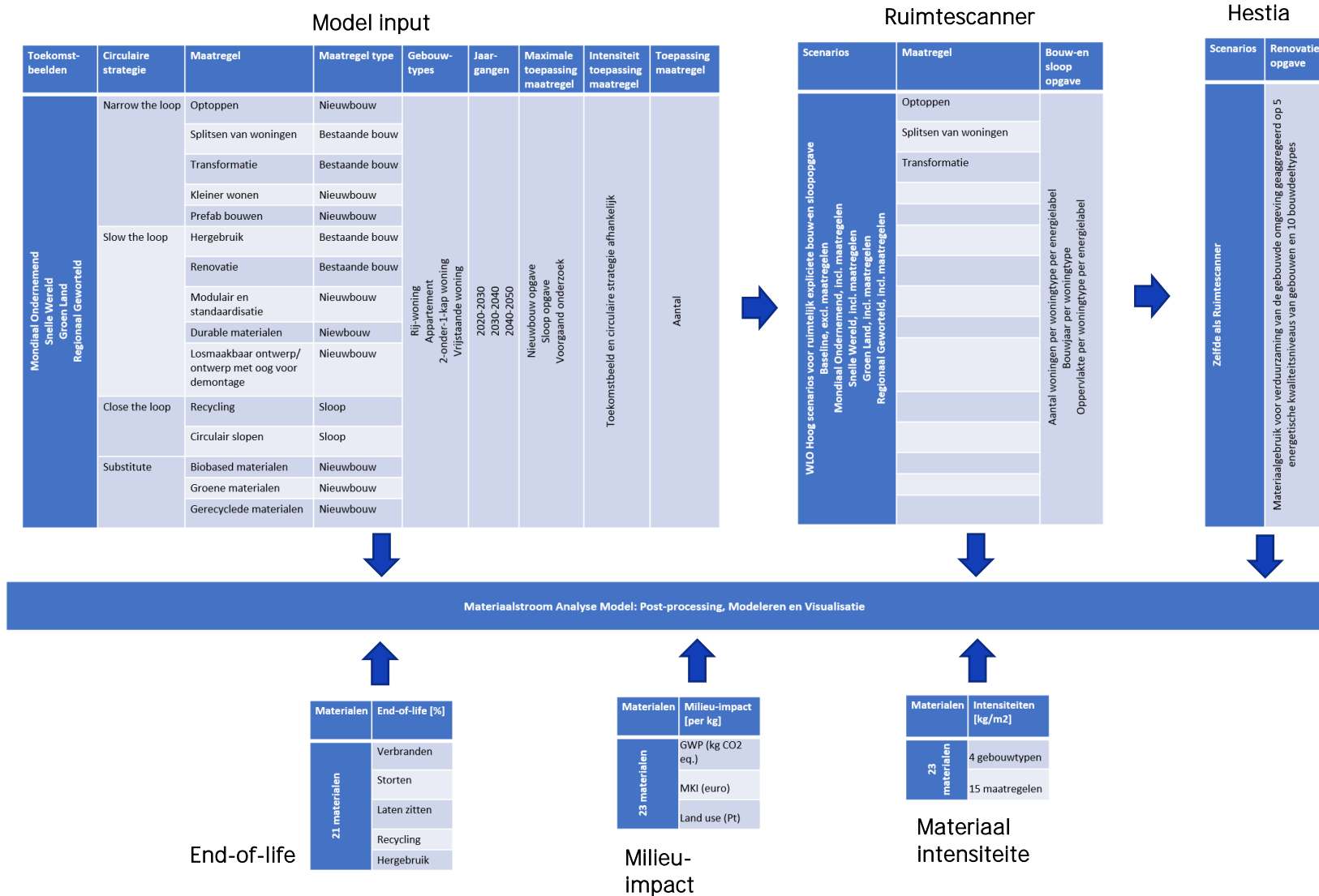
Materiaal	Proceskaart
Aluminum	0018-fab&Aluminium, met poedercoating (o.b.v. Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, U; 26% primair, 74% secundair + Powder coat, aluminium sheet {RER} powder coating, aluminium sheet Cut-off, U)
Clay brick	0008-fab&Baksteen, metselbaksteen, straatbaksteen, klinker (o.b.v. Clay brick {GLO} market for Cut-off, U)
Concrete	Concrete o.b.v. gemiddelde (CE Delft, 2017) excl. wapeningsstaal
Bitumen	0051-fab&Bitumen, SBS-gemodificeerd (o.b.v. Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {GLO} market for Cut-off, U)
Electronics	0303-fab&Elektronica, passieve componenten (o.b.v. Electronic component, passive, unspecified {GLO} market for Cut-off, U)
Gypsum	0011-fab&Gips, stuc, voor pleisterwerk en gipsplaat (o.b.v. Stucco {GLO} market for Cut-off, U)
Glass	0019-fab&Glas, vlakglas (o.b.v. Flat glass, coated {RoW} market for flat glass, coated Cut-off, U)
Wood	0067-fab&Hout, zachthout, vuren, grenen, lariks, douglas (o.b.v. Sawnwood, softwood, dried (u=10%), planed {RER} production Cut-off, U en 1 m ³ = 460 kg)
Insulation	Isolatie (Glaswol / Steenwol / XPS - ongewogen o.b.v. volume)
Sand-lime brick	Kalkzandsteen, stenen en blokken (o.b.v. Sand-lime brick {GLO} market for Cut-off, U)
Ceramics	0034-fab&Keramiek (o.b.v. Ceramic tile {GLO} market for Cut-off, U)
Copper	0287-fab&Koper, semis, voor plaat en buis (o.b.v. 33% 0059-fab&koper, kathode, 67% Copper {RER} treatment of scrap by electrolytic refining; 27,5% primair, 72,5% secundair)
Plastics	0199-fab&PVC, geëxtrudeerd (o.b.v. Polyvinylchloride, suspension polymerised {GLO} market for Cut-off, U + Extrusion, plastic pipes {GLO} market for Cut-off, U)
Adhesives & paint	Adhesive & paint (ongewogen gemiddelde 5 lak en 5 verfproducten)
Mortal	0004-fab&Betonmortel C20/25 (o.b.v. 75% CEM III en 25% CEM I), 2407 kg/m ³
Other biobased materials	Other biobased materials (Ongewogen gemiddelde 5 NMD biobased materialen)
Other metals	Other metals (ongewogen gemiddelde Zink, Lood en Messing)

Paper	0058-fab&Papier/karton (o.b.v. Core board {GLO}) market for Cut-off, U; 24% primair, 76% secundair)
Iron & steel	0167-fab&Staal, wapening, ongelegeerd (betonstaal, wapeningsnet, vezels, voorspanstaal) (o.b.v. 21,5% Steel, unalloyed, 78,5% Steel, low-alloyed & Hot rolling, steel {GLO}) market for Cut-off, U; 17,8% primair, 82,2% secundair)
Stone	0193-fab&Grind (o.b.v. Gravel, round {RoW}) market for gravel, round Cut-off, U)
Green concrete	Green concrete (Concrete o.b.v. gemiddelde (CE Delft, 2017), 18,75wt% secundair (EIB, Metabolic, 2022) i.p.v. 2,79wt% & 100% CEM III (proxy) i.p.v. 25% CEM I en 75%CEM III) exl. wapeningsstaal
Green steel	Green Steel (O.b.v. 30% reductie 2030 volgens bouwakkoord staal)
Green ceramics	Green Ceramics

Bijlage C

Conceptueel model

Zie conceptueel model op volgende pagina.



Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl

TNO innovation
for life