# Verkenning naar de belangrijkste variabelen en scenario's voor de wlc-gwp

## Richting 2050 – Eindrapport

**TNO Publiek ⟩ TNO 2026 R10503**

**18 Augustus 2026**

**Energy & Materials Transition**
www.tno.nl
+31 88 866 42 56
info@tno.nl

TNO 2026 R10503 – 18 Augustus 2026

# Verkenning naar de belangrijkste variabelen en scenario's voor de wlc-gwp

## Richting 2050 – Eindrapport

| | |
|---|---|
| Auteurs | Kamiel Jansen<br>Marijke Menkveld |
| | |
|---|---|
| Rubricering rapport | TNO Publiek |
| Titel | TNO Publiek |
| Rapporttekst | TNO Publiek |
| Bijlagen | TNO Publiek |
| Aantal pagina's | 119 (excl. voor- en achterblad) |
| Aantal bijlagen | 5 |
| Projectnaam | RVO Prognose Bouw Routekaart EPBDIV |
| Projectnummer | 060.67917 |

**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 de auteursrechthebbende(n).

Ter behoud van de wetenschappelijke, analytische en contextuele integriteit van deze uitgave is wijziging, manipulatie, selectief presenteren of een wijze van gebruik die anderszins een misleidende indruk wekt m.b.t. de bevindingen, conclusies, reikwijdte, methodologie of rol van TNO, niet toegestaan. Iedere verwijzing, citaat, samenvatting, vertaling of gedeeltelijke reproductie van deze uitgave dient een verwijzing naar de oorspronkelijke uitgave te bevatten.

© Opmaak - 2026 TNO – All rights reserved

# Management samenvatting

Dit rapport verkent welke variabelen en toekomstscenario's bepalend zijn voor de ontwikkeling van de "whole life cycle global warming potential" (wlc-gwp) van nieuwbouw richting 2050. Het doel is om een inhoudelijke basis te bieden voor de Nederlandse routekaart en de streefwaarden na 2030[1] die in het kader van de Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) IV moeten worden ontwikkeld. De studie biedt een onderbouwde scenarioanalyse van de ontwikkeling van de streefwaarden voor de wlc-gwp richting 2050. Daarbij worden de belangrijkste variabelen, beschikbare kwantitatieve bandbreedtes, onzekerheden en kennisleemtes in beeld gebracht. Deze richtlijn verplicht lidstaten om uiterlijk in januari 2027 een routekaart voor de invoering van Whole Life Cycle Global Warming Potential (wlc-gwp) aan te bieden en te publiceren. Vanaf 2028 moet voor grotere nieuwe gebouwen een wlc-gwp-berekening worden gerapporteerd en vanaf 2030 moeten lidstaten streefwaarden invoeren voor de wlc-gwp van nieuwbouw.

De belangrijkste conclusie van het rapport is dat de emissies in de gebruiksfase, met name B6, in veel scenario's sterk afnemen door aangescherpte energieprestatie-eisen en verdere verduurzaming van elektriciteit en warmte. Daardoor neemt het relatieve belang van materiaalgebonden emissies toe.
Tegelijk is deze ontwikkeling niet automatisch lineair. Maatregelen die B6 verlagen, kunnen extra materiaalgebruik veroorzaken, bijvoorbeeld door meer installaties, PV-panelen, energieopslag, koeling of ventilatietechniek. Het toekomstige emissiepad hangt daarom af van de samenhang tussen gebouwontwerp, energieprestatie, installaties, materiaalkeuzes en industriële verduurzaming, evenals van ontwikkelingen in aanpalende sectoren en regionale, Europese en mondiale beleids- en marktomstandigheden.

De analyse laat zien dat de ontwikkeling van de wlc-gwp richting 2050 vooral wordt bepaald door:
1. de snelheid van verduurzaming van de energievoorziening en industrie;
2. de mate waarin circulaire strategieën en biobased bouw daadwerkelijk opschalen;
3. de beschikbaarheid van biobased en secundaire grondstoffen;
4. veranderingen in materiaalgebruik en bouwmethodiek;

Daarnaast zijn methodische keuzes van belang voor de interpretatie van de uitkomsten. Keuzes rond biogene koolstof, module D, substitutie-aannames en einde-levensscenario's veranderen de fysieke emissies niet, maar beïnvloeden wel de berekende wlc-gwp-score en de vergelijking tussen scenario's.

De scenarioanalyse laat zien dat vooral de bandbreedte tussen best-case en best-case scenario's richtinggevend inzicht geeft in mogelijke ontwikkelingen van de wlc-gwp. Extreem optimistische scenario's blijken daarbij sterk afhankelijk van aannames over technologische opschaling en beschikbaarheid van duurzame energie en grondstoffen. De gepresenteerde bandbreedtes moeten daarom vooral worden gezien als een richtinggevend kader voor de routekaart. Daarbij vindt een aanzienlijk deel van de emissies buiten Nederland plaats, waardoor nationale wlc-gwp-eisen hier slechts beperkt rechtstreeks op kunnen sturen.

[1] Deze verkenning doet geen uitspraak over de grenswaarde voor 2030, maar richt zich op de ontwikkeling en onderbouwing van streefwaarden voor de periode na 2030 richting 2050.

# Verdiepende samenvatting

Deze samenvatting beschrijft de belangrijkste inhoudelijke bevindingen uit de verkenning naar de variabelen en scenario's die de ontwikkeling van de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050 bepalen. Aanleiding is de implementatie van de EPBD IV, die lidstaten verplicht een routekaart met grenswaarden voor 2030 en streefwaarden voor de periode na 2030 tot 2050 vast te stellen voor broeikasgasemissies over de volledige levenscyclus van gebouwen. De analyse richt zich daarom niet alleen op het energiegebruik in de gebruiksfase, maar ook op materiaalgebonden emissies, installaties, bouwproces en einde-levensfase.
Per thema is beschreven op welke levensfasen van de wlc-gwp het effect optreedt, wat de verwachte richting van dat effect is, welke bandbreedtes op basis van de literatuur en expertinschattingen aannemelijk zijn, en welke onzekerheden nog niet goed kunnen worden onderbouwd. Daarnaast zijn leerpunten uit Denemarken en Frankrijk meegenomen als referentie voor beleidsinrichting en methodische keuzes.

**Doel, scope en aanpak**
*Doelstelling*
Het rapport brengt de bepalende variabelen en toekomstscenario's in kaart die de wlc-gwp-prestatie van nieuwbouw richting 2050 bepalen, zodat hiermee streefwaarden voor de routekaart kunnen worden bepaald. Het is expliciet een eerste verkennende stap: inventariseren wat al bekend is en welke onzekerheden in een vervolgfase kwantitatief moeten worden ingevuld.

*Regelgevingscontext.*
In het kader van de implementatie van EPBD IV moet Nederland een nationale routekaart voor de wlc-gwp opstellen, inclusief grenswaarden vanaf 2030 en streefwaarden voor de ontwikkeling richting klimaatneutraliteit in 2050. De EPBD-fasering in het rapport: uiterlijk 1 januari 2027 aanbieden routekaart aan Europese Commissie en publicatie van de routekaart, in 2028 wlc-gwp-berekening voor grote gebouwen (>1000 $m^2$) en opname op energielabel, en in 2030 wlc-gwp eisen voor alle nieuwe bouwwerken met labelplicht en opname van de wlc-gwp op het energielabel.

*Scope*
De wlc-gwp betreft emissies over 50 jaar in overeenstemming met de Nederlandse bepalingsmethode en de EN 15804 module-indeling (A1–A5, B-modules incl. B6, C1–C4, en D1 en D2)[2].

*Aanpak*
De verkenning is thematisch opgebouwd rond de belangrijkste variabelen die de toekomstige wlc-gwp beïnvloeden. Er worden vier dominante thema's geïdentificeerd:
- Energie-efficiëntie gebouwen
- Voorraad en volumes
- Bouwmethodiek en materiaalgebruik
- Verduurzaming industrie

[2] De EN 15804 onderscheidt levenscyclusmodules voor bouwproducten en gebouwen, waarbij A1–A5 de product- en bouwfase beschrijven, de B-modules de gebruiksfase inclusief operationeel energiegebruik (B6), C1–C4 de einde-levensfase, module D1 de potentiële baten en lasten buiten de systeemgrens, zoals hergebruik, recycling en module D2 geëxporteerde energie van het perceel.

Per thema worden deelvragen gesteld en wordt beschreven: relevante WLC-fasen, verwachte effecten, bandbreedtes (waar mogelijk), onzekerheden en aanvullend onderzoek. De verkenning steunt op literatuur/beleidskaders en consultatie van experts binnen en buiten TNO, inclusief een workshop.

**Voornaamste bevindingen**
Voor de scenario's is gewerkt met richtinggevende worst-case- en best-case bandbreedtes voor 2030 en 2050 (en een interpolatie voor 2040). In de best-case nemen de emissies in B6 richting 2050 vrijwel volledig af naar nul, terwijl ook in A1–A3 zeer sterke reducties mogelijk zijn als industrie, energiemix, circulariteit en biobased toepassingen tegelijk versnellen. In de worst-case blijven de reducties beperkter, onder meer door vertraging in netverzwaring, beperkte beschikbaarheid van groene elektriciteit, waterstof en CCS, tragere opschaling van circulaire en biobased materialen en achterblijvende industriële verduurzaming. Het rapport benadrukt daarbij dat deze effecten niet onafhankelijk optelbaar zijn. Materiaalvervanging, ontwerpoptimalisatie, hergebruik, recycling en dalende emissiefactoren van materialen grijpen op elkaar in. Een simpele optelsom van afzonderlijke reductiepercentages zou daarom leiden tot overschatting van het totale reductiepotentieel.

De scenario's in dit rapport zijn geen voorspellingen, maar richtinggevende toekomstbeelden met bandbreedtes die zijn uitgewerkt aan de hand van een best-case- en een best-case-scenario. Het best-case-scenario veronderstelt een traag verloop van de energietransitie, beperkte industriële verduurzaming en een beperkte opschaling van circulaire en hernieuwbare oplossingen. Het best-case-scenario gaat juist uit van een versnelde systeemtransitie, waarbij elektriciteit en warmte vrijwel emissievrij worden, de industrie ingrijpend verduurzaamt en circulaire, hernieuwbaar en ontwerpoptimalisaties op grote schaal worden toegepast.

*Energie-efficiëntie gebouwen*
De overgang van BENG (Bijna Energieneutrale Gebouwen) naar ZEB (emissievrije nieuwbouw) is de primaire driver voor daling van B6. Cruciaal is hoe ZEB wordt ingevuld. Zowel aanvullende maatregelen aan de gebouwschil als extra energieopwek kunnen de wlc-gwp beïnvloeden via veranderingen in B6, A1–A3 en, bij teruglevering, module D2. Welke route per saldo gunstiger uitvalt, hangt af van de gekozen maatregelen en de methodische waardering van teruggeleverde energie. De invulling van ZEB wordt naar verwachting scherper na de herziening van de bepalingsmethode energieprestatie gebouwen en de kostenoptimaliteitsstudies, voorzien in 2027-2028.

Daarnaast kunnen bij eigen energie-opwek ook baten buiten de systeemgrens ontstaan door teruglevering van elektriciteit aan het net, deze wordt gedeclareerd in module D2. De omvang van deze bate is echter tijdsafhankelijk en onzeker: door een hoger eigen verbruik van zonnestroom, onder meer door opslag en het wegvallen van de salderingsregeling, wordt minder elektriciteit teruggeleverd, terwijl tegelijk de klimaatbate per teruggeleverde kWh afneemt naarmate de elektriciteitsmix verder vergroent. De grootste kennislacunes betreffen daarom vooral de praktische invulling van ZEB en de toekomstige omvang van teruglevering. Daarnaast speelt de methodische waardering van de baten van teruglevering op bouwwerkniveau een rol. De wijze waarop deze baten worden gewaardeerd is een beleidskeuze.

*Verduurzaming elektriciteit en warmte*
Het rapport signaleert dat gangbare modellering van elektriciteitsmixen vaak conservatief is (door extrapolatie met beperkte horizon), waardoor toekomstige emissiefactorreducties

mogelijk worden onderschat; dit werkt door in zowel B6 als in A1–A3 van energie intensieve producten.

Voor warmtenetten wordt een gemiddelde emissie van circa 39 kg $CO_2$/GJ in 2024 (≈ 140 g $CO_2$/kWh) genoemd, met hierbij het aandachtspunt dat toekomstige emissiefactoren sterk per net kunnen verschillen en beleidsmatig (EED/EPBD-koppeling) dalende maxima kennen richting 2050.

*Voorraad en volumes*
Volumes bepalen vooral de totale (macro)emissies: meer $m^2$ GO (gebruiksoppervlakte) leidt tot hogere absolute emissies, ook als de wlc-gwp per gebouw daalt. Belangrijke aandachtspunten voor een betere bepaling van de ontwikkeling van de emissies op macroniveau zijn het ontbreken van eenduidige, publiek beschikbare prognoses voor de utiliteitsbouw en het beperkte onderscheid tussen uitbreiding, vervanging en transformatie. Daarnaast kunnen beleidswijzigingen, bijvoorbeeld op het gebied van huurbeleid, stikstof, vergunningverlening en ruimtelijke ordening, bouwprognoses sterk beïnvloeden.

*Bouwmethodiek en materiaalgebruik*
De analyse laat de volgende inzichten zien:
- De grootste reductiehefboom ligt bij de productie van materialen (A1–A3).
- De bijdrage van transport (A4) is doorgaans beperkt (<5%) en zelden bepalend voor de totale wlc-gwp.
- Industrieel en prefab bouwen leidt niet automatisch tot $CO_2$-reductie; afhankelijk van de casus varieert het effect tussen circa −10% en +10% in A1–A3 bij gelijkblijvende materialen.
- Minder forfaitair bouwafval bij prefab (reductie van 5% naar 3%) kan voor de betreffende onderdelen circa 2% reductie in productgebonden wlc-gwp opleveren.
- Verbeterde luchtdichtheid en inregeling kunnen mogelijk leiden tot circa 10% reductie van B6-emissies, al is de onderbouwing hiervoor binnen de Nederlandse context nog onzeker.

Circulaire en hernieuwbare materialen, evenals materiaalreductie, hebben potentieel een grote impact op de reductie. De omvang van de gerapporteerde reducties – en eventuele negatieve emissies – is echter sterk afhankelijk van de gehanteerde rekenregels, met name voor de waardering van biogene koolstofopslag (volledig, tijdsgecorrigeerd of niet meenemen) en de behandeling van module D. Daarnaast is een grote onzekerheid over in hoeverre deze materialen de nu gangbare materialen gaan vervangen.

*Verduurzaming industrie*
Industriële routes voor energieopwekking en –gebruik (elektrificatie, waterstof, CCS, recyclaat, procesefficiëntie) bepalen de daling van emissiefactoren van bouwproducten richting 2050 en zijn sterk afhankelijk van een (bijna) volledig groene energiemix. Hiermee wordt benadrukt dat technologie vaak beschikbaar is, maar schaal/tempo door economische randvoorwaarden, beleidszekerheid, infrastructuur en investeringsrisico's wordt begrensd. Daarnaast laat het onderzoek zien dat een groot deel van de emissies van toegepaste bouwproducten buiten Nederland plaatsvindt. De effectiviteit van nationaal beleid op emissiereductie binnen internationale productieketens is mede afhankelijk van Europees beleid, zoals het ETS en CBAM, en van de wijze waarop dit beleid in andere lidstaten wordt geïmplementeerd. Voor emissies die buiten Nederland plaatsvinden, ligt de directe beleidsinvloed minder bij nationale gebouwregelgeving en meer bij Europese en internationale ketensturing.

**Andere Europese landen**
Denemarken en Frankrijk worden besproken als koplopers met een gefaseerde wettelijke invoering van grenswaarden voor de $CO_2$-impact van gebouwen, in lijn met de ontwikkeling richting EPBD IV.

Denemarken hanteert sinds 2023 wettelijke grenswaarden voor de klimaatimpact van gebouwen over de levenscyclus, uitgedrukt in kg $CO_2$-eq./m² per jaar. De hoofdgrenswaarde omvat de modules A1–A3, B4, B6 en C3–C4. Sinds 1 juli 2025 zijn de grenswaarden gedifferentieerd naar gebruiksfunctie en geldt daarnaast een afzonderlijke grenswaarde voor de bouwplaatsmodules A4–A5. Module D wordt afzonderlijk gerapporteerd, maar telt niet mee bij de toetsing. Voor de grenswaarden is een aanscherpingspad richting 2029 vastgesteld.

Frankrijk hanteert onder RE2020 afzonderlijke grenswaarden voor operationele energie en materiaalgebonden emissies[3]. Daarbij wordt expliciet rekening gehouden met biogene koolstofopslag en worden vaste aannames gehanteerd voor de end-of-life fase.

Deze landen laten zien hoe grenswaarden stapsgewijs kunnen worden ingevoerd en aangescherpt, en hoe methodische keuzes (zoals de omgang met biogene koolstof en end-of-life) beleidsmatig worden vastgelegd. De voorbeelden zijn daarmee relevant als referentie voor beleidsopzet en implementatiestrategie, maar de waardes zijn niet vergelijkbaar omdat methodische verschillen zijn t.o.v. de Nederlandse rekenmethodiek.

**Verwachte reductiebandbreedte per levensfase richting 2030, 2040 en 2050**
Het rapport presenteert voor de verschillende levensfasen scenario-gebaseerde prognoses van de procentuele reductie ten opzichte van basisjaar 2023. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen een conservatief (best-case) en een optimistisch (best-case) ontwikkelpad.

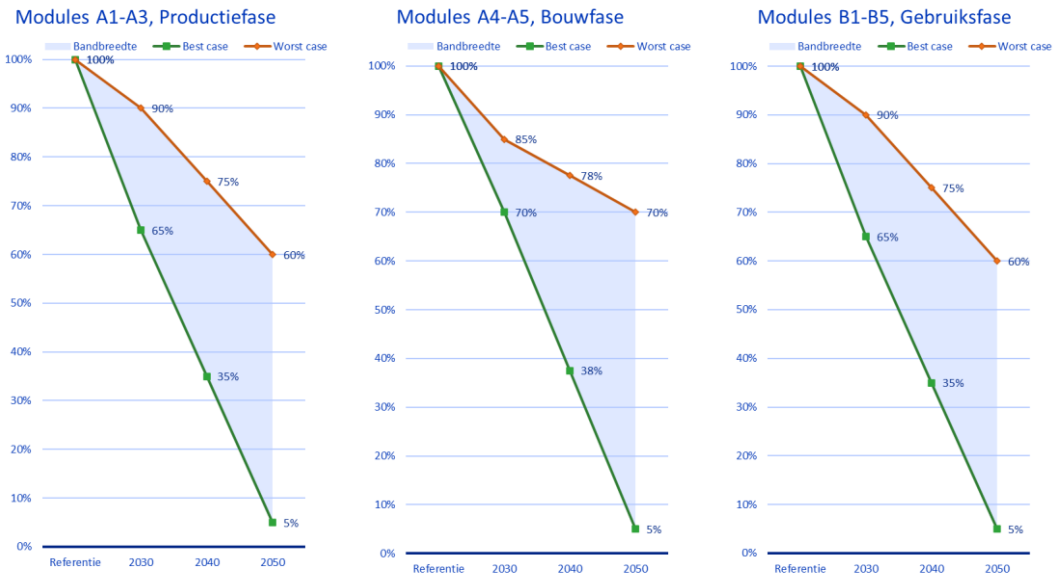
De berekende percentages beschrijven de mogelijke ontwikkeling van de wlc-gwp van hetzelfde referentiegebouw onder aannames over onder meer de verduurzaming van energie, bouwmaterialen, transport en bouwprocessen. Het best-case scenario vormt daarbij uitsluitend de minst gunstige combinatie van de in dit onderzoek doorgerekende aannames. Het is geen haalbaarheidsscenario en ook geen gegarandeerde minimale reductie die in 2030 voor alle nieuwe gebouwen kan worden bereikt. Niet onderzochte ontwikkelingen en verschillen tussen gebouwen zijn hierin niet meegenomen.
De uitkomst van circa 81% in 2030 voor de 12M-hoekwoning kan daarom niet rechtstreeks worden vertaald naar een grenswaarde van 81% van het niveau van 2023. Deze prognose is berekend als proeve van de methodiek en ter illustratie voor één referentiegebouw. Het LBP-onderzoek naar grens- en streefwaarden gaat uit van een bredere verzameling referentiegebouwen en onderzoekt andere beleidsvarianten. Daarbij hebben onder meer de verschillende energiepakketten in referentiegebouwen, de tijdsweging en, in de huidige LBP-berekeningen, de waardering van teruggeleverde elektriciteit in module D2 een groot effect op de berekende ontwikkeling van de totale wlc-gwp.

Voor het bepalen van een grenswaarde voor 2030 moet de definitieve bepalingsmethode worden toegepast op een representatieve verzameling gebouwen. Daarbij moeten ook de spreiding tussen gebouwen en de technische en praktische haalbaarheid worden beoordeeld. Op basis van deze prognose kan daarom niet worden geconcludeerd dat een grenswaarde van 81% van het niveau van 2023 haalbaar is. De bandbreedte geeft uitsluitend inzicht in de mogelijke ontwikkeling en biedt geen basis voor het afleiden van grenswaarden.

[3] Franse term: “Impact carbone de la construction”, vrij vertaald als de materiaal gebonden carbon impact.

De grafieken in Figuur S.1 t/m Figuur S.3 tonen de ontwikkeling van de impact richting 2050, met een bandbreedte tussen een best- en worstcasescenario. De modules zijn geclusterd op basis van het moment in de levenscyclus. Daarbij is onderscheid gemaakt in de volgende groepen: A1–A3, A4–A5, B1–B5, B6, C1–C4, D1 en D2.

De grafieken laten zien dat de potentiële reductie in A1–A3, A4–A5 en B1–B5 groot is, waarbij sommige best-case scenario's in de modelberekeningen richting volledige $CO_2$-neutraliteit of incidenteel zelfs negatieve emissies bewegen. Voor de rapportage is de maximale reductie echter begrensd op circa 95%, omdat volledige $CO_2$-neutraliteit in 2050 niet realistisch wordt geacht vanwege resterende procesemissies, ketenverliezen en praktische beperkingen in de beschikbaarheid van duurzame energie en grondstoffen. Deze begrenzing betreft de reductie van positieve proces- en ketenemissies. Eventuele negatieve scores door de methodische waardering van tijdelijke koolstofvastlegging worden afzonderlijk beschouwd. De toenemende spreiding tussen scenario's richting 2050 laat daarnaast zien dat de uitkomsten sterk afhankelijk zijn van aannames over technologische ontwikkeling, beleid en mate van opschaling.



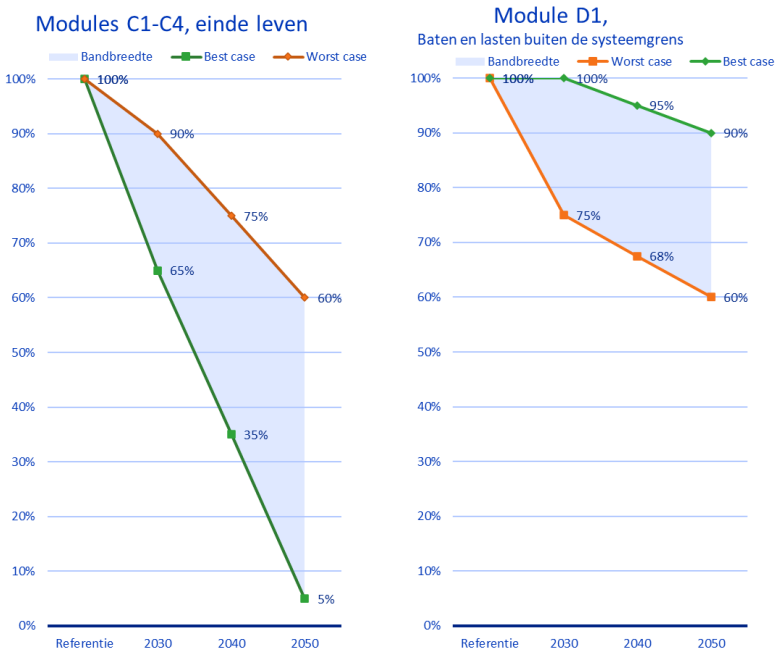

**Figuur S.1:** Grafieken met worst en best-case scenario-analyse van de A1–A3, A4-A5 en B1-5 emissies (ref, 2030, 2040 tot 2050).

In de grafieken van Figuur S.2 zijn de resultaten weergegeven voor B6 (energiegebruik in de gebruiksfase) en D2 (teruglevering van energie). Voor B6 daalt de impact in het best-case scenario richting nul, uitgaande van een vergaand verduurzaamde elektriciteitsmix en verdere aanscherping van energieprestatie-eisen (ZEB/EPBD). Voor D2 is de bandbreedte omgekeerd, omdat het de vermeden $CO_2$-emissies door teruglevering betreft; deze nemen af naarmate de energiemix koolstofarmer wordt.




**Figuur S.2:** Grafieken met worst en best-case scenario-analyse van de B6 en de D2 emissies (ref, 2030, 2040 tot 2050). Bij D2 wordt de absolute omvang van de netto milieubaat weergegeven, waarbij de referentie gelijk is aan 100%. Een hoger percentage betekent hier een grotere negatieve bijdrage en daarmee een lagere totale WLC-GWP. Hierdoor ligt het best-case-scenario bij D1 en D2 boven het worst-case-scenario. Dit is omgekeerd aan de weergave van levenscyclusfasen met een positieve emissiebijdrage.

In Figuur S.3 zijn de eindelevensfasen (C1–C4 en D1) weergegeven. De impact van C1–C4 laat een vergelijkbare afname zien als A1–A3, doordat in de scenario's wordt verondersteld dat ook in de toekomst verdere verduurzaming van processen optreedt. Aangezien de eindelevensfase circa 50 jaar na de bouw plaatsvindt, is dit waarschijnlijk een onderschatting van de reductie. Dit komt doordat de methode voorschrijft om voor eindelevensscenario's conservatieve aannames te hanteren, gebaseerd op de huidige stand der techniek.
Voor module D1 is de afname beperkter. Dit komt doordat D1 de vermeden impact van primaire productie representeert, waarin eveneens een verduurzaming optreedt. Daarnaast wordt module D alleen bepaald op basis van de primaire materiaalinput van het oorspronkelijke product, waardoor de potentiële baten in de toekomst afnemen naarmate deze input lager wordt.

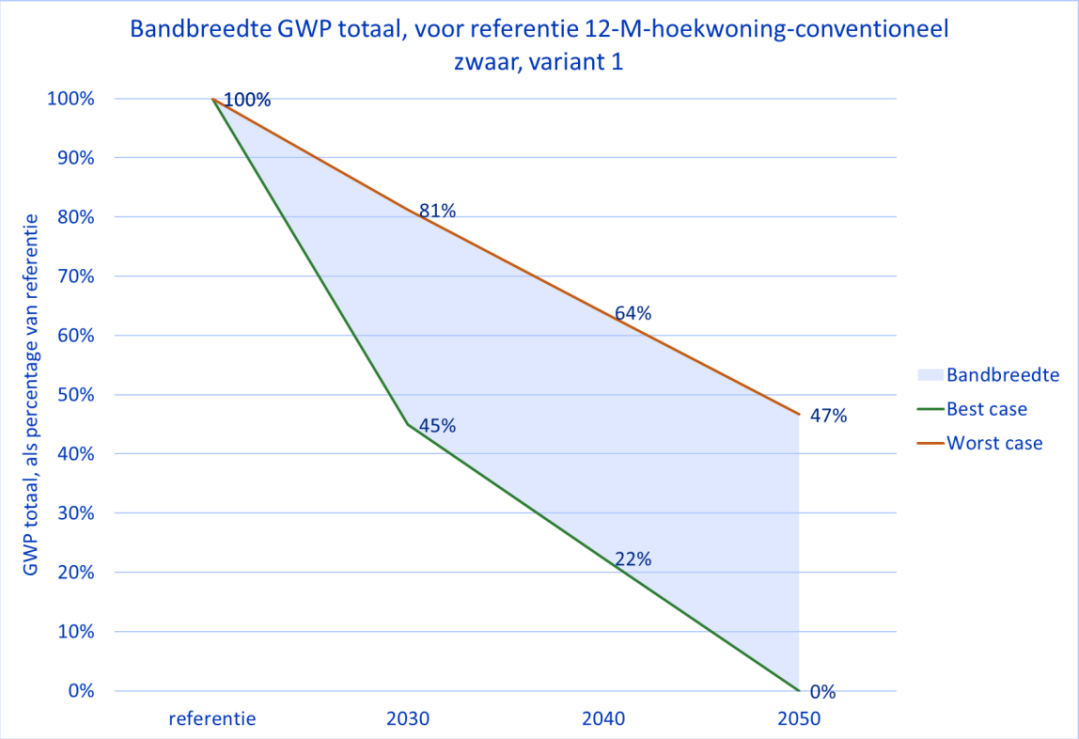



**Figuur S.3:** Grafieken met worst en best-case scenario-analyse van de C1-C4 en de D1 emissies (ref, 2030, 2040 tot 2050). Bij D1 wordt de absolute omvang van de netto milieubaat weergegeven, waarbij de referentie gelijk is aan 100%. Een hoger percentage betekent hier een grotere negatieve bijdrage en daarmee een lagere totale WLC-GWP. Hierdoor ligt het best-case scenario bij D1 en D2 boven het best-case scenario. Dit is omgekeerd aan de weergave van levenscyclusfasen met een positieve emissiebijdrage

Omdat de bijdrage aan de wlc-gwp per levenscyclusfase verschilt, is ook een voorbeeldberekening uitgevoerd voor één referentiewoning: de 12-M-hoekwoning, conventioneel zwaar, variant 1[4]. Hiermee is inzichtelijk gemaakt hoe de ontwikkelingen per fase doorwerken in de totale wlc-gwp. Figuur S.4 toont de ontwikkeling van de totale wlc-gwp ten opzichte van de referentie (100%) voor de periode tot 2050, met een bandbreedte tussen een best-case en best-case scenario.

In beide scenario's is een duidelijke daling zichtbaar. In het worst-case scenario neemt de wlc-gwp geleidelijk af van 100% naar circa 81% in 2030, 64% in 2040 en 47% in 2050. In het best-case scenario verloopt de reductie aanzienlijk sneller: naar circa 45% in 2030, 22% in 2040 en uiteindelijk richting 0% in 2050. De bandbreedte tussen beide scenario's neemt toe in de tijd. Dit wijst op een toenemende onzekerheid richting 2050. De uiteindelijke reductie hangt sterk af van de snelheid en omvang van technologische ontwikkeling, de daadwerkelijke verduurzaming van energievoorziening en materiaalproductie, en de effectiviteit van nationaal en Europees beleid om deze ontwikkelingen te stimuleren en te borgen.

[4] In de berekening van de referentiehoekwoning is module D2 nul er wordt dus netto geen energieteruggeleverd in deze referentie.




**Figuur S.4:** Figuur met het effect van de wlc-gwp ontwikkelingen voor de referentie 12-M-hoekwoning-conventioneel zwaar, variant 1.

### $CO_2$-vastlegging in conceptwoningen

Hoe om te gaan met de tijdelijke $CO_2$-opslag in materialen is een belangrijke methodische en beleidsmatige keuze. In de huidige bepalingsmethode wordt deze opslag niet als definitieve negatieve emissie verrekend. Een toekomstige keuze hierover kan de berekende wlc-gwp sterk beïnvloeden, vooral bij biobased gebouwconcepten.

In Bijlage B wordt een dataset met 46 woningconcepten geanalyseerd. Daaruit volgt dat productgebonden $CO_2$-opslag in toegepaste materialen sterk varieert: van circa 10 kg $CO_2$/m² BVO (beton-gebaseerde concepten) tot 442 kg $CO_2$/m² BVO (overwegend hout/biobased; 89% biobased), met een gemiddelde van 155 kg $CO_2$/m² BVO en 29/46 concepten boven 100 kg $CO_2$/m².

Bij volledige aftrek van opslag zouden 14 van de 46 concepten een negatieve productgebonden wlc-gwp vertonen; bij toepassing van een Franse tijdweging (factor 0,578 over 50 jaar) resteren drie concepten met negatieve wlc-gwp. Hierdoor gaat de koolstofopslag minder zwaar meetellen waardoor biobased varianten minder snel onder de nul uitkomen. Deze negatieve waarden moeten voorzichtig worden geïnterpreteerd. De opgeslagen $CO_2$ komt bij verbranding of afbraak aan het einde van de levensduur grotendeels weer vrij. Alleen bij langdurig hergebruik, recycling of blijvende opslag wordt deze emissie uitgesteld of beperkt. De uitkomst is daarom sterk afhankelijk van de gehanteerde eindelevensscenario's en rekenregels voor koolstofvastlegging.

**Conclusies en aanbevelingen**
De verkenning bevestigt dat het energiesysteem, materialen en gebouwontwerp gezamenlijk bepalend zijn voor de ontwikkeling van de wlc-gwp. Door ZEB en de verduurzaming van de energiemix daalt de impact van de gebruiksfase (B6) in veel gevallen sterk, waardoor de productgebonden emissies dominanter worden[5]. Daarbij is van belang dat niet alle ontwikkelingen in gelijke mate door een wlc-gwp-eis kunnen worden beïnvloed. Een dergelijke eis stuurt vooral op gebouw- en ontwerpkeuzes, materiaaltoepassing en op de vraag naar producten met een lagere $CO_2$-impact. De verduurzaming van de energievoorziening en de industrie wordt echter primair bepaald door breder energie-, klimaat- en industriebeleid. Wel hangen deze ontwikkelingen sterk met elkaar samen: strengere eisen aan gebouwen kunnen de vraag naar installaties, opwek en opslag vergroten, terwijl de uiteindelijke $CO_2$-reductie mede afhankelijk blijft van de verduurzaming van elektriciteit en bouwmaterialen.

**Methodische onzekerheden**
Bijlage A benoemt een set methodiekelementen die uitkomsten substantieel kunnen verschuiven, zowel absoluut als in relatieve vergelijking tussen materialen/concepten:
- Waardering van koolstofvastlegging (wel/geen credit, timing en einde-levensfase);
- Wel of niet meenemen van Module D, inclusief substitutie-aannames;
- Toepassing van tijdweging / dynamische LCA (zoals de Franse benadering);
- Materiaal-specifieke effecten, zoals betoncarbonatatie;
- Aannames over de referentielevensduur (RSL), met name van installaties;
- Forfaitaire einde-levensscenario

[5] In de referentieberekening bedraagt het aandeel van het energiegebruik 49% van de totale wlc-gwp. Wanneer voor 2030, 2040 en 2050 het gemiddelde wordt genomen van het worst case- en best case-scenario, daalt dit aandeel naar respectievelijk 36%, 34% en 18%. Dit illustreert dat de relatieve bijdrage van energiegebruik richting 2050 afneemt, terwijl de productgebonden impact relatief belangrijker wordt.

# Inhoudsopgave

Management samenvatting ..... 3
Verdiepende samenvatting ..... 4
Afkortingen en woordenlijst ..... 15
1 Inleiding ..... 17
1.1 Leeswijzer ..... 18
1.2 Samenhang met andere EU-beleidsinstrumenten ..... 19
2 Energie-efficiëntie gebouwen ..... 20
2.1 Aanscherping eisen (EPBD/BENG/ZEB) ..... 21
2.2 Comforteisen ..... 24
2.3 Verduurzaming energiemix ..... 26
2.4 Eigen energie-opwek ..... 29
2.5 Energieopslag ..... 31
3 Voorraad en volumes ..... 34
3.1 Demografie ..... 34
3.2 Verandering van woonbehoefte ..... 36
3.3 Economische ontwikkelingen ..... 37
4 Bouwmethodiek en materiaalgebruik ..... 40
4.1 Industriële en modulaire bouw ..... 41
4.2 Biobased en lichter bouwen ..... 42
4.3 Hergebruik bouwmaterialen ..... 46
4.4 Arbeidspotentieel ..... 49
4.5 Risico door gebrek aan toezicht ..... 52
4.6 Leveringszekerheid ..... 52
4.7 Materiaal efficiëntie door ontwerp optimalisatie ..... 55
5 Verduurzaming industrie ..... 57
5.1 Elektrificatie van processen ..... 59
5.2 Waterstof en alternatieve energiedragers ..... 60
5.3 Carbon Capture en Storage (CCS) ..... 63
5.4 Gerecyclede grondstoffen ..... 65
5.5 Procesefficiëntie en duurzamere productie ..... 66
6 Verwachte ontwikkeling per LCA-fase ..... 76
6.1 A1-A3 productiefase ..... 78
6.2 A4 – A5 Transport bouwfase ..... 80
6.3 B1-B5 (onderhoud en vervanging) ..... 81
6.4 B6 Energiegebruiksfase ..... 82
6.5 C1-C4 Sloop en einde levensfase ..... 83
6.6 D1 Milieubaten en lasten buiten de systeemgrens voor producten ..... 87
6.7 D2 Milieubaten ge-exporteerde energie ..... 89
6.8 Totaal reductie t.o.v. van een referentie woning ..... 90
7 Synthese ..... 92

7.1 Energie-efficiëntie gebouwen ..... 92
7.2 Voorraad en volumes ..... 93
7.3 Bouwmethodiek en materiaalgebruik ..... 94
7.4 Verduurzaming bouwmaterialenindustrie ..... 95

8 Conclusies en aanbevelingen voor vervolgfase ..... 97
8.1 Conclusies ..... 97
8.2 Onzekerheden ..... 98
8.3 Overwegingen voor een vervolgfase ..... 99

Referenties ..... 103

Ondertekening ..... 107

Bijlagen
Bijlage A: Methodische belangrijkste onzekerheden 108
Bijlage B: Tabel conceptwoningen en de wlc-gwp 112
Bijlage C: Andere Europese landen 114
Bijlage D: Geraadpleegde experts 118
Bijlage E: Voorbeeldberekening compensatie van fossiele primaire energie door lokaal opgewekte hernieuwbare elektriciteit 119

# Afkortingen en woordenlijst

### Afkortingen

| Afkorting | Omschrijving |
|---|---|
| AFOLU | Agriculture, Forestry and Other Land Use |
| BAG | Basisregistratie Adressen en Gebouwen |
| BENG | Bijna Energie Neutraal Gebouw |
| BVO | Bruto vloeroppervlak |
| CBAM | Carbon Border Adjustment Mechanism |
| CBS | Centraal Bureau voor de Statistiek |
| CCS | Carbon Capture and Storage |
| CCU | Carbon Capture and Utilisation |
| CLT | Cross-Laminated Timber |
| DRI | Direct Reduced Iron |
| EPBD | Energy Performance of Buildings Directive |
| EPBD IV | Energy Performance of Buildings Directive – vierde herziening |
| EPD | Environmental Product Declaration |
| GJ | Giga Joule |
| GO | Gebruiksoppervlakte |
| GWW | Grond-, Weg- en Waterbouw |
| IC | Impact indicator construction (Franse RE2020) |
| KEV | Klimaat- en Energieverkenning |
| LCA | Life Cycle Assessment |
| MKI | MilieuKostenIndicator |
| MMC | Modern Methods of Construction |
| NMD | Nationale Milieudatabase |
| NTA 8800 | Nederlandse Technische Afspraak 8800 |
| PEF | Primary Energy Factor |
| PV | Photovoltaics (zonnepanelen) |
| RSL | Reference Service Life |
| RVO | Rijksdienst voor Ondernemend Nederland |
| SPF | Seasonal Performance Factor |
| WKO | Warmte-Koude Opslag |
| wlc-gwp | Whole Life Cycle Global Warming Potential |
| ZEB | Zero Emission Building |

## Woordenlijst

| | Definitie |
|---|---|
| **BENG (Bijna Energie Neutraal Gebouw)** | Nederlandse energieprestatie-eis voor nieuwbouw, gericht op lage energiebehoefte, beperkt fossiel energiegebruik en inzet van hernieuwbare energie. |
| **Biogene koolstof** | Koolstof opgeslagen in biobased materialen (zoals hout). |
| **BVO (Bruto Vloeroppervlak)** | Totale vloeroppervlakte van een gebouw, gemeten volgens de geldende norm (NEN 2580). |
| **Circulariteit** | Mate waarin materialen en producten worden hergebruikt, gerecycled of in gesloten kringlopen blijven. |
| **Emmisievrij** | Bij ZEB betekend emissievrij geen emissie op de locatie waar energie wordt verbruikt. Dit is dus in afwijking van de wlc-gwp, die de emissie in de hele keten betreft, dus ook emissies buiten de locatie. Daarnaast omvat de wlc-gwp niet alleen over de emissie gekoppeld aan het energieverbruik maar ook de emissie veroorzaakt door de toepassing van bouwproducten en gebouwinstallaties. |
| **End-of-life (EoL)** | Fase waarin materialen vrijkomen na gebruik en worden verwerkt, hergebruikt of verwijderd. |
| **hergebruik** | Het opnieuw inzetten van producten, componenten of materialen, met behoud van hun oorspronkelijke vorm en met slechts beperkte aanpassingen of bewerkingen. |
| **hoogwaardig recycling** | Het verwerken van afgedankte materialen tot secundaire grondstoffen die opnieuw kunnen worden ingezet in toepassingen van vergelijkbare kwaliteit en waarde. |
| **LCA (Life Cycle Assessment)** | Methode om de milieueffecten van een product of gebouw over de volledige levenscyclus te bepalen, conform EN 15804 en EN 15978. |
| **MKI (Milieukostenindicator)** | Samengestelde indicator die milieueffecten monetariseert en uitdrukt in euro's. |
| **MPG (Milieuprestatie Gebouwen)** | Nederlandse indicator voor de milieuprestatie van gebouwen, gebaseerd op meerdere milieueffectcategorieën en uitgedrukt in € per m² BVO per jaar. |
| **recycling** | Het zodanig verwerken van afgedankte materialen dat zij opnieuw als grondstof kunnen worden ingezet voor de productie van nieuwe materialen of producten. |
| **wlc-gwp** | Totale broeikasgasemissies over de gehele levenscyclus van een gebouw, uitgedrukt in kg $CO_2$-equivalent per m² GO per jaar, inclusief materiaalgebonden en operationele emissies. |
| **ZEB (Zero Emission Building)** | Gebouw met een zeer lage energiebehoefte en zonder operationele $CO_2$-emissies, zoals beoogd in de EPBD IV. |

# 1 Inleiding

Voorliggend rapport verkent welke variabelen en toekomstscenario's bepalend zijn voor de ontwikkeling van de Whole Life Cycle Global Warming Potential (wlc-gwp) van nieuwbouw richting 2050.
Het doel van dit rapport is om de bepalende variabelen en toekomstscenario's voor de Whole Life Carbon (WLC) prestaties van gebouwen in kaart te brengen richting 2050.

In het kader van de implementatie van de herziene Europese richtlijn betreffende de energieprestatie van gebouwen (EPBD IV) moet Nederland vanaf 2030 grenswaarden invoeren voor de bijdrage van nieuwe gebouwen aan klimaatverandering over hun volledige levenscyclus (wlc-gwp). Deze eis heet 'whole life cycle global warming potential' of afgekort wlc-gwp. In het Nederlands is dit 'bijdrage aan de opwarming van de aarde over het de gehelen levenscyclus van een gebouw'. De berekening dient voor het inzicht in en de sturing op de broeikasgasemissies die gepaard gaan met nieuwe bouwwerken gedurende hun levensduur (50 jaar) vanaf de winning en productie van grondstoffen tot aan de sloop en verwerking van het sloopafval van het gebouw. De wlc-gwp wordt in de EPBD-IV (Richtlijn (EU) 2024/1275) primair vastgelegd in artikel 7 en de rekenmethode in bijlage III [1] . Hierbij gaat het om zowel de broeikasgas voetafdruk van de toegepaste bouwproducten, de bouwkundige installaties als van het gebouw gebonden energieverbruik in het bouwwerk (de zogenoemde module B6) gedurende 50 jaar. De wlc-gwp wordt berekend conform de Nederlandse bepalingsmethode wlc-gwp [2], welke is uitgewerkt in de "Eindrapportage wlc-gwp Methode bepaling WLC-broeikasgasemissie door LBP sight [3].[6]

De introductie van de wlc-gwp is volgens de EPBD als volgt gefaseerd, verdeeld over drie hoofdstappen (Ministerie VRO, 2025. [4]:

1. Uiterlijk op 1 januari 2027 publicatie door elke lidstaat van een zogeheten Routekaart wlc-gwp. Deze geeft aan hoe de emissies gedurende de levenscyclus van de nieuwbouw vanaf het niveau in 2030 zich ontwikkelen naar klimaatneutraliteit in 2050. Zo zal de routekaart ook aangeven welke eis in 2030 wordt ingevoerd en welke streefwaarden zijn voorzien in de periode tussen 2030 en 2050.
2. Vanaf 2028 dient bij de vergunningsaanvraag voor grote gebouwen (met een gebruiksoppervlakte van meer dan 1000 $m^2$) een berekening van de wlc-gwp te worden ingediend bij het bevoegd gezag. De uitkomst daarvan dient op het energielabel te worden vermeld.
3. In 2030 dienen alle nieuwe bouwwerken met labelplicht te voldoen aan de dan geldende eisen voor de emissies van broeikasgassen gedurende de gehele levenscyclus per gebruiksfunctie en moet de wlc-gwp zijn vermeld op het energielabel.

Historisch wordt vaak de vuistregel gehanteerd dat het grootste deel van de gebouwgerelateerde $CO_2$-emissies samenhangt met operationele emissies: circa 70–80% door energiegebruik in de gebruiksfase en circa 20–30% door productgebonden emissies. Deze verhouding is vooral gebaseerd op de bestaande gebouwvoorraad. Bij energiezuinige nieuwbouw ligt het aandeel productgebonden emissies aanzienlijk hoger en kan dit rond de

[6] Mogelijk wordt deze nog geactualiseerd en bij invoering van de wlc-gwp-verplichting als vigerende versie vastgesteld.

50% van de totale levenscyclusimpact bedragen.[5]. De verwachting is dat dit door het terugdringen van energieverbruik op gebouwniveau (energie-efficiënte) en verduurzaming van de energievoorziening het aandeel embodied relatief zal stijgen. Het doel van dit rapport is om de bepalende variabelen en toekomstscenario's voor de Whole Life Carbon (WLC) prestaties van gebouwen richting 2050 in kaart te brengen richting 2050. Het onderzoek verkent hoe externe ontwikkelingen de integrale wlc-gwp-score beïnvloeden. De inzichten uit deze verkenning dienen als basis voor het opstellen van streefwaarden voor de routekaart. Dit rapport vormt een eerste verkennende stap waarin wordt geïnventariseerd welke informatie reeds beschikbaar is, in welke mate deze is uitgewerkt en welke onderdelen al kwantitatief zijn onderbouwd.

## 1.1 Leeswijzer

Dit rapport verkent welke variabelen en scenario's de ontwikkeling van de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050 beïnvloeden. Het document is thematisch opgebouwd en volgt geen volledige kwantitatieve doorrekening, maar een systematische inventarisatie van bepalende factoren, onzekerheden en kennisonzekerheden.

Hoofdstuk 2: Energie-efficiëntie gebouwen
Behandelt de invloed van normering (EPBD/BENG/ZEB), comforteisen, verduurzaming van de energiemix, eigen energieopwekking en energieopslag op met name de gebruiksfase (B6) en indirect op de productiefase (A1–A3). Per onderdeel wordt aangegeven welke WLC-fasen geraakt worden, wat het verwachte effect is en waar onzekerheden zitten.

Hoofdstuk 3: Voorraad en volumes
Richt zich op de ontwikkeling van nieuwbouwvolumes en gebouwtypologieën. Dit hoofdstuk beschrijft vooral de invloed op de totale (macro)emissies en minder op de emissie-intensiteit per gebouw.

Hoofdstuk 4: Bouwmethodiek en materiaalgebruik
Analyseert effecten van industriële bouw, biobased toepassingen, hergebruik en materiaalreductie. De nadruk ligt hier op de productgebonden emissies (A1–A3) en de interactie met module D. Ook wordt ingegaan op onzekerheden rond vervangingspercentages en adoptiesnelheid.

Hoofdstuk 5: Verduurzaming industrie
Beschrijft transitiepaden voor dominante productstromen (zoals staal, beton en installaties) via elektrificatie, waterstof, CCS en recyclaat. De effecten hebben primair betrekking op A1–A3, maar werken indirect door in andere fasen.

Hoofdstuk 6: verwachte ontwikkeling per LCA-fase.
Beschrijft de verwachte ontwikkeling per LCA-levensfase (A1–A3, A4–A5, B1–B6, C1–C4 en D) richting 2030 en 2050 samengevat, inclusief de gehanteerde bandbreedtes voor worst-case en best-case scenario's.

Hoofdstuk 7: Synthese
Brengt de afzonderlijke thema's samen en presenteert de verwachte bandbreedte in procentuele reducties per levensfase (2030 en 2050). De weergegeven bandbreedtes zijn scenario-gestuurd en indicatief.

Hoofdstuk 8: Conclusies en aanbevelingen
Dit hoofdstuk bevat de conclusies en de aanbevelingen.

In dit rapport wordt verwezen naar de levensduurfases conform EN 15804 en EN 15978. Hieronder is de systematiek schematisch weergegeven:

| Productiefase | | | Bouwfase | | Gebruiksfase | | | | | Sloop- en vewerkingsfase | | | | Baten en lasten buiten de systeemgrens | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B6 | C1 | C2 | C3 | C4 | D1 | D2 |
| Winning van grondstoffen | Transport | Productie | Transport | Constructie | Gebruiksfase | Onderhoud | Reparaties | Vervanging | Operationeel energiegebruik | Sloop | Transport | Afvalbewerking | Finale afval vewerking | Lasten- en baten uit hergebruik, recycling en energieterugwinning en/of andere terugwinning | Baten en lasten uit geëxporteerde gebruiksmiddelen |

**Figuur 1.1:** Overzicht van de modules conform EN 15804 en EN 15978 waarnaar in deze rapportage wordt verwezen.

## 1.2 Samenhang met andere EU-beleidsinstrumenten

De ontwikkeling van de wlc-gwp van gebouwen wordt niet alleen bepaald door gebouwgebonden ontwerpkeuzes en de toekomstige nationale uitwerking van de EPBD, maar ook door bredere Europese beleidsinstrumenten die de emissie-intensiteit van energie, materialen en producten beïnvloeden. De wlc-gwp-routekaart staat daarmee niet op zichzelf, maar bouwt voort op een bredere beleidscontext waarin vraagreductie, verduurzaming van energiedragers, industriële transitie en productinformatie parallel worden aangestuurd.

Aan de kant van de operationele emissies zijn met name de EPBD en de EED relevant voor het terugdringen van de energievraag van gebouwen. Daarnaast beïnvloeden ETS II en RED III de randvoorwaarden voor de verduurzaming van warmte- en energievoorziening in de gebouwde omgeving. De EU Taxonomy werkt daarbij vooral als financieel en rapportagegericht sturingsmechanisme, doordat zij de vraag naar aantoonbaar duurzame gebouwen en onderliggende prestatie-informatie vergroot.

Aan de kant van de materiaalgebonden emissies zijn met name ETS en CBAM relevant, omdat zij de $CO_2$-intensiteit en prijsvorming van energie-intensieve bouwmaterialen zoals staal, cement en aluminium beïnvloeden. De CPR ondersteunt de wlc-gwp-berekening op gebouwniveau door geharmoniseerde milieu-informatie op productniveau te leveren. BPIE benadrukt daarbij dat de CPR de EPBD feitelijk onderbouwt met product- en materiaaldata voor gebouwniveau-berekeningen. Ook ESPR is relevant, omdat dit kader samen met de CPR bijdraagt aan digitale en interoperabele productinformatie, onder meer via digitale productpaspoorten. [6]

Een wlc-gwp-eis stuurt vooral op ontwerpkeuzes, materiaalgebruik en de vraag naar $CO_2$-arme producten. De verduurzaming van de energievoorziening en de industrie wordt echter vooral bepaald door breder energie-, klimaat- en industriebeleid. De nationale routekaart voor wlc-gwp moet daarom worden gezien als een aanvullend sturingsinstrument op gebouwniveau.

# 2 Energie-efficiëntie gebouwen

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de energie-efficiëntie van gebouwen zich richting 2050 kan verbeteren en welke factoren daarbij een rol spelen. Het behandelt zowel technologische, sociale en beleidsmatige aspecten die leiden tot lager energiegebruik in woningen en utiliteitsbouw, en de gevolgen daarvan voor met name de operationele $CO_2$-uitstoot in de gebouwde omgeving. Beleidskaders en trends op het gebied van gebouwprestaties worden in kaart gebracht om scenario's te schetsen voor de bijdrage van dit thema aan het reduceren van de wlc-gwp.

## 2.1 Aanscherping eisen (EPBD/BENG/ZEB)

***Deelvraag: Wat is het effect van een verdere aanscherping van de bouwregelgeving en energieprestatie-eisen (zoals EPBD, BENG en ZEB-eisen) op de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050.***

Deze paragraaf beschrijft de aanscherping van energieprestatie-eisen voor nieuwe gebouwen, zoals de Europese EPBD-richtlijn, en de introductie van Zero Energy Building-eisen. Het geeft aan hoe strengere eisen en regelgeving tot 2050 de gebouwschil, installaties en energieprestatie verbeteren. Ook wordt ingegaan op de verwachte effecten van deze normen op het energieverbruik en de $CO_2$-reductie in de gebruiksfase van gebouwen.

**Implementatie van de EPBD IV en ZEB-eisen**
De herziene richtlijn EPBD scherpt de kaders aan waarbinnen lidstaten hun energieprestatie-eisen moeten bepalen. Lidstaten hebben tot eind mei 2026 de tijd om de aangepaste EPBD om te zetten naar nationaal beleid en regelgeving. Vanaf 1 januari 2030 moeten alle nieuwe woningen en utiliteitsgebouwen emissievrij zijn. De EPBD IV[7] beschrijft onder andere een Zero Emission Building (ZEB) als een gebouw met een zeer hoge energieprestatie, dat geen of zeer weinig energie nodig heeft, ter plaatse geen koolstofemissies uit fossiele brandstoffen genereert, en geen of zeer weinig operationele broeikasgasemissies genereert.

In de Kamerbrief van 14 juli 2025 informeerde minister van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (VRO) de Tweede Kamer over hoe Nederland de richtlijn Energy Performance of Buildings Directive IV (EPBD IV) gaat implementeren (Ministerie VRO, 2025 Brief aan Parlement - Implementatie EPBD[8]).

De Kamerbrief werkt het ZEB-niveau voor gebouwen uit aan de hand van vier aspecten:

1. Zeer lage energiebehoefte voor verwarming en/of koeling;
2. Toepassing van efficiënte installaties;
3. Geen fossiele emissies op het eigen perceel ("aardgasvrij");
4. Maximale inzet van hernieuwbare energie, bijvoorbeeld via opwek op of nabij het gebouw of via lokale warmtenetten.

In de mededeling van de EC over implementatie van de EPBD IV (EC, 2025, pagina 186 [9]) geeft een nadere uitwerking van aspect 4. Het totale primaire energieverbruik van een ZEB gebouw moet op jaarbasis volledig worden gedekt door een of meer van de volgende opties:

1. ter plaatse of dichtbij geproduceerde hernieuwbare energie
2. hernieuwbare energie die wordt geleverd door een hernieuwbare-energiegemeenschap
3. energie uit een efficiënt systeem voor stadsverwarming en -koeling
4. energie uit koolstofvrije bronnen

Ter plaatse of dichtbij betekent op het gebouw, op het terrein van het gebouw of wanneer het gebouw met een speciale aansluiting met de productiebron is verbonden. Voor de definitie van efficiënte stadsverwarming wordt in de EPBD verwezen naar de EED 2023 (EC, 2023). Daarin wordt efficiënte stadsverwarming gedefinieerd als een geleidelijke toename in toekomstige jaren van het aandeel hernieuwbare energie, restwarmte en hoogrenderende warmtekrachtkoppeling met eisen aan broeikasgasemissies van de geleverde warmte voor de zichtjaren 2026, 2035, 2045 en 2050. Energie uit koolstofvrije bronnen betreft elektriciteit uit het elektriciteitsnet voor zover deze is geproduceerd met hernieuwbare elektriciteit of kernenergie.

Een mogelijkheid is dat het totale primaire energieverbruik van een ZEB gebouw over een jaar volledig en continu wordt gedekt door een of meer van de opties onder 1) tot en met 4). De mededeling van de EC meldt dat een ZEB gebouw ook tijdelijk kan worden voorzien door andere energiebronnen, waaronder energiebronnen met een hoge $CO_2$-uitstoot en deze niet-conforme energie op jaarbasis compenseren met de hernieuwbare energie die ter plaatse wordt geproduceerd en ter plaatse wordt gebruikt voor niet-EPB-toepassingen of naar het net wordt geëxporteerd (blz 189 EC,2025 [9]).

Artikel 11 van de EPBD IV legt vast dat het primair energieverbruik van ZEB gebouwen minstens 10% lager moet zijn dan de BENG-eisen.

Voor alle nieuwbouw moeten per 2030 de nieuwe ZEB-eisen gaan gelden. Deze eisen vervangen de huidige BENG-eisen. De ZEB-eisen worden gebaseerd op de gemoderniseerde bepalingsmethode van de NTA8800[10] en een kostenoptimaliteitsstudie. Deze studie wordt periodiek opnieuw uitgevoerd zodat de actuele prijzen en technische ontwikkelingen meegenomen kunnen worden. Praktisch betekent dit dat de eisen voor nieuwbouw om de 5 jaar worden geëvalueerd, en indien daar aanleiding voor is herzien. IV legt vast dat het primair energieverbruik van ZEB gebouwen minstens 10% lager moet zijn dan de BENG-eisen. Overeenkomstig artikel 6, lid 2, moeten de lidstaten met regelmatige tussenpozen van ten hoogste vijf jaar verslag uitbrengen aan de Commissie over hun kostenoptimale berekeningen. Het eerste verslag moet uiterlijk op 30 juni 2028 worden ingediend (EC, 2025 [9]).

Overheidsinstanties krijgen in 2028 al met nieuwe eisen voor nieuwbouw te maken. Deze eisen worden dan nog wel gebaseerd op de huidige bepalingsmethode en gecommuniceerd in 2026. Voor de hoogte van de energiezuinigheid wordt uitgegaan van de EPBD die als ondergrens ‘BENG minus 10%’ voorschrijft. Vanaf 2030 moeten nieuwe overheidsgebouwen voldoen aan de eisen zoals die dan voor alle nieuwbouw van toepassing zijn, zoals bovenstaand beschreven (Ministerie VRO, 2025)[8].

Per 2030 komt er een nieuw energielabel voor gebouwen. De energielabelletter moet vanaf 2030 worden gebaseerd op een andere indicator die voor alle lidstaten gelijk is, namelijk het totaal primair energiegebruik. Vergeleken met de huidige indicator (het primair fossiel

energiegebruik), wordt met het totaal primair energiegebruik ook het verbruik van hernieuwbare energie meegenomen, waardoor meer inzichtelijk hoeveel energie een gebouw in totaal nodig heeft. Vanaf 2030 moeten de energielabelletterklassen worden vereenvoudigd. De huidige labels A+ t/m A++++ zoals die nu in Nederland bestaan komen bij de nieuwe labels niet meer voor. De nieuwe klassenindeling bestaat in de basis uit de categorieën G t/m A. Zoals eerder benoemd wordt ook op het energielabel inzichtelijk gemaakt of een gebouw voldoet aan het ZEB-niveau voor 2050.

Tegelijk met het nieuwe energielabel wordt in 2030 ook een gemoderniseerde bepalingsmethode voor de energieprestatie van gebouwen ingevoerd deels ter implementatie van de EPBD. De bepalingsmethode rekent indicatorwaardes uit die gebruikt worden voor het aantonen van het voldoen aan de nieuwbouweisen, voor het bepalen van de energielabelletter en voor het berekenen van de niveaus waar het gebouw op uitkomt wat betreft de eerder genoemde vier ZEB-aspecten. De gemoderniseerde bepalingsmethode vervangt dan de huidige bepalingsmethode, de NTA 8800.

### 2.1.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

Voor de GWP zullen de ZEB eisen bepalen welk energieverbruik nieuwe woningen en gebouwen tijdens de gebruiksfase (B6) hebben, maar ook welke isolatiematerialen en installaties worden toegepast (A1, A3). Dat laatste is ook van belang voor andere fasen in de GWP berekening (C,D). Het energiegebruik in de gebruiksfase van nieuwbouw wordt bepaald met de bepalingsmethode; de grenswaarde bepaalt hoeveel dit maximaal mag zijn. De toepassing van isolatie en installatie - onder andere, maar ook infiltratie, PV, glaskwaliteit enz - worden wel bepaald voor referentiegebouwen waarmee de kostenoptimaliteit van de grenswaarden bepaald wordt, maar liggen niet vast in die grenswaarden. Een bouwer mag een andere invulling kiezen.

### 2.1.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

De aanpassingen van de EPBD IV in wet  worden geïmplementeerd in een aantal tranches (Ministerie VRO, 2026 [11]). De 1e tranche is gericht op de EPBD IV onderdelen die per 29 mei 2026 in werking moeten treden. Deze tranche bevat een aantal wijzigingen in de bepalingsmethode van de energieprestatie, extra zonne-energie op gebouwen, technische bouwsystemen, duurzame mobiliteit, laadinfrastructuur voor elektrisch vervoer en (fiets-)parkeerplaatsen, uitwisseling van gegevens en databanken over energieprestatie gebouwen, verbeterde en uitgebreidere informatie op het energielabel, uitbreiding van de labelplicht naar en (verslagen van) keuringen van systemen voor verwarming, ventilatie en airconditioning.

De 2e tranche van de regelgeving die de implementatie van de EPBD IV vormgeeft heeft betrekking op de aanpassing van de huidige BENG-eisen naar tijdelijke ZEB-eisen voor nieuwe gebouwen van overheidsinstanties en de rekenplicht wlc-gwp voor nieuwe gebouwen die groter zijn dan 1.000m². Deze verplichtingen gaan beide gelden per 1 januari 2028.
De 3e tranche van de implementatie regelgeving heeft betrekking op de minimum energieprestatie-eisen voor utiliteitsgebouwen die per 2030 en 2033 gaan gelden en het ZEB-niveau voor de bestaande gebouwen. Deze onderdelen zullen onder andere via een wijziging van het Bbl per 1 juli 2027 in werking treden. In maart en april van dit jaar worden de eerste concepten hiervan besproken met de stakeholders.

De 4e en laatste tranche van de implementatie regelgeving heeft betrekking op het moderniseren van de bepalingsmethode energieprestatie en het aanpassen van de systematiek voor energielabels, omdat per 2030 een nieuw energielabel van kracht zal worden, gebaseerd op totaal primair energiegebruik en met een indeling van A tot en met G. De modernisering betekent dat de uitkomsten van de bepalingsmethode anders zullen worden dan ze nu zijn. Dit kan gevolgen hebben voor gebouweigenaren en huurders. De inzet is om deze gevolgen minimaal te laten zijn. In de komende jaren zullen de effecten bepaald worden. Ook zullen met de nieuwe bepalingsmethode in 2028 twee eisen worden herijkt, zoals de ZEB-eisen voor nieuwbouw en de wlc-gwp per 2030. De voorbereidingen voor de 4etranche zijn al in gang gezet en zullen naar verwachting uiterlijk op 1 juli 2029 in werking treden.

Omdat de ZEB-eisen nog moeten worden vastgesteld aan de hand van de gemoderniseerde bepalingsmethode is het lastig om aan te geven wat de ZEB-eisen zullen betekenen voor het energieverbruik van nieuwe woningen en gebouwen.  Er zijn een paar zaken die we daarover wel kunnen opmerken:

- TNO verwacht dat de isolatie-eisen uit het bouwbesluit voor nieuwbouw waarschijnlijk niet verder worden aangescherpt, omdat hogere isolatiewaarden een afnemende meeropbrengst hebben en daardoor niet kosteneffectief zijn. In 2023 heeft RVO nog advies gegeven over aanscherping van isolatie-eisen voor nieuwbouw. Op basis van een kostenoptimaliteitsstudie uitgevoerd door DGMR adviseerde RVO de huidige isolatie-eisen te handhaven (RVO, 2023 [12]).
- De ZEB eisen vereisen dat nieuwbouw aardgasvrij is. Nieuwe woningen en gebouwen zijn sinds aangepaste nationale wetgeving in 2018 in principe al verplicht aardgasvrij in Nederland[7], nieuwe woningen of gebouwen gebruiken een elektrische warmtepomp of zijn aangesloten op een collectieve aardgasvrije installatie of warmtenet voor verwarming. De Wet Voortgang Energietransitie (wet VET) trad op 1 juli 2018 in werking. De wet regelt onder meer dat nieuwbouw niet meer zal worden aangesloten op aardgas, behalve in uitzonderlijke situaties.

De ZEB-eisen vragen een totaal primair energieverbruik dat 10% lager is dan de huidige BENG-eisen. Dit zou kunnen door betere energie-efficiëntie, maar ook meer eigen elektriciteitsproductie met zonnepanelen kunnen.

### 2.1.3 Wat zijn de onzekerheden?

Wanneer aan nieuwbouw een eis wordt gesteld voor wlc-gwp en voor ieder nieuwe woning en nieuw gebouw een wlc-gwp moet worden bepaald bij de aanvraag van een bouwvergunning, dan ligt het voor de hand het energieverbruik te bepalen op basis van dezelfde theoretische berekening die ook al voor de BENG en ZEB eisen wordt gemaakt. Voor een routekaart zou het logisch zijn dan dezelfde waarden te gebruiken.

Omdat de ZEB eisen pas in 2028 worden vastgesteld aan de hand van een gemoderniseerde bepalingsmethode weten we nu nog niet wat dat zal betekenen voor het energieverbruik van verschillende energiedragers en toe te passen verduurzamingsmaatregelen. De onzekerheden zitten dus in de vraag of de ZEB-eisen zullen leiden tot de toepassing van hogere isolatiewaarden van gevel, dak en vloer, ander type glas dan nu gebruikelijk is, of de toepassing van energiezuinige installaties voor verwarming, koeling, ventilatie en verlichting.

[7] Aansluiting op het gasnet is alleen nog mogelijk als de gemeente dit expliciet toestaat en motiveert (uitzonderingssituatie)

### 2.1.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

De mogelijke impact van ZEB zou kunnen zijn dat de isolatie-eisen nog worden aangescherpt en dat alle warmte en gebouwgebonden elektriciteitsverbruik duurzaam wordt opgewekt. Maar het kan ook zo zijn dat isolatie-eisen niet worden aangescherpt omdat dat niet rendabel is en alleen gestuurd wordt op 10% lager primair energieverbruik dan de huidige BENG-eisen, wat met eigen elektriciteitsproductie met zonnepanelen wordt gerealiseerd.

### 2.1.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Er is een studie nodig naar de kostenoptimaliteit van ZEB-eisen (voorzien in 2028). Dan zal duidelijk worden wat de ZEB-eisen betekenen en in hoeverre deze leiden tot lagere warmtevraag en gebouwgebonden elektriciteitsvraag dan de huidige BENG-eisen.

De studies naar kostenoptimaliteit geven een beeld welke combinatie van isolatiematerialen en installaties in nieuwe woningen en gebouwen naar verwachting na 2030 aan de ZEB-eisen voldoen. Om een beeld te krijgen van de werkelijk toegepaste maatregelen in nieuwbouw kan ook een analyse van de energielabeldatabase worden gemaakt. Het type isolatiematerialen dat in nieuwbouw wordt toegepast wordt jaarlijks onderzocht door Buildsight in opdracht van RVO (Buildsight 2025 [13]). Het type installaties dat wordt toegepast kan worden gebaseerd op analyses van recent gebouwde woningen in de labeldatabase. Daaruit blijkt dat van de woningen gebouwd na 2020 circa 75% een elektrische warmtepomp krijgt en 25% een aansluiting op een warmtenet. In de KEV ramingen wordt deze verhouding ook voor toekomstige jaren gebruikt.

## 2.2 Comforteisen

***Deelvraag: Wat is de invloed van hogere comfort- en gezondheidseisen(thermisch comfort, akoestiek, binnenluchtkwaliteit) op de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

Hier wordt ingegaan op de ontwikkeling van comforteisen en maatschappelijke verwachtingen rondom binnenklimaat, ventilatie en temperatuur in gebouwen. We bespreken hoe hogere comfortstandaarden (bijvoorbeeld meer koeling in zomers, betere ventilatie voor gezond binnenmilieu) kunnen leiden tot extra energieverbruik, maar ook hoe innovatieve klimaatsystemen dit opvangen. Deze paragraaf inventariseert hoe comfort gerelateerde trends de energie-efficiëntie uitdagingen beïnvloeden en wat dit betekent voor het behalen van klimaatdoelen.

### 2.2.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

Dit heeft effect op de gebruiksfase (B) van de wlc-gwp, maar wanneer installaties worden toegepast kunnen er ook effecten zijn van het materiaalgebruik in deze installaties (A, C).

### 2.2.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Deze deelvraag is op dit moment niet eenduidig te beantwoorden. Voor nieuwbouw gelden reeds eisen voor thermisch comfort, akoestiek en binnenluchtkwaliteit. Het is onduidelijk of

deze eisen worden aangepast wanneer de berekeningsmethode wijzigt. Zonder nadere beleidskeuzes kan het effect hiervan lastig worden vastgesteld.
Voor thermisch comfort wordt de methodiek voor het beoordelen van oververhitting verder verfijnd van Maandmethode naar Uurmethode. Dit kan leiden tot een grotere inzet van passieve maatregelen, zoals zonwering, overstekken, terugliggend glas en aangepaste gevelontwerpen. Dergelijke maatregelen verhogen het materiaalgebruik en daarmee de productgebonden GWP impact, maar dit effect blijft naar verwachting beperkt. Tegelijkertijd kunnen deze maatregelen het energiegebruik voor koeling reduceren, wat een gunstig effect heeft op de wlc-gwp in de gebruiksfase. Indien thermisch comfort wordt geborgd via actieve koeling (zoals airconditioning), leidt dit tot een hoger elektriciteitsgebruik, in het verleden is deze vraag naar koelte toegenomen, zoals opgenomen in het rapport: *'Schatting van de elektriciteitsvraag van airconditioners in Nederlandse woningen in 2021, 2022 en 2030'*[14]. Dit rapport laat een duidelijke toename van de elektriciteitsvraag van airco's tot 2030 zien. Deze ontwikkeling is echter niet specifiek toe te schrijven aan nieuwbouw. In nieuwbouw moet dit extra energiegebruik worden gecompenseerd binnen de geldende energieprestatie-eisen, waardoor het netto-effect op de operationele emissies begrensd blijft.

Op het gebied van binnenluchtkwaliteit is een verschuiving zichtbaar van natuurlijke ventilatie naar mechanische ventilatiesystemen, vaak gecombineerd met warmteterugwinning en vraagsturing op basis van $CO_2$-concentratie of luchtvochtigheid. Deze ontwikkeling leidt tot extra installatietechniek en regelcomponenten, wat resulteert in een hogere productgebonden GWP impact. Het effect hiervan op de totale wlc-gwp wordt naar verwachting beperkt geacht, mede doordat warmteterugwinning het energiegebruik in de gebruiksfase kan reduceren. De uiteindelijke impact hangt sterk af van ontwerpkeuzes, systeemrendementen en de kwaliteit van inregeling en beheer.

Voor akoestisch comfort geldt dat verbeteringen veelal worden gerealiseerd via extra massa, aanvullende scheidingsconstructies of afwerkingslagen. Dit kan leiden tot een toename van het materiaalgebruik en daarmee van de productgebonden $CO_2$-emissies. In de praktijk worden akoestische eisen echter grotendeels ingevuld binnen bestaande bouwkundige oplossingen, waardoor geen substantiële additionele impact op de wlc-gwp wordt verwacht.

Richting 2050 wordt verwacht dat hogere comfort- en gezondheidseisen vooral leiden tot een lichte toename van de productgebonden GWP impact, terwijl het effect op de operationele emissies beperkt blijft door steeds strengere energieprestatie-eisen. Ook zal het veranderende klimaat naar verwachting invloed hebben op de verwachte koelbehoefte.

Per saldo lijkt de invloed van hogere comfort- en gezondheidseisen op de totale wlc-gwp van nieuwbouw beperkt, waarbij de ontwerpkeuzes (passief versus actief) en de kwaliteit van uitvoering en beheer bepalend zijn voor de uiteindelijke uitkomst.

### 2.2.3 Wat zijn de onzekerheden?

De belangrijkste onzekerheid is dat op dit moment nog onduidelijk is of en in welke mate de comfort- en gezondheidseisen voor nieuwbouw daadwerkelijk worden aangescherpt. Daarnaast is onzeker in hoeverre thermisch comfort in de praktijk vooral via passieve maatregelen of juist via actieve koeling zal worden ingevuld. Ook de ontwikkeling van de koelbehoefte onder invloed van klimaatverandering is onzeker. Voor ventilatie en binnenluchtkwaliteit geldt dat de uiteindelijke impact sterk afhangt van ontwerpkeuzes, systeemrendementen en de kwaliteit van inregeling en beheer.

### 2.2.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Op dit moment is geen robuust gekwantificeerde bandbreedte beschikbaar voor de invloed van comforteisen op de wlc-gwp. Kwalitatief ligt de bandbreedte naar verwachting tussen een scenario waarin aanvullende comforteisen slechts beperkt doorwerken in ontwerp en installaties, en een scenario waarin meer koeling, extra ventilatietechniek en aanvullende bouwkundige maatregelen leiden tot een lichte toename van de materiaalgebonden impact. Op basis van de huidige inzichten lijkt het netto-effect op de totale wlc-gwp echter beperkt te blijven.

### 2.2.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Aanvullende informatie is nodig om beter te kunnen onderbouwen in hoeverre toekomstige comfort- en gezondheidseisen daadwerkelijk wijzigen en hoe deze in de praktijk worden ingevuld. Met name meer inzicht in de ontwikkeling van koelbehoefte, de toepassing van actieve koeling in nieuwbouw en de effecten van aanvullende ventilatie- en comfortmaatregelen op zowel materiaalgebonden als operationele emissies is wenselijk.

## 2.3 Verduurzaming energiemix

***Deelvraag: In welke mate draagt de verduurzaming van de energiemix voor gebouwen (inclusief inzet van lokale en decentrale energiebronnen) bij aan het verlagen van de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

Deze paragraaf behandelt hoe de energievoorziening van gebouwen verduurzaamt richting 2050. Denk aan de toename van duurzame warmtebronnen (bijv. all-electric, warmtepompen, geothermie, restwarmte) en groene elektriciteitsmix voor gebouwen. We schetsen scenario's waarin het aandeel hernieuwbare energie in de gebouwde omgeving sterk toeneemt. Hiermee wordt duidelijk in hoeverre de energiemix bijdraagt aan lagere wlc-gwp.

Een nieuwe woning of nieuw gebouw die aan ZEB-eisen voldoet, moet aardgasvrij zijn en zal daarom all-electric zijn of aangesloten op een warmte- (en koude)net. Het gaat dus om verduurzaming van elektriciteit en verduurzaming van warmte. De emissie per kWh geleverde elektriciteit of warmte is van belang voor de emissies in de gebruiksfase van het gebouw.

Het LPB Sight rapport[15] kijkt ook naar emissiefactoren van aardgas, biogas en groene waterstof. Aardgas is niet relevant omdat alle nieuwe woningen en gebouwen aardgasvrij zullen zijn en geen aansluiting op een aardgasnet zullen hebben. In theorie is het mogelijk dat nieuwbouw wordt aangesloten op een lokaal biogasnet of op een waterstofnet. Maar in de praktijk zal biogas naar verwachting vooral worden gebruikt als groen gas voor bijmenging in het aardgasnet en zal groene waterstof vooral worden gebruikt in de industrie (zie PBL, 2025[16]).

### 2.3.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

De verduurzaming van de energiemix heeft vooral effect op de gebruiksfase van het gebouw (B6), doordat de emissiefactor van geleverde elektriciteit en warmte afneemt. Daarnaast werkt een schonere elektriciteitsmix door in de productgebonden emissies (A1–A3) van elektriciteitsintensieve bouwproducten en installaties. In hoofdstuk 5 wordt verder ingegaan op de effecten van een duurzame energiemix op de emissies in de productiefase.

### 2.3.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

In het rapport van LBP|SIGHT[17] is beschreven hoe de NMD-milieuverklaringen voor elektriciteit zijn geactualiseerd op basis van de verwachte netmix voor 2025. Het rapport bevat de gehanteerde LCA-uitgangspunten, de rekenmethodiek en de resultaten per elektriciteitsbron en voor de totale Nederlandse elektriciteitsmix.

De energiemixen zijn bepaald op basis van de meest recente Klimaat- en Energieverkenning (KEV), uitgaand van vastgesteld beleid, in combinatie met productiedata van het CBS. Op basis hiervan is per bron het aandeel in de totale Nederlandse elektriciteitsproductie vastgesteld en verwerkt tot een samengestelde netmix. De KEV-prognoses lopen tot circa 2035. In het rapport wordt de mix van 2035 vervolgens verondersteld constant te blijven tot en met 2075.

Deze aanname leidt tot een relatief conservatieve inschatting van de toekomstige elektriciteitsmix. In lange termijn scenario's wordt verwacht dat de decarbonisatie van de elektriciteitsproductie na 2035 verder doorzet en richting 2050 in sterke mate richting klimaatneutraliteit beweegt (PBL, 2025). Het effect hiervan op de wlc-gwp van gebouwen zal naar verwachting groter zijn dan in de huidige modellering is opgenomen. De Klimaat- en energieverkenning 2026 zal 15 september 2026 een raming tot en met 2040 publiceren. Na 2040 wordt in EU-ETS beoogd geen nieuwe emissierechten uit te geven en voor 2050 kan worden aangenomen dat de elektriciteitsproductie emissievrij zal zijn.

Daarnaast is in de onderliggende modellering gebruikgemaakt van de huidige ecoinvent-procesdata voor elektriciteitsbronnen. Verwachte toekomstige efficiëntieverbeteringen en verdere verduurzaming van productieprocessen zijn hierin niet meegenomen. Zo is aannemelijk dat windturbines die over twintig jaar worden geproduceerd een lagere GWP hebben dan de huidige datasets weergeven, onder meer door verduurzaming van staalproductie, verbeterde recycling, efficiëntere productie van composietmaterialen en lagere milieu-impact van magneten. Ook de efficiency van zonnepanelen kan nog verder verbeteren en daarmee de opbrengst per $m^2$ dakoppervlak met zonnepanelen (TNO, 2026[8]).

Hiermee is de toekomstige reductie van de elektriciteitsgerelateerde emissiefactoren waarschijnlijk onderschat, wat doorwerkt in zowel de gebruiksfase (B6) als in de productgebonden emissies (A1–A3) van elektriciteitsintensieve producten.

[8] Link naar de website: Zonnetechnologie: kansen en uitdagingen | TNO

**Warmtenetten**
In de gedelegeerde verordening over implementatie van de EPBD IV (EC, 2025) wordt voor de definitie van een efficiënt systeem voor stadsverwarming en -koeling verwezen naar artikel 26 uit de Energie Efficiëntie Richtlijn (EC, 2023 [18]). Daarin staat vermeld aan welke $CO_2$-emissiefactor van de geleverde warmte of koude een efficiënt systeem moet voldoen. Vanaf 2026 mag die emissiefactor maximaal 150 gram per kWh zijn, vanaf 2035 maximaal 100 gram per kWh, vanaf 2045 maximaal 50 gram per kWh en vanaf 2050 maximaal 0 gram per kWh.

Warmteleveranciers zijn verplicht duurzaamheidsrapportages te maken, waarin de $CO_2$-emissie van de geleverde warmte wordt berekend, zie bijvoorbeeld Eneco, 2025[19]. RVO verzamelt deze gegevens in een jaarlijkse monitor (RVO, 2024[20]). De gemiddelde $CO_2$-emissie van warmtenetten in Nederland was in 2024 zo'n 38,9 kg $CO_2$ per GJ geleverde warmte. Daarbij is 1 GJ gelijk aan 277,8 kWh, zodat de gemiddelde emissie omgerekend 140 gram $CO_2$ per kWh geleverde warmte is.

Voor een beeld van de ontwikkeling van de gemiddelde emissie van warmtenetten richting de toekomst zou gebruik gemaakt kunnen worden van de eisen uit de energie efficiëntie richtlijn (aangenomen dat warmtenetten daaraan voldoen) of kunnen data uit de ramingen in de Klimaat en energieverkenning worden gebruikt.

Voor een specifieke woning of gebouw zal in de wlc-gwp berekening rekening gehouden moeten worden met de emissiefactor van diverse typeringen van warmtenetten waarop de woning of het gebouw is aangesloten. De verwachte emissiefactor tot en met 2050 kan per type warmtenet verschillend zijn.

De bij het afronden van de onderhavige verkenning bekende versie van het LBP|SIGHT LCA Rapportage productkaarten Energiedragers Nationale Milieudatabase versie 1.3[21], houdt bij toegeleverde warmte geen rekening met toekomstige beleidsontwikkelingen. Daardoor kan de gebruikte milieuverklaring afwijken van de verwachte verduurzaming van warmtenetten onder invloed van de EED-eisen die zijn overgenomen in de Wet collectieve warmte[9]. Ook bij nieuwe warmtenetten zullen warmtebedrijven kiezen voor duurzame bronnen, anders heeft de aanleg van een warmtenet geen zin in het kader van de energietransitie.

### 2.3.3 Wat zijn de onzekerheden?

In de Klimaat en energieverkenning 2025 geeft PBL geen bandbreedte bij de $CO_2$-emissiefactor van elektriciteit maar schetst wel een bandbreedte voor de emissies van de sector elektriciteit als geheel. Voor 2030 zijn de BKG emissies van de sector elektriciteit naar verwachting 12 Mton met een bandbreedte van 9 tot 20 Mton. De belangrijkste onzekere factoren zijn het tempo van uitrol van wind op zee, gebruik van restgassen van Tata voor elektriciteitsproductie en ontwikkelingen in vraag en aanbod in het buitenland die leiden tot import of export van elektriciteit.

[9] En als ze dat niet doen mag er geen nieuwe woning meer aangesloten worden op een warmtenet, want dan wordt niet voldaan aan het in EPBD IV opgenomen criterium voor ZEB.

### 2.3.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Hiervoor is het belangrijk te kijken naar de bandbreedte die PBL zal ramen in de emissies van de elektriciteitsproductie voor 2040 in de Klimaat en energieverkenning. Maximaal duurzaam is fossielvrij in 2050. Best-case is dan het afbouw pad naar 2040 en vervolgens een gelijkblijvende emissiefactor na 2040. Hiermee kan, op basis van de energiedragers en de energiemix, een bandbreedte (best-case en best-case) voor B6 worden bepaald.

### 2.3.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

De Klimaat en energieverkenning 2026 (KEV 2026) maakt een raming voor 2040, zowel voor de verduurzaming van de elektriciteitsproductie als voor de verduurzaming van de warmteproductie voor stadsverwarming op basis van bestaand beleid. De raming en bandbreedte in de KEV 2026 in de publicatie half september 2026 kan gebruikt worden voor de routekaart wlc-gwp. Op basis hiervan kunnen dan aanvullende berekeningen worden gedaan om de $CO_2$-emissie per geleverde warmte aan gebouwen te berekenen.

## 2.4 Eigen energie-opwek

***Deelvraag: In welke mate zullen duurzame opwekkingstechnologieën op gebouwniveau (zoals zonnepanelen, WKO, geothermie) worden geïntegreerd in nieuwbouw, en wat is het effect daarvan op de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

In deze paragraaf wordt onderzocht in welke mate gebouwen richting 2050 zelf in hun energie kunnen voorzien via eigen opwek. We bespreken de grootschalige toepassing van technologieën zoals zonnepanelen op daken, gebouw-geïntegreerde PV, windturbines en geothermie op perceelniveau.

We verwachten dat het daarbij primair om zonnepanelen zal gaan (elektriciteit en mogelijk ook warmte zoals in PVT en/of PT). Kleine windturbines in de gebouwde omgeving zijn minder rendabel dan zonnepanelen. Geothermie vraagt een grote investering vanwege de boring en vraagt een grote continue warmtevraag om die investering terug te verdienen. Zo'n warmtevraag is er wel bij glastuinders of als basislast in een groot warmtenet, maar is ondenkbaar in individuele gebouwen of als onderdeel van een klein collectief warmtenet. Open en gesloten WKO-bronnen zullen in samenhang met een grondgebonden warmtepomp toegepast worden, Deze worden verder behandeld in paragraaf 2.5.

### 2.4.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

Eigen opwek van zonnepanelen heeft effect op de gebruiksfase (B6) en de teruglevering (D2) van wlc-gwp maar ook op de productgebonden $CO_2$ impact (met name A1-3, maar ook bij vervanging (B2-5) en einde leven C1-4) van zonnepanelen.

### 2.4.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

We verwachten dat met name het dakoppervlak van nieuwe woningen en gebouwen beter zal worden benut voor de plaatsing van meer zonnepanelen, wanneer de ZEB-eisen vragen

om meer eigen hernieuwbare energieproductie op eigen perceel. Ook onder de BENG-eisen hadden nieuwe woningen en gebouwen al enkele zonnepanelen nodig om aan de eisen te voldoen (zie DGMR,[22] ). Een goed beeld van het precieze aantal zonnepanelen per woning of gebouw in recente nieuwbouw is er niet. CBS verzamelt wel data over zonnepanelen bij woningen, maar geeft op deze specifieke vraag geen antwoord (CBS, 2024[10]) Analyse van de labeldatabase zou een andere manier zijn om een beeld te krijgen van het aantal zonnepanelen op nieuwe woningen.
Doordat in de ZEB eisen wordt gestuurd op eigen hernieuwbare energieproductie op het gebouw of eigen perceel zal de eigen opwek toenemen bij nieuwe woningen en gebouwen na 2030. De mededeling van de EC (EC, 2025) geeft een rekenvoorbeeld dat laat zien hoeveel eigen hernieuwbare elektriciteitsproductie noodzakelijk is. Zie Bijlage E voor een rekenvoorbeeld.

Uit het rekenvoorbeeld blijkt dat zolang de elektriciteit uit het net niet volledig met hernieuwbare energie wordt geproduceerd, de eigen elektriciteitsproductie op jaarbasis even groot moet zijn als het gebouwgebonden elektriciteitsverbruik. Bij een woning heeft alleen een warmtepomp al gauw een elektriciteitsvraag van 2300 kWh per jaar (warmtevraag 25 GJ/woning, SPF van 3), en vraagt 8 zonnepanelen per woning. Daar komt dan nog elektriciteitsverbruik voor overige functies zoals ventilatie, verlichting en koeling bij.

Daarnaast kunnen bij eigen energie-opwek ook baten buiten de systeemgrens ontstaan door teruglevering van elektriciteit aan het net, deze wordt gedeclareerd in module D2. De omvang van deze bate is echter tijdsafhankelijk en onzeker: door een hoger eigen verbruik van zonnestroom, onder meer door opslag en het wegvallen van de salderingsregeling, wordt minder elektriciteit teruggeleverd, terwijl tegelijk de klimaatbate per teruggeleverde kWh afneemt naarmate de elektriciteitsmix verder verduurzaamt. De grootste kennislacunes betreffen daarom niet alleen de praktische invulling van ZEB, maar ook de toekomstige behandeling en omvang van deze baten in de tijd.

### 2.4.3 Wat zijn de onzekerheden?

De grootste onzekerheid zit in het aantal zonnepanelen dat bouwers zullen toepassen om aan de ZEB -eisen te voldoen. Dat kan afhankelijk zijn van de keuze voor de warmtetransitie (een warmtepomp of een warmtenet) en in hoeverre deze warmte en elektriciteit met hernieuwbare bronnen wordt geproduceerd.

### 2.4.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Hoe duurzamer de collectieve warmte en elektriciteitsvoorziening, hoe minder eigen opwek nodig is. In theorie kan het aantal zonnepanelen per gebouw variëren van geen tot zoveel als mogelijk is op de ruimte die het dak van de woning of gebouw biedt.
De bandbreedte in D2 wordt niet alleen bepaald door de hoeveelheid teruglevering, maar ook door de dalende emissiefactor van elektriciteit. Hierdoor kan meer PV richting 2050 een kleinere D2-bate opleveren.

[10] https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/86044NED

### 2.4.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie en/of inzichten?

Ja, uit de kostenoptimaliteitsstudie naar de ZEB-eisen (voorzien in 2028) , kan een beeld worden gekregen van het aantal zonnepanelen dat nodig is om aan de ZEB-eisen te voldoen, mede afhankelijk van de keuze voor een warmtenet of verwarming met een warmtepomp.

## 2.5 Energieopslag

***Deelvraag: In welke mate worden duurzame energieopslagtechnologieën (zoals batterijen, waterstof en thermische opslag) op grote schaal in nieuwe gebouwen toegepast, en hoe draagt dit, samen met slimme netten en energiebeheersystemen, bij aan het verlagen van de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***
Deze sectie beschrijft de ontwikkeling en toepassing van energieopslagtechnologieën in de gebouwde omgeving, zoals thuisbatterijen en warmtebuffers (boilervaten, seizoensopslag).

### 2.5.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

Energieopslag heeft betrekking op de gebruiksfase van het gebouw (B), maar ook op andere fasen vanwege het gebruik van materialen voor energieopslag (A, C, B (de product gebonden vervanging/onderhoud) en D).

### 2.5.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Doordat in de ZEB-eisen wordt gestuurd op eigen hernieuwbare energie productie op het gebouw of eigen perceel met zonnepanelen en rekening wordt gehouden met het eigen verbruik van die zonnestroom zou verwacht mogen worden dat opslag een randvoorwaarde wordt om aan de ZEB-eisen te kunnen voldoen Uit de kostenoptimaliteitsberekening van de ZEB-eisen zal moeten blijken of dat inderdaad zo is. Het is wel van belang dat opslag wordt meegenomen in de berekeningsmethode.

Een thuisbatterij kan worden gebruikt om zonnestroom op te slaan en daarmee het eigen verbruik[11] van zelfgeproduceerde zonnestroom te vergroten van 30 naar circa 60%[12]. CE Delft heeft in 2023 berekend dat er toen (nog) geen businesscase was voor thuisbatterijen. De terugverdientijd was langer dan 15 jaar (CE Delft, 2023[23]). Door aankondiging van het einde van de salderingsregeling en doordat energieleveranciers terugleverkosten in rekening brengen bij eigenaren van zonnepanelen is de installatie van batterijen toch snel gegroeid. Het Nationaal Solar Storage trendrapport 2025 schetst dat de exponentiele groei van nieuw geïnstalleerde batterij capaciteit doorzet (DNE research, 2025 [24]). In 2025 kan de verwachte nieuwe capaciteit oplopen tot 1,55 GWh, waarvan 860 MWh in de residentiële sector, 330 MWh in de commerciële en industriële sector, en 360 MWh in utiliteitssystemen. De totale geïnstalleerde batterijcapaciteit kan eind 2025 uitkomen op 2,9 GWh (tegen bijna 30 GWp zonnestroomvermogen). Daarvan is 1,3 GWh thuisbatterijen bij huishoudens, 620 MWh staat in de commerciële en industriële sector, en 980 MWh betreft grootschalige installaties. Marktpartijen verwachten de komende jaren een verdere groei, volgens het

[11] alle huishoudelijk energiegebruik, niet alleen het gebouwgebonden verbruik.
[12] https://www.hier.nu/stroom-en-gas/thuisbatterijen-zijn-ze-investering-waard?

trendrapport zou Nederland in 2030 kunnen beschikken over in totaal ongeveer 36,8 GWh aan batterijopslagcapaciteit. Hiervan wordt naar schatting 14,6 GWh gerealiseerd in de residentiële markt, 12,1 GWh in de commerciële en industriële sector en 10,1 GWh op utiliteitsschaal.

Om zonnestroom op te slaan kan ook een elektrische boiler worden gebruikt. Zo adverteert Feenstra[13] met de zonnestroomboiler[14]. De zonnestroomboiler is een elektrische boiler en maakt gebruik van de overtollige energie van de zonnepanelen, die anders terug geleverd zou worden aan het elektriciteitsnet[15]. Een zonnestroomboiler stelt huishoudens in staat ongeveer 50% -70% van hun opgewekte zonnestroom zelf te gebruiken, tegenover de 25-30% zonder een vorm van opslag, stelt Feenstra. Dat is sterk afhankelijk van de verhouding tussen het aantal zonnepanelen, de grootte van de boiler en het tapwatergebruik.
Ook bestaan er opslagsystemen die zowel overtollige elektriciteit uit eigen productie als uit het net kunnen opslaan in verliesarme boilervaten.

Als we kijken naar de verschillen in duurzaamheid, scoort de zonnestroomboiler beter: het systeem gebruikt alleen water en gaat ongeveer 25 jaar mee, zonder dat er schaarse materialen zoals lithium nodig zijn. De thuisbatterij maakt vaak gebruik van lithium-ion technologie, wat minder duurzaam is door het gebruik van zeldzame metalen. De levensduur van een thuisbatterij is daarnaast korter, gemiddeld 10 tot 15 jaar, en recycling is complexer en minder efficiënt.

De kosten en terugverdientijd verschillen ook aanzienlijk. Een zonnestroomboiler kost ongeveer € 2.500 tot € 3.000 en bespaart jaarlijks € 200 tot € 250 op je energierekening, wat resulteert in een terugverdientijd van 11 tot 13 jaar. De thuisbatterij is duurder, met prijzen tussen de € 5.000 en € 10.000. De jaarlijkse besparing ligt tussen € 150 en € 300, waardoor de terugverdientijd vaak 15 jaar of langer is, wat dicht tegen de levensduur van de batterij zelf aan ligt Aan de opschaling van recycling wordt actief gewerkt. De kosten dalen als gevolg van technologische ontwikkeling en schaalvergroting. De mate en snelheid van kostendaling zijn afhankelijk van marktontwikkeling, beleidskaders en beschikbare volumes.

Opslag van warmte en koude is ook mogelijk in aquifers, watervoerende lagen in de bodem (tot 500 meter diepte), open bron, of in ondiepere grondlagen, gesloten bron. Dit betreft warmte/koude opslag (WKO), altijd toegepast met een grondgebonden warmtepomp. Om warmte uit de bodem te onttrekken wordt grondwater opgepompt. In de zomer wordt dit grondwater, dat een temperatuur heeft van 5 tot 10 graden, gebruikt om een gebouw te koelen. Na het koelen is dit water opgewarmd tot tussen 10 en 15 graden, en wordt het op een andere plek weer teruggepompt in de grond op een vergelijkbare diepte. In de winter wordt dit opgewarmde water weer opgepompt en gebruikt om het gebouw te verwarmen, waarna het afgekoelde water weer terug de bodem in gaat en de cirkel rond is. Water van 10 à 15 graden is niet zonder meer geschikt om een gebouw in de winter op een aangename temperatuur te krijgen. Daarom wordt meestal een warmtepomp gebruikt om de energie naar een hoger temperatuurniveau te brengen. WKO wordt toegepast in nieuwe grote gebouwen met een grote koelvraag, zoals kantoren, ziekenhuizen, bij een aantal woningen op gebouwniveau (mini warmtenet), of met een gesloten bron op woningniveau. Het aantal WKO installaties neemt gestaag toe, van 2 PJ benutte omgevingswarmte in 2010 naar 7 PJ in 2024 (CBS, 2025).

[13] https://www.feenstra.com/zorgelooswonen/de-zonnestroomboiler
[14] De zonnestroomboiler: een slimme manier om zoveel mogelijk uit je zonnestroom te halen | HIER
[15] http://www.newton.energy

De toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving zal in de toekomst waarschijnlijk beperkt zijn. Volgens het NPE zal waterstof vooral worden ingezet in de energie-intensieve industrie, de (internationale) mobiliteit en de elektriciteitsproductie. Hernieuwbare (groene) waterstof zal grootschalig worden geproduceerd op momenten van overvloedig aanbod van $CO_2$-vrije elektriciteit. Op momenten dat het minder waait en de zon niet schijnt, wordt waterstof ingezet voor flexibele elektriciteitsproductie. Daarnaast zal groene waterstof worden ingezet als grondstof voor de productie van duurzame brandstoffen. In andere sectoren (waaronder de gebouwde omgeving) wordt waterstof volgens het NPE vanaf 2035 alleen ingezet op plekken waar geen redelijk alternatief is, zoals elektrische warmtepompen of een warmtenet. Waterstof kan in principe goed worden opgeslagen in zoutcavernes en lege gasvelden om daarna het verschil tussen vraag naar energie en het aanbod van hernieuwbare energie te overbruggen. Omdat waterstof wel een mogelijke transitieroute is, zijn er 4 pilotprojecten gestart om kennis op te bouwen met de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving (RVO, 2024)[25].

### 2.5.3 Wat zijn de onzekerheden?

Het $CO_2$-reductie effect van batterijopslag is afhankelijk van de efficiency van de opslag, verhoging van het eigen verbruik van zonnestroom en de ontwikkeling van de $CO_2$-emissie van elektriciteit die wordt geleverd uit het net.

Ook voor energieopslagmaatregelen zijn LCA’s nodig. Het effect van deze maatregelen op de wlc-gwp is op dit moment onvoldoende inzichtelijk. Met name de productgebonden impact in de productiefase (A1–A3) kan substantieel zijn. Dit vraagt om nadere kwantificering (zie ook 5.5.5 installaties). Zonder deze informatie bestaat het risico dat verschuivingen in operationele emissies leiden tot een toename van product gebonden emissies.

### 2.5.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Voor de wlc-gwp zullen eerst berekeningen moeten worden uitgevoerd naar het $CO_2$-reductie effect van verschillende opslag technologieën en hoe hun effect tijdens de gebruiksfase opweegt tegen emissies uit materialen.

### 2.5.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Aanvullende informatie is nodig om het effect van energieopslag op de wlc-gwp beter te kunnen onderbouwen. Met name is nadere kwantificering nodig van het $CO_2$-reductie-effect van verschillende opslagtechnologieën, zoals batterijen, thermische opslag en waterstofopslag, in relatie tot het extra materiaalgebruik dat deze systemen met zich meebrengen. Daarbij is het van belang om zowel het effect in de gebruiksfase als de materiaalgebonden impact in de productiefase mee te nemen. Zonder deze informatie blijft onduidelijk in hoeverre een reductie van operationele emissies daadwerkelijk leidt tot een lagere totale wlc-gwp.

# 3 Voorraad en volumes

Dit hoofdstuk richt zich op de omvang en samenstelling van de gebouwvoorraad richting 2050 en hoe dit de totale milieu-impact beïnvloedt. Het beschrijft trends in nieuwbouw en sloop in zowel de woningbouw als utiliteitsbouw, en factoren die de vraag naar vierkante meters bepalen. We verkennen scenario's voor groei of krimp van de bouwvoorraad en analyseren hoe deze volumeveranderingen doorwerken in de materiaalvraag en operationele emissies. Daarmee wordt duidelijk gemaakt hoe demografie, woonvoorkeuren en economie de wlc-gwp kunnen bepalen via veranderingen in het aantal en type gebouwen.

Dit hoofdstuk gaat over de ontwikkeling van bevolking, huishoudens, woningbehoefte en woningvoorraad; niet over de rekenlevensduur van de wlc-gwp-berekening. Voor wlc-gwp geldt namelijk een vaste referentiestudieperiode van 50 jaar. Die staat los van een mogelijke feitelijke of veronderstelde levensduur van koopwoningen of corporatiewoningen

## 3.1 Demografie

***Deelvraag: In hoeverre beïnvloeden demografische trends (zoals vergrijzing, veranderingen in huishoudensamenstelling en migratie) de behoefte aan nieuwbouw, en wat betekent dit voor de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

Deze paragraaf analyseert hoe demografische ontwikkelingen zoals: bevolkingsgroei of -krimp, vergrijzing en veranderingen in huishoudensamenstelling, de behoefte aan woningen en andere gebouwen tot 2050 beïnvloeden. We behandelen prognoses voor bevolkingsaantallen en huishoudens, en wat deze betekenen voor de nieuwbouwbehoefte (meer woningen bij groei) of leegstand/sloop bij krimp.

### 3.1.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

Demografische ontwikkelingen hebben invloed op de behoefte aan woningen en de vraag naar nieuwe woningen en gebouwen. Een afname van de gemiddelde woninggrootte verlaagt de absolute warmte- en materiaalvraag per woning, maar kan de materiaalintensiteit per m² verhogen door compactere typologieën en een relatief groter aandeel installaties en gevel per m². Omdat de GWP-GWP per $m^2$ wordt bepaald kan het hier dus effect op hebben.

### 3.1.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

CBS brengt jaarlijks bevolkingsprognoses uit die een beeld geven van de verwachte bevolkingsgroei in Nederland (CBS, 2025 [16]).. De bevolking groeit naar verwachting van circa 18 miljoen inwoners begin 2025 naar 20,6 miljoen inwoners in 2070. Deze bevolkingsgroei vertaalt zich echter niet één-op-één naar de behoefte aan nieuwe woningen. Daarvoor zijn vooral de ontwikkeling van het aantal huishoudens, de huishoudensgrootte, migratie, regionale spreiding en bestaande woningtekorten bepalend.

[16] Bevolkingsprognose: vanaf nu meer ouderen dan jongeren | CBS

Voor de vertaling van bevolkingsontwikkeling naar huishoudensontwikkeling en woningbehoefte ligt het daarom voor de hand om aan te sluiten bij de Primos-prognoses van ABF Research. Deze prognoses worden jaarlijks opgesteld op basis van onder meer de CBS-bevolkingsprognose en geven inzicht in de verwachte ontwikkeling van huishoudens, woningbehoefte en woningvoorraad.

Er staan eind 2024 zo'n 8,3 miljoen woningen in Nederland. Dat zou betekenen dat er zo'n 1 miljoen woningen bij moeten komen als de huishoudgrootte gelijk blijft. Er is echter ook sprake van een dalende huishoudgrootte. Het aantal nieuwbouwwoningen lag de afgelopen jaren rond de 70 duizend per jaar. De woningvoorraad verandert ook door sloop, toevoeging en onttrekking van woningen. Omdat de wlc-gwp alleen betrekking heeft op de nieuwbouw, is een prognose van het aantal nieuwbouwwoningen het belangrijkste.

ABF maakt woningvooraadscenario's voor het Ministerie van VRO in de PRIMOS prognoses[26]. Deze zijn ook te volgen op de dashboard: Dashboard - Overzicht - Nederland. Hierbij gaan ze uit van een huishoudensgroei tussen 2025-2050 van 1.068.420 huishoudens in Nederland. Zij voorspellen ook in 2050 nog een woningtekort[17].

### 3.1.3 Wat zijn de onzekerheden?

Er zitten onzekerheden in de bevolkingsprognoses van het CBS. Zo kan het aantal migranten van jaar tot jaar sterk wisselen. Ook is niet zeker of de levensduur met dezelfde snelheid zal blijven stijgen, en of het aantal kinderen dat mensen gemiddeld krijgen gelijk blijft. De bevolking in 2070 ligt zeer waarschijnlijk tussen 17,5 miljoen en 23,9 miljoen inwoners.

Huurbevriezing heeft een groot disruptief effect op de woningproductie. Voor de Primos-woningbouwverwachtingen is verondersteld dat er met enige vertraging aanvullende compenserende maatregelen van kracht zouden worden, die de te verwachten terugval in de productie beperken. Aangenomen is dat de maatregel vanaf 2027 een negatief effect heeft op de woningproductie en het streven van 100.000 woningen per jaar niet gehaald wordt. Voor de tienjarige periode 2027 t/m 2036 betekent dit 84.000 nieuwbouwwoningen minder dan in de vorige prognose. Circa twee derde van deze verwachting is het gevolg van huurbevriezing/vertraagde daadwerkelijke compensatie. Daarnaast speelt de lager dan verwachte vergunningverlening een rol, alsmede lagere sloopverwachtingen waardoor er ook minder vervangende nieuwbouw nodig is. Inmiddels is het Kabinet-Schoof gevallen en het voorstel voor huurbevriezing ingetrokken. Mogelijk wordt de woningproductie in de Primos-prognose daardoor onderschat.

### 3.1.4 Is er behoefte aan aanvullende?

Voor inzicht in de woningvoorraad kan gebruik worden gemaakt van de ABF prognoses. Voor overige gebouwen bestaan er geen officiële prognoses. Er kan worden aangesloten bij de ramingen in de Klimaat en energieverkenning. PBL maakt in de KEV een prognose van de

[17] Een woningtekort van circa 2% wordt doorgaans beschouwd als een niveau waarbij nog sprake is van gezonde spanning op de woningmarkt. Bij een tekort van 0% zou er theoretisch voor iedere woningzoekende direct een woning beschikbaar zijn. Dat kan leiden tot risico's op leegstand, verminderde verkoop- en verhuurbaarheid en waardedaling in kwetsbare segmenten. Dat Primos ook richting 2050 nog een beperkt woningtekort voorziet, is daarom op zichzelf geen knelpunt. Volgens Primos wordt rond 2040 een tekort van circa 2% bereikt. De Rijksinzet is om dit niveau, via een bouwtempo van 100.000 woningen per jaar, al in de eerste helft van de jaren dertig te bereiken.

vraag naar gebouwen aan de hand van economische groei, aantal werknemers en demografische ontwikkelingen. Een deel van de vraag wordt ingevuld met nieuwbouw, maar ook transformatie, bestaande woningen splitsen en optoppen spelen een grote rol.

## 3.2 Verandering van woonbehoefte

***Deelvraag: In hoeverre leiden veranderingen in leefstijl, betaalbaarheid en ruimtelijke planning tot een verschuiving in de vraag naar verschillende woningtypen (zoals appartementen, eengezinswoningen en hoogbouw), en wat betekent dit voor de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

Hier kijken we naar hoe de vraag naar woningtypen en gebouwfuncties verandert onder invloed van maatschappelijke ontwikkelingen. Denk aan de afweging tussen appartementen vs. grondgebonden woningen**,** voorkeur voor kleiner wonen in stedelijk gebied, en nieuwe woonvormen (bijv. groepswonen of flexwonen). Ook ontwikkelingen als thuiswerken, e-commerce en digitalisering komen aan bod, omdat ze de behoefte aan kantoorruimte, retail en logistiek vastgoed beïnvloeden. Deze paragraaf verkent hoe veranderingen in woonbehoefte en gebruikspatronen de toekomstige bouwopgave en renovatievraag bepalen.

### 3.2.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

Veranderingen in woningbehoefte kunnen effect hebben op het type nieuwe woningen en de vraag naar nieuwe woningen en gebouwen.

### 3.2.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Met de verschuivingen in de woonsector van de afgelopen decennia is de samenstelling van de woningnieuwbouw veranderd. Het aandeel huurwoningen dat opgeleverd wordt, is toegenomen en ook het aandeel appartementen is flink gegroeid (Bouwkennis, 2025[18]).

In de woningmarktverkenning met het woningmarktsimulatiemodel Primos Woningmarkt van ABF Research wordt onderzocht welke mix van woningtypen, prijsklassen en woonmilieus binnen de woningbouwopgave het best aansluit bij de behoefte van huidige en toekomstige huishoudens (ABF, 2025[27]). Volgens de Primos-prognose telt Nederland in 2040 bijna 9,3 miljoen huishoudens, een groei van 10% (822.000) ten opzichte van 2025. Om in de toekomst (nieuwe) huishoudens van een woning te kunnen voorzien is uitbreiding van de woningvoorraad nodig. Daarnaast ligt er nog een opgave om het huidige woningtekort terug te dringen. In de scenario's wordt voor de eerstkomende vijftien jaar uitgegaan van een nieuwbouwproductie van gemiddeld 80.400 woningen per jaar bij een sloop van gemiddeld 11.000 woningen per jaar. In totaal wordt tussen 2025 en 2040 de woningvoorraad netto (nieuwbouw minus sloop) met ruim 1,042 miljoen woningen uitgebreid. Dit komt neer op gemiddeld bijna 69.500 woningen per jaar. De ABF-cijfers zouden ook een beeld kunnen geven van het type woningen dat wordt gebouwd. ABF baseert zich bij woningvoorkeuren op WoonOnderzoek Nederland (WoON 2024 [28]).

[18] Woningnieuwbouwprognoses: meer dan alleen aantallen - BouwKennis

### 3.2.3 Wat zijn de onzekerheden?

Het kan zijn dat de woningbehoefte in de toekomst veranderd en zich anders ontwikkeld dan wij nu verwachten.

### 3.2.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Op basis van de huidige inzichten kan nog geen robuust gekwantificeerde bandbreedte voor de invloed van veranderende woonbehoefte op de wlc-gwp worden gegeven. Kwalitatief ligt de bandbreedte tussen een scenario waarin de verschuiving naar compactere woningtypen, zoals appartementen en kleinere woningen, beperkt blijft, en een scenario waarin deze verschuiving sterker doorzet. In dat laatste geval kan de materiaal- en energievraag per woning veranderen, terwijl ook de verdeling tussen woningtypen en woonmilieus verschuift. De uiteindelijke impact op de wlc-gwp hangt daarbij sterk af van de feitelijke mix van woningtypen, de gemiddelde woninggrootte en de mate waarin de toekomstige vraag via nieuwbouw, transformatie, splitsing of optoppen wordt ingevuld

### 3.2.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Aanvullende informatie is nodig om beter te kunnen onderbouwen hoe veranderingen in woonvoorkeuren doorwerken in de toekomstige wlc-gwp. Met name meer inzicht in de verwachte ontwikkeling van woningtypen, woninggroottes en woonmilieus is wenselijk. Daarbij kunnen de ABF-prognoses en het WoonOnderzoek Nederland worden benut om de verschuiving in de vraag verder te concretiseren. Ook is nadere analyse nodig van de mate waarin de toekomstige behoefte wordt ingevuld via nieuwbouw of via alternatieven zoals transformatie, splitsing en optoppen, omdat dit direct doorwerkt in de materiaalvraag en de emissies van de bouwopgave.

## 3.3 Economische ontwikkelingen

***Deelvraag: In hoeverre veranderen digitalisering, thuiswerken en de opkomst van de kenniseconomie de behoefte aan nieuwe utiliteitsgebouwen (zoals kantoren, zorginstellingen, onderwijsgebouwen en logistieke centra), en wat betekent dit voor de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

In deze sectie wordt ingegaan op de invloed van economische groei, sectorontwikkeling en beleid op de bouw- en renovatieactiviteit. We bespreken hoe economische voorspoed of recessie de investeringen in nieuwbouw beïnvloeden en bijvoorbeeld de vraag naar utiliteitsbouw (kantoren, bedrijfsruimten) bepaalt. De paragraaf geeft daarmee inzicht in scenario’s voor bouwvolume (hoog, laag) afhankelijk van economische parameters en hoe robuust de bouwvraag is bij economische onzekerheden.

### 3.3.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

Economische ontwikkelingen kunnen effect hebben op het aantal nieuwe gebouwen. Het heeft dan effect op al de fases van de wlc-gwp maar het is wel de vraag wat voor effect dit gaat zijn.

### 3.3.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Voor utiliteitsbouw wordt er door PBL in de Klimaat- en energieverkenning een prognose gemaakt van de gebouwvoorraad en benodigde nieuwbouw (KEV van PBL, 2025[16] ). Daarbij wordt de groei van de gebouwvoorraad ingeschat aan de hand van de verwachte economische en demografische ontwikkelingen. De tabellenbijlage (tabel 36) geeft een raming van het totale gebruiksoppervlakte in vierkante meters utiliteitsbouw. Het aantal vierkante meters gebruiksoppervlakte van utiliteitsbouw in de dienstensector groeit van 415 miljoen $m^2$ in 2025 naar 436 miljoen $m^2$ in 2030. De KEV 2026[19] zal een raming maken tot en met 2040. PBL maakt in de KEV raming ook een inschatting van het verwachte aantal nieuwe gebouwen, op basis van de nieuwbouw in de BAG van de afgelopen jaren, maar publiceert die niet. De relatie tussen nieuwbouw en verwachte groei van de totale voorraad utiliteitsbouw is niet eenvoudig. Nieuwbouw kan nodig zijn vanwege een groeiende vraag naar vierkante meters vloeroppervlak, maar ook vervangende nieuwbouw betreffen. Nieuwbouwcijfers van de afgelopen jaren zij wel uit de Basisadministratie Adressen en Gebouwen BAG te halen, maar de reden van de nieuwbouw is al lastiger. Een groeiende vraag naar vierkante meters kan worden ingevuld door nieuwbouw maar ook door transformatie van gebouwen met een andere gebruiksfunctie uit andere sectoren.

Het EIB-rapport Toekomstperspectieven sloopsector 2024[29] bevat aanvullende gegevens over de sloop van utiliteitsgebouwen. In de periode 2019–2023 werden jaarlijks gemiddeld bijna 3.800 utiliteitsobjecten gesloopt, exclusief gebouwen met een logiesfunctie. Hoewel in 2022 en 2023 ruim twee keer zoveel woningen als utiliteitsobjecten werden gesloopt, was het gesloopte vloeroppervlak van de utiliteitsgebouwen circa 2,5 keer zo groot. De sloop van utiliteitsgebouwen is daarmee relevant voor de omvang van de vervangende nieuwbouw en de hoeveelheid vrijkomende materialen voor hergebruik en recycling. Het EIB-rapport bevat echter geen langetermijnraming van het aantal of het vloeroppervlak van te slopen utiliteitsgebouwen tot 2050. De cijfers worden daarom gebruikt als onderbouwing van de huidige situatie, maar niet rechtstreeks geëxtrapoleerd naar 2050.

### 3.3.3 Wat zijn de onzekerheden?

Er is onzekerheid over de economische groei in de komende 25 jaar (tot aan 2050). De economische groei in de KEV 2024[30] en KEV 2025[16] is overgenomen uit het Centraal Economisch Plan (CEP) van het CPB van februari 2024 voor de periode tot en met 2032 (CPB 2024a). Voor de periode na 2032 gebruikt de KEV macro-economische cijfers uit de Welvaart en Leefomgeving (WLO) van PBL (PBL 2024c [31]). In deze scenariostudie worden vier scenario's uitgewerkt, gebaseerd op een lage dan wel hoge economische groei. In de KEV wordt het gemiddelde van de groeicijfers uit deze WLO scenario's gebruikt en voor de onzekerheidsanalyse gaat de KEV uit van de lage of hoge economische groei in de WLO.

### 3.3.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's

Op basis van de huidige inzichten kan nog geen robuust gekwantificeerde bandbreedte worden gegeven voor de invloed van veranderende woonbehoefte op de wlc-gwp. Kwalitatief ligt de bandbreedte tussen een scenario waarin de huidige verdeling van woningtypen en woninggroottes beperkt verandert, en een scenario waarin de verschuiving naar compactere

[19] Verschijnt op prinsjesdag 2026, zie: Planning KEV 2026 | Planbureau voor de Leefomgeving

woningen, appartementen en meer stedelijke woonmilieus sterker doorzet. In dat laatste geval kan de absolute materiaal- en energievraag per huishouden dalen, maar de uiteindelijke invloed op de wlc-gwp blijft sterk afhankelijk van de feitelijke mix van woningtypen, de gemiddelde woninggrootte en de mate waarin de vraag wordt ingevuld via nieuwbouw, transformatie, splitsing of optoppen.

### 3.3.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Aanvullende informatie is nodig om beter te kunnen bepalen hoe economische ontwikkelingen doorwerken in de toekomstige vraag naar utiliteitsbouw en daarmee in de totale wlc-gwp op macroniveau. Deze behoefte kan deels worden ingevuld met gegevens uit de WLO-scenario's en de KEV.
Het EIB-rapport[29] biedt hiervoor een historische onderbouwing van de sloop van utiliteitsgebouwen. Voor een volledige doorrekening blijft echter aanvullende analyse nodig, met name om onderscheid te maken tussen uitbreiding, vervangende nieuwbouw, transformatie en sloop en om hiervoor scenario's tot 2050 op te stellen.

# 4 Bouwmethodiek en materiaalgebruik

Dit hoofdstuk behandelt hoe de manier van bouwen en de keuze van materialen verandert richting 2050 en wat dit betekent voor de productgebonden GWP-impact (verankerde emissies in bouwproducten) van gebouwen. We bekijken op welke schaal nieuwe bouwmethodieken (zoals modulair en industrieel bouwen) worden toegepast en hoe dit de efficiëntie en verspilling beïnvloedt. Daarnaast onderzoeken we trends in materiaalgebruik: de verschuiving naar lichtere of biobased materialen**,** en de mate van hergebruik en recycling. Dit hoofdstuk schetst scenario's waarin de bouwsector zelf verduurzaamt door innovatie, en kwantificeert de impact daarvan op de wlc-gwp.

Bij de interpretatie van dit hoofdstuk is van belang dat de beschreven ontwikkelingen in bouwmethodiek en materiaalgebruik primair gaan over technische en marktmatige veranderingen, en niet over toekomstige beleidskeuzes binnen de Nederlandse wlc-gwp-methodiek. Waar in dit hoofdstuk wordt verwezen naar koolstofopslag in bouwmaterialen, is dat uitsluitend bedoeld om aan te geven dat dit een relevante methodische onzekerheid kan zijn voor de uitkomst van berekeningen, met name bij biobased materialen. Dit hoofdstuk loopt daarmee niet vooruit op de vraag of, en zo ja hoe, dergelijke opslag in toekomstige regelgeving of normstelling zal worden gewaardeerd. Voor de effectinschattingen in dit hoofdstuk geldt daarom dat beleidsgevoelige methodiekkeuzes, zoals de waardering van opgeslagen koolstof en de omgang met einde-levensscenario's, niet als vaststaand uitgangspunt zijn genomen. In Bijlage A worden juist dit soort methodische keuzes apart toegelicht

## 4.1 Industriële en modulaire bouw

***Deelvraag: In hoeverre draagt de toenemende industrialisatie en prefabricage in de bouw bij aan een lagere wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

In deze paragraaf wordt onderzocht in hoeverre de bouwproductie richting 2050 verder industrialiseert en welke effecten dit kan hebben op de wlc-gwp van nieuwbouw. Daarbij wordt gekeken naar ontwikkelingen zoals het toenemend gebruik van prefab-elementen, modulaire bouwsystemen en de inzet van robotisering en automatisering in fabrieken en, in beperktere mate, op de bouwplaats. Deze ontwikkelingen worden vaak geassocieerd met voordelen zoals minder materiaalverlies, kortere bouwtijden en een constantere bouwkwaliteit.

### 4.1.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

De relevante levenscyclusfasen zijn met name A1–A3, A4–A5 en in beperktere mate B6. De belangrijkste effecten van industrieel en modulair bouwen liggen bij materiaalgebruik, materiaalverlies, transport en bouwafval. Indirect kunnen ook de eindelevensfase en module D worden beïnvloed, bijvoorbeeld via andere materiaalkeuzes en betere ketensturing.

### 4.1.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

De verwachte effecten van industrialisatie en prefabricage op de wlc-gwp zijn divers :

- Transport naar de bouwplaats (A4). Door prefabricage neemt het aantal transportbewegingen naar de bouwplaats doorgaans af. Het effect hiervan op de totale wlc-gwp is echter beperkt, omdat transport in veel gebruiksfuncties een relatief klein aandeel heeft (vaak minder dan circa 5%). De bijdrage aan de totale reductie is daardoor naar verwachting beperkt. Door toenemende elektrificatie van transport zal de bijdrage verder omlaaggaan.
  Beperking van bouwafval (A5). Bij de overgang van in-situ gebouwde elementen naar prefab wordt in de huidige methodiek uitgegaan van een lager forfaitair bouwafvalpercentage (van 5% naar 3%). Dit leidt tot een reductie van circa 2% van de productgebonden wlc-gwp (A1–A5, B1–B4, C1–D) voor de betreffende materialen of elementen. In de huidige praktijk worden echter al veel bouwdelen prefab uitgevoerd (zoals kanaalplaatvloeren), waardoor het additionele effect op gebouwniveau beperkt, onzeker en sterk afhankelijk is van de mate waarin prefabricage verder wordt opgeschaald.
- Kwaliteit en gebruiksfase (B6). Industrieel geproduceerde woningen kennen vaak een hogere en consistentere uitvoeringskwaliteit, wat kan leiden tot betere luchtdichtheid en een beter ingeregeld gebouw. In de literatuur wordt gesuggereerd dat dit kan resulteren in een reductie van het energiegebruik in de gebruiksfase die kan oplopen tot circa 10%. De mate waarin dit effect optreedt is sterk afhankelijk van ontwerpkeuzes en kwaliteitsborging.
- Materiaalgebruik en ontwerp. Prefabricage kan leiden tot lichtere en efficiëntere constructies en daarmee tot een lager materiaalgebruik. Tegelijkertijd kunnen in sommige gevallen juist extra materialen nodig zijn, bijvoorbeeld door snellere ontkisting, aanvullende wapening of transport gerelateerde eisen. Het netto-effect op materiaalgebruik is daarmee project specifiek.
- Toepassing van biobased materialen. Industrialisatie en prefabricage maken het toepassen van biobased materialen vaak eenvoudiger en consistenter, doordat productie onder gecontroleerde omstandigheden plaatsvindt en toleranties beter beheersbaar zijn. De mate waarop dit rekenkundig effect zal hebben is mede afhankelijk van de te maken beleidskeuzes.
- Ketensturing. Een verder geïndustrialiseerd bouwproces maakt de toeleveringsketen beter controleerbaar en vergemakkelijkt het maken van ketenafspraken over duurzamere materialen en producten, wat op termijn kan bijdragen aan structurele reducties in de productgebonden emissies.
- Een grootschalige literatuurreview naar *“Modern Methods of Construction”* [32] laat geen robuuste, generieke relatie zien tussen prefabricage/MMC en een lagere productgebonden GWP-impact. De uitkomsten lopen sterk uiteen en zijn duidelijk case-afhankelijk.

### 4.1.3 Wat zijn de onzekerheden?

De beschikbare literatuur laat zien dat de effecten van industrialisatie en prefabricage sterk contextafhankelijk zijn. De belangrijkste onzekerheden betreffen:

- de mate waarin prefab-toepassingen in de toekomst verder opschalen ten opzichte van in-situ bouw (verwachting aandeel>50 % in 2030);
- de richting en omvang van veranderingen in materiaalgebruik door prefabricage, die zowel reducerend als verhogend kunnen uitpakken;

- de invloed van prefabricage op materiaalkeuzes, productgewichten en constructieprincipes.

### 4.1.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Voor veel afzonderlijke effecten zijn in de literatuur inschattingen beschikbaar van het maximale reductiepotentieel. Deze kunnen worden gebruikt als bovengrens in een optimistisch scenario. Als ondergrens kan worden uitgegaan van een business-as-usual scenario, waarin verdere industrialisatie geen additioneel effect heeft op de wlc-gwp ten opzichte van de huidige praktijk. Een kwantitatieve bandbreedte op gebouwniveau is op dit moment echter beperkt onderbouwd.

### 4.1.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Aanvullend onderzoek is nodig om de effecten van industrialisatie en prefabricage beter te kwantificeren het effect op de totale wlc-gwp is waarschijnlijk klein. Bestaande studies richten zich vaak op de totale GWP- of MPG-prestatie van specifieke woningconcepten of fabriekswoningen [28], maar maken onvoldoende onderscheid tussen het effect van het bouwconcept (bijvoorbeeld houtbouw) zelf en het effect van industrialisatie en prefabricage als afzonderlijke factor. Scenario-analyses die deze effecten expliciet isoleren zijn nodig om de bijdrage van industrialisatie aan de wlc-gwp richting 2050 robuust te kunnen berekenen.

## 4.2 Biobased en lichter bouwen

***Deelvraag: In hoeverre worden biobased materialen (zoals hout, mycelium en hennep) en lichtere constructies grootschalig toegepast in nieuwbouw, en wat betekent dit voor de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

Deze paragraaf richt zich op de inzet van biobased materialen en daarmee vaak ook lichtere bouwconstructies als vervanging van reguliere, producten zoals beton en staal. Daarbij wordt gekeken naar ontwikkelingen zoals houtbouw en hybride constructies, de mate waarin deze richting 2050 kunnen opschalen, en het potentiële effect daarvan op de totale $CO_2$-uitstoot van de bouw.

### 4.2.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

De relevante levenscyclusfasen zijn vooral A1–A3 en daarnaast, afhankelijk van de methodiek, ook de gebruiksfase en einde-levensfase. Het grootste effect zit in A1–A3, doordat biobased materialen traditionele $CO_2$-intensieve materialen kunnen vervangen. Daarnaast kunnen koolstofopslag, levensduur en einde-levensscenario’s de uitkomst verder beïnvloeden. Ook A4 kan indirect relevant zijn door het lagere gewicht van biobased materialen.

### 4.2.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Opschaling van biobased bouwmaterialen kan in potentie een substantiële invloed hebben op de wlc-gwp van nieuwbouw. De belangrijkste effecten treden op in de productiefase (A1–A3)

en, afhankelijk van de gekozen berekeningswijze, in de gebruik- en einde-levensduurfase. De belangrijkste mechanismen zijn:

- Vervanging van primaire en fossiele materialen. Hernieuwbare/biobased materialen zijn een vervanging van beton en staal, die doorgaans hoge emissies kennen in de productiefase. Deze materiaalvervanging kan leiden tot een directe reductie van de productgebonden emissies in A1–A3.
- Biogene koolstofopslag. Tijdens de groei slaan biobased producten koolstof op. Wanneer deze materialen in gebouwen worden toegepast, kan dit leiden tot langdurige koolstofopslag gedurende de gebruiksfase. Nb vergelijkbaar effect treedt op bij koolstofopslag in beton, regelgeving is hierover momenteel bij de EC in de maak.
- Lichtere constructies. Biobased materialen zijn vaak aanzienlijk lichter dan minerale en metalen alternatieven (bijvoorbeeld hout ten opzichte van beton). Dit kan leiden tot efficiënter materiaalgebruik, lichtere funderingen, lagere transportemissies en betere randvoorwaarden voor elektrificatie van de bouwplaats.

Het effect van biobased bouwen op gebouwniveau kan aanzienlijk zijn. In scenario's met een hoog aandeel biobased materialen worden in de literatuur reducties van de productgebonden GWP van 50% of meer genoemd in de productiefase (A1-A5), afhankelijk van gebruiksfunctie, constructieprincipe en het aandeel biobased toepassingen, bron: *Potentie van biobased materialen in de bouw* [33] en de paper: *Quantifying the life cycle emissions of hybrid structures with advanced bio- and conventional materialization for low-embodied carbon urban densification of the Amsterdam Metropolitan Area* [34].

Op macroniveau laat de studie Circulaire Bouw 2035 van copper8 en metabolic [35] zien dat vervanging van primaire en fossiele materialen door biobased alternatieven kan leiden tot een reductie van circa 9,5% van de $CO_2$-uitstoot in 2035, waarbij biogene koolstofopslag nog niet is meegerekend, indien dit wel wordt meegerekend is de reductie groter. Voor de periode na 2035 zijn geen vergelijkbare kwantitatieve studies beschikbaar.

**Analyse van de impact van het meenemen van opgeslagen $CO_2$ op de wlc-gwp**
In de publicatie *Woonconcepten en hun prestatie* [28] zijn voor 46 woonconcepten de wlc-gwp per levenscyclusfase en de totale opgeslagen $CO_2$ gerapporteerd. Op basis van deze gegevens is vastgesteld dat een aanzienlijk deel van de concepten substantiële hoeveelheden $CO_2$ opslaat in de toegepaste materialen. De opslag varieert van circa 10 kg $CO_2$ per m² BVO (voornamelijk beton-gebaseerde concepten) tot 442 kg $CO_2$ per m² BVO voor een overwegend hout- en biobased concept (89% biobased). De gemiddelde $CO_2$-opslag bedraagt 155 kg $CO_2$ per m² BVO. In totaal slaan 29 van de 46 concepten meer dan 100 kg $CO_2$ per m² BVO op.

Vervolgens hebben we een scenarioanalyse uitgevoerd waarin de opgeslagen $CO_2$ volledig in mindering wordt gebracht op de wlc-gwp (volledige toerekening van opslag). In dat geval zouden 14 van de 46 concepten (circa 30%) een negatieve wlc-gwp vertonen, dus een productgebonden wlc-gwp van onder de 0. Wanneer de Franse methode[20] wordt toegepast, waarbij het tijdseffect wordt gewogen met een factor 0,578 over een periode van 50 jaar, resulteert dit in drie concepten met een negatieve wlc-gwp. In deze berekeningen is B6 niet meegenomen, omdat dit bij gelijke energieperformance van het gebouw, vergelijkbaar zal zijn.

[20] Met de Franse methode wordt tijdelijke biogene $CO_2$-opslag niet volledig één-op-één als negatieve emissie afgetrokken, maar tijdgewogen meegenomen: omdat de koolstof gedurende de gebouwlevensduur tijdelijk is opgeslagen en pas later weer kan vrijkomen, wordt over 50 jaar een tijdcorrectiefactor toegepast (in deze analyse: 0,578).

Daarnaast is een duidelijke positieve correlatie vastgesteld tussen het aandeel biobased materiaal en de productgebonden $CO_2$-opslag. Concepten met een hoger percentage biobased materialen slaan gemiddeld meer $CO_2$ op in de toegepaste bouwmaterialen, welke tijdens de einde levensfase bij de verbranding van de bouwmaterialen meestal ook weer emitteren. Een groter aandeel biobased materialen leidt doorgaans tot meer tijdelijke $CO_2$-opslag in het gebouw. Als deze opslag in de berekeningsmethode wordt gewaardeerd, kan dit resulteren in een lagere berekende wlc-gwp

De volledige uitwerking van de analyse is opgenomen in Bijlage B Daarin wordt de $CO_2$-impact gespecificeerd per levenscyclusfase en per gebouwonderdeel (structure, skin, services, space plan en stuff).

Ten slotte dient te worden opgemerkt dat de onderzochte woonconcepten geen representatieve afspiegeling vormen van de huidige gemiddelde bouwpraktijk. Het betreft waarschijnlijk relatief duurzame koplopers binnen de markt.

### 4.2.3 Wat zijn de onzekerheden?

De mate waarin biobased materialen bijdragen aan de wlc-gwp richting 2050 is sterk afhankelijk van de schaal waarop zij daadwerkelijk worden toegepast, en in welke mate de $CO_2$ opslag wordt meegewogen. Monitoring laat zien dat het huidige aandeel biobased materialen in de Nederlandse nieuwbouw nog beperkt is,  rond de 1,6%, maar wel groeiende is ligt [36]. Wanneer specifiek naar houtbouw wordt gekeken, ligt het aandeel hoger: circa 2% in 2022, oplopend naar 4% begin 2024[37], en volgens recente opgaven van Aedes circa 8% eind 2024.

Een belangrijk beleidsmatig referentiepunt is de Nationale Aanpak Biobased Bouwen (NABB)[21]. De ambitie is dat in 2030 ten minste 30% van de nieuwbouwwoningen wordt gerealiseerd met minimaal 30% biobased materiaal. Het materiaalpercentage wordt in de huidige monitoring bepaald op basis van massa, exclusief de fundering. De grote minerale massa van de fundering valt dus buiten de scope van de NABB.

De ambitie betekent echter niet dat in 2030 gemiddeld 30% van al het materiaalgebruik in de woningnieuwbouw biobased is. Zij beschrijft het aandeel woningen dat een drempelwaarde van 30% haalt. Voor het bepalen van het effect op de wlc-gwp moet daarom per woningtype en bouwdeel worden vastgesteld welke materialen daadwerkelijk worden vervangen en wat daarvan de gwp-impact is. De NABB-ambitie vormt daarmee een bruikbaar referentiepunt voor de mate van opschaling van biobased producten, maar kan niet rechtstreeks worden vertaald naar een reductiepercentage voor de wlc-gwp.

Regionaal zijn de ambities hoger. Zo streeft de Metropoolregio Amsterdam naar een aandeel houtbouw van 20% in 2030, met scenario's tot 30%[22]. In deze regio is het aandeel houtbouw gegroeid van 0,5% in 2021 naar circa 5% in 2025, wat wijst op een versnelling. Tegelijkertijd concludeert de Integrale Circulaire Economie Rapportage van PBL[38] dat op macroniveau nog geen duidelijke structurele toename zichtbaar is in het gebruik van hout binnen de bouwmaterialenindustrie en de bouwnijverheid. Dit onderstreept de onzekerheid over de mate en snelheid van landelijke opschaling.

De potentiële voordelen van biobased bouwen zijn nadrukkelijk voorwaardelijk. Opschaling leidt alleen tot een daadwerkelijke reductie van de wlc-gwp indien wordt voldaan aan

[21] Zie link: Nationale Aanpak Biobased Bouwen
[22] Zie link: Houtbouw Pact MRA

randvoorwaarden zoals het gebruik van reststromen, duurzaam land- en bosbeheer en voldoende technische prestaties.

De prestaties van biobased bouwconstructies op aspecten als brandwerendheid, vochtbestendigheid en mechanische capaciteit zijn niet zozeer een kwestie van vrije ontwerpkeuzes, maar hangen sterk samen met de huidige stand van kennis, eisen en praktijkervaring. Omdat de grootschalige toepassing van biobased bouwen nog relatief jong is, bestaat op deze punten nog onzekerheid over de prestaties op lange termijn en over de meest robuuste uitwerking in ontwerp, detaillering en uitvoering. Naarmate de praktijkervaring toeneemt, zal dit naar verwachting leiden tot verdere aanscherping en doorontwikkeling van biobased bouwconstructies. Zolang die kennisbasis nog in ontwikkeling is, blijft onzeker in hoeverre extra onderhoud, aanpassingen of vervanging nodig zullen zijn, en daarmee ook wat het effect is op de emissies in de B- en C-fasen.

Een tweede, fundamentele onzekerheid betreft de beleidskeuzes rond de toepassing van en waardering van koolstofopslag in LCA- en wlc-gwp-methodieken. Afhankelijk van de gehanteerde aannames kan de vastgelegde hoeveelheid $CO_2$ in biobased producten groter zijn dan de emissies die vrijkomen tijdens productie. Uit internationale LCA-studies, onder meer binnen het IPCC-domein Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) [39], blijkt dat dit in sommige gevallen kan leiden tot een negatieve productgebonden $CO_2$-balans.

### 4.2.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Voor de effectinschatting richting 2050 kan worden gewerkt met bandbreedtes. Een maximum biobased scenario kan worden gebaseerd op de huidige stand van de techniek en de hoogste realistisch geachte opschalingsniveaus. Als ondergrens kan een business-as-usual-scenario worden gehanteerd, waarin het aandeel biobased materialen beperkt blijft tot het huidige niveau. De werkelijke ontwikkeling zal naar verwachting tussen deze uitersten liggen.

Voor scenario’s richting 2030–2050 kan de NABB-ambitie worden gebruikt als referentiepunt voor een optimistisch opschalingspad, maar niet als harde ondergrens. In een conservatief scenario blijft het aandeel biobased materialen in 2030 beperkt en groeit dit pas na 2030 geleidelijk door. In een versneld scenario wordt de NABB-ambitie rond 2030 benaderd voor een substantieel deel van de nieuwbouw, waarna verdere groei mogelijk is richting 2040 en 2050. De realistische bandbreedte hangt af van beschikbaarheid van biogrondstoffen, opschaling van productieketens, technische prestaties, kosten, vergunningverlening en de mate waarin biobased toepassingen daadwerkelijk gangbare materialen vervangen.

Indicatief kan voor de verdere scenario-uitwerking worden gewerkt met een bandbreedte waarin het aandeel biobased toepassingen in nieuwbouw richting 2030 beperkt blijft in het worst-case-scenario en oploopt richting de NABB-ambitie in het best-case-scenario. Voor 2040 en 2050 kan vervolgens worden uitgegaan van verdere opschaling, mits voldoende biogrondstoffen beschikbaar zijn en de toepassing technisch en economisch haalbaar blijkt. Deze bandbreedte moet in een vervolgfase nader worden gekwantificeerd per gebouwtype en bouwdeel, omdat een generiek percentage voor het hele gebouw snel misleidend wordt door het grote aandeel minerale massa in funderingen en constructies.

### 4.2.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Om de bijdrage van biobased materialen aan de wlc-gwp robuuster te kunnen inschatten, zijn aanvullende onderzoeken nodig, met name naar:

- robuuste scenario-bandbreedtes voor opschaling van biobased materialen en het effect op de wlc-gwp. Er is een ambitie uitgesproken[23] maar nog niet zeker hoe robuust die ambitie is;
- de invloed van levensduur, onderhoud en vervangingscycli van biobased constructies;
- een duidelijke beleidskeuze ten aanzien van koolstofopslag en end-of-life-scenario's binnen LCA-methodieken.

## 4.3 Hergebruik bouwmaterialen

***Deelvraag: In hoeverre wordt hergebruik van bouwmaterialen en -elementen (zoals urban mining en vernieuwbouw in plaats van volledige nieuwbouw) toegepast, en hoe beïnvloedt dit de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

In deze paragraaf wordt de voortgang op het gebied van circulair bouwen geanalyseerd, in de zin van(hoogwaardig) hergebruik van bouwmaterialen. Daarbij wordt verkend in welke mate hergebruik richting 2050 haalbaar is en wat dit betekent voor de wlc-gwp van nieuwbouw.

Dit onderwerp hangt nauw samen met het hoofdstuk over recycling van materialen en grondstoffen (paragraaf 5.4), aangezien beide afhankelijk zijn van de materialen die vrijkomen bij sloop en renovatie. Een toename van hergebruik gaat in beginsel ten koste van het volume dat beschikbaar is voor recycling. In deze analyse wordt aangenomen dat, conform de Lansink[24] of R-ladder[25] , hergebruik de voorkeur heeft boven recycling wanneer dit technisch en functioneel mogelijk is.

**Matchingspercentages als indicatie voor hergebruik- en recyclingpotentie**
In het rapport Materiaalstromen, MKI en $CO_2$ in de Bouw en Infra 2025 [40] wordt gewerkt met zogenoemde matchingspercentages. Dit percentage geeft aan in hoeverre de massa van vrijkomende materialen overeenkomt met de massa van materialen die in een bepaald jaar nodig is. Een matchingspercentage van 100% betekent dat aanbod en vraag op massabasis in balans zijn.

[23] Ambitie die is uitgesproken door de NABB: Uitgesproken 30-30-30 ambitie in de NABB, 2030 minstens 30 procent van de nieuwbouwwoningen met minimaal 30 procent biobased materialen te realiseren. zie link
[24] Ladder van Lansink - Rangorde van afvalverwijdering - Recycling.nl
[25] Circulariteit: 4 strategieën & de R-ladder | RVO.nl

**Tabel 4.1:** Matchingspercentages tussen vrijkomende materialen en benodigde materialen in het BAU scenario

| | Match 2023 | Match 2030 | Match 2040 | Match 2050 |
|---|---|---|---|---|
| Beton | 15% | 20% | 30% | 37% |
| Staal & IJzer | 21% | 30% | 43% | 51% |
| Baksteen | 37% | 42% | 62% | 82% |
| Zand | 16% | 20% | 31% | 43% |
| Gips | 16% | 17% | 27% | 37% |
| Hout | 50% | 60% | 78% | 90% |
| Isolatie | 35% | 44% | 52% | 55% |
| Mortel | 37% | 43% | 62% | 80% |
| Elektronica (o.a. PV) | 3% | 6% | 48% | 93% |
| Kalkzandsteen | 80% | 88% | 98% | 99% |
| Keramiek | 47% | 49% | 65% | 78% |
| Glas | 80% | 82% | 91% | 96% |
| Steen | 12% | 14% | 13% | 13% |
| Kunststoffen | 47% | 54% | 68% | 78% |
| Aluminium | 15% | 24% | 54% | 86% |
| Dakbitumen | 55% | 63% | 68% | 70% |
| Lijm en verf | 60% | 63% | 73% | 78% |
| Koper | 33% | 39% | 54% | 66% |
| Overige metalen | 56% | 61% | 70% | 74% |
| Papier | 30% | 32% | 47% | 60% |
| Gewogen gemiddelde | 19% | 24% | 36% | 45% |

Het matchingspercentage is echter geen directe maat voor realiseerbaar hergebruik of hoogwaardige recycling[26]. In de praktijk kunnen beperkingen optreden door:

- kwaliteitseisen (zoals sterkte, samenstelling en verontreiniging);
- benodigde bewerking of opschoning;
- materiaalverlies tijdens demonteren, sorteren en verwerken.

De matchingspercentages moeten daarom worden geïnterpreteerd als een theoretische potentiële dekkingsgraad op massabasis, en niet als een één-op-één vertaling naar daadwerkelijk hergebruik.

[26] Met hoogwaardig recycling wordt bedoeld dat vrijkomende materialen zó worden gesorteerd en verwerkt dat zij als secundaire grondstof opnieuw in de bouwketen kunnen worden ingezet en gelijkwaardige primaire materialen vervangen, in plaats van laagwaardig te worden toegepast, bijvoorbeeld als ophoogmateriaal.

Voor het business-as-usual-scenario (BAU) laten de berekende matchingspercentages een duidelijke stijging zien richting 2050. Het gewogen gemiddelde neemt toe van circa 19% in 2023 naar 45% in 2050, met grote verschillen tussen materiaalstromen. Met name hout, baksteen, glas, kalkzandsteen en metalen laten hoge potentiële matchingspercentages zien, terwijl andere stromen, zoals elektronica en kunststoffen, sterk afhankelijk zijn van technologische en organisatorische verbeteringen.

Naast het BAU-scenario zijn twee aanvullende scenario's doorgerekend:
- Worst-case scenario, met lagere nieuwbouwvolumes, waardoor eerder balans ontstaat tussen vrijkomend materiaal en materiaalvraag;
- Best-case scenario, met hogere economische en demografische groei, waardoor de materiaalvraag toeneemt en de matchingspercentages lager uitvallen.

**Huidige praktijk en initiatieven**
In de huidige praktijk "lekt" een aanzienlijk deel van de vrijkomende materialen weg uit de gebouwde omgeving, bijvoorbeeld doordat deze worden toegepast als laagwaardig ophoogmateriaal in de infrastructuur. Hierdoor blijven deze stromen beperkt beschikbaar voor hoogwaardig hergebruik of recycling binnen de bouwketen.

Tegelijkertijd zijn er per materiaalstroom initiatieven zichtbaar om hergebruik te stimuleren. Voor constructiestaal zijn bijvoorbeeld normatieve kaders ontwikkeld, zoals NTA 8713:2023 Hergebruik van constructiestaal[41], en bestaan er consortia gericht op het organiseren en opschalen van hergebruik. Vergelijkbare initiatieven bevinden zich voor andere materialen nog in een vroegere ontwikkelfase.

### 4.3.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

De relevante levenscyclusfasen zijn vooral A1–A3 en module D. Het grootste effect van hergebruik zit in het vermijden van nieuwe productie, waardoor de productiefase sterk wordt verlaagd. Daarnaast zijn ook A4, A5 en de einde-levensfase relevant, doordat demontage, transport, opwerking en eventuele reparatie of bewerking nodig zijn om hergebruik mogelijk te maken.

### 4.3.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Het potentiële effect van hergebruik op de wlc-gwp is groot. Materialen die worden hergebruikt komen in de volgende cyclus de keten binnen met een sterk gereduceerde of nihil toegerekende productiefase-impact (het zogeheten free-of-burden-principe). Hierdoor kan de wlc-gwp impact van hergebruikte materialen een fractie bedragen van die van nieuwe producten.

Tegelijkertijd is de totale impact niet nul. Emissies door demontage, transport, bewerking, reparatie en eventueel onderhoud moeten worden meegenomen. De beperkte hoeveelheid beschikbare LCA-studies naar hergebruikte bouwproducten laat zien dat de uiteindelijke reductie sterk afhankelijk is van de benodigde opwerkingsstappen, maar in veel gevallen leidt tot reducties van meer dan 70% ten opzichte van nieuwe producten.

### 4.3.3 Wat zijn de onzekerheden?

De grootste onzekerheden in bestaande studies hebben betrekking op:
- het aandeel materialen dat technisch en functioneel daadwerkelijk (hoogwaardig) hergebruikt wordt;
- Maten van marktacceptatie van de in te zetten hergebruikte materialen.
- de mate van opwerking die nodig is om hergebruik mogelijk te maken;
- uitvalpercentages, bijvoorbeeld doordat producten niet voldoen aan maatvoering, isolatiewaarden of andere prestatie-eisen voor een volgende toepassing;

Deze factoren bepalen in sterke mate of theoretisch beschikbare materiaalstromen zich ook vertalen naar daadwerkelijke wlc-gwp-reducties.

### 4.3.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Voor de effectinschatting kan worden gewerkt met bandbreedtes. Een maximaalscenario veronderstelt dat een groot deel van de vrijkomende materialen kan worden hergebruikt. Als ondergrens kan het BAU-scenario worden gehanteerd, waarin hergebruik beperkt blijft en het merendeel van de materialen wordt gerecycled of laagwaardig toegepast. De werkelijke ontwikkeling zal naar verwachting tussen deze uitersten liggen.

### 4.3.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Aanvullend onderzoek is nodig om de bijdrage van hergebruik aan de wlc-gwp robuuster te onderbouwen. Prioritaire onderzoeksvragen zijn:
- wat de daadwerkelijk herbruikbare volumes per materiaalstroom zijn en welke randvoorwaarden daarvoor moeten worden verbeterd;
- wat de efficiëntieverliezen bij hergebruik zijn (uitvalpercentages);
- hoe de verdeling tussen hergebruik, recycling en verbranding zich richting 2030–2050 ontwikkelt.

## 4.4 Arbeidspotentieel

***Deelvraag: In hoeverre beïnvloedt het toenemende tekort aan vakmensen de keuze voor bouwmethoden en -materialen, en wat is het effect daarvan op de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

Deze paragraaf analyseert hoe het structurele tekort aan vakmensen in de bouwsector doorwerkt in de keuze voor bouwmethoden, ontwerpprincipes en materialen, en wat de implicaties hiervan zijn voor de wlc-gwp van nieuwbouw. Daarbij wordt ingegaan op de mate waarin arbeidsmarktkrapte leidt tot versnelling van arbeidsbesparende technieken, zoals prefabricage, industrialisatie, digitalisering (BIM) en automatisering, en of dit de verduurzaming van de gebouwde omgeving ondersteunt of juist belemmert.

Uit literatuur en workshops blijkt dat arbeidsmarktkrapte in de praktijk vooral druk zet op doorlooptijd en uitvoeringskwaliteit. Dit stimuleert verdere standaardisatie, prefabricage en industrialisatie, de inzet van plug-and-play installaties, robotisering en digitalisering, en leidt tot andere materiaal- en detailkeuzes, zoals drogere verbindingen, lichtere elementen en

geïntegreerde componenten [42]. Daarbij geldt dat deze ontwikkelingen primair zijn gericht op het reduceren van arbeidsuren op de bouwplaats en niet expliciet op het verlagen van $CO_2$-emissies. Klimaatwinst is daarmee mogelijk en vergelijkbaar met de effecten rond industrialisatie (paragraaf Industriële en modulaire bouw 4.1).

### 4.4.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfasen?

De relevante levenscyclusfasen zijn vooral A1–A3, A2/A4/C2, de B-fase en C1–C4 en D. Arbeidstekorten kunnen doorwerken in materiaalgebruik, transport, uitvoeringskwaliteit, onderhoud en de mogelijkheden voor circulair demonteren en hergebruik.

### 4.4.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

**Productiefase (A1–A3)**
Een verschuiving richting fabrieksmatige productie kan leiden tot hogere herhaalbaarheid, minder faalkosten en materiaalverlies, en een strakkere kwaliteitscontrole. Daarnaast kunnen andere materiaalkeuzes worden gemaakt om arbeid te “ontkoppelen” van de bouwplaats, bijvoorbeeld lichtere of meer systeemmatige en biobased oplossingen[43].

Tegelijkertijd kan prefabricage ook leiden tot een toename van materiaalgebruik, bijvoorbeeld door extra wapening, verstevigingen, transportframes of overdimensionering om toleranties te beheersen. Hierdoor kan de productgebonden GWP-impact in A1–A3 juist toenemen.

Een grootschalige review naar *“Modern Methods of Construction”* laat geen robuuste, generieke relatie zien tussen prefabricage/MMC en een lagere productgebonden GWP-impact. De uitkomsten lopen sterk uiteen en zijn duidelijk case-afhankelijk [32].

Nederlandse sectorroadmaps en innovatieprogramma’s laten zien dat gecombineerde maatregelen, waaronder bindmiddelinnovatie, procesoptimalisatie, digitalisering en robotisering, in de betonketen tot substantiële reducties in $CO_2$-emissies kunnen leiden (sectorbrede ambitie tot circa 40–50 % reductie in vergelijking met 1990-niveaus, afhankelijk van maatregel en productsegment)[44]

Voor biobased materiaalstrategieën wordt in vergelijkbare programma’s genoemd dat een aandeel van circa 50% biobased materialen kan leiden tot ongeveer 40% $CO_2$-reductie, afhankelijk van toepassing en ontwerp.[33]

**Transportfasen (A2, A4 en C2)**
Prefabricage en modulariteit leiden vaak tot minder transportbewegingen naar de bouwplaats, doordat losse materialen en afbouwpartijen worden vervangen door samengestelde elementen. Tegelijkertijd kunnen deze ritten zwaarder of volumineuzer zijn. Het netto-effect is daardoor projectafhankelijk[32].

De inzet van bouwhubs en gebundelde logistiek laat in recente Nederlandse praktijkervaringen een sterke reductie van lokale emissies zien (orde van grootte tot circa 80%). Voor $CO_2$-emissies is het effect afhankelijk van de mate van elektrificatie en de gebruikte brandstofmix in transport.

**Gebruiksfase (B-fase)**
Tekorten aan installateurs en onderhoudsmonteurs vormen een bekende bottleneck. Dit kan leiden tot:
- vertraging in oplevering en inregeling, met een tijdelijke verhoging van het energiegebruik (performance gap);
- uitgesteld onderhoud, wat de efficiëntie verlaagt en vervanging versnelt.

Tegelijkertijd kan industrialisatie bijdragen aan een hogere en consistentere bouwkwaliteit, bijvoorbeeld door betere luchtdichtheid en fabrieksmatige afwerking, wat het operationele energiegebruik kan verlagen, mits ontwerp en inregeling goed zijn uitgevoerd. [45]

**Einde-levensduurfase en module D (C1–C4 en D)**
Circulair demonteren is arbeidsintensief en kan door arbeidstekorten worden afgeremd. Tegelijkertijd kan industrialisatie dit juist ondersteunen, mits ontwerpprincipes zoals design-for-disassembly, standaardverbindingen en digitale ondersteuning (BIM, materialenpaspoorten) worden toegepast. Sommige geïntegreerde of gelijmde systemen kunnen recycling en hergebruik echter bemoeilijken.

### 4.4.3 Wat zijn de onzekerheden?

De belangrijkste onzekerheden betreffen:
- de ontwikkeling van het arbeidstekort zelf (migratie, scholing, robotisering, productiviteitsgroei);
- de mate waarin industrialisatie in Nederland daadwerkelijk kan opschalen, mede beïnvloed door lokale eisen zoals welstand en regelgeving;
- de vraag of arbeidstekort leidt tot verduurzaming of juist tot pragmatische, suboptimale materiaalkeuzes.

### 4.4.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

De arbeidsmarktkrapte is groot en naar verwachting aanhoudend. Voor de periode 2026–2029 wordt een behoefte van circa 75.000 extra voltijdse arbeidskrachten genoemd om de voorziene productie te realiseren. Dit maakt arbeidsbesparende oplossingen waarschijnlijk.

Omdat de literatuur geen eenduidig netto-effect laat zien, is het zinvol te werken met bandbreedtes in wlc-gwp-scenario's:
- Methode-switch regulier → prefab/MMC (zonder grote materiaalwijzigingen): indicatief −10% tot +10% effect op A1–A3 op gebouwniveau, afhankelijk van ontwerp en uitvoering.
- Arbeidstekort als versneller van materiaaltransitie (meer biobased, lagere cementgehalten, standaardisatie met minder waste): potentieel grotere reducties, in samenhang met de effecten beschreven in het hoofdstuk over biobased bouwen.
- B-fase-effecten: kwantificering is beperkt beschikbaar; effecten kunnen worden gemodelleerd via aannames over vertragingen in inregeling en performance gaps.

**Scenario's richting 2050**

**Maximaal duurzaam scenario (arbeidstekort als versneller):**
- snelle opschaling van industrieel bouwen, DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) en biobased materialen;
- strakker kwaliteitsmanagement, lagere faalkosten en betere energieprestatie;
- logistieke optimalisatie en elektrificatie van materieel en transport.

Indicatief effect: −20% tot −40% productgebonden GWP-impact (A1–A3) ten opzichte van de huidige praktijk, projectafhankelijk.

**Best-case scenario (arbeidstekort als rem):**
- verschuiving naar wat uitvoerbaar is, met suboptimale materiaalkeuzes en meer herstelwerk;
- onvoldoende installatie- en onderhoudscapaciteit, resulterend in hogere B6-emissies;
- beperkte toepassing van circulair demonteren en lage baten in module D.

Indicatief effect: een verslechtering van circa 10% ten opzichte van de huidige wlc-gwp-prestatie.

## 4.5 Risico door gebrek aan toezicht

Uit het klankbordoverleg blijkt dat het ontbreken van effectieve toezicht op wlc-gwp-eisen een wezenlijk transitierisico vormt. Bij beperkte controle op naleving neemt de prikkel af om daadwerkelijk te ontwerpen en bouwen op lage wlc-gwp-waarden. Dit kan leiden tot:
- Minder toepassing van materialen met een lagere $CO_2$- en milieu-impact.
- Uitblijvende marktvraag naar duurzamere producten.
- Vertraging in opschaling en innovatie.

Toezicht (controle na oplevering) is daarmee een randvoorwaarde voor het realiseren van de beoogde emissiereductie. Onzekerheid betreft de inrichting van toezicht, capaciteit bij bevoegd gezag en de mate waarin sancties effectief worden toegepast

## 4.6 Leveringszekerheid

***Deelvraag: In hoeverre beïnvloeden geopolitieke en economische ontwikkelingen de beschikbaarheid van bouwmaterialen in de toeleveringsketen, en wat betekent dit voor de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

De beschikbaarheid van bouwmaterialen voor nieuwbouw in de woning- en utiliteitsbouw wordt in toenemende mate beïnvloed door geopolitieke spanningen en bredere economische ontwikkelingen. Handelsconflicten, oorlogen, protectionistische maatregelen, concentratie van grondstoffenwinning en volatiliteit in energieprijzen leiden tot verstoringen in internationale toeleveringsketens. Tegelijkertijd neemt de mondiale vraag naar bouwmaterialen toe als gevolg van verstedelijking, de energietransitie en grootschalige infrastructuurinvesteringen.

Deze ontwikkelingen hebben zowel directe als indirecte gevolgen voor de Whole Life Carbon (wlc-gwp) van gebouwen. Met name de productgebonden emissies in de productiefase (A1–A3) worden hierdoor beïnvloed, terwijl vertragingen in de beschikbaarheid van installaties en bouwproducten ook kunnen doorwerken in de gebruiksfase, bijvoorbeeld door uitstel van oplevering of suboptimale inregeling.

Voor de periode 2025–2050 zijn de volgende structurele ontwikkelingen bepalend, zie Global Powers of Construction [46]:
- **Geopolitieke spanningen en handelsbeperkingen**
  Importheffingen op staal en aluminium, sancties, exportrestricties en verstoringen door

conflicten (onder meer in Oekraïne, het Midden-Oosten en de relatie tussen de VS en China) vergroten prijsvolatiliteit en onzekerheid in de levering van bouwmaterialen.

- **Concentratie van grondstoffenwinning en -verwerking**
  Veel kritieke materialen, zoals ijzererts, zeldzame aardmetalen, lithium en silicium, worden gewonnen of verwerkt in een beperkt aantal landen. Dit vergroot de kwetsbaarheid van Europese en Nederlandse bouwketens.
- **Energieprijzen en energiezekerheid.**
  Productie van cement, staal, glas en aluminium is sterk energie-intensief. Hoge en volatiele energieprijzen beïnvloeden zowel de beschikbare productiecapaciteit als de emissie-intensiteit van deze materialen.
- **Economische volatiliteit en inflatie.**
  De periode 2021–2023 laat zien dat bouwmateriaalprijzen zeer gevoelig zijn voor mondiale schokken, met prijsstijgingen die voor specifieke productgroepen konden oplopen tot 50–100%.
- **Klimaat gerelateerde verstoringen.**
  Droogte, overstromingen en bosbranden hebben een toenemende invloed op mijnbouw, gewassen en houtproductie en logistieke infrastructuur, en daarmee op de betrouwbaarheid van materiaalstromen.

### 4.6.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfasen?

De relevante levenscyclusfasen zijn vooral A1–A3, A2/A4, A5, de B-fase, de C-fase en module D. Het grootste effect ligt in A1–A3, doordat verstoringen in de toeleveringsketen kunnen leiden tot hogere emissies door energie-intensievere productie, langere ketens of minder optimale materiaalkeuzes. Daarnaast kunnen langere aanvoerroutes, vertragingen in de bouw, uitstel van installaties en veranderingen in hergebruik en recycling doorwerken in de andere fasen.

### 4.6.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Gezamenlijk vergroten deze ontwikkelingen de onzekerheid rondom materiaalbeschikbaarheid, kosten en emissie-intensiteit, wat het bepalen van robuuste wlc-gwp-paden richting 2050 complexer maakt en het belang van adaptieve scenario’s onderstreept.

**Tabel 4.2:** Tabel met de materialen en installaties met een verhoogde kwetsbaarheid:

| Bouwproduct / installatie | Belangrijkste afhankelijkheden | Verwachte ontwikkeling richting 2050 |
|---|---|---|
| **Constructiestaal** | Import van ijzererts, beschikbaarheid schroot, energieprijzen, handelsmaatregelen | Structurele prijsvolatiliteit; schroottekort beperkt snelle opschaling van laag-$CO_2$-staal |
| **Cement en beton** | Energieprijzen, ETS/CBAM, beschikbaarheid secundaire toeslagstoffen | Druk op productiecapaciteit; stimulans voor cementarme en alternatieve bindmiddelen |
| **Isolatiematerialen (fossiel)** | Petrochemische grondstoffen, gas- en olieprijzen | Toenemende prijsvolatiliteit; verschuiving naar biobased alternatieven |
| **Biobased materialen (hout, vezels)** | Duurzaam bosbeheer, klimaatimpact, schaalbaarheid | Groei verwacht, maar beperkte beschikbaarheid bij snelle opschaling |
| **Installaties zoals Zonnepanelen (PV)** | Productie geconcentreerd in Azië, siliciumketen. Veel afhankelijk van critical materials [47] | Geopolitiek gevoelig; Europese productie groeit maar blijft beperkt |
| **Warmtepompen** | Koper, aluminium, zeldzame aardmetalen, elektronica | Leveringsrisico's kunnen uitrol vertragen; afhankelijkheid van kritieke metalen |
| **Glas en aluminium** | Hoge energie-intensiteit productie | Productiegevoelig voor energieprijzen en netcapaciteit |

**Tabel 4.3:** Tabel met een overzicht van de leveringszekerheidsrisico's en de WLC-fasen waarin deze kunnen optreden

| WLC-fase | Verwacht effect | Toelichting |
|---|---|---|
| **A1–A3 Productie** | **Groot effect** | Hogere emissies door energie-intensieve productie, langere ketens of minder optimale materiaalkeuzes |
| **A2/A4 Transport** | Matig effect | Verplaatsing van productie en langere aanvoerroutes verhogen transportemissies |
| **A5 Bouw** | Beperkt effect | Indirect via vertragingen en inefficiënties |
| **B-fase Gebruik** | **Indirect maar potentieel groot** | Vertraging in PV, Windenergie en warmtepompen kan leiden tot hogere operationele emissies |
| **C-fase Einde levensduur** | Beperkt tot matig | Schaarste stimuleert hergebruik en recycling |
| **D-module** | Potentieel positief[27] | Hogere materiaalwaarden stimuleren circulaire stromen |

De productiefase blijft dominant: voor veel bouwproducten en installaties ligt daar een groot deel van de impact.

### 4.6.3 Wat zijn de onzekerheden?

De belangrijkste onzekerheden betreffen de geopolitieke schokken, zoals nieuwe conflicten of handelsbeperkingen(tarieven), die per definitie niet voorspelbaar zijn en lastig te vangen zijn in scenario studies. Historische ervaringen laten zien dat geopolitieke en economische schokken vaak een sterk kort termijneffect hebben op levertijden, beschikbaarheid en prijzen

[27] Door hergebruik en recycling van materialen neemt de afhankelijkheid van primaire grondstoffen af.

van bouwmaterialen, maar dat dit effect meestal niet één-op-één blijvend is. De acute verstoring van internationale toeleveringsketens tijdens de coronaperiode is bijvoorbeeld grotendeels afgenomen, terwijl prijs- en inflatie-effecten nog meerdere jaren kunnen doorwerken. Tegelijk kunnen opeenvolgende schokken wel leiden tot meer structurele veranderingen, zoals hogere risicopremies, aanpassing van handelsstromen, meer spreiding van leveranciers en een grotere focus op leveringszekerheid. Voor de wlc-gwp betekent dit dat vooral het tempo, de herkomst en de emissie-intensiteit van materiaalstromen kunnen veranderen, ook wanneer de acute verstoring zelf tijdelijk is. [48]

### 4.6.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

De bandbreedte loopt tussen een scenario waarin verstoringen in toeleveringsketens beperkt blijven en de beschikbaarheid van bouwmaterialen grotendeels stabiel is, en een scenario waarin geopolitieke spanningen, handelsbeperkingen, hoge energieprijzen en schaarste aan kritieke grondstoffen leiden tot sterkere prijs- en leveringsschokken. In dat laatste geval kunnen materiaalkeuzes, transportafstanden en vertragingen in de toepassing van duurzame installaties ongunstig uitwerken op de wlc-gwp. De exacte omvang van deze bandbreedte is op dit moment nog niet robuust te kwantificeren

### 4.6.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Aanvullende informatie is nodig om beter te kunnen bepalen hoe gevoelig de wlc-gwp is voor verstoringen in internationale ketens en voor verschillen in herkomst, beschikbaarheid en prijs van bouwmaterialen en installaties. Met name is meer inzicht wenselijk in de afhankelijkheid van kritieke materiaalstromen, de mogelijke verschuiving naar alternatieve herkomstregio's en de doorwerking daarvan op emissies in productie, transport en gebruiksfase. Ook expertduiding is nodig om realistische scenario's voor leveringszekerheid richting 2030 en 2050 te onderbouwen.

## 4.7 Materiaal efficiëntie door ontwerp optimalisatie

Internationaal onderzoek van het International Energy Agency (IEA) toont aan dat materiaalefficiëntie een substantiële bijdrage kan leveren aan $CO_2$-reductie in energie-intensieve materialen zoals staal, cement en aluminium [49]. Met materiaalefficiëntie wordt hier bedoeld: het leveren van dezelfde functie (bijv. draagkracht, woonoppervlak) met minder primaire grondstoffen en minder emissies over de gehele levenscycli.

In het Clean Technology Scenario (het meest gunstige scenario) daalt de materiaalvraag in 2060 ten opzichte van een referentiescenario met circa:

- 24% voor staal
- 15% voor cement
- 17% voor aluminium

Deze reductie komt vooral uit vraagreductie in de keten: ontwerpoptimalisatie, minder overdimensionering, hogere bouwkwaliteit, levensduurverlenging, hergebruik en recycling.

Voor de gebouwde omgeving zijn met name ontwerpoptimalisatie, verlenging van de gebruiksduur (in combinatie met renovatie) en hergebruik van componenten bepalend[28]. Hierdoor daalt de vraag naar primaire materialen. Dit verkleint de benodigde inzet van zware industriële decarbonisatietechnologieën, zoals CCS of waterstof, om dezelfde emissiedoelen te behalen.

Voor de wlc-gwp-prognose richting 2030–2050 betekent dit dat reducties in A1–A3 niet uitsluitend voortkomen uit productieverbetering, maar ook uit een structurele daling van materiaalintensiteit per m² BVO en reductie van het aantal m2 BVO per woning. Dit raakt direct aan aannames over referentiegebouwen, materiaalhoeveelheden en circulaire strategieën. Opschaling van ontwerpoptimalisatie, biobased toepassingen, hergebruik en levensduurverlenging kan aanvullende reducties opleveren.

[28] Hier zit dus een overlap (dubbel telling) met hergebruik en recycling

# 5 Verduurzaming industrie

In dit hoofdstuk staat de industrie centraal die bouwmaterialen en -producten produceert, zoals staal, cement, glas en baksteen. Deze sectoren zijn verantwoordelijk voor een groot deel van de productgebonden emissies binnen de wlc-gwp van gebouwen. De verduurzaming van industriële productieprocessen is daarmee een cruciale randvoorwaarde voor het realiseren van lage wlc-gwp-waarden richting 2050.

Per sub thema – elektrificatie, waterstof, CCS, inzet van recyclaat en procesefficiëntie – worden de belangrijkste technologische opties beschreven, inclusief de verwachte ontwikkeling en mate van toepassing in verschillende scenario's. Hiermee wordt inzicht verkregen in de potentiële daling van emissiefactoren van bouwmaterialen, evenals in de belangrijkste onzekerheden en beleidsvragen die deze transitie bepalen.

Hoofdstuk 4 en 5 hangen nauw met elkaar samen, omdat beide vooral betrekking hebben op de materiaalgebonden emissies van nieuwbouw, met name in fase A1–A3. Het verschil is dat hoofdstuk 4 vooral kijkt naar veranderingen in het gebouw en de bouwpraktijk: welke bouwmethoden, materiaalkeuzes en ontwerpstrategieën worden toegepast, in welke hoeveelheden en met welk effect op de wlc-gwp. Hoofdstuk 5 kijkt vervolgens naar de productiekant van deze materialen en installaties: hoe de emissie-intensiteit van dominante materiaalstromen zich richting 2050 kan ontwikkelen door industriële verduurzaming, zoals elektrificatie, waterstof, CCS, recyclaat en procesefficiëntie. Anders gezegd: hoofdstuk 4 gaat vooral over wat er wordt gebouwd en hoe dat gebeurt, terwijl hoofdstuk 5 gaat over hoe de benodigde materialen en producten worden geproduceerd. Beide hoofdstukken moeten in samenhang worden gelezen, omdat veranderingen in materiaalkeuze en ontwerp direct doorwerken in de relevantie en het reductiepotentieel van industriële transitiepaden, en omgekeerd.

Dit hoofdstuk richt zich niet op alle materiaalgroepen afzonderlijk, maar op een selectie van materiaalstromen en productgroepen die naar verwachting bepalend zijn voor de ontwikkeling van de materiaalgebonden emissies richting 2050. De selectie is gebaseerd op een combinatie van factoren: de verwachte relevantie voor de wlc-gwp van nieuwbouw, de energie- en procesintensiteit van de productie, de beschikbaarheid van sectorale routekaarten en literatuur, en de mate waarin voor deze materiaalstromen duidelijke transitiepaden richting 2030–2050 zijn te onderscheiden. Daarbij ligt de nadruk op materiaalgroepen waarvoor industriële verduurzaming naar verwachting een groot effect heeft op fase A1–A3. Installaties zijn aanvullend opgenomen omdat hun relatieve bijdrage aan de totale wlc-gwp toeneemt naarmate het energiegebruik in de gebruiksfase afneemt. Het hoofdstuk is daarmee richtinggevend, maar geen uitputtende of volledig gekwantificeerde rangorde van alle materiaalgroepen.

**Economische randvoorwaarden en marktwerking**
Uit gesprekken met de industrie komt consistent naar voren dat duurzame productie structureel hogere kosten met zich meebrengt. Indien verduurzaming economisch neutraal of goedkoper zou zijn, zou deze transitie reeds grootschalig zijn ingezet. Een belangrijke onzekerheid is of deze meerkosten binnen Europa kunnen worden doorberekend aan afnemers, of gecompenseerd worden via overheidsinstrumenten. Zonder effectieve

kostencompensatie bestaat het risico dat Europese producenten worden verdrongen door import van minder duurzaam geproduceerde materialen.

De effectiviteit van grenscorrectiemechanismen, zoals het Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), wordt door verschillende sectoren betwijfeld. Daarbij wordt gewezen op mogelijke ontwijkroutes en administratieve complexiteit, waardoor het risico bestaat dat duurzame Europese productie alsnog concurrentienadeel ondervindt. Tegelijkertijd laten studies zien dat, hoewel de meerkosten van duurzame industriële bouwmaterialen aanzienlijk kunnen zijn, de doorwerking in de prijs van het eindproduct beperkt blijft. In de praktijk blijkt echter dat meerdere schakels in de waardeketen een duurzaamheidspremie doorberekenen, waardoor de betaalbaarheid op eindgebruikersniveau onder druk komt te staan, blijkt uit onderzoek van Deloitte [50].

Uit onderzoek van de DGBC blijkt dat 72% van de $CO_2$-emissies van bouwproducten die in Nederland worden toegepast, buiten Nederland plaatsvinden[51]. Dit komt doordat de productie en/of winning van grondstoffen in het buitenland gebeurt. Daarbij gaat het niet alleen om import van bouwproducten; ook in Nederland geproduceerde materialen kunnen weer worden geëxporteerd. Voor deze import- en exportstromen ontbreken op dit moment echter nog voldoende sectorspecifieke gegevens om hun effect op de wlc-gwp van in Nederland toegepaste bouwproducten precies te kwantificeren.  De wlc-gwp rekent de broeikasgasemissies over de gehele levenscyclus van een gebouw mee en maakt daarbij geen onderscheid naar de locatie van die emissies. Dat is logisch vanuit klimaatperspectief, omdat broeikasgassen mondiaal bijdragen aan klimaatverandering. Tegelijk vallen de systeemgrens van de wlc-gwp en de directe invloedssfeer van Nederlands beleid niet samen. Voor emissies uit binnenlandse productie is de beleidsinvloed directer dan voor emissies in internationale ketens.

Een aanvullend knelpunt betreft het investeringsrisico voor de zware industrie. Investeringen in elektrificatie, waterstof of CCS leiden vaak tot een sterke afhankelijkheid van één energiedrager of infrastructuur. De beschikbaarheid, prijsontwikkeling en regelgeving hiervan zijn onzeker over de komende decennia. Omdat industriële installaties een afschrijvingstermijn van circa 20 jaar kennen, vergroot deze onzekerheid het risico op technologische lock-in.

Hybride oplossingen, waarin bijvoorbeeld gas en elektriciteit worden gecombineerd, kunnen deze afhankelijkheid tijdelijk verkleinen. Tegelijkertijd bestaat het risico dat dergelijke installaties op termijn onvoldoende duurzaam blijken om te voldoen aan aangescherpte beleids- of marktvereisten. In beide gevallen kan dit leiden tot investeringsuitstel, omdat geen van de opties een volledig robuust langetermijnperspectief biedt.

De benodigde technologieën voor vergaande verduurzaming van de bouwmaterialenindustrie zijn in principe beschikbaar en leveren producten op die technisch voldoen aan de eisen vanuit de bouwpraktijk. De snelheid en schaal van implementatie richting 2050 worden echter in sterke mate bepaald door economische randvoorwaarden, beleidszekerheid en het vermogen om investeringsrisico’s voor de industrie te beperken.

In dit hoofdstuk staat de industrie centraal die bouwmaterialen en -producten produceert (zoals staal, cement, glas, baksteen). We onderzoeken de belangrijkste opties om deze industrieën te verduurzamen richting 2050, aangezien hun procesemissies een groot deel uitmaken van de wlc-gwp van gebouwen. Per subthema (elektrificatie, waterstof, CCS, recyclaat, efficiëntie) beschrijven we de verwachte technologische ontwikkelingen en de mate van toepassing in verschillende scenario’s. Daarmee krijgen we inzicht in hoe de

emissiefactor van materialen kan dalen en welke onzekerheden en beleidsvragen hierbij spelen.

# 5.1 Elektrificatie van processen

***Deelvraag: In welke mate draagt elektrificatie van productieprocessen in de bouwmaterialenindustrie bij aan het verlagen van de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

Deze paragraaf beschrijft in hoeverre industriële productieprocessen in de bouwmaterialenindustrie kunnen worden geëlektrificeerd en welke bijdrage dit levert aan de reductie van de wlc-gwp van nieuwbouw. De focus ligt op energie-intensieve sectoren zoals staal, cement, keramiek en minerale isolatiematerialen. Elektrificatieopties omvatten onder meer elektrische ovens en inductieverhitting als vervanging van fossiele branders. Daarnaast wordt ingegaan op de verwachte ontwikkeling richting 2050, de benodigde duurzame elektriciteitsvoorziening en de belangrijkste randvoorwaarden en risico's.

## 5.1.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

De relevante levenscyclusfasen zijn vooral A1–A3. Het grootste effect van elektrificatie ligt in de productiefase van bouwmaterialen, doordat fossiele productieprocessen worden vervangen door elektrische processen. Daarmee dalen vooral de materiaalgebonden emissies van energie-intensieve producten zoals staal, cement, keramiek en minerale isolatiematerialen.

## 5.1.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Elektrificatie van productieprocessen wordt in vrijwel alle nationale en internationale scenario's beschouwd als een cruciale route voor het reduceren van de productiefase-emissies (A1–A3) van bouwmaterialen. Met name in energie-intensieve processen kan elektrificatie leiden tot reducties van circa 60–90% van de directe $CO_2$-emissies per ton product, mits wordt uitgegaan van een grotendeels $CO_2$-vrije elektriciteitsmix[52]. Deze reducties zijn ook opgenomen in routekaarten van materiaalketens, opgesteld naar aanleiding van het bouwmaterialenakkoord. (zie hoofdstuk 5.5).

**Systeemrandvoorwaarden: elektriciteitsnet en energievoorziening**
Nationale systeemstudies, waaronder II3050[53][29] van Netbeheer Nederland in samenwerking met TenneT en Gasunie, laten zien dat het Nederlandse elektriciteitssysteem in principe geschikt kan worden gemaakt voor grootschalige elektrificatie richting 2050. Dit is ook verwerkt in het bouwmaterialen akkoorden. Dit is echter alleen haalbaar onder strikte voorwaarden:

- de uitbreiding van regionale elektriciteitsnetten moet structureel twee tot drie keer sneller verlopen dan het huidige (al verhoogde) tempo;
- het hoog- en extra-hoogspanningsnet moet aanzienlijk worden uitgebreid, met naar schatting 50–100 extra hoogspanningsstations en een toename van het ruimtebeslag van circa 20–33% ten opzichte van het huidige netwerk;

[29] Zie Nationaal plan energie systeem link

- de koppeling tussen landelijke en regionale netten moet minimaal verdubbelen tot verdrievoudigen.

De grootste uitvoeringsdruk ligt in de periode 2025–2035, waarin industriële elektrificatie samenvalt met groei in woningbouw, mobiliteit en andere elektriciteit intensieve toepassingen.

### 5.1.3 Wat zijn de onzekerheden?

De bijdrage van elektrificatie aan de reductie van de wlc-gwp is afhankelijk van meerdere risico's:

- Netcongestie op korte en middellange termijn. In grote delen van Nederland is reeds sprake van congestie op midden- en laagspanningsniveau. Zonder tijdige netverzwaring kunnen industriële elektrificatieprojecten worden uitgesteld, waardoor fossiele productieprocessen langer in gebruik blijven.
- Tempo- en uitvoeringsrisico's. Vergunningprocedures, ruimtegebruik, beschikbaarheid van technisch personeel en leveringszekerheid van kritieke componenten, zoals transformatoren, vormen substantiële bottlenecks.
- Mismatch tussen elektrificatie en duurzame opwek. Indien de groei van de elektriciteitsvraag sneller verloopt dan de uitbreiding van hernieuwbare opwek, kan elektrificatie tijdelijk leiden tot hogere marginale emissies en grotere prijsvolatiliteit, waardoor de gerealiseerde $CO_2$-reductie beperkter uitvalt.

### 5.1.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Gezien deze onzekerheden is het noodzakelijk om in wlc-gwp-scenario's richting 2050 met bandbreedtes te werken:

- Best-case scenario: tijdige en grootschalige netverzwaring in combinatie met een snelle groei van hernieuwbare elektriciteitsopwekking, resulterend in maximale reducties van A1–A3-emissies.
- Worst-case scenario: structurele netbeperkingen tot in 2050 (realistisch proberen te bepalen in welke maten dit beperkt is, met experts), waardoor elektrificatie vertraagt en een negatief effect heeft op de wlc-gwp.

## 5.2 Waterstof en alternatieve energiedragers

***Deelvraag: In hoeverre kan waterstof (en andere alternatieve energie dragers) als alternatieve brandstof voor de energie-intensieve bouwmaterialenindustrie en voor zwaar bouwtransport bijdragen aan een lagere wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050, gegeven de verwachte beschikbaarheid van waterstof?***

Deze paragraaf onderzoekt de rol van groene waterstof als alternatief voor fossiele brandstoffen en grondstoffen in energie-intensieve productieprocessen binnen de bouwmaterialenindustrie. De focus ligt op toepassingen waarbij directe elektrificatie technisch of economisch lastig is, zoals zeer hoge-temperatuurprocessen en reductieprocessen in de staal, keramische en glasproductie. Daarnaast wordt ingegaan op de verwachte

beschikbaarheid van betaalbare groene waterstof, de concurrentie met andere sectoren en de implicaties voor wlc-gwp-scenario's richting 2050.

Naast waterstof kunnen ook andere energiedragers relevant zijn voor de verduurzaming van industriële productieprocessen. Biogas kan voor een deel van de bestaande productielocaties een relatief direct toepasbaar alternatief zijn, omdat het in bepaalde gevallen met beperkte aanpassingen in bestaande verbrandingsinstallaties kan worden ingezet. Daarmee kan biogas vooral op korte en middellange termijn een overgangsroute bieden, al blijft grootschalige toepassing afhankelijk van beschikbaarheid, prijs en concurrentie met andere sectoren.

Daarnaast wordt in onderzoek gekeken naar ijzerpoeder/ijzeroxide als energiedrager. Deze route wordt gezien als een potentieel veelbelovend alternatief voor waterstof, met name voor de opslag en het transport van energie. Voor de bouwmaterialenindustrie is deze toepassing op dit moment nog minder ver ontwikkeld dan elektrificatie, biogas en waterstof, maar zij kan op langere termijn relevant worden voor hoge-temperatuurprocessen waar flexibiliteit in energiedragers gewenst is. De reductiebijdrage van deze alternatieven aan de wlc-gwp is daarmee vooralsnog vooral scenarioafhankelijk en nog beperkt kwantitatief onderbouwd.

### 5.2.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

De relevante levenscyclusfasen zijn vooral A1–A3. Het grootste effect van waterstof ligt in de productiefase van bouwmaterialen, doordat groene waterstof fossiele brandstoffen en reductiemiddelen kan vervangen in energie-intensieve processen, zoals in delen van de staal-, keramiek- en glasproductie. Indirect kan waterstof ook doorwerken in andere fasen, maar het primaire effect op de wlc-gwp ligt in A1–A3.

### 5.2.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

Waterstof speelt met name een rol in productieprocessen waar temperaturen van meer dan 1.000 °C vereist zijn, zoals in delen van de staal- en keramische industrie. In deze context wordt waterstof gezien als complementair aan elektrificatie, en niet als een volledige vervanging daarvan. Voor staalproductie kan waterstof bijvoorbeeld worden ingezet als reductiemiddel de zo geheten direct reduced iron (DRI-route) in plaats van cokes, terwijl in keramische processen waterstof fossiele brandstoffen kan vervangen in ovens waar elektrificatie beperkt toepasbaar is.

Voor de wlc-gwp van nieuwbouw betekent inzet van groene waterstof primair een reductie van de directe verbrandingsemissies in de productiefase (A1–A3). Deze reductie is echter alleen realiseerbaar indien de waterstof daadwerkelijk wordt geproduceerd met hernieuwbare elektriciteit; bij gebruik van fossiel of deels fossiel opgewekte waterstof verschuift de emissie slechts in de keten.

**Infrastructuur en beschikbaarheid**
Nederland werkt aan de ontwikkeling van een landelijk waterstoftransportnet, grotendeels gebaseerd op hergebruik van bestaande aardgasleidingen. Volgens huidige plannen wordt dit netwerk gefaseerd gerealiseerd, waarbij delen pas rond 2030–2032 operationeel worden. Dit betekent dat grootschalige industriële toepassing van waterstof in de bouwmaterialenindustrie pas na 2030 realistisch wordt.

Internationale analyses, onder meer van de International Energy Agency, laten zien dat wereldwijd slechts een beperkt deel van de aangekondigde groene-waterstofprojecten momenteel een definitieve investeringsbeslissing heeft genomen. Belangrijke oorzaken hiervoor zijn:

- de hoge kosten van elektrolyse;
- onzekerheid over toekomstige en stabiele vraag;
- het ontbreken van voldoende infrastructuur en opslagcapaciteit.

### 5.2.3 Wat zijn de onzekerheden?

De bijdrage van waterstof aan de reductie van de wlc-gwp richting 2050 is omgeven door meerdere onzekerheden:

- Timing-risico's. Wanneer infrastructuur, productiecapaciteit en industriële vraag niet gelijktijdig ontwikkelen, ontstaat een kip-ei-probleem dat investeringsbeslissingen vertraagt.
- Kosten- en concurrentierisico's. Groene waterstof blijft naar verwachting schaars en relatief duur, waardoor toepassing zich waarschijnlijk beperkt tot sectoren zonder realistisch elektrisch alternatief of waarbij het de meest economische voordeel op levert[54].
- Beperkte schaal voor bouwmaterialen. Gezien de grote volumestromen in de bouwmaterialenindustrie is het onzeker of voldoende groene waterstof beschikbaar komt zonder verdringing van andere sectoren, zoals chemie, luchtvaart en energieopslag.

### 5.2.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Voor wlc-gwp-modellering richting 2050 betekent dit dat waterstof en andere alternatieve energiedragers:

- geen generieke oplossing vormt voor de gehele bouwmaterialenindustrie;
- vooral relevant is in specifieke niches en als overgangsoptie,;
- gepaard gaat met grotere onzekerheden dan directe elektrificatie.

In scenario-analyses verdient het daarom aanbeveling om waterstof te modelleren als aanvullende reductieroute, met expliciete aannames over beschikbaarheid, prijs en infrastructuur, en niet als vanzelfsprekende hoofdroute voor emissiereductie. IEA-studies laten zien dat groene waterstof richting 2030 beperkt beschikbaar blijft en primair wordt ingezet in sectoren zonder haalbaar elektrisch alternatief[52].

### 5.2.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

Vooralsnog is het niet wenselijk om binnen deze verkenning één specifieke energiedrager als voorkeursroute aan te wijzen. Hoewel waterstof, biogas en andere alternatieve energiedragers potentieel relevant kunnen zijn voor de verduurzaming van hoge-temperatuurprocessen, is op dit moment nog onvoldoende duidelijk in hoeverre deze opties technologisch uitontwikkeld, economisch haalbaar en op schaal beschikbaar zullen zijn. Het ligt daarom voor de hand om deze routes in dit rapport te beschouwen als mogelijke, maar nog onzekere transitiepaden. Deze onzekerheid is relevant voor de interpretatie van de scenario's en dient expliciet te worden meegewogen bij de inschatting van de verwachte reductie van de wlc-gwp.

Voor een robuuste inschatting van de rol van waterstof en/of andere energie dragers binnen de wlc-gwp zijn aanvullende onderzoeken nodig, met name naar:

- de expliciete doorwerking van infrastructuurbeperkingen in wlc-gwp-scenario's;
- de concurrentie om schaarse hernieuwbare elektriciteit en waterstof, inclusief allocatievraagstukken tussen sectoren.

## 5.3 Carbon Capture en Storage (CCS)

***Deelvraag: In welke mate kan Carbon Capture and Storage (CCS) de CO2-uitstoot van de bouwmaterialenindustrie verminderen en daarmee de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050 verlagen?***

Deze paragraaf beschrijft de rol van Carbon Capture and Storage (CCS) bij het reduceren van moeilijk vermijdbare procesemissies in de bouwmaterialenindustrie. De focus ligt op sectoren waar $CO_2$ vrijkomt als gevolg van chemische reacties of hoge-temperatuurprocessen, en waar elektrificatie of waterstof slechts gedeeltelijk een oplossing biedt. Met name de productie van cementklinker, maar ook delen van de staal- en keramische industrie, worden gezien als primaire toepassingsgebieden.

Naast CCS wordt kort ingegaan op Carbon Capture and Utilisation (CCU), waarbij afgevangen $CO_2$ wordt hergebruikt als grondstof. Daarbij wordt expliciet onderscheid gemaakt tussen tijdelijke en structurele emissiereducties.

### 5.3.1 Wat zijn de relevante levenscyclusfases?

De inzet van CCS heeft primair effect op de productiefase van bouwmaterialen (A1–A3), doordat directe proces- en verbrandingsemissies worden afgevangen voordat deze in de atmosfeer terechtkomen. Voor $CO_2$-intensieve materialen zoals cement, staal en keramiek kan CCS daarmee een substantiële reductie van de productgebonden GWP realiseren.

Maar CCS kan ook effect hebben op andere levenscyclusfasen:

- Einde-levensfase (C-fase): toepassing van CCS bij afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) kan de emissies van reststromen verminderen en daarmee invloed hebben op de totale wlc-gwp. Helemaal voor bouwproducten met een lange levensduur waarbij de uiteindelijke verbranding na 2050 bevindt kan dit van invloed zijn op de impact.
- Energiesysteem (B6): CCS bij elektriciteits- of warmteproductie kan indirect doorwerken in de emissiefactoren van elektriciteit en warmte, mits deze centrales onderdeel blijven van het energiesysteem.

### 5.3.2 Wat is het verwachte effect op de wlc-gwp?

CCS wordt in vrijwel alle nationale en internationale scenario's beschouwd als een cruciale sluitsteen voor het bereiken van zeer lage of vrijwel klimaat neutrale emissies in sectoren met onvermijdelijke procesemissies. Voor cementproductie wordt in routekaarten en systeemstudies doorgaans uitgegaan van afvangpercentages van 60–90% van de $CO_2$-emissies per ton klinker, afhankelijk van de gekozen technologie en integratiegraad. Ook

voor staalproductie en bepaalde keramische processen worden vergelijkbare ordegroottes genoemd, zij het met grotere onzekerheid en beperktere toepasbaarheid.
Voor de wlc-gwp van nieuwbouw betekent dit dat CCS, mits grootschalig toegepast, een zeer groot effect kan hebben op de productgebonden emissies van enkele dominante productstromen. Zonder CCS blijven met name cementgerelateerde emissies in vrijwel alle scenario's substantieel aanwezig, ook bij maximale elektrificatie en inzet van alternatieve bindmiddelen.

**CCS versus CCU**
Naast opslag kan afgevangen $CO_2$ ook worden hergebruikt (CCU), bijvoorbeeld voor kunststoffen, chemicaliën of bepaalde bouwmaterialen (zoals vulmiddel in beton). Voor de wlc-gwp is hierbij het onderscheid essentieel:

- CCS leidt tot structurele emissiereductie, mits $CO_2$ permanent wordt opgeslagen (bijvoorbeeld in lege gasvelden onder de Noordzee).
- CCU leidt in veel toepassingen slechts tot tijdelijke opslag, waarna de $CO_2$ op termijn weer vrijkomt (bijvoorbeeld bij verbranding van synthetische brandstoffen).

CCU kan in specifieke gevallen bijdragen aan emissiereductie, maar wordt in de meeste wlc-gwp-methodieken niet gelijkgesteld aan permanente emissieverwijdering. De bijdrage van CCU aan structurele verlaging van de wlc-gwp wordt daarom als beperkter, dit is wel echter sterk afhankelijk van of de methode het meeneemt (zie bijlage: 0)

**Infrastructuur en haalbaarheid**
In Nederland wordt CCS expliciet voorzien in combinatie met offshore opslag onder de Noordzee, onder meer in lege gasvelden. Verschillende infrastructuurprojecten zijn gericht op collectieve $CO_2$-transport- en opslagnetwerken, met grootschalige toepassing voorzien vanaf circa 2030. De haalbaarheid van CCS op grote schaal is daarmee in sterke mate afhankelijk van:
- tijdige realisatie van transport- en opslaginfrastructuur;
- beschikbaarheid van voldoende opslagcapaciteit;
- langdurige beleidszekerheid en financiële ondersteuning.

### 5.3.3 Wat zijn de onzekerheden?

De belangrijkste onzekerheden in bestaande studies betreffen:

- Opschalingsrisico's: of CCS-projecten daadwerkelijk op de beoogde schaal worden gerealiseerd, gegeven vergunningstrajecten, investeringskosten en maatschappelijke acceptatie;
- Opslagcapaciteit en concurrentie: of er voldoende betaalbare opslagruimte beschikbaar blijft wanneer meerdere industrieën tegelijkertijd inzetten op CCS;
- Kosten en energiegebruik: CCS verhoogt het energiegebruik van productieprocessen, wat de netto-emissiereductie en kostenstructuur beïnvloedt;
- Lock-in-risico's: langdurige afhankelijkheid van CCS kan alternatieve routes (zoals verdere materiaalinnovatie) mogelijk afremmen.

### 5.3.4 Wat is de bandbreedte van mogelijke scenario's?

Voor wlc-gwp-scenario's richting 2050 is het noodzakelijk om CCS expliciet als scenario-afhankelijke optie te modelleren:

- Hoog CCS-scenario: grootschalige toepassing vanaf 2030–2035, resulterend in zeer sterke reducties van A1–A3-emissies voor cement en andere $CO_2$-intensieve materialen zoals staal, glas, keramische producten en kunststoffen.
- Laag CCS-scenario: beperkte of vertraagde toepassing, waardoor restemissies in de bouwmaterialenindustrie substantieel blijven en alternatieve reductieroutes onvoldoende blijken om klimaatneutraliteit te bereiken.

De Europese gedelegeerde verordening onder Regulation (EU) 2024/3012 [55] maakt een duidelijk onderscheid tussen tijdelijke koolstofopslag en gecertificeerde permanente koolstofverwijdering. Het kader ziet uitsluitend op permanente removals via DACCS, BioCCS en biochar carbon removal, waarbij opslag geologisch moet zijn geborgd of, in het geval van biochar, aantoonbaar voor meerdere eeuwen stabiel is, inclusief monitoring, onzekerheidsanalyse (95% betrouwbaarheidsinterval) en aansprakelijkheid bij eventuele lekkage. Tijdelijke biogene koolstofopslag in bouwproducten, zoals hout in gebouwen, valt niet onder deze certificeringsmethodiek en wordt in dit kader niet als permanente verwijdering erkend. Voor de Nederlandse wlc-gwp-systematiek betekent dit dat eventuele negatieve emissies richting 2050 alleen als zodanig kunnen worden beschouwd wanneer zij voldoen aan deze strikte EU-criteria voor permanentie, additionaliteit en robuuste kwantificering; tijdelijke opslag in bouwproducten blijft methodisch en juridisch een aparte categorie. Tegelijkertijd impliceert het expliciet erkennen en certificeren van permanente opslag dat CCS en BioCCS economisch en beleidsmatig aantrekkelijker worden, omdat zij verhandelbare en juridisch geborgde verwijderingseenheden kunnen genereren. Dit vergroot de kans dat deze technieken richting 2040–2050 op grotere schaal worden toegepast, met name in energie-intensieve sectoren zoals cement, staal en afvalverbranding.

### 5.3.5 Is er behoefte aan aanvullende informatie?

De uiteindelijke bijdrage van CCS aan de wlc-gwp van nieuwbouw ligt daarmee binnen een brede bandbreedte en is sterk afhankelijk van beleidskeuzes, infrastructuurontwikkeling en maatschappelijke acceptatie in het komende decennium. Maar CCS of indien de methode het toelaat CCU is wel de sluitsteen naar een $CO_2$ vrije bouw.

## 5.4 Gerecyclede grondstoffen

***Deelvraag: In hoeverre leidt grootschalig gebruik van circulaire grondstoffen (zoals gerecycled beton, hergebruikt staal) tot een lagere wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

De inzet van gerecyclede grondstoffen en secundaire materialen kan de vraag naar primaire productie verlagen en daarmee de productgebonden emissies (met name A1–A3) in de wlc-gwp reduceren. Voorbeelden zijn toepassing van staalschroot in plaats van ijzererts en inzet van glasscherven, betongranulaat, gerecyclede kunststoffen en metalen als grondstof voor nieuwe bouwproducten.

Dit onderwerp overlapt inhoudelijk met paragraaf 4.3 (Hergebruik bouwmaterialen). Hergebruik en recycling zijn beide afhankelijk van vrijkomende materiaalstromen uit sloop en renovatie. In lijn met de Ladder van Lansink (R-ladder) geldt dat hergebruik voorrang heeft boven recycling indien technisch en functioneel haalbaar. Extra hergebruik verkleint daarmee het volume dat beschikbaar is voor recycling. Voor onderbouwing van matchingspercentages, inclusief beperkingen zoals kwaliteitsverlies, opschoning en procesverliezen, wordt verwezen naar paragraaf 4.3. Om zo min mogelijk overlap te hebben zijn hier alleen de aanvullende conclusies voor recycling weergegeven.

Voor recycling kunnen de aanvullende conclusies worden getrokken:

- De theoretische beschikbaarheid van secundaire grondstoffen kan richting 2050 toenemen, maar dit vertaalt zich niet automatisch in hoogwaardige recycling.
- Flankerend beleid ontbreekt en er is onvoldoende vraag vanuit opdrachtgevers ondanks beleid Milieuverantwoord Inkopen (MVI) naar gerecyclede materialen.
- Realisatie is afhankelijk van kwaliteit, sortering, procesverliezen en marktacceptatie.
- In de huidige praktijk wordt een deel van de vrijkomende stromen laagwaardig toegepast (bijv. als ophoogmateriaal), wat de beschikbaarheid voor gesloten kringlopen in de bouw beperkt.
- De bijdrage van recycling aan wlc-gwp kent een brede bandbreedte. De bijdrage van recycling aan de wlc-gwp vertoont een brede bandbreedte. De potentiële emissiereductie is naar verwachting lager dan bij hergebruik en is sterk afhankelijk van de toegepaste opwerkingsprocessen en het daadwerkelijke recyclingspercentage. Onzekerheden betreffen:
  - Verdeling van vrijkomende stromen over nieuwbouw, renovatie, GWW-toepassing en andere sectoren)
  - De mate van hergebruik (en daarmee resterende recyclaatstroom).
  - Effecten van hoge recyclaatpercentages op productkwaliteit en levensduur.

## 5.5 Procesefficiëntie en duurzamere productie

***Deelvraag: In welke mate verbeteren innovaties in de bouwmaterialensector (zoals slimme fabrieken, materiaal alternatieven nieuwe productieprocessen) de procesefficiëntie, en wat betekent dit voor de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2050?***

Deze sectie beschrijft innovaties die de procesefficiëntie in de bouwmaterialenindustrie verhogen, los van brandstofwisseling. Het gaat om optimalisatie van productieprocessen, toepassing van digitale technologie (smart industry) voor efficiënter gebruik van energie en grondstoffen, en nieuwe productietechnieken met lagere emissies.

Verwachte ontwikkelingen zijn onder meer verdere energie-efficiëntie in fabrieken, benutting van restwarmte en procesintegratie. De potentiële emissiereductie door efficiencymaatregelen wordt gekwantificeerd of weergegeven in bandbreedtes. Hiermee wordt inzichtelijk gemaakt dat naast structurele transities (zoals waterstof en CCS) ook incrementele verbeteringen bijdragen aan de routekaartdoelen.

In dit hoofdstuk is de analyse primair gericht op bouwmaterialen met een hoge impact. Deze zijn afzonderlijk per materiaalstroom uitgewerkt. Daarnaast is een verzamelcategorie opgenomen voor overige bouwmaterialen. Ook is aandacht besteed aan verbetering van LCA-data en de inzet van duurzamer materieel.

Daarnaast is er uit het rapport: Materiaalstromen en milieubelasting in de bouw en infra, Materiaalstromen, MKI en CO2 -emissies in 2023, 2030 en 2050 [56]. Uit het rapport volgen twee scenario's met verschillende aannames over groei en verduurzaming.

**Best-case scenario:**
Gaat uit van lage economische en demografische groei en een trager verduurzamingstempo.

- Huishoudensgroei: gemiddeld 23.000 per jaar.
- Arbeidsproductiviteit: +0,4% per jaar.
- Werkgelegenheid: +0,1% per jaar.
- BBP-groei: +0,5% per jaar.

**Best-case scenario:**
Gaat uit van hogere groei en een versneld verduurzamingstempo.

- Huishoudensgroei: 56.000 per jaar.
- Arbeidsproductiviteit: +1,5% per jaar.

Het verschil tussen beide scenario's zit in de mate van bevolkings- en economische groei en het tempo waarin de gebouwde omgeving verduurzaamt.

### 5.5.1 Beton

De betonketen heeft een duidelijke reductieambitie geformuleerd ten opzichte van het referentiejaar 1990. Richting 2030 wordt ingezet op een reductie van circa 30–49%, waarbij naar schatting in 2023 reeds 15–20% reductie is gerealiseerd. Voor 2050 is de ambitie om te komen tot een reductie van meer dan 95%, in lijn met nationale en Europese klimaatdoelstellingen.

Deze ambitie is gebaseerd op een samenstel van maatregelen langs de gehele keten. Een belangrijk deel van de reductie wordt verwacht uit de inzet van $CO_2$-afvang en -opslag of -benutting (CCS/CCU) bij cementproductie. Daarnaast dragen het gebruik van klinkervervangers en secundaire toeslagmaterialen, evenals optimalisatie van betonrecepturen, bij aan een structurele verlaging van de emissie-intensiteit. Ook maatregelen buiten het productieproces spelen een rol, zoals verduurzaming van transport en bouwplaats, en de opslag van $CO_2$ in beton, zowel via bewuste opslag als via natuurlijke carbonatatie gedurende de levensduur. Deze maatregelen zijn onder meer vastgelegd in het Betonakkoord[57], en de Cement & Beton Roadmap[58].

Aanvullend is recent een ex-ante LCA-studie[59] gepubliceerd waarin is onderzocht hoe de milieu-impact van klinkerproductie in de EU zich richting 2050 kan ontwikkelen. In dit onderzoek zijn zowel technologische ontwikkelingen (zoals elektrificatie van ovens en toepassing van carbon capture) als veranderingen in het energiesysteem meegenomen. De resultaten laten zien dat de milieu-impact in veel scenario's sterk kan afnemen, in sommige gevallen tot ongeveer een factor vijf ten opzichte van het huidige niveau. Daarbij blijken met name de mate van inzet van carbon capture en de beschikbaarheid van een vergaand gedecarboniseerde elektriciteitsmix bepalend voor de uiteindelijke impact. Dit onderstreept dat de gerealiseerde reductie niet alleen afhankelijk is van technologische keuzes binnen de betonketen zelf, maar ook sterk samenhangt met de bredere energietransitie.

Concluderend is een vergaande reductie van de milieu-impact van beton haalbaar, mits grootschalige toepassing van $CO_2$-afvang bij cementproductie wordt gerealiseerd en het elektriciteitsnet verder wordt verduurzaamd.

**Tabel 5.1:** Range in $CO_2$ reductie van beton.

| Beton | Jaar 2030 | Jaar 2040 | Jaar 2050 |
|---|---|---|---|
| best-case | -10% | -35% | -50% |
| Best-case | -30% | -65% | -90% |

### 5.5.2 Bouw Staal

Ten opzichte van het referentiejaar 1990 heeft de staalketen voor 2030 een reductieambitie van circa 60% geformuleerd. Tot op heden is echter slechts een reductie van ongeveer 12% gerealiseerd, wat impliceert dat een substantiële versnelling in de komende jaren noodzakelijk is. Richting 2050 wordt ingezet op een reductie van meer dan 95% ten opzichte van 1990.

De beoogde reductie is gebaseerd op een combinatie van technologische en systeemmatige maatregelen binnen de staalproductieketen. Een centrale rol is weggelegd voor de omschakeling van de traditionele hoogovenroute naar Direct Reduced Iron (DRI) op basis van groene waterstof, in combinatie met elektrische boogovens. Daarnaast wordt uitgegaan van een maximale inzet van gerecycled staal, met percentages van meer dan 95% voor constructiestaal. Technisch is dit op dit moment al grotendeels haalbaar, waarbij een belangrijk aandachtspunt ligt bij de massabalans tussen de beschikbaarheid van schroot en de vraag naar nieuw staal. Aanvullende reducties worden verwacht door het gebruik van biobased of anderszins duurzame brandstoffen in resterende processtappen en door de verdere verduurzaming van transport binnen de keten.

Deze ambities en maatregelen sluiten aan bij het Bouwakkoord Staal (Bouwakkoord Staal (link), roadmap bouwakkoord staal (mei 2023)[60]) en de bijbehorende routekaart, waarin de staalindustrie inzet op een fundamentele transitie van productieprocessen richting een vrijwel $CO_2$-vrije staalproductie.

Aanvullend biedt recent wetenschappelijk onderzoek inzicht in de lange termijn ontwikkeling van de milieu-impact van staalproductie. In een prospectieve LCA-studie naar de mondiale ijzer- en staalproductie is geanalyseerd hoe de emissie-intensiteit zich ontwikkelt richting 2060, gekoppeld aan geïntegreerde energiescenario's[61]. De studie vergelijkt verschillende klimaatpaden (ongeveer 3,5 °C, <2 °C en 1,5 °C) en productieroutes, waaronder de hoogovenroute, DRI op waterstof, elektrificatie en CCS. De resultaten laten zien dat elektrificatie en waterstof gebaseerde productieroutes de grootste reductiepotentie hebben, met emissiereducties tot circa 95% per ton staal, mits de elektriciteits- en waterstofvoorziening zelf vergaand is verduurzaamd. CCS kan bijdragen aan emissiereductie, maar levert aantoonbaar minder reductie op dan volledige elektrificatie. Tegelijkertijd laat de studie zien dat, ondanks deze technologische vooruitgang, het bereiken van netto-nul emissies in de staalsector vóór 2060 niet vanzelfsprekend is.

De haalbaarheid van deze reductieambities wordt in de literatuur als technisch mogelijk, maar systeemafhankelijk beoordeeld. De realisatie is in sterke mate afhankelijk van de tijdige beschikbaarheid van duurzame alternatieve o.b.v. groene elektriciteit en/of groene waterstof/biogassen, voldoende netcapaciteit, en grootschalige investeringen in nieuwe

productie-infrastructuur. Daarnaast speelt de beschikbaarheid van hoogwaardig staalschroot een cruciale rol, evenals de snelheid waarmee bestaande productielocaties kunnen worden omgebouwd. Zonder gelijktijdige voortgang op deze randvoorwaarden is het tempo van emissiereductie richting 2030 onzeker, terwijl richting 2050 vooral het tempo van de bredere energietransitie bepalend is.

De DRI route betreft met name de vervanging van hoogovens. In deze installaties worden hoofdzakelijk staalplaten geproduceerd. Constructiestaal (lange producten), zoals liggers en kolommen, wordt momenteel grotendeels geproduceerd in elektrische boogovens (EAF). Deze hebben een aanzienlijk lagere $CO_2$-impact dan hoogovens: circa 1,2 kg $CO_2$-eq per kg product tegenover circa 3,3 kg $CO_2$-eq per kg product.

Het reductiepotentieel van EAF-staal ligt primair in verdere verlaging van het elektriciteitsverbruik en in verduurzaming van de elektriciteitsmix. Onzekerheid betreft de snelheid van elektrificatie en de beschikbaarheid van voldoende hernieuwbare elektriciteit.

**Tabel 5.2:** Range in $CO_2$ reductie van bouwstaal.

| Staal | Jaar 2030 | Jaar 2040 | Jaar 2050 |
|---|---|---|---|
| Best-case | -10% | -40% | -50% |
| Best-case | -30% | -70% | -90% |

### 5.5.3 Bouwkeramiek (bakstenen, pannen, tegels)

Voor bouwkeramische keten, producenten van onder meer, bakstenen, dakpannen en keramische tegels, heeft duidelijke reductieambities geformuleerd voor de broeikasgasemissies ten opzichte van 1990 in de Routekaart bouwkeramiek[9] . Richting 2030 wordt ingezet op een reductie van circa 50%, terwijl voor 2050 een reductie van meer dan 90% wordt nagestreefd. Deze ambities sluiten aan bij de sectorale routekaart voor bouwkeramiek en bij bredere nationale klimaatdoelstellingen.

De beoogde reductie is primair gebaseerd op verduurzaming van het productieproces, dat traditioneel sterk energie-intensief is door het gebruik van hoge-temperatuurovens. Een belangrijk deel van de emissiereductie wordt verwacht uit elektrificatie van ovens en de inzet van waterstof als alternatief voor fossiele brandstoffen. Daarnaast dragen efficiëntieverbeteringen bij aan een lager energiegebruik per producteenheid, bijvoorbeeld door optimalisatie van ovenprocessen, warmteterugwinning en verbeterde processturing.

Op langere termijn wordt ook gekeken naar alternatieve productieroutes, zoals koudgebakken of laag-temperatuurgebakken keramische producten. Deze innovaties bevinden zich momenteel nog in verschillende ontwikkelfasen, maar kunnen potentieel leiden tot een structurele verlaging van de energie- en emissie-intensiteit van bouwkeramische producten.

De realisatie van deze reducties is sterk afhankelijk van externe randvoorwaarden. Cruciaal zijn de beschikbaarheid van voldoende duurzame elektriciteit en waterstof, de tijdige verzwaring en aanpassing van netinfrastructuur, en de mate waarin bestaande productielocaties technisch en economisch kunnen worden omgebouwd. Daarnaast is de snelheid van marktacceptatie van alternatieve keramische producten van belang, mede in relatie tot regelgeving, producteisen en esthetische eisen. Zonder voortgang op deze randvoorwaarden is het tempo van emissiereductie richting 2030 onzeker, terwijl het behalen

van de ambitie voor 2050 in sterke mate samenhangt met de bredere energietransitie en technologische doorontwikkeling binnen de sector.

**Tabel 5.3:** Range in $CO_2$ reductie van baksteen.

| Baksteen | Jaar 2030 | Jaar 2040 | Jaar 2050 |
|---|---|---|---|
| Best-case | -10% | -25% | -40% |
| Dynamisch | -25% | -55% | -90% |

### 5.5.4 Biobased materialen

Voor opschaling, materiaalvervanging en koolstofvastlegging wordt verwezen naar paragraaf 4.2. Deze paragraaf behandelt uitsluitend de verduurzaming van de productieprocessen van biobased materialen. Biobased materialen (o.a. hout, hennep, stro en mycelium) hebben vaak van nature een relatief lage milieu-impact in met name A1-A5, doordat ze grotendeels aan groeien in de natuur binnen afzienbare tijd (1-100 jaar), in de regel minder energie-intensieve productieprocessen kennen en een laag gewicht hebben. Tegelijkertijd is er nog sprake van milieu-impact in de landbouwfase (onder meer door inzet van materieel, meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen), in transport en in productieprocessen zoals het drogen van hout. Deze impact kan deels worden gereduceerd door verdere elektrificatie van materieel, transport en productie, omdat het in de regel geen zware of hoge energie vragende processen zijn is het ook de verwachting dat dit relatief gemakkelijk kan. Daarnaast is er in veel gevallen ook nog een efficiëntie verbeterslag die bij de verdere opschaling van de biobased markt wordt verwacht. Hierdoor kan de milieu-impact van biobased bouwen in de toekomst verder afnemen. De mate waarin verdere reductie mogelijk is, vraagt nader onderzoek. Omdat het hier veelal om laagwaardige energieprocessen gaat, productie bij relatief lage temperaturen, transport en lichte mechanische bewerkingen, is elektrificatie en verduurzaming van de energievraag technisch goed mogelijk. In een best-case-scenario kan de productie-impact sterk dalen door elektrificatie, hernieuwbare energie en efficiëntieverbetering; de omvang is nog niet robuust gekwantificeerd.

Indien $CO_2$ opslag wordt meegenomen kunnen negatieve waarde worden bereikt mits duurzame land/bosbouw, efficiënt en duurzaam geproduceerd en getransporteerd.

Bronnen: Green Deal Biobased Bouwen[63], Nationale aanpak Biobased Bouwen (2023-2030)[64], houtbouwpact [65].

### 5.5.5 Installaties

Installaties hebben een substantiële invloed op de totale $CO_2$-impact van gebouwen. Deze invloed manifesteert zich zowel in de gebruiksfase (module B6) via het energieverbruik van het gebouw, als in de productgebonden emissies die samenhangen met de productie (A1, A3, A4), vervanging en end-of-life van installaties (C,D). Naarmate het energiegebruik van gebouwen verder wordt gereduceerd en de energiemix verduurzaamt, neemt de relatieve bijdrage van de productgebonden emissies van installaties toe.

Het IEA-rapport Net Zero [52] laat zien dat de broeikasgasemissies gerelateerd aan energiegebruik in de gebruiksfase na 2035 naar verwachting verder afnemen. Deze afname is echter grotendeels toe te schrijven aan de verduurzaming van de energiemix en in veel mindere mate aan aanvullende efficiëntieverbeteringen van installaties zelf. Dit impliceert dat

verdere reducties in de wlc-gwp van gebouwen steeds sterker afhankelijk worden van materiaalkeuzes, systeemontwerp en levensduur van installaties.

**Ontwerpstrategieën op gebouwniveau**
Op gebouwniveau zijn verschillende strategieën te onderscheiden die elk op een andere manier invloed hebben op de wlc-gwp van installaties:

- Installatie-arm ontwerpen. Door het gebouwontwerp te optimaliseren (bijvoorbeeld via passieve maatregelen en integrale ontwerpkeuzes) kan zowel het benodigde installatievolume als het energiegebruik worden beperkt. Deze strategie kan leiden tot een significante reductie van zowel B6-emissies als productgebonden emissies. De toepasbaarheid is echter sterk contextafhankelijk en vraagt om vroegtijdige betrokkenheid van ontwerpers. Er is nog beperkte kennis over realistische opschalingsscenario's en de kwantitatieve effecten hiervan op de wlc-gwp.
- Zwaardere installatieconcepten ter reductie van B6. Strategieën waarbij extra of zwaardere installaties worden ingezet om het energiegebruik te reduceren, zoals grootschalige toepassing van PV-panelen, toepassen van batterijen, verlagen weliswaar de gebruiksfase-emissies, maar vergroten tegelijkertijd de productgebonden $CO_2$-impact. Dit vraagt om een expliciete afweging tussen reducties in B6 en toename van emissies in A1–A3.
- Verduurzaming van installaties zelf. Reductie kan worden bereikt door het toepassen van duurzamere materialen, schonere productieprocessen en levensduurverlenging van installaties. Over de mate waarin deze ontwikkelingen zich op korte termijn vertalen naar substantiële wlc-gwp-reducties is echter nog beperkte empirische kennis beschikbaar.
- Uitfasering van extreme broeikasgassen. Het uitfaseren van koudemiddelen met een hoge GWP, zoals bepaalde F-gassen in klimaatsystemen, levert een directe bijdrage aan emissiereductie. Wetgeving die hoge-GWP-koudemiddelen verbiedt vanaf 2028 zal naar verwachting een duidelijk effect hebben op de wlc-gwp van installaties.

**Sectorale routekaarten en reductieambities**
- Binnen verschillende sectorale trajecten zijn reductieambities voor installaties vastgelegd. Voor zonnestroomsystemen is in de Routekaart circulaire zonnestroomsystemen[66] dat de gemiddelde emissie-intensiteit van PV-panelen moet dalen van circa 600 g $CO_2$-eq/Wp naar <500 g $CO_2$-eq/Wp in 2030 en <250 g $CO_2$-eq/Wp in 2035.

Daarnaast stelt het Programma van Eisen Circulaire Installaties [58] een reductiedoel van 25% MKI-reductie in 2030, gecombineerd met 50% levensduurverlenging en 100% hoogwaardige recycling. Deze combinatie van maatregelen kan naar verwachting leiden tot een reductie van de wlc-gwp van installaties die groter is dan 25%, al is de exacte doorwerking naar wlc-gwp nog onvoldoende gekwantificeerd. Daarnaast worden koelvloeistoffen met een zeer hoge broeikasgasuitstoot uitgefaseerd, wat naar verwachting leidt tot een aanzienlijke reductie van de wlc-gwp.

**Afbakening en datavolledigheid**
Een belangrijk risico voor de grenswaarde voor zowel MPG- als wlc-gwp-berekeningen is dat de huidige afbakening van installaties een vereenvoudigd beeld van de werkelijkheid geeft. Diverse installatiecomponenten worden structureel niet of slechts gedeeltelijk meegenomen, waaronder regeltechniek (sensoren, schakelkasten), sprinklerinstallaties en specifieke productonderdelen zoals brandkleppen, motoren en appendages in ventilatiesystemen. Hierdoor bestaat het risico dat een substantieel deel van de productgebonden GWP-impact buiten beschouwing blijft.

De geplande actualisatie van categorie-3-data kan deze onzekerheden deels verkleinen, maar de potentiële invloed op de wlc-gwp kan groot zijn en is op dit moment onvoldoende inzichtelijk.

Binnen TNO werken verschillende onderzoeksgroepen aan de ontwikkeling van toekomstige technologieën zoals zonnepanelen, batterijen, warmtepompen, airconditioningsystemen en zonneboilers. In een vervolgonderzoek kan worden verkend of de kennis en data uit deze programma's kunnen worden benut om een beter onderbouwde inschatting te maken van de te verwachten reducties in wlc-gwp van installaties.

**Vervolgonderzoek en kennisontwikkeling**
Een logisch en praktisch vervolgonderzoek is het systematisch vergelijken van as-built BIM-modellen van een representatieve set Nederlandse gebouwen (woningbouw en utiliteit) met de installatie-afbakening in de bijbehorende MPG- en wlc-gwp-berekeningen. Door per gebouw de daadwerkelijk aanwezige installaties en componenten te inventariseren en te toetsen welke onderdelen wel en niet zijn meegenomen, kunnen structurele hiaten zichtbaar worden gemaakt.

Voor installaties of componenten waarvoor nog geen data beschikbaar is in de Nationale Milieudatabase kan de milieulast voorlopig worden benaderd met Europese EPD's (EN 15804+A2), buitenlandse databanken (zoals ÖKOBAUDAT of INIES) of technisch onderbouwde proxy's op basis van massa, materiaaltype en functie. Door deze aanpak toe te passen op meerdere gebruiksfuncties ontstaat inzicht in de orde van grootte van de ontbrekende wlc-gwp, de spreiding tussen gebouwtypen en de installaties die prioriteit zouden moeten krijgen bij verdere dataverrijking van de NMD.

Inschatting van de reducties in installaties is moeilijk te geven en zal nog verder uitgezocht moeten worden, op basis van de gegevens nu zou de GWP-impact mogelijk eerst nog om hoog gaan (door meer volledigheid) en omdat er meer installaties nodig zijn om energieneutraal te worden. Waarna ze daarna de impact omlaaggaat. Omdat installaties veelal in het buitenland worden geproduceerd treedt hier weer een extra onzekerheid op met hoe snel deze transitie naar GWP lage productie gaat plaatsvinden.

### 5.5.6 Overige materialen

Naast beton, staal, bouwkeramiek en installaties zijn er meerdere materiaalstromen die afzonderlijk een beperktere, maar gezamenlijk nog relevante bijdrage leveren aan de totale $CO_2$-impact van gebouwen. Voor deze materialen zijn in verschillende routekaarten en studies reductieambities en transitiepaden geschetst, met name richting 2050.

**Isolatiematerialen (PUR, minerale wol)**
Voor isolatiematerialen wordt richting 2050 een reductie van de GWP-impact verwacht in de orde van 80–95% over de materiaal gebonden milieu-impact. Deze reductie is gebaseerd op een combinatie van maatregelen, waaronder het gebruik van biobased grondstoffen (zoals biopolyolen bij PUR), vervanging door biobased isolatie materialen (> 100 % reductie), een toenemende inzet van gerecyclede grondstoffen, en de elektrificatie van productieprocessen, met name energie-intensieve ovens bij minerale wol. De mate waarin deze reducties gerealiseerd kunnen worden is afhankelijk van zowel technologische doorontwikkeling als de beschikbaarheid van duurzame energie.
Bron: Roadmap PUR/PIR NVPU[67] en Steenwol Roadmap[68],

**Aluminium**
Voor aluminium zijn geen uitgesproken sector brede reductiedoelstellingen vastgelegd voor 2030. Richting 2050 wordt echter ingezet op een reductie van meer dan 95% van de GWP-impact. Deze reductie is hoofdzakelijk gebaseerd op de maximale inzet van gerecycled aluminium, gecombineerd met het gebruik van groene elektriciteit (bijvoorbeeld uit waterkracht) en verdere verduurzaming van productietechnologieën.

De realiseerbaarheid van deze reductie is sterk afhankelijk van twee randvoorwaarden: de beschikbaarheid van voldoende groene elektriciteit en de beschikbaarheid van hoogwaardig aluminium schroot. Beperkingen in één van deze factoren kunnen het reductiepotentieel aanzienlijk beperken.

Bron: Decarbonisation options for the Dutch aluminum industry[69].

**Glas**
Voor vlakglas en bouwglas wordt richting 2050 een reductie van de GWP-impact van meer dan 90% voorzien. Deze reductie is gebaseerd op de elektrificatie van smeltprocessen en de maximale inzet van glasscherven als secundaire grondstof. De mate van hergebruik speelt hierbij een cruciale rol, omdat een hoger aandeel scherven leidt tot lagere smelttemperaturen en daarmee een lager energiegebruik.

**Tabel 5.4:** Range in $CO_2$ reductie van vlak.

| Vlakglas | Jaar 2030 | Jaar 2040 | Jaar 2050 |
|---|---|---|---|
| Best-case | -10% | -25% | -35% |
| Best-case | -20% | -55% | -90% |

**Kunststoffen**
Voor kunststoffen wordt richting 2050 eveneens een reductie van meer dan 90% voorzien in een gunstig scenario. Deze reductie is gebaseerd op een combinatie van biobased grondstoffen (doormiddel van bio-drop in of het vervangen van de gehele polymeren door biobased varianten), de inzet van groene waterstof in productieprocessen, chemische recycling en het gebruik van duurzame energie.

De daadwerkelijke reductie is sterk afhankelijk van de schaal waarop deze technologieën beschikbaar komen en van de mate waarin fossiele grondstoffen daadwerkelijk kunnen worden vervangen worden.

In het document van Plastics Europe *“our industry’s roadmap for plastics in Europe to be circular and have net-zero emissions by 2025”*[70] worden de volgende reductiepaden gepresenteerd:
- 28% emissiereductie in 2030
- 30–40% emissiereductie in 2040
- Netto-nul emissies in 2050

Het betreft sectorale inschattingen vanuit de industrie. De realisatie is afhankelijk van elektrificatie, circulaire grondstoffen, CCS en beleidsontwikkeling.

Onzekerheid zit met name in technologische doorbraken, beschikbaarheid van duurzame energie en marktdynamiek.

**Gips**
De routekaart voor gips [71] bevat geen expliciete reductiedoelstellingen voor een vast percentage GWP-reductie en formuleert geen sector brede ambities of eisen voor scope 1-, 2- en 3-emissies. Wel hebben individuele fabrikanten eigen doelstellingen geformuleerd voor scope 1 en 2, met aangekondigde reducties die uiteenlopen van circa 33% tot 50% voor 2030.

### 5.5.7 Nauwkeurige en actuele data

Naast vooruitgang in de productiemethoden worden ook verbeteringen verwacht in de kwaliteit van de levenscyclusanalyses van productieprocessen door een toename van categorie 1 (producent specifieke) en categorie 2 (branche) data, en door een bredere deelname van toeleveranciers die met betere en meer gedetailleerde data komen. Dit leidt tot een betere kwantificering van GWP-impact en maakt gerichte optimalisaties mogelijk in de productieketen. Uit onderzoeken o.a. de MPG-praktijktoets[72] blijkt dit een reductie op product niveau kan oplopen tot meer dan 30%.

### 5.5.8 Duurzamer materieel en transport

De Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen (SEB)[73] schetst een geleidelijke maar structurele verduurzaming van bouwmaterieel en bouwlogistiek richting 2030 en verder richting 2050. Tot 2030 ligt de nadruk op versnelde vernieuwing van het materieelpark, met brede inzet van batterij-elektrisch materieel voor licht en middelzwaar werk, aangevuld met Stage-V diesel (nog GWP intensief, behalve als er HVO wordt toegepast) waar emissieloze alternatieven nog niet beschikbaar zijn. Voor zwaar materieel en zwaar transport wordt richting 2030 slechts een beperkte inzet van emissieloze oplossingen verwacht, mede door technische beperkingen, kosten en infrastructuur.

Na 2030 voorziet de routekaart een verdere opschaling van volledig emissieloos bouwmaterieel en transport, waarbij elektrificatie de dominante route blijft en waterstof vooral een aanvullende rol kan krijgen voor zwaar materieel en lange inzetduur, mits groene waterstof en infrastructuur beschikbaar komen. Richting 2050 wordt uitgegaan van een grotendeels emissieloze bouwlogistiek en bouwplaats.

Voor de wlc-gwp betekent dit dat de bijdrage van bouwmaterieel en transport in de levenscyclus geleidelijk afneemt. In fase A2 (transport naar de bouwplaats) en A4 (transport van materialen) leidt elektrificatie en schoner transport tot een duidelijke daling van de operationele $CO_2$-emissies, vooral na 2030. In fase A5 (bouw- en installatiefase) neemt de impact van mobiel bouwmaterieel substantieel af door de overstap naar emissieloos materieel, met name bij lichte en middelzware werkzaamheden. Ook in de einde-levensduurfases C1 (sloop/demontage) en C2 (transport van vrijkomend materiaal) wordt een vergelijkbare reductie verwacht, doordat emissieloos sloopmaterieel en transportmiddelen steeds meer de norm worden.

Het is te verwachten dat wanneer er meer lichte (biobased) bouwmaterialen worden toegepast dat het transport en materieel ook lichter kan worden uitgevoerd en dus sneller worden verduurzaamd.

Uit LCA-berekeningen blijkt dat elektrisch materieel en transport, gevoed met groene elektriciteit, per geleverd vermogen of per tonkilometer circa 86% minder $CO_2$-eq uitstoten

dan dieselvarianten. Bij inzet van groene waterstof is de reductie beperkter, circa 21% (bron: NMD profielen voor transport en materieel)[30]. Dit hangt samen met verliezen in de productie, compressie en omzetting van waterstof. Voor bouwmaterieel worden vergelijkbare reductiepercentages gevonden.

Deze waarden zijn gebaseerd op de huidige generatie elektrisch en waterstofmaterieel en de actuele groene energiemix. Verdere reductie is mogelijk bij technologische ontwikkeling en verdere verduurzaming van de elektriciteitsproductie.

Uit SEB Routekaart Schoon en Emissieloos bouwen [74],komt het volgende beeld voor bouwlogistiek en materieel:

- 2030: groot deel binnenstedelijke bouwlogistiek emissieloos
- 2035–2040: zware machines en zwaar transport in opschaling
- 2050: vrijwel volledig emissieloos

Voor een positief scenario is een reductie van 90% realistisch in 2050 en voor conservatief scenario is een reductie van 50% als goed mogelijk geschat.
Omdat materieel en vrachtwagens een afschrijftijd van meer dan 10 jaar hebben zal dit waarschijnlijk toe leiden dat er een versnelling optreedt na 2035.

Onzekerheid betreft met name systeemefficiëntie, inzetprofielen (waterstof of elektriciteit) en toekomstige energiemix.

[30] Zie de Processendatabase van de nationale milieudatabase.

# 6 Verwachte ontwikkeling per LCA-fase

In **Tabel 6.1** is verwachte bandbreedte aan wlc-gwp ontwikkelingen weergegeven. Deze tabel toont de verwachte procentuele reducties van de wlc-gwp per levensfase voor 2030, 2040 en 2050, weergegeven als bandbreedte tussen een worst[31]- en best-case[32] scenario. De reducties zijn uitgedrukt ten opzichte van het basisjaar (2023) en geven inzicht in de relatieve bijdrage van afzonderlijke levensfasen (A1–A3, A4–A5, B1–B5, B6, C1–C4 en D1 en D2) aan de totale emissiereductie.
De figuur maakt zichtbaar dat het reductiepotentieel sterk verschilt per fase.

**Tabel 6.1:** Tabel met de verwachte bandbreedte (best- en worst-case) van de reductie per fase voor de jaren 2030, 2040 en 2050, ten opzichte van de huidige referentie.

| Fase | | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|---|---|---|---|
| **A1-A3** | Best-case | -35% | -65% | -95% |
| | Best-case | -10% | -25% | -40% |
| **A4-A5** | Best-case | -30% | -63% | -95% |
| | Best-case | -15% | -23% | -30% |
| **B1-B5** | Best-case | -35% | -65% | -95% |
| | Best-case | -10% | -25% | -40% |
| **B6** | Best-case | -75% | -88% | -100% |
| | Best-case | -26% | -46% | -66% |
| **C1-C4** | Best-case | -35% | -65% | -95% |
| | Best-case | -10% | -25% | -40% |
| **D1** | Best-case | -25% | -33% | -40% |
| | Best-case | 0% | -5% | -10% |
| **D2** | Best-case | -75% | -88% | -100% |
| | Best-case | -26% | -46% | -66% |

[31] Een ontwikkeling waarbij de energietransitie en industriële verduurzaming slechts volgens het minimale beleidsmatige pad verlopen, circulaire en biobased toepassingen beperkt opschalen en materiaalgebonden emissies dominant blijven ondanks reductie in de gebruiksfase.
[32] Een versnelde systeemtransitie waarin elektriciteit en warmte (nagenoeg) emissievrij worden, industrie fundamenteel verduurzaamt en circulaire, biobased en ontwerpoptimalisaties grootschalig worden toegepast, waardoor zowel operationele als materiaalgebonden emissies sterk dalen richting klimaatneutraliteit.

De in deze tabel gepresenteerde reductiepercentages betreffen een prognose van de ontwikkeling van de wlc-gwp richting 2030, 2040 en 2050. De waarden zijn gebaseerd op de in dit rapport beschreven scenario's, literatuurbronnen en beleidsontwikkelingen, maar blijven onvermijdelijk onzeker.

Hieronder de onderbouwing en uitgangspunten per levensfase van deze tabel

In deze sub hoofdstukken worden de verwachte reducties in de wlc-gwp per levensfase weergegeven als bandbreedte tussen een worst-case- en een best-case-scenario. Het worst-case-scenario beschrijft een ontwikkeling waarin verduurzaming trager verloopt, toepassingen beperkt opschalen en resterende wlc-gwp emissies relatief hoog blijven.

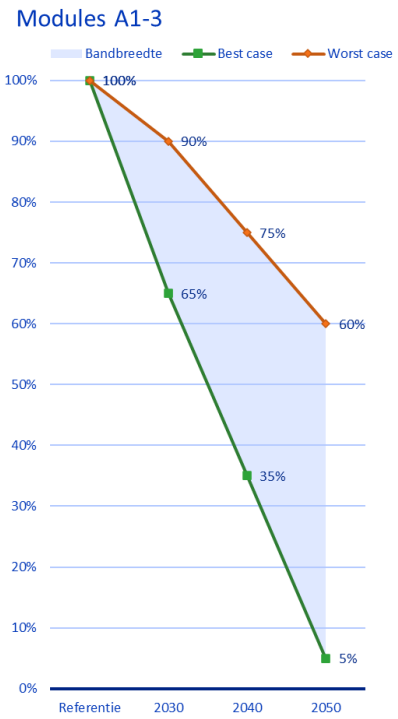
Het best-case-scenario beschrijft juist een versnelde systeemtransitie. De gepresenteerde waarden zijn daarmee geen voorspelling, maar een richtinggevende bandbreedte voor de mogelijke ontwikkeling van de wlc-gwp richting 2030 en 2050.

# 6.1 A1-A3 productiefase

**Tabel 6.2:** Omschrijving van de gehanteerde uitgangspunten voor fase A1–A3, inclusief de uitwerking van de worst-case- en best-case-scenario's voor 2030 en 2050.

| | Best-case | Best-case |
|---|---|---|
| **2030** | De industriële omschakeling blijft beperkt tot no-regretmaatregelen en incrementele optimalisaties. De inzet van secundaire grondstoffen blijft achter bij de ambities uit het Bouwmaterialenakkoord. Beperkingen in de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit, waterstof en CCS-capaciteit vertragen de verduurzaming van primaire productieprocessen.<br><br>De opschaling van biobased en circulaire alternatieven verloopt geleidelijk. Ook de industrialisatie van de bouw (prefabricage, standaardisatie) ontwikkelt zich trager dan voorzien. Mogelijk komen er ook meer bouwmaterialen van buiten Nederland/Europa. | In het best-case-scenario versnelt de industriële omschakeling richting 2050. No-regretmaatregelen en incrementele optimalisaties worden aangevuld met structurele verduurzamingsroutes, zoals elektrificatie, inzet van hernieuwbare elektriciteit, toepassing van waterstof waar directe elektrificatie niet haalbaar is, en CCS voor moeilijk vermijdbare procesemissies. De beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit, waterstof en CCS-capaciteit vormt in dit scenario geen structurele beperking voor de verduurzaming van primaire productieprocessen. Ook de inzet van secundaire grondstoffen neemt toe in lijn met, of sneller dan, de ambities uit het Bouwmaterialenakkoord. Biobased en circulaire alternatieven schalen versneld op en de industrialisatie van de bouw, waaronder prefabricage, standaardisatie en ketensturing, draagt bij aan efficiënter materiaalgebruik en lagere emissies. Waar bouwmaterialen worden geïmporteerd, verschuift de markt in dit scenario naar producten met aantoonbaar lage $CO_2$-impact, mede onder invloed van Europees beleid, productdata en marktvraag. |
| **2050** | Er vindt een substantiële emissiereductie plaats als gevolg van brede systeemdecarbonisatie (elektriciteitsmix, ETS-prijsontwikkeling, efficiëntieverbetering). Doorbraken bij moeilijk te verduurzamen materialen (bijv. primaire staal- en cementproductie) blijven echter achter.<br><br>De beschikbaarheid van hernieuwbare energie, waterstof en CCS blijft structureel beperkt. Een deel van de bouwmaterialen wordt geïmporteerd uit regio's met een minder vergaande verduurzaming, waardoor de resterende emissies hoger uitvallen. Vertraging in ETS-ontwikkeling en Europese regelgeving versterkt dit effect. De wlc-gwp daalt, maar stabiliseert boven het beoogde lange-termijnniveau. | Er is sprake van een diepgaande industriële transitie. Productieprocessen zijn grotendeels geëlektrificeerd of maken gebruik van waterstof en/of CCS. De circulariteit is hoog, met een groot aandeel secundaire input en ontwerpstrategieën gericht op hergebruik.<br><br>De bouwsector is in hoge mate geïndustrialiseerd en maakt substantieel gebruik van biobased en hergebruikte producten. Indien permanente koolstofvastlegging in materialen wordt meegeteld binnen de systematiek, kan de netto wlc-gwp richting nul bewegen. De mate waarin dit mogelijk is, hangt af van methodologische keuzes rond biogene koolstof en systeemgrenzen. |

Dit resulteert in de volgende grafiek:




**Figuur 6.1:** Grafiek met worst en best-case scenario-analyse van de A1–A3 emissies van de referentie en de jaren 2030, 2040 tot 2050).

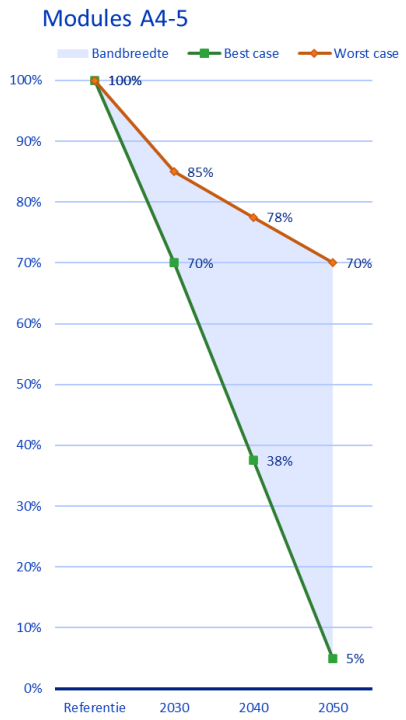
De grafiek laat zien dat de potentiële reductie in A1–A3 groot is, waarbij de best-case richting nul gaat. Deze best-case is gemaximeerd op circa 95%, omdat volledige $CO_2$-neutraliteit in 2050 niet realistisch is door resterende procesemissies en ketenbeperkingen. Tegelijkertijd neemt de spreiding tussen scenario's sterk toe richting 2050, door toenemende onzekerheden en de sterke afhankelijkheid van technologische en beleidsontwikkelingen.

## 6.2 A4 – A5 Transport bouwfase

**Tabel 6.3:** Omschrijving van de gehanteerde uitgangspunten voor fase A4–A5, inclusief de uitwerking van de worst-case- en best-case-scenario's voor 2030 en 2050.

| | Best-case | Best-case |
|---|---|---|
| **2030** | De verduurzaming van logistiek en bouwplaats verloopt traag. De elektrificatie van zwaar transport en bouwmaterieel blijft beperkt. De ambities rond emissieloos bouwen worden niet gerealiseerd.<br><br>De impact van fase A5 (bouw- en installatieproces) blijft relatief hoog. De hoeveelheid constructie- en faalafval neemt niet af. Er wordt aangenomen dat verdere industrialisatie in deze periode nog niet leidt tot een substantiële reductie van bouwafval. De emissiereductie in A4–A5 blijft daarmee beperkt. | De transitie naar elektrische logistiek versnelt, met name in het lichte en middelzware segment. De bouwlogistiek wordt efficiënter ingericht (bundeling, optimalisatie van transportbewegingen).<br><br>Door toenemende prefabricatie en standaardisatie nemen faalkosten en constructieafval af. Dit resulteert in lagere emissies in zowel A4 (transport) als A5 (bouwplaats en afvalverwerking). Onzekerheden betreffen met name netcapaciteit en beschikbaarheid van geschikt elektrisch materieel in het zware segment. |
| **2050** | Transport en bouwplaatsprocessen zijn aanzienlijk schoner dan in 2030, maar niet volledig emissievrij. Met name in het zware segment blijven restemissies bestaan, mede door beperkingen in de beschikbaarheid van waterstof en hernieuwbare elektriciteit.<br><br>De hoeveelheid bouwafval blijft op vergelijkbaar niveau als in 2030. Verdere reductie door industrialisatie of ontwerpoptimalisatie blijft achter. De resterende emissies in A4 en A5 blijven daarmee structureel aanwezig. | Logistiek en bouwplaats opereren vrijwel volledig emissievrij. Elektrificatie is dominant; waterstof wordt toegepast waar elektrificatie technisch niet haalbaar is.<br><br>De mate van industrialisatie is hoog, waardoor verliezen in de uitvoeringsfase sterk zijn gereduceerd. Prefabricatie en ontwerpoptimalisatie leiden tot een structureel lager niveau van bouw- en faalafval. De emissies in A4–A5 naderen daarmee het minimale technisch haalbare niveau. |

Dit resulteert in de volgende grafiek:




**Figuur 6.2:** Grafiek met worst en best-case scenario-analyse van de A4-A5 emissies van de referentie en de jaren 2030, 2040 tot 2050).

De grafiek laat zien dat de potentiële reductie in A1–A3 groot is, waarbij de best-case richting nul gaat. Deze best-case is gemaximeerd op circa 95%, omdat volledige $CO_2$-neutraliteit in 2050 niet realistisch is door resterende procesemissies en ketenbeperkingen. Tegelijkertijd neemt de spreiding tussen scenario's sterk toe richting 2050, door toenemende onzekerheden en de sterke afhankelijkheid van technologische en beleidsontwikkelingen.

## 6.3 B1-B5 (onderhoud en vervanging)

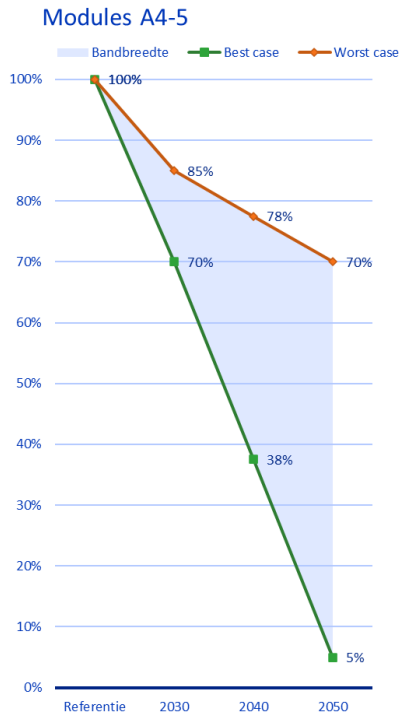
De emissies in fase B1–B5 zijn direct gerelateerd aan de andere levensfasen. Onderhoud en vervanging brengen immers opnieuw productie (A1–A3), transport (A4), bouwplaats activiteiten (A5) en een eindelevensfase (C1–C4) met zich mee. Het verschil is dat deze processen zich op een later moment in de gebouwlevensduur voordoen.

Binnen de gehanteerde rekenmethodiek wordt bij vervanging uitgegaan van de op dat moment geldende levensfaseprofielen. In deze analyse is daarom aangesloten bij dezelfde uitgangspunten als voor A1–A3. De ontwikkeling van B1–B5 volgt daarmee dezelfde reductietrajecten als de productiefase.

Onzekerheden betreffen met name de werkelijke vervangingsfrequenties en de mate waarin toekomstige producten daadwerkelijk een lager emissieprofiel hebben dan huidige referenties. Deze fases zijn sterk afhankelijk van de overige fases daarom omdat bij onderhoud en vervanging ook weer productie A1-3, transport en bouwfase en Einde levensfase zijn gemoeid. Alleen speelt dit dan verder in de tijd af (wanneer de onderdelen

vervangen worden. Omdat in de rekenmethodiek altijd wordt aangehouden dat vervanging gebeurt met de levensfases zoals die nu voor liggen is dit dus gelijk gehouden aan A1-A3.

Dit resulteert in de volgende grafiek:




**Figuur 6.3:** Grafiek met worst en best-case scenario-analyse van de B1-B5 emissies van de referentie en de jaren 2030, 2040 tot 2050).

## 6.4 B6 Energiegebruiksfase

De ontwikkeling van de wlc-gwp in de gebruiksfase (B6) tussen 2030 en 2050 wordt primair bepaald door de verduurzaming van de elektriciteitsmix en warmtenetten. Beleidsmatig wordt geen verdere aanscherping van isolatie-eisen verwacht, aangezien eerdere analyses hebben laten zien dat aanvullende eisen in 2023 niet kosteneffectief waren.

De ZEB-eisen uit EPBD IV schrijven voor dat nieuwe woningen en gebouwen vanaf 2030 aardgasvrij worden gerealiseerd. In Nederland is dit sinds 2018 reeds de praktijk. Verwarming vindt plaats via elektrische warmtepompen of via aansluiting op een warmtenet. Daarmee verschuift de emissieontwikkeling in B6 in hoofdzaak naar de emissiefactor van elektriciteit en collectieve warmte.

**Elektriciteit**
In 2024 was circa 50% van de elektriciteitsproductie hernieuwbaar (CBS, 2025). De Klimaat- en Energieverkenning 2025 (KEV 2025) raamt voor 2030 een aandeel van circa 60%, met een bandbreedte van 48–70%. De resterende emissies zijn afhankelijk van fossiele inzet en import.

Voor 2050 geldt dat een klimaatneutraal energiesysteem veronderstelt dat ook de elektriciteitsvoorziening klimaatneutraal is. Dit kan worden gerealiseerd via verdere opschaling van zon en wind, uitbreiding van kernenergie en/of inzet van fossiele centrales met CCS. Omdat er op dit moment geen vastgestelde raming voor 2050 beschikbaar is, kan voor scenarioanalyse het volgende worden aangehouden:

- **Best-case 2050**: emissiefactor gelijk aan (of binnen de bandbreedte van) de projectie voor 2040, bij gebrek aan verder aangescherpte ramingen.
- **Best-case 2050:** volledig klimaatneutrale elektriciteitsproductie (nagenoeg nul emissiefactor).

De belangrijkste onzekerheden betreffen tempo van netverzwaring, vergunningverlening, kernenergieontwikkeling en CCS-infrastructuur.

**Warmtenetten**

In 2024 bedroeg de gemiddelde emissie van geleverde warmte via warmtenetten 38,8 kg $CO_2$/GJ (RVO, 2025), overeenkomend met circa 140 g $CO_2$/kWh. Ongeveer 30% van de warmte was hernieuwbaar en 8% afkomstig uit restwarmte.

De Energy Efficiency Directive 2023 (EED 2023) stelt reductiedoelen voor warmtenetten, die zijn door vertaald in de ZEB-eisen uit de EPBD IV voor nieuwbouw. De maximale emissiefactor daalt daarbij stapsgewijs:

- 2026: ≤150 g $CO_2$/kWh
- 2035: ≤100 g $CO_2$/kWh
- 2045: ≤50 g $CO_2$/kWh
- 2050: 0 g $CO_2$/kWh

Deze afbouw kan als best-case worden gehanteerd.

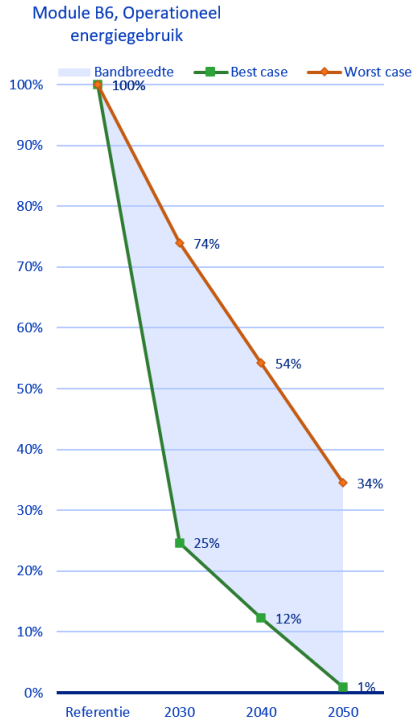
In een best-case kan verduurzaming vertragen. Indien bijvoorbeeld 20% van de warmte in 2050 nog uit aardgas wordt geproduceerd (emissiefactor aardgas circa 64 kg $CO_2$/GJ), resulteert dit in circa 12,8 kg $CO_2$/GJ, overeenkomend met ongeveer 50 g $CO_2$/kWh additionele emissie. De totale emissiefactor zou daarmee substantieel boven nul blijven.

De ontwikkeling van de gebruiksfase wordt tussen 2030 en 2050 in hoofdzaak bepaald door externe systeemfactoren (elektriciteitsmix en warmtenetten). De bandbreedte in wlc-gwp is daarmee sterk afhankelijk van nationaal en Europees energiebeleid, en minder van gebouw specifieke maatregelen.

Voor nu hebben we daarom de CO2eq per kWh ontwikkeling aangehouden en deze waarde gehanteerd:

- Referentie jaar 2023: 203 $CO_2$eq per kWh
- Best-case 2030: 150 $CO_2$eq per kWh
- Best-case 2030: 70 $CO_2$eq per kWh
- Best-case 2050: 50 $CO_2$eq per kWh
- Best-case 2050: 0 $CO_2$eq per kWh

Dit resulteert in de volgende grafiek:




**Figuur 6.4:** Grafiek met worst en best-case scenario-analyse van de B6 emissies van de referentie en de jaren 2030, 2040 tot 2050).

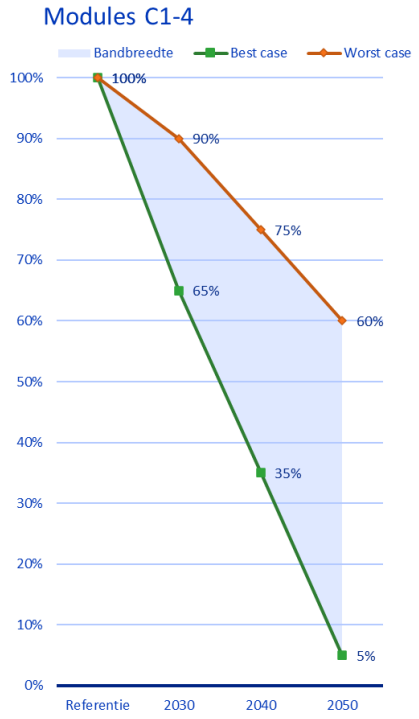
In de **Figuur 6.4** zijn de resultaten weergegeven voor B6. Voor B6 daalt de impact in het best-case scenario richting nul, uitgaande van een vergaand verduurzaamde elektriciteitsmix en verdere aanscherping van energieprestatie-eisen (ZEB/EPBD).

# 6.5 C1-C4 Sloop en einde levensfase

**Tabel 6.4:** Omschrijving van de gehanteerde uitgangspunten voor fase C1–C4, inclusief de uitwerking van de worst-case- en best-case-scenario's voor 2030 en 2050.

| | Best-case | Best-case |
|---|---|---|
| **2030** | De sloop- en verwerkingsketens zijn in 2030 slechts beperkt veranderd. De mate van recycling en hergebruik is niet substantieel toegenomen. Verwerkingsprocessen zijn slechts beperkt verduurzaamd en draaien grotendeels op de bestaande energiemix.<br><br>Er is geen grootschalige toepassing van CCS bij afvalverbrandingsinstallaties (AVI's). De emissiereductie in C1–C4 blijft daarmee beperkt. | De kwaliteit van scheiding bij sloop is verbeterd, waardoor hoogwaardige recycling en hergebruik toenemen. Dit leidt tot lagere verwerkingsimpact per ton vrijkomend materiaal.<br><br>Verwerkingsinstallaties zijn efficiënter ingericht en maken in toenemende mate gebruik van hernieuwbare elektriciteit. In een optimistisch scenario is reeds een eerste toepassing van CCS bij AVI's operationeel, wat resulteert in een lagere netto emissie in C3–C4. Onzekerheden betreffen investeringsbeslissingen en infrastructuur voor $CO_2$-transport en -opslag.<br><br>Aan de vraagzijde is er voldoende marktacceptatie en vragen opdrachtgevers actief naar secundaire materialen en producten. |
| **2050** | De verwerking is efficiënter dan in 2030, maar de emissiereductie blijft afhankelijk van de feitelijke sloopprakijk en ketenrouting. Selectieve demontage wordt niet structureel toegepast.<br><br>CCS bij AVI's is niet breed uitgerold. Een deel van de verwerking vindt nog plaats met niet-volledig duurzame energiebronnen. De emissies in C1–C4 dalen, maar blijven structureel aanwezig. | De sloopprakijk is ingericht op selectieve demontage en maximale waardebehoud. Ketens zijn geoptimaliseerd voor hergebruik en hoogwaardige recycling.<br><br>AVI's zijn uitgerust met CCS, waardoor procesemissies substantieel worden gereduceerd. Verwerking vindt plaats met een vrijwel klimaatneutrale energiemix. De resterende emissies in C1–C4 naderen daarmee het technisch minimale niveau. |

Dit resulteert in de volgende grafiek:




**Figuur 6.5:** Grafiek met worst en best-case scenario-analyse van de C1-C4 emissies van de referentie en de jaren 2030, 2040 tot 2050).

De impact van C1–C4 laat een vergelijkbare afname zien als A1–A3, doordat in de scenario's wordt verondersteld dat ook in de toekomst verdere verduurzaming van processen optreedt. Aangezien de eindelevensfase circa 50 jaar na de bouw plaatsvindt, is dit waarschijnlijk een onderschatting van de reductie. Dit komt omdat de methode voorschrijft voor om voor eindelevensscenario's conservatieve aannames te hanteren, gebaseerd op de huidige stand der techniek.

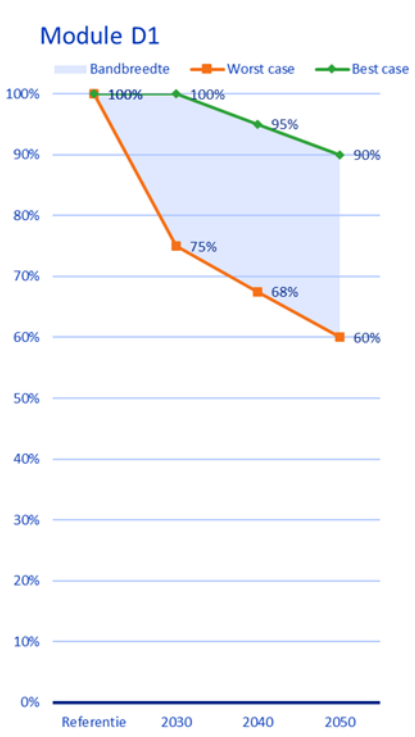
Een belangrijke methodische onzekerheid in de eindelevensfase betreft de waardering van biogene koolstofvastlegging. Bij biobased materialen wordt $CO_2$ tijdelijk opgeslagen gedurende de gebruiksfase van het gebouw. Afhankelijk van het eindelevensscenario komt deze koolstof aan het einde van de levensduur grotendeels weer vrij, bijvoorbeeld bij verbranding. Bij hergebruik en recycling blijft de koolstof fysiek opgeslagen in het product of de grondstof, maar wordt deze volgens de bepalingsmethode in module C3 gemodelleerd alsof deze vrijkomt. De gekozen methodiek bepaalt daarom sterk hoe deze tijdelijke opslag doorwerkt in de wlc-gwp. Wanneer tijdelijke opslag volledig wordt verrekend, kan dit leiden tot zeer lage of zelfs negatieve productgebonden scores voor biobased gebouwconcepten. Bij een tijdgewogen benadering, zoals toegepast in Frankrijk, wordt dit effect kleiner omdat alleen het klimaatvoordeel van uitgestelde emissies wordt meegewogen. Wanneer opslag niet wordt gewaardeerd, vervalt dit effect vrijwel volledig en is de $CO_2$ over de gehele levensloop in balans. De keuze voor de waardering van biogene koolstofvastlegging heeft daarmee vooral invloed op het best-case scenario, waarin een sterke opschaling van biobased bouwen wordt verondersteld. In een worst-case scenario, met beperkte toepassing van langdurige $CO_2$ opslag na einde levensduur, is het effect kleiner.

## 6.6 D1 Milieubaten en lasten buiten de systeemgrens voor producten

**Tabel 6.5:** Omschrijving van de gehanteerde uitgangspunten voor fase D1, inclusief de uitwerking van de worst-case- en best-case-scenario's voor 2030 en 2050.

| | Best-case | Best-case |
|---|---|---|
| **2030** | De mate van hergebruik en recycling neemt slechts beperkt toe. De hoeveelheid secundair materiaal die primaire productie vervangt blijft laag.<br><br>De potentiële baten in module D blijven daarmee beperkt en hebben een gering effect op de totale wlc-gwp. | Er is sprake van een duidelijke toename van hoogwaardig hergebruik en recycling. Een groter deel van de vrijkomende materialen vervangt primaire grondstoffen in nieuwe toepassingen. |
| **2050** | Hergebruik en recycling nemen toe ten opzichte van 2030, maar blijven onder het technisch en beleidsmatig beoogde niveau. De substitutie van primaire materialen blijft beperkt. | De keten is maximaal ingericht op hergebruik en hoogwaardige recycling. De substitutie van primaire materialen is groot, waardoor module D in theorie aanzienlijke baten oplevert.<br><br>Tegelijkertijd geldt dat de omvang van de baten afhankelijk is van de hoeveelheid secundair materiaal die het systeem binnenkomt. Naarmate meer productie reeds gebaseerd is op secundaire input (hoge circulariteit), neemt de additionele substitutie af. In een sterk circulair systeem dalen de module D-baten per eenheid product daardoor wel maar behaald niet heel hoge reducties. |

Dit resulteert in de volgende grafiek:




**Figuur 6.6:** Grafiek met worst en best-case scenario-analyse van de D1 emissies van de referentie en de jaren 2030, 2040 tot 2050).

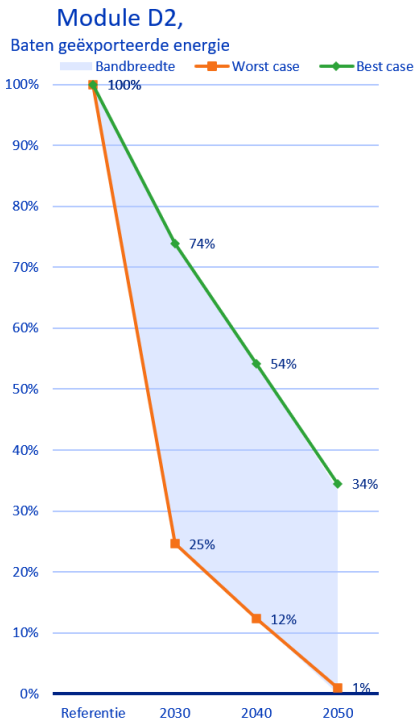
Voor module D1 is de afname beperkter. Dit komt doordat D1 de vermeden impact van primaire productie representeert, waarin eveneens een verduurzaming optreedt. Daarnaast wordt module D alleen bepaald op basis van de primaire materiaalinput van het oorspronkelijke product, waardoor de potentiële baten in de toekomst afnemen naarmate deze input lager wordt.

# 6.7 D2 Milieubaten ge-exporteerde energie

**Tabel 6.6:** Omschrijving van de gehanteerde uitgangspunten voor fase D2, inclusief de uitwerking van de worst-case- en best-case-scenario's voor 2030 en 2050.

| | Best-case | Best-case |
|---|---|---|
| **2030** | De milieubate van D2 blijft beperkt. Het aandeel eigen verbruik van zonnestroom neemt toe door opslag en slimme sturing, waardoor slechts een beperkt deel van de lokaal opgewekte elektriciteit aan het net wordt teruggeleverd. Daarnaast is de omvang van de bate afhankelijk van de feitelijke invulling van de ZEB-eisen en het aantal toegepaste zonnepanelen. | De milieubate van D2 is in 2030 relatief groot. Er wordt veel elektriciteit op het eigen perceel opgewekt en een relevant deel daarvan wordt nog aan het net teruggeleverd. Omdat de elektriciteitsmix in 2030 nog niet klimaatneutraal is, kan deze export nog een substantiële hoeveelheid netemissies vermijden. |
| **2050** | De milieubate van D2 is in 2050 zeer beperkt. Door hoge mate van eigen verbruik, opslag en vraagsturing wordt nog maar weinig elektriciteit geëxporteerd. Daarnaast is de emissiefactor van netelektriciteit in 2050 laag, waardoor de vermeden emissie per teruggeleverde kWh gering is. | Ook in het best-case-scenario blijft de milieubate van D2 in 2050 beperkt tot matig. Hoewel veel hernieuwbare elektriciteit op het eigen perceel wordt opgewekt, neemt de bate per geëxporteerde kWh af doordat de elektriciteitsmix sterk is verduurzaamd. De maximale D2-bate ligt daardoor eerder in de transitiefase richting 2030 dan in een vergaand klimaatneutraal 2050-scenario. |

Dit resulteert in de volgende grafiek:




**Figuur 6.7:** Grafiek met worst en best-case scenario-analyse van de D2 emissies van de referentie en de jaren 2030, 2040 tot 2050).

Voor D2 is de bandbreedte omgekeerd t.o.v. B6, omdat het de vermeden $CO_2$-emissies door teruglevering betreft; deze nemen af naarmate de energiemix koolstofarmer wordt.

## 6.8 Totaal reductie t.o.v. van een referentie woning

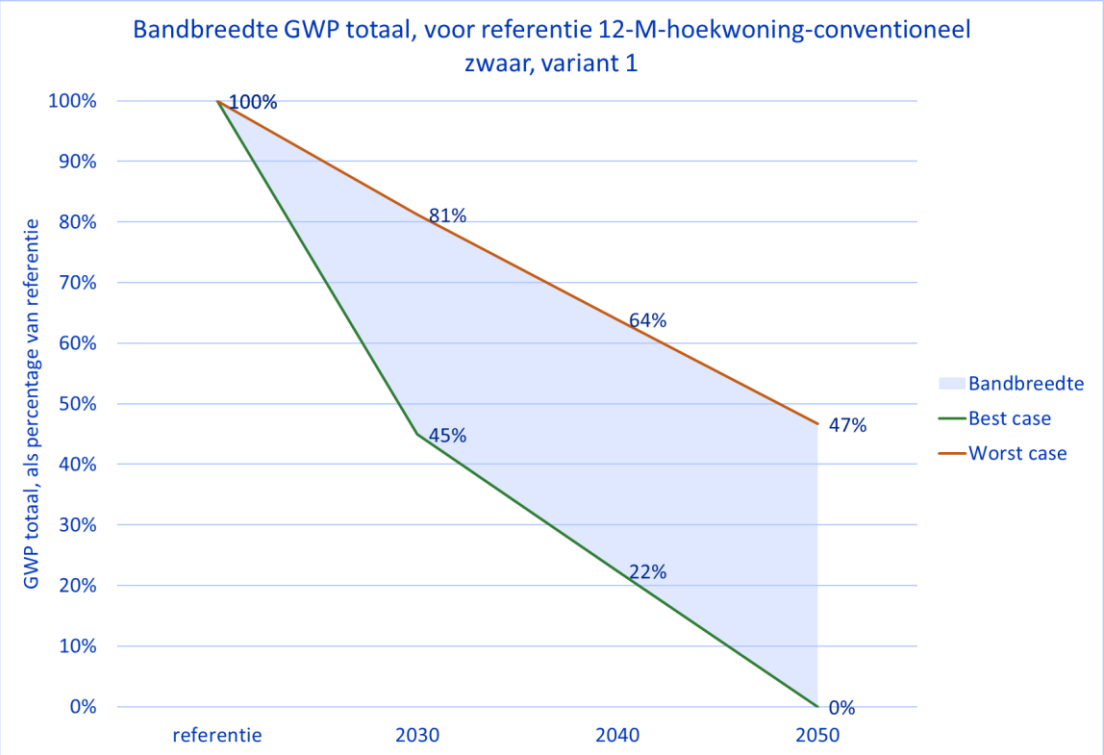
Omdat de bijdrage aan de wlc-gwp per levensfase sterk verschilt, is aanvullend een integrale analyse uitgevoerd op één referentiecasus: de 12-M-hoekwoning (conventioneel zwaar, variant 1)[33]. Dit sluit aan bij de voorziene afbakening in de bepalingsmethode WLC-GWP Deze analyse geeft inzicht in het gecombineerde effect van reducties over alle fasen op de totale wlc-gwp.

**Figuur 6.8** toont de ontwikkeling van de totale wlc-gwp ten opzichte van de huidige referentie (100%) voor de periode tot 2050, inclusief een bandbreedte tussen een best-case en best-case scenario.

In beide scenario's is sprake van een duidelijke afname. In het best-case scenario daalt de wlc-gwp geleidelijk van 100% naar circa 81% in 2030, 64% in 2040 en 47% in 2050. In het best-case scenario verloopt deze reductie aanzienlijk sneller, tot circa 45% in 2030, 22% in 2040 en richting 0% in 2050.

De bandbreedte tussen beide scenario's neemt toe in de tijd. Dit duidt op een groeiende onzekerheid richting 2050, waarbij de uiteindelijke reductie sterk afhankelijk is van technologische ontwikkelingen, de verduurzaming van de energievoorziening en de decarbonisatie van materiaalproductie.

[33] In de berekening van de referentiehoekwoning is module D2 nul er wordt dus netto geen energieteruggeleverd in deze referentie.




**Figuur 6.8:** figuur met het effect van de wlc-gwp ontwikkelingen voor de referentie 12-M-hoekwoning-conventioneel zwaar, variant 1.

De berekende percentages beschrijven de mogelijke ontwikkeling van de wlc-gwp van één specifiek referentiegebouw onder aannames over onder meer de verduurzaming van energie, bouwmaterialen, transport en bouwprocessen. Het best-case scenario vormt daarbij uitsluitend de minst gunstige combinatie van de in dit onderzoek doorgerekende aannames. Het is geen haalbaarheidsscenario en ook geen gegarandeerde minimale reductie die in 2030 voor alle nieuwe gebouwen kan worden bereikt. Niet onderzochte ontwikkelingen en verschillen tussen gebouwen zijn hierin niet meegenomen.

De uitkomst van circa 81% in 2030 voor de 12M-hoekwoning kan daarom niet rechtstreeks worden vertaald naar een grenswaarde van 81% van het niveau van 2023. Deze prognose is berekend als proeve van de methodiek en ter illustratie voor één referentiegebouw. Het LBP-onderzoek naar grens- en streefwaarden gaat uit van een bredere verzameling referentiegebouwen en onderzoekt andere beleidsvarianten. Daarbij hebben onder meer de verschillende energiepakketten in referentiegebouwen, de tijdsweging en, in de huidige LBP-berekeningen, de waardering van teruggeleverde elektriciteit in module D2 een groot effect op de berekende ontwikkeling van de totale wlc-gwp.

Voor het bepalen van een grenswaarde voor 2030 moet de definitieve bepalingsmethode worden toegepast op een representatieve verzameling gebouwen. Daarbij moeten ook de spreiding tussen gebouwen en de technische en praktische haalbaarheid worden beoordeeld. Op basis van deze prognose kan daarom niet worden geconcludeerd dat een grenswaarde van 81% van het niveau van 2023 haalbaar is. De bandbreedte geeft uitsluitend inzicht in de mogelijke ontwikkeling en biedt geen basis voor het afleiden van grenswaarden.

# 7 Synthese

In dit hoofdstuk worden de bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken integraal samengebracht. De afzonderlijke thema's worden in samenhang beschouwd om inzicht te geven in hun gezamenlijke effect op de ontwikkeling van de wlc-gwp richting 2030 en 2050. Waar relevant wordt ook 2040 als tussenliggend jaar beschouwd. Voor dit jaar is echter in de beschikbare literatuur en scenario's minder directe onderbouwing beschikbaar, omdat 2030 en 2050 gangbare referentiepunten zijn. De waarden voor 2040 zijn daarom indicatief en gebaseerd op interpolatie tussen 2030 en 2050, en moeten als zodanig worden geïnterpreteerd.

Het vorige hoofdstuk analyseerde de ontwikkeling van de wlc-gwp per levensfase, waarbij verschillende ontwikkelingen in samenhang zijn beschouwd. In hoofdstuk 8 worden deze ontwikkelingen opnieuw geordend per thema, om inzicht te geven in de relatieve bijdrage en bandbreedte van afzonderlijke factoren. Waar hoofdstuk 6 het integrale effect per levensfase toont, maakt hoofdstuk 8 expliciet welke thema's bepalend zijn voor deze ontwikkeling en welke onzekerheden daarbij horen.

## 7.1 Energie-efficiëntie gebouwen

Dit onderdeel beschrijft hoe aanscherping van energieprestatie-eisen, verduurzaming van de energiemix en keuzes in installatietechniek de ontwikkeling van de operationele emissies (B6) beïnvloeden en indirect doorwerken in de productgebonden fasen.

**Impact analyse**
Energie-efficiëntie beïnvloedt de wlc-gwp vooral via de gebruiksfase (B6) en in D2 bij de teruglevering van energie. Minder warmtevraag en lager gebouwgebonden elektriciteitsverbruik leiden direct tot lagere operationele emissies. In Nederland wordt dit primair gestuurd door EPBD IV en de overgang van BENG naar Zero-Emission Buildings (ZEB): vanaf 2030 moet de energievoorziening van nieuwe gebouwen emissievrij[34] zijn, met een minimaal 10 % lager primair energiegebruik dan onder BENG.

De impact op de totale wlc-gwp hangt sterk af van de invulling van deze eis:

- Schil- en efficiëntieroute: extra isolatie en passieve maatregelen verlagen B6, maar verhogen beperkt de productimpact (A1–A3). Nb. Meer isolatie kan, afhankelijk van toekomstige beleidskeuzes rond meewegen CO2 opslag, bij biobased isolatiemateriaal, potentieel zowel de energie-efficiënte verhogen als de embodied CO2 verlagen.

Opwekroute: extra PV of compensatie via export verlaagt de berekende energieprestatie, maar kan leiden tot meer installaties en dus hogere A1–A3, terwijl een deel van de B6-winst al samenhangt met de verduurzaming van de energiemix (die weer afhankelijk is van de carbonisatie van het elektriciteitsnetwerk). Wat een omgekeerd effect heeft op de teruggewonnen energie in module D2.

[34] emissievrij betekent in deze context geen emissie op de locatie waar energie wordt verbruikt. Dit is dus in afwijking van de wlc-gwp, die de emissie in de hele keten betreft, dus ook emissies buiten de locatie. Daarnaast omvat de wlc-gwp niet alleen over de emissie gekoppeld aan het energieverbruik maar ook de emissie veroorzaakt door de toepassing van bouwproducten en gebouwinstallaties.

**Bandbreedte**
In de best-case wordt uitgegaan van een ZEB met een lage warmtevraag en een efficiënt energiegebruik.
In de worst-case wordt de ZEB-eis voornamelijk ingevuld via extra PV-opwekking. Hierdoor verschuift een deel van de $CO_2$-impact naar de product- en installatiegebonden emissies. De warmtevraag en efficiëntieverbetering blijven daarbij beperkt, terwijl de product- en installatie-impact toeneemt.

**Onzekerheid (ontbrekende kennis)**
De grootste onduidelijkheid is wat ZEB in de praktijk gaat betekenen voor maatregelpakketten en daarmee voor B6 én A1–A3. Dit hangt expliciet af van de kostenoptimaliteitsstudie die in 2028 wordt uitgevoerd; dan wordt duidelijk of strengere eisen ook echt leiden tot lagere warmtevraag/elektriciteitsvraag ten opzichte van BENG.

Belangrijkste datavragen:
1. Energie per energiedrager ontbreekt in de huidige onderbouwing van de DGMR-studie. DGMR-studies geven BENG-2/BENG-3, maar dat is niet direct om te zetten naar $CO_2$ in B6 zonder uitsplitsing naar elektriciteit/warmte.
2. Werkelijk energiegebruik inclusief gebruikersdeel (naast gebouwgebonden) vraagt aanvullend inzicht, bijvoorbeeld via CBS-data; voor utiliteit ontbreekt nog een vergelijkbare uitsplitsing naar bouwjaarklasse.

Vervolgvragen die direct helpen voor de routekaart:
- Welke “ZEB-compliance route” (schil vs PV-compensatie vs warmtenet) verwachten we per gebruiksfunctie?
- Hoe groot is de trade-off “extra installaties” (A1–A3) versus “lagere B6”, vooral na 2035 wanneer operationele emissies sowieso dalen door de mix.

## 7.2 Voorraad en volumes

Voorraad- en volumegroei beschrijft hoe demografische ontwikkelingen, economische trends en veranderende woonbehoeften de omvang en samenstelling van de nieuwbouw beïnvloeden.

**Bandbreedte**
Voor de vervolgfase is aanvullende scenarioanalyse nodig om de bandbreedte in de wlc-gwp per referentiegebouw beter te duiden. Omdat de beleidsindicator wordt uitgedrukt in kg $CO_2$-eq per m² GO per jaar, worden veranderingen in bouwvolume of gebouwgrootte vooral zichtbaar in de totale emissies op macroniveau en minder direct in de score per m². Veranderingen in materiaalintensiteit, installatiedichtheid en vervangingscycli werken daarentegen wel direct door in de wlc-gwp per m² GO per jaar. Daarom moet onderscheid worden gemaakt tussen ontwikkelingen die vooral de totale emissies beïnvloeden en ontwikkelingen die ook de prestatie per m² verbeteren of verslechteren.

**Onzekerheid (ontbrekende kennis)**
- **Geen “officiële” prognoses voor niet-woningbouw**
  Voor utiliteit is er wel raming via PBL (KEV), maar niet één geïntegreerde, publiek beschikbare prognose die nieuwbouw, transformatie en sloop eenduidig uitsplitst. Dit bemoeilijkt consistente volumescenario’s voor wlc-gwp richting 2050.

- **Beleidsschokken en uitvoerbaarheid zijn moeilijk te kwantificeren**
  Voorbeeld: huurbevriezing in prognoses laat zien dat één beleidsmaatregel de nieuwbouwproductie substantieel kan beïnvloeden (en later weer kan verdwijnen). Dit soort beleids-/markt-schokken moeten als onzekerheidsbron expliciet worden meegenomen.

## 7.3 Bouwmethodiek en materiaalgebruik

Dit hoofdstuk bouwmethodiek, materiaalgebruik beschrijft in hoeverre de mate van industrialisatie en circulaire strategieën (zoals biobased toepassen, hergebruik en ontwerpoptimalisatie) de productgebonden emissies (met name A1–A3) en daarmee de wlc-gwp van nieuwbouw beïnvloeden.

De grootste effecten liggen bij materialen (A1–A3); transport (A4) is doorgaans < 5 % van de totale wlc-gwp en zelden de hoofdhefboom.

- Industrieel/prefab bouwen (MMC): Studies laten zowel dalingen als stijgingen zien; effecten zijn projectafhankelijk. Indicatieve bandbreedte A1–A3 op gebouwniveau van tussen de: −10 % tot +10 %, bij gelijkblijvende materialen.
- Bouwafval (A5): bij verschuiving van in-situ naar prefab daalt forfaitair afval van 5 % naar 3 %, wat neerkomt op circa 2 % reductie van de materiaalgebonden wlc-gwp voor de betreffende prefab-onderdelen.
- Gebruiksfase (B6): betere luchtdichtheid en inregeling kunnen tot circa 10 % reductie leiden, maar deze waarde is voor Nederland nog onzeker.

Biobased bouwen en materiaalreductie kunnen een groter effect hebben dan alleen een verschuiving van bouwmethode, zoals van traditioneel naar prefab of modulair bouwen. In de studie *Potentie van biobased materialen in de bouw* [33]wordt indicatief genoemd dat een hoog aandeel biobased materialen, bijvoorbeeld rond 50%, kan leiden tot een reductie van circa 40% in de productgebonden GWP-impact. Deze reductie moet echter worden geïnterpreteerd in samenhang met de gehanteerde rekenwijze. Zonder waardering van tijdelijke biogene koolstofopslag wordt het effect vooral bepaald door materiaalvervanging en materiaalreductie. Met waardering van tijdelijke koolstofopslag kan de berekende reductie aanzienlijk groter uitvallen, vooral bij concepten met een hoog aandeel hout en andere biobased materialen.

**Bandbreedte**

- Maximaal duurzaam: snelle opschaling industrieel bouwen, DfMA en biobased → A1–A3 −20 % tot −50 % en circa 10 % reductie in B6.
- Worst-case: arbeidsdruk en ketenstress → suboptimale materiaalkeuzes, meer waste, hogere B6 en beperkte D-baten.

**Onzekerheid (ontbrekende kennis)**

- Geen robuust “gemiddeld effect” van industrialisatie/prefab op productgebonden GWP impact. De literatuur is case-by-case; er ontbreekt een NL-set van vergelijkbare projecten met dezelfde functionele eisen en dezelfde systeemgrenzen.
- Opschalingsaannames ontbreken of zijn zwak onderbouwd. Hoeveel extra prefab, hoeveel biobased, hoeveel hergebruik richting 2030–2050? Zonder expliciete adoptiecurves blijft de impactanalyse een aanname.

- Onzekerheid over netto materiaalgebruik bij prefab. Prefab kan minder waste geven, maar ook méér materiaal door “over-spec”, toleranties, extra wapening of transportframes. Dit is nu niet gekwantificeerd.
- Logistiek/bouwhubs: $CO_2$-effect onvoldoende hard. Er worden grote effecten genoemd voor lokale emissies (~80% reductie), maar dat is niet geheel onderbouwd.
- Arbeidskrapte als driver van efficiënte en verduurzaming of als remmer door arbeidstekort is nog onzeker van het effect.

## 7.4 Verduurzaming bouwmaterialenindustrie

De verduurzaming van de bouwmaterialenindustrie werkt vrijwel volledig door in de productiefase (A1–A3). Routes zoals elektrificatie, waterstof, CCS, inzet van recyclaat en procesefficiëntie bepalen de daling van emissiefactoren van bouwproducten richting 2050 en sterk afhankelijk van de daadwerkelijke en vrijwel volledige vergroening van de energiemix

**Bandbreedte**
Voor dominante materiaalstromen zijn in routekaarten zeer forse reducties voorzien richting 2050 (t.o.v. 1990):
- beton en constructiestaal: > −95 %;
- bouwkeramiek: > −90 % tot −100 %;
- vergelijkbare ordegroottes voor glas, aluminium, kunststoffen en isolatie.

De haalbaarheid is sterk afhankelijk van:
- energiesysteem-randvoorwaarden (netcapaciteit, tempo netverzwaring, groei hernieuwbare opwek);
- waterstofbeschikbaarheid (waarschijnlijk niche/complement, geen generieke hoofdroute);
- CCS-infrastructuur en acceptatie (met name sluitsteen voor procesemissies);
- beschikbaarheid en kwaliteit van recyclaat, en de interactie met hergebruik.

Ook de end-of-life-fase kan bij verdere verduurzaming van verwerking en recycling een relevante aanvullende reductie opleveren, met name voor kunststoffen en biobased materialen.

**Onzekerheid (ontbrekende kennis)**
De belangrijkste kennisleemtes liggen niet in de beschikbaarheid van technieken, maar in tempo, schaalbaarheid en systeeminteractie.

- Er ontbreekt een consistente kwantitatieve vertaling van industrie-routekaarten naar EPD- en NMD-emissiefactoren per materiaal voor de periode 2030–2050. Dit betreft onder meer aannames over importmixen en variatie tussen producenten. Zonder deze vertaalslag blijven wlc-gwp-scenario’s beperkt reproduceerbaar.
- Beperkingen van het energiesysteem zijn nog onvoldoende expliciet meegenomen in de modellering. Zowel bij elektrificatie (netcongestie, timing van netverzwaring) als bij waterstof (infrastructuur, schaarste en concurrentie met andere sectoren) is behoefte aan consistente, numerieke aannames over beschikbaarheid, prijs en marginale emissies die doorwerken in de productiefase (A1–A3).
- Er bestaat onduidelijkheid over de verwerking van CCS en CCU in LCA’s en hoe dit in de Europese (CPR) PCR’s gaat worden opgenomen. Met name voor cement en mogelijk afvalverbrandingsinstallaties is onzeker hoe implementatiegraad, extra energiegebruik en afvang of hergebruik van $CO_2$ methodisch moeten worden toegerekend aan WLC-modules, inclusief eventuele effecten in de einde-levensfase.

- De kennis over de toepassing van zeer hoge recyclaatpercentages is voor sommige materialen en veeleisende toepassingen nog beperkt. Dit betreft vooral de gevolgen voor productkwaliteit, levensduur, verliespercentages en de netto GWP-reductie bij grootschalige opschaling. Voor lagere recyclaatpercentages en minder veeleisende toepassingen, zoals beton in lagere sterkteklassen, is al veel kennis en praktijkervaring beschikbaar. De beperkte toepassing wordt daar niet alleen veroorzaakt door een gebrek aan kennis, maar ook onder meer door onvoldoende vraag van opdrachtgevers, conservatieve uitvragen en productspecificaties, kosten en onzekerheid over de beschikbaarheid en constante kwaliteit van recyclaat. De onzekerheid bij hoge recyclaatpercentages mag daarom niet worden veralgemeniseerd tot een belemmering voor reeds bewezen toepassingen met lagere percentages.
- De kennis over hoogwaardige circulariteit bij hoge recyclaatpercentages is beperkt. Hoewel veel bekend is over beperkte bijmenging van secundaire grondstoffen, ontbreekt inzicht in effecten op productkwaliteit, levensduur, verliespercentages en netto GWP-reductie bij grootschalige opschaling.
- Marktacceptatie en vraag naar recycling en hergebruik van bouwmaterialen
- Er substantiële datagaten bij installaties, met een potentieel groot effect op de wlc-gwp. Een concreet vervolgonderzoek is het systematisch vergelijken van as-built BIM-modellen met de huidige MPG/wlc-gwp-afbakening om ontbrekende installatiecomponenten te identificeren en te prioriteren. Voor ontbrekende datasets kunnen tijdelijk EN 15804+A2-EPD’s of buitenlandse databanken als proxy worden ingezet.
- Als aanvullend vervolgonderzoek wordt aanbevolen om voor materialen met de grootste bijdrage aan de wlc-gwp prospectieve LCA’s uit te voeren. Daarmee kan de samenhang tussen veranderingen in achtergrondsystemen (zoals energietransitie en transportverduurzaming) en aanpassingen in het voorgrondsysteem (bijvoorbeeld alternatieve cementtypen) expliciet en consistent worden gekwantificeerd.

# 8 Conclusies en aanbevelingen voor vervolgfase

## 8.1 Conclusies

Dit onderzoek heeft als doel inzicht te geven in de belangrijkste variabelen en ontwikkelingen die de wlc-gwp van nieuwbouw richting 2030 en 2050 beïnvloeden. De centrale onderzoeksvraag luidt:
***Welke ontwikkelingen en onzekerheden zijn bepalend voor de ontwikkeling van de wlc-gwp van gebouwen richting 2030 en 2050, en welke bandbreedte kan daarbij worden verwacht?***

Hiervoor zijn de ontwikkelingen onderverdeeld in vier hoofdthema's. Per hoofdthema is onderzocht welke ontwikkelingen zich voordoen en welke effecten deze kunnen hebben:
- Energie-efficiëntie van gebouwen
- Voorraad en volumes
- Bouwmethodiek en materiaalgebruik
- Verduurzaming van de industrie

Dit verkennende onderzoek bevestigt dat zowel energiesystemen, bouwmaterialen als gebouwontwerp bepalend zijn voor de toekomstige $CO_2$-uitstoot van gebouwen. Aanscherping van de eisen (zoals Zero-Emission Buildings) en verdere verduurzaming van de energiemix leiden tot een sterke reductie van emissies in de gebruiksfase (module B6), in veel gevallen tot een vrijwel verwaarloosbaar niveau. Hierdoor verschuift het zwaartepunt van de totale gebouwgerelateerde $CO_2$-uitstoot naar de productgebonden emissies.

Richting 2050 kunnen de emissies in de productiefase sterk afnemen wanneer de energievoorziening nagenoeg $CO_2$-vrij wordt en de productie van bouwmaterialen vergaand wordt geëlektrificeerd of gebaseerd op groene waterstof. In dat geval blijven vooral de procesgebonden emissies[35], zoals bij cementproductie, als dominante restemissies over. De verdere reductie daarvan is afhankelijk van randvoorwaarden zoals de opschaling van alternatieve bindmiddelen, de inzet van CCS/CCU, de beschikbaarheid van duurzame energie en voldoende investeringszekerheid voor de industrie.

**Onderlinge samenhang tussen thema's**
De analyse laat zien dat de onderzochte thema's sterk met elkaar samenhangen. Zo vragen zowel de elektrificatie van de industrie als de grootschalige inzet van duurzame-energie en opslag om een robuuste energietransitie, inclusief voldoende netcapaciteit en warmte-infrastructuur. Tegelijkertijd zorgen Zero-Emission Buildings en een verder verduurzaamde

[35] Met procesgebonden emissies worden emissies bedoeld die vrijkomen door de chemische reacties in het productieproces zelf, en dus niet door het energieverbruik, zoals $CO_2$ die ontstaat bij de omzetting van kalksteen naar klinker in de cementproductie.

energiemix ervoor dat gebruiksemissies worden geminimaliseerd en deels worden verplaatst van energie in de gebruiksfase naar de productgebonden GWP impact, waardoor de relatieve bijdrage van productgebonden emissies (A1–A3) toeneemt.

**Interactie tussen maatregelen**
Binnen de wlc-gwp-modellering beïnvloeden maatregelen elkaar. Het verlagen van de $CO_2$-intensiteit van beton en het gedeeltelijk vervangen van beton door hout of regulier beton door carbon-negative beton zijn bijvoorbeeld niet onafhankelijk van elkaar te beschouwen ingrepen. Materiaalvervanging verandert zowel de totale materiaalvraag als de emissie-intensiteit per eenheid. Omdat maatregel-effecten elkaar beïnvloeden, leidt het afzonderlijk optellen van reductiepercentages in veel gevallen tot een overschatting van de totale reductie. In deze verkenning is dit daarom vermeden: effecten zijn niet als losse reductiepercentages opgeteld, maar geïnterpreteerd binnen samenhangende worst-case- en best-case-scenario's per levenscyclusfase.

## 8.2 Onzekerheden

De belangrijkste onzekerheden betreffen:
- de toekomstige omvang van de nieuwbouw en de verdeling over gebruiksfuncties;
- de mate en snelheid waarmee biobased en circulaire producten worden opgeschaald en in welke mate zij reguliere materialen vervangen;
- de beschikbaarheid van randvoorwaarden voor industriële verduurzaming, zoals groene elektriciteit, groene waterstof en koolstofopslag (CCS/CCU);
- de verduurzamingstransitiepaden van bouwproducten met de grootste bijdrage aan de wlc-gwp, met name staal, beton en installaties;
- de volledigheid van wlc-gwp-berekeningen, zowel op productniveau als op componentniveau.

**Onvoorspelbare systeemonzekerheden**
Naast de benoemde thema-onzekerheden zijn er bredere, moeilijk voorspelbare systeemeffecten die momenteel buiten de huidige studie vallen. Disruptieve innovaties, zoals nieuwe energiebronnen en bouwmaterialen met een zeer lage of nihil $CO_2$-voetafdruk, of fundamentele doorbraken in technologie of fundamentele verandering in regelgeving, kunnen de uiteindelijke wlc-gwp sterk beïnvloeden. Dergelijke ontwikkelingen zijn per definitie niet te voorspellen binnen de huidige studie. Dit vraagt om terughoudendheid bij de interpretatie van de resultaten en onderstreept het belang van adaptief beleid, waarbij aannames en doelstellingen periodiek worden herijkt op basis van nieuwe inzichten en ontwikkelingen.

**Methodische belangrijkste onzekerheden**
In bijlage A zijn de methodische keuzes omschreven die een bepalende invloed hebben op de uitkomsten van de wlc-gwp-berekeningen. Het gaat met name om methodische keuzes in de berekening, waaronder de waardering van koolstofvastlegging (opslag, vrijgave en tijdweging), het wel of niet meenemen van module D en de bijbehorende substitutie-aannames, de modellering van einde-levensscenario's, aannames over de referentielevensduur (RSL) van bouwdelen en installaties, en materiaal-specifieke effecten zoals betoncarbonatatie. Deze keuzes beïnvloeden zowel de absolute emissiewaarden als de onderlinge vergelijking tussen materialen en ontwerpvarianten en zijn daarmee bepalend voor de beleidsmatige richting.

## 8.3 Overwegingen voor een vervolgfase

De in dit rapport beschreven onzekerheden verschillen in aard, omvang en beleidsrelevantie. Niet alle onzekerheden hoeven op korte termijn te worden weggenomen om tot een bruikbare routekaart met een grenswaarde voor 2030 en streefwaarden voor de periode daarna te komen. Wanneer bepaalde onzekerheden het vaststellen van streefwaarden bemoeilijken, of wanneer in de praktijk blijkt dat een streefwaarde op onderdelen minder sturend is dan beoogd, kan in een vervolgfase worden overwogen om nadere analyses uit te voeren, uitgangspunten te actualiseren of aanvullende differentiatie aan te brengen. Welke vervolgstappen daarbij het meest voor de hand liggen, hangt af van de aard van de onzekerheid en van de mate waarin deze doorwerkt in de wlc-gwp.

- Op **korte termijn** bestaat het risico dat de potentiële impact van duurzaamheidsmaatregelen wordt overschat. Dit kan optreden wanneer maatregelen (bijvoorbeeld hout en het verduurzamen van beton) gelijktijdig plaats vinden, terwijl zij in de praktijk niet volledig cumulatief toepasbaar zijn. De impact van installaties daarentegen kan op de wlc-gwp worden onderschat door onvolledigheid van de berekening en database.

- Op de **middellange termijn** bestaat een reëel risico dat tussentijdse beleidsdoelen richting de doelstelling voor 2050 niet realistisch zijn. Dit kan optreden wanneer de complexiteit en dynamiek van de systeemtransitie onvoldoende worden meegenomen. Indien ontwikkelingen op de energiemarkt of adoptiecurves van innovaties niet adequaat worden verdisconteerd, kan dit leiden tot een onjuist ambitieniveau. Een te laag ambitieniveau vergroot het risico dat de 2050-doelstelling niet wordt gehaald of dat later aanvullende maatregelen nodig zijn. Een te hoog ambitieniveau kan leiden tot uitvoeringsproblemen en weerstand vanuit de markt.

Om meer grip te krijgen op de benoemde onzekerheden worden de volgende aanbevelingen voor vervolgonderzoeken op de korte termijn (8.3.1 t/m 8.3.5) gedaan, en adviseren we voor een lange-termijn visie te ontwikkelen (8.3.6) hoe de wlc-gwp beter kan inspelen op de complexe dynamiek van de transitie naar een duurzame economie.

### 8.3.1 Toekomstige nieuwbouwvolumes en gebruiksfuncties

Een onzekerheid in deze verkenning betreft de ontwikkeling van nieuwbouwvolumes en gebouwtypologieën richting 2030–2050. Deze ontwikkeling is van directe invloed op de totale wlc-gwp, maar is op dit moment nog niet eenduidig vast te leggen. Dat hangt samen met onzekerheden in demografische ontwikkelingen, woningbehoeften, ruimtelijke keuzes en de verhouding tussen verschillende typen nieuwbouw, zoals grondgebonden woningen, gestapelde bouw en utiliteit.

**Vervolgonderzoek**
Indien deze onzekerheid het opstellen van robuuste scenario's of streefwaarden bemoeilijkt, kan in een vervolgfase worden overwogen om te werken met een consistente set nationale bouwscenario's richting 2030–2050, waarin nieuwbouwvolumes en gebouwtypologieën expliciet worden onderscheiden. Daarbij kan worden aangesloten bij bestaande bronnen, zoals CBS-, PBL- en woningbouwprogrammeringsdata, in combinatie met

referentiegebouwen per typologie en verwachte veranderingen in woningbehoefte, zoals kleinere woningen en een groter aandeel alleenwonenden en ouderen. Ook ligt het voor de hand om hierbij met bandbreedtes te werken en de aannames zoveel mogelijk consistent te houden met andere beleidsanalyses op het gebied van woningbouw, energie en ruimte.

**Effect**
Een dergelijke verdieping kan bijdragen aan een beter onderbouwd beeld van de toekomstige schaal en samenstelling van de wlc-gwp. Ook kan dit helpen om scenariovergelijkingen robuuster te maken en de onderlinge consistentie tussen analyses te vergroten.

### 8.3.2 Opschaling van biobased en circulaire producten

Een onzekerheid betreft de mate waarin biobased en circulaire bouwproducten richting 2030–2050 daadwerkelijk op grote schaal kunnen worden toegepast. Hoewel deze productgroepen in potentie relevant zijn voor de reductie van de wlc-gwp, is de feitelijke opschaling afhankelijk van technische haalbaarheid, kostenontwikkeling, beschikbaarheid van grondstoffen, marktacceptatie en beleidscontext. Zonder nadere duiding bestaat het risico dat het reductiepotentieel van materiaaltransities te optimistisch wordt ingeschat.

**Vervolgonderzoek**
Indien deze onzekerheid het onderbouwen van scenario's of streefwaarden bemoeilijkt, kan in een vervolgfase worden overwogen om per productgroep realistische opschalingsscenario's uit te werken. Daarbij kan onderscheid worden gemaakt tussen technisch, economisch en beleidsmatig haalbare adoptiepaden. Ook kan het zinvol zijn om de concurrentie om biomassa en secundaire grondstoffen, zowel binnen de bouwsector als tussen sectoren, explicieter in beeld te brengen.

**Effect**
Een dergelijke verdieping kan helpen om aannames over materiaaltransities explicieter en beter toetsbaar te maken. Ook kan dit bijdragen aan het voorkomen van overschatting van het mitigatiepotentieel van biobased en circulaire bouwproducten.

### 8.3.3 Beschikbaarheid van randvoorwaarden voor industriële verduurzaming

Een onzekerheid betreft de mate waarin de randvoorwaarden voor industriële verduurzaming tijdig en op voldoende schaal beschikbaar komen. De verwachte reductie van de wlc-gwp is in belangrijke mate afhankelijk van de beschikbaarheid van groene elektriciteit, waterstof en $CO_2$-opslag en -gebruik. Tegelijk is onzeker in hoeverre deze energiedragers en infrastructuren zich richting 2030–2050 ontwikkelen volgens het benodigde tempo en de benodigde schaal.

**Vervolgonderzoek**
Indien deze onzekerheid het onderbouwen van scenario's of streefwaardes bemoeilijkt, kan in een vervolgfase worden overwogen om wlc-gwp-scenario's explicieter te koppelen aan realistische beschikbaarheidsscenario's voor groene elektriciteit, waterstof en $CO_2$-opslag en -gebruik. Daarbij kan worden aangesloten bij nationale energiescenario's voor onder meer netcapaciteit, energieopwekking en opslag. Ook kan het zinvol zijn om met meerdere

infrastructuurscenario’s te werken, bijvoorbeeld op basis van tijdige, vertraagde of beperkte beschikbaarheid, om inzicht te krijgen in de mate waarin de verduurzaming van de industrie hiervan afhankelijk is.

**Effect**
Een dergelijke verdieping kan helpen om impliciete aannames over onbeperkte beschikbaarheid van duurzame energiedragers en CCS/CCU te beperken. Ook kan dit bijdragen aan een realistischer beeld van het tempo en de haalbaarheid van industriële verduurzaming binnen de wlc-gwp-scenario’s.

### 8.3.4 Verduurzamingstransitiepaden bouwproducten

Een onzekerheid betreft de snelheid en richting waarmee de milieu-impact van bouwproducten zich richting 2030–2050 ontwikkelt. Voor verschillende materiaalgroepen is duidelijk dat verduurzaming mogelijk is, maar de verwachte reductie verschilt sterk per product en is afhankelijk van technologische ontwikkeling, infrastructuur, marktcondities en beleidscontext. Daardoor is nog beperkt onderbouwd welke reducties als robuust kunnen worden beschouwd en welke sterk afhankelijk zijn van specifieke randvoorwaarden.

**Vervolgonderzoek**
Indien deze onzekerheid het onderbouwen van scenario’s of streefwaardes bemoeilijkt, kan in een vervolgfase worden overwogen om voor bouwproducten met een grote bijdrage aan de wlc-gwp productspecifieke transitiepaden uit te werken, bijvoorbeeld voor staal, beton, hout en installaties. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van een combinatie van literatuur, industriële routekaarten en expert judgement, uitgewerkt in gestandaardiseerde paden. Het ligt daarbij voor de hand om onderscheid te maken tussen korte-, middellange- en lange termijn opties, zoals efficiëntieverbetering, elektrificatie, CCS en materiaalvervanging. Ook kan gebruik worden gemaakt van ervaringen en inzichten uit andere Europese landen, zoals Denemarken en Frankrijk. Voor producten die naar verwachting het meest bepalend zijn, kan aanvullend worden verkend of prospectieve LCA’s voor de Nederlandse markt kunnen worden opgesteld, mede op basis van bestaande LCA’s en beschikbare internationale prospectieve LCA-studies.

**Effect**
Een dergelijke verdieping kan helpen om beter zichtbaar te maken welke reducties relatief robuust zijn en welke in sterkere mate afhangen van technologische ontwikkeling of infrastructurele randvoorwaarden.

### 8.3.5 Volledigheid van wlc-gwp-berekeningen op product- en onderdeelniveau

Een onzekerheid betreft de mate van volledigheid van de huidige wlc-gwp-berekeningen op product- en onderdeelniveau. Met name bij installaties bestaat het risico dat relevante producten, componenten en productonderdelen niet of slechts gedeeltelijk in de berekeningen worden meegenomen. Hierdoor kan de wlc-gwp structureel worden onderschat en wordt de vergelijkbaarheid tussen verschillende gebouwconcepten beperkt.

**Vervolgonderzoek**
Indien deze onzekerheid het onderbouwen van scenario's of streefwaardes bemoeilijkt, kan in een vervolgfase worden overwogen om systematisch te analyseren welke producten en productonderdelen in de huidige databases ontbreken of onvoldoende zijn uitgewerkt, met name voor installaties, zoals ook benoemd in hoofdstuk 5.5.5. Daarbij kan tevens worden verkend in hoeverre gegevens, werkwijzen of proxy's uit andere Europese landen bruikbaar zijn om deze onzekerheden voorlopig te verkleinen.

**Effect**
Een dergelijke verdieping kan bijdragen aan het beperken van structurele onderschatting van de wlc-gwp. Ook kan dit de vergelijkbaarheid tussen verschillende concepten vergroten, doordat de onderliggende berekeningen volledieger en consistenter worden opgebouwd.

# Referenties


[1] “Richtlijn (EU) 2024/1275 van het Europees Parlement en de Raad van 24 april 2024 betreffende de energieprestatie van gebouwen (herschikking) (Voor de EER relevante tekst)”.
[2] “Bepalingsmethode_WLC-GWP_NL_versie”.
[3] “eindrapportage-wlc-gw. LBP-Sightt 2025”.
[4] “Kamerbrief inzake Implementatie EPBD”.
[5] United Nations Environment Programme, “2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector”, United Nations Environment Programme, Nairobi, 2022.
[6] Z. Toth, C. Koronen, L. Graaf, en J. Kockat, “Defining a common vision for climate neutral buildings: a comprehensive and harmonised framework for whole-life carbon measurement across Europe”, Buildings Performance Institute Europe, 2025.
[7] Europees Parlement en de Raad, “RICHTLIJN (EU) 2024/1275 betreffende de energieprestatie van gebouwen (herschikking)”, Publicatieblad van de Europese Unie, 2024.
[8] Mona Keijzer, “Kamerbrief inzake Implementatie EPBD”, Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening, 2025.
[9] “Mededeling van de Commissie  met richtsnoeren inzake nieuwe of ingrijpend gewijzigde bepalingen van de herschikte Richtlijn (EU) 2024/1275 betreffende de energieprestatie van gebouwen”.
[10] “NTA 8800_2025 nl”.
[11] E. Boekholt-O’Sullivan, “Kamerbrief over Stand van zaken implementatie EPBD IV”, Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (Rijksoverheid), 2026.
[12] P. van der Beesen en S. Dictus, “Advies ten aanzien van de minimum Rc- en U-eisen nieuwbouw”, RVO Utrecht / DRS Duurzaam Bouwen, 2023.
[13] Buildsight b.v., “Marktinformatie isolatiematerialen, isolatieglas en HR-ketels 2010-2024”, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), 2025.
[14] Casper Tigchelaar *e.a.*, “Schatting van de elektriciteitsvraag van airconditioners in Nederlandse woningen in 2021, 2022 en 2030”, TNO, 2024.
[15] D. van Nunen, I. Iloniitty, en J. Levels-Vermeer, “LCA Rapportage update milieuverklaringen Energiedragers 1 – Gas”, Stichting Nationale Milieudatabase, 2026.
[16] Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), “Klimaat- en Energieverkenning 2025”, PBL Planbureau voor de Leefomgeving, 2025.
[17] “R002_02_L250440_Update Energiedragers 2 - Elektriciteit-11”.
[18] Europees Parlement en Raad van de Europese Unie, “Richtlijn (EU) 2023/1791 van het Europees Parlement en de Raad van 13 september 2023 betreffende energie-efficiëntie (herschikking)”, sep. 2023, [Online]. Beschikbaar op: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=CELEX:32023L1791
[19] W. Rotterdam, “ACM duurzaamheidsrapportage Eneco grote netten 2024”.
[20] Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, “Overzicht duurzaamheid warmtenetten in 2024”, Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2025.
[21] D. van Nunen, H. van der Leij, en J. Levels-Vermeer, “LCA Rapportage productkaarten Energiedragers Nationale Milieudatabase”, Stichting Nationale Milieudatabase, 2023.
[22] R. M. M. (René) van der Loos, “Referentiegebouwen BENG”, DGMR Bouw B.V., 2016.
[23] L. van Cappellen, H. Groenewegen, en M. Nauta, “Thuisbatterijen in de energietransitie”, CE Delft, 2023.

[24] P. Groot, G. de Koning, en H. Medarac, “Nationaal Storage & Solar Trendrapport 2025”, Dutch New Energy Research; Solar365, 2025.
[25] H. Bouwmeester, “Pilotprojecten waterstof in de gebouwde omgeving: Leerervaringen”, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), 2024.
[26] K. Gopal *e.a.*, “Primos-prognose 2025: Prognose van bevolking, huishoudens en woningbehoefte”, ABF Research, 2025.
[27] W. Faessen, K. Gopal, L. Groenemeijer, G. van Leeuwen, D. Omtzigt, en M. Stuart-Fox, “ABF Woningmarktverkenning 2025-2040”, ABF Research, 2025.
[28] Netwerk Conceptueel Bouwen, “Woningconcepten en hun prestaties”, Netwerk Conceptueel Bouwen, 2024.
[29] J. Kok en R. Polderman, “Toekomstperspectieven sloopsector 2024: Ontwikkelingen en vooruitzichten”, Economisch Instituut voor de Bouw (EIB), 2024.
[30] Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), “Klimaat- en Energieverkenning 2024”, Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), 2024.
[31] J. Ritsema van Eck, B. Hof, M. t’ Hoen, en Projectteam WLO, “Toekomstverkenning WLO: Vier scenario’s voor Nederland in 2040, 2050 en 2060”, PBL Planbureau voor de Leefomgeving, 2025.
[32] R. O’Hegarty, A. McCarthy, J. O’Hagan, T. Thanapornpakornsin, S. Raffoul, en O. Kinnane, “Understanding the embodied carbon credentials of modern methods of construction”, *Build. Cities*, vol. 6, nr. 1, feb. 2025, doi: 10.5334/bc.515.
[33] Olga van der Velde en Mantijn van Leeuwen, “Potentie biobased materialen in de bouw”, NIBE Research bv, 2019.
[34] E. Migoni Alejandre, G. Koskamp, M. Van De Leur, A. Wandl, en A. Van Timmeren, “Quantifying the life cycle emissions of hybrid structures with advanced bio- and conventional materialization for low-embodied carbon urban densification of the Amsterdam Metropolitan Area”, *J. Clean. Prod.*, vol. 483, p. 144273, dec. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.144273.
[35] “Circulaire-Bouw-2035-Aanzet-tot-een-toekomstperspectief”.
[36] “Dashboard Nationale Aanpak Biobased Bouwen - Nederland”.
[37] “236-23-RVO-Buildsight-Rapport-verkenning-monitoring-biobased-bouwmaterialen”.
[38] “Integrale Circulaire Economie Rapportage 2025”.
[39] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), Red., “Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU)”, in *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, 1ste dr., Cambridge University Press, 2023, pp. 747-860. doi: 10.1017/9781009157926.009.
[40] Economisch Instituut voor de Bouw (EIB); Structural Collective, “Materiaalstromen en milieubelasting in de bouw en infra”, Economisch Instituut voor de Bouw; Structural Collective, 2026.
[41] B. Staal, “Ketenbrede afspraken naar een circulaire economie”, 2024.
[42] “TNO-Verkenning-Arbeidsondersteunende-Technologie-in-de-bouw-online”.
[43] E. Bouwen, “Openbare rapportage Q3 2022 consortium industriële prefab bouw”.
[44] J. Cramer, “The transition to sustainable concrete in the Netherlands through network governance”, Ghent: IABSE Congress Ghent 2021, 2021.
[45] “Arbeidsbesparende innovaties in de energietransitie”.
[46] Deloitte Spain; Deloitte Global Engineering & Construction Sector, “Global Powers of Construction 2024 (GPoC 2024)”, Deloitte, 2025.
[47] International Energy Agency (IEA), “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions”, International Energy Agency, 2022.
[48] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), *OECD Supply Chain Resilience Review: Navigating Risks*. Paris: OECD Publishing, 2025.
[49] International Energy Agency (IEA), “Material efficiency in clean energy transitions”, International Energy Agency, 2019.
[50] “Deloitte-EU-Demand-Creation-report”.

[51] K. Andrea, I. van der Bent, en T. ’t Mannetje, “Sustainability Challenge DGBC - Final Report”, Leiden University & Delft University of Technology (Industrial Ecology MSc Program); Commissioned by Dutch Green Building Council (DGBC), 2025.
[52] “Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector”.
[53] “Conclusies II3050 Editie 2”.
[54] “Global Hydrogen Review 2023”, 2023.
[55] European Commission, “Commission Delegated Regulation (EU) …/... of 3.2.2026 supplementing Regulation (EU) 2024/3012 of the European Parliament and of the Council by establishing the certification methodologies for permanent carbon removals activities”, European Commission, 2026.
[56] Economisch Instituut voor de Bouw (EIB); Structural Collective, “Materiaalstromen en milieubelasting in de bouw en infra, bijlage A methodiek”, EIB / Structural Collective, 2026.
[57] “Resultaten-Betonakkoord-2018-2023”.
[58] “CBC-CO2-ROADMAP_2024_10_15-DEFINITIEF-online-LR”.
[59] B. Maes, A. Audenaert, B. Craeye, en M. Buyle, “Consequential ex-ante life cycle assessment on clinker production in the EU: How will the future influence its environmental impact?”, *J. Clean. Prod.*, vol. 315, p. 128081, sep. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128081.
[60] “BAS_Roadmap_concept7_mei2023_comp”.
[61] C. Harpprecht *e.a.*, “Future environmental impacts of global iron and steel production”, *Energy Environ. Sci.*, vol. 18, nr. 16, pp. 8009-8028, 2025, doi: 10.1039/D5EE01356A.
[62] “Routekaart bouwkeramiek”.
[63] Rijksoverheid, “Green Deal Biobased Bouwen”, Rijksoverheid, 2013.
[64] Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, N. en V. Ministerie van Landbouw, en Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, “Nationale Aanpak Biobased Bouwen (2023-2030)”, Rijksoverheid, 2023.
[65] J. Betist, B. Van der Zande, I. Groet, M. Stolker, S. Snoek, en M. Eringa, “Houtbouw Pact MRA 2026-2030: Vervolg op het Convenant Houtbouw MRA”, Metropoolregio Amsterdam, 2025.
[66] I. EU-wetgeving, “ROUTEKAART CIRCULAIRE ZONNESTROOMSYSTEMEN & WEERBARE SECTOR”.
[67] Onbekend, “Routekaart NVPU”, LBP Sight, 2025.
[68] P. Mul en B. van Bergen, “Roadmap steenwol”, HaskoningDHV Nederland B.V., 2025.
[69] “Decarbonisation options for the Dutch aluminium industry”.
[70] Plastics Europe; Deloitte, “The Plastics Transition: Executive Summary Roadmap Adjustments Sep 2024”, Plastics Europe, 2024.
[71] P. Mul en R. van der Steen, “Roadmap gips”, HaskoningDHV Nederland B.V., 2025.
[72] “Rapport-MPG-Praktijktoets”.
[73] “Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen”, Rijksoverheid, 2023.
[74] SEB, “Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen”, 2024.
[75] J. Kanselaar, H. van Ewijk, en B. Casper, “Onderzoeksrapport: Voorstel berekeningsmethodiek om koolstofvastlegging in biobased bouwmaterialen te kunnen waarderen”, SGS Search Ingenieursbureau B.V., Heeswijk, jul. 2022.
[76] European Commission. Directorate-General for Climate Action en Viegand Maagøe, *Technical assessment paper (TAP) for long-term temporary biogenic carbon storage in buildings (with certification rules report)*. LU: Publications Office of the European Union, 2025. doi: 10.2834/2853440.
[77] D. D. Haag, “Opdrachtgever Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening Postbus 20011, 2500 EA Den Haag”.
[78] J. Timmers en B. Rooijen, “Impact Assessment of LCA background databases: Study on four construction products”, SGS INTRON B.V., okt. 2025.
[79] “Dokumentation_Zwischenbericht_10.08.17-24.51_10-11-2025-11”.

[80] K. Jansen en H. Keizers, “Overview of WLC-GWP approach in 18 European countries”, TNO, 2024.
[81] M. K. Wiik, “A systematic literature review of GHG emission declarations, limit values, and roadmaps for the decarbonisation of buildings”, *Sustain. Futur.*, vol. 10, p. 100846, dec. 2025, doi: 10.1016/j.sftr.2025.100846.
[82] European Commission. Directorate General for Environment., Ramboll., BPIE., en KU Leuven, *Supporting the development of a roadmap for the reduction of whole life carbon of buildings: final technical report.* LU: Publications Office, 2024. doi: 10.2779/849252.
[83] “BUILD_Report_2021_12”.

# Ondertekening

TNO Energy & Materials Transition Utrecht, 18 augustus 2026

ValidSigned by Charlotte Smit-Rietveld on 18-08-2026

Charlotte Smit-Rietveld
Research Manager

*I/o Alix Reichenecker*

ValidSigned by Alix Reichenecker on 18-08-2026

Arjan van Horssen
Project Manager

# Bijlage A
# Methodische belangrijkste onzekerheden

In deze bijlage worden de belangrijkste methodische onzekerheden beschreven die van invloed kunnen zijn op de berekende wlc-gwp-resultaten. Deze onzekerheden vallen buiten de scope van de huidige opdracht en zijn daarom niet integraal geanalyseerd of gekwantificeerd binnen dit onderzoek.

Tegelijkertijd kunnen deze methodische keuzes en aannames een substantiële invloed hebben op de uitkomsten, zowel in absolute zin als in de onderlinge vergelijking tussen scenario's en gebruiksfuncties. Om die reden zijn de meest relevante methodische onzekerheden in deze bijlage samengevat en toegelicht, met als doel transparantie te bieden over potentiële effecten op de resultaten en aandachtspunten te benoemen voor vervolgonderzoek en beleidsontwikkeling.

De in deze bijlage beschreven onzekerheden zijn niet bedoeld als uitputtend overzicht, maar richten zich op de methodische aspecten die naar verwachting de grootste impact kunnen hebben op de wlc-gwp-berekeningen richting 2030–2050.

**Waardering van opgeslagen koolstof in bouwproducten**
De manier waarop "opgeslagen koolstof" in biobased producten wordt gewaardeerd kan de wlc-gwp sterk beïnvloeden, vooral bij hout en biobased isolatie. De kernonzekerheid is: tel je tijdelijke opslag mee als (tijdelijke) negatieve emissie, hoe ga je om met einde-levensfase als bij verbranding de emissie weer vrijkomt, en welke aannames hanteer je over hergebruik/verbranding/afbraak. Kleine verschillen in regels (wel/geen credit, timing, end-of-life scenario) kunnen een grote impact hebben. Hierover zijn Nationaal[75] en internationaal[76] al verschillende onderzoeken verschenen incl. het effect ervan. Het effect op het totaal is natuurlijk sterk afhankelijk van de hoeveelheid koolstof er is opgeslagen in het gebouw en dit is in veel gevallen sterk afhankelijk hoeveel biobased materiaal er in is opgeslagen, zie hiervoor hoofdstuk 4.2.

Het wel of niet tijdgewogen waarderen van tijdelijke (biogene) koolstofopslag heeft vooral invloed op het best-case-ontwikkelpad. Dit heeft alleen effect voor de levensfases die in de toekomst liggen dus fase B, C en D. Zonder tijdweging heffen de opname van $CO_2$ en de latere uitstoot daarvan elkaar op. Bij tijdweging telt de toekomstige uitstoot minder zwaar mee, waardoor tijdelijke koolstofopslag een voordeel oplevert en de berekende wlc-gwp lager wordt. In het worstcase-ontwikkelpad is dit effect beperkt, omdat daarin weinig biobased materiaal wordt toegepast. In het best-case-ontwikkelpad is het effect groter door de sterkere opschaling van biobased bouwen. Tijdweging van koolstofopslag vergroot daardoor het verschil tussen het worst- en best-case-ontwikkelpad.

**Module D (buiten de systeemgrens)**
Of en hoe Module D wordt meegenomen is een grote onzekerheid: het kan aanzienlijke credits geven voor recycling/hergebruik buiten de gebouwgrens, maar het risico is dat je daarmee effecten verschuift in plaats van reduceert. Volgens de WE Evaluatie Module D [77].

kan dit in de orde van grootte van ~10–15% reductie liggen, maar dat is gebaseerd op huidige einde-levensscenario's; als de praktijk verschuift naar hoogwaardiger recycling of hergebruik, verandert zowel de grootte als de richting (en vooral: de verdeling over materialen). Voor beleid is dit gevoelig: Module D kan prikkels geven, maar maakt resultaten ook afhankelijk van aannames over toekomstige markten en substitutie.

**Verdisconteren van GWP over tijd (Franse methode / dynamic LCA)**
Als je emissies niet "plat" optelt maar weegt naar het moment waarop ze optreden, verandert de uitkomst structureel: vroege emissies (A1–A5) tellen zwaarder dan emissies ver in de toekomst (bijv. vervangingen of einde-levensfase), of andersom afhankelijk van de gekozen weging. Dit maakt biobased opslag, levensduurverlenging en vervangingscycli ineens veel relevanter in de score, maar introduceert tegelijk normatieve keuzes (tijdshorizon, discount/weging, rapportagevorm). Het gevolg is dat dezelfde fysieke keten een andere wlc-gwp "score" kan krijgen puur door de gekozen tijdmethodiek.

**Veranderingen / updates van achtergrond databases**
Updates in achtergronddata (elektriciteitsmixen, brandstoffen, transport, recyclingprocessen, chemie, metalen) kunnen de wlc-gwp merkbaar verschuiven zonder dat het gebouwontwerp verandert. Dat effect is extra groot richting 2050 omdat decarbonisatiepaden vooral in de achtergrond (energie en industrie) zitten. Methodisch zit de onzekerheid in versiebeheer (welke databaseversie "geldt"), consistentie door de tijd (trenddata vs momentopname) en in hoe nationale methoden omgaan met periodieke herberekeningen van referenties en grenswaardes en streefwaardes..

**CPR: verplicht toelaten van LCA's uit andere Europese databases bij CPR conformiteit**
Als de CPR ertoe leidt dat je EPD/LCA's uit verschillende (internationale) databases moet accepteren, krijg je vergelijkbaarheidsrisico: datasets kunnen verschillen in scope, allocatie, achtergronddata, aannames en datakwaliteit, terwijl ze formeel "conform" zijn. Verschillende onderzoeken geven aan dat dit effect groot kan (factoren verschil)[78] [79], wat betekent dat marktpartijen strategisch kunnen shoppen naar gunstige datasets ("boundary/data shopping") en dat nationale grenswaarden minder robuust worden. Voor wlc-gwp vraagt dit om strakke harmonisatie- en kwaliteitsregels.

**Herziening van EN 15804: allocatie, scope en afbakening**
Wijzigingen in EN 15804 werken direct door in product-EPD's en dus in de materiaalcomponent van wlc-gwp. Als allocatieregels, module-inhoud, datakwaliteitseisen of end-of-life-modellering verschuiven, kunnen milieuverklaring ineens anders uitpakken, zonder dat achterliggende productie of materiaal werkelijk verandert. Dit creëert een overgangsperiode met gemengde "generaties" EPD's, waardoor vergelijkingen scheef kunnen worden en beleidsmonitoring lastiger wordt (je meet dan deels methodewijziging in plaats van echte reductie).

**Herziening van EN 15978 (gebouwniveau) incl. nieuwe modules (A0, B8) en herstructurering**
Als EN 15978 wordt herzien met extra modules (zoals A0, B8) of een andere module-structuur, verandert wat je verplicht rapporteert en hoe je systeemscheidingen legt. Dat heeft twee effecten:

1. je krijgt mogelijk extra posten (bijv. pre-life of extra operationele onderdelen) die eerder buiten beeld bleven
2. historische trends worden moeilijk vergelijkbaar omdat "de noemer" verandert.

Nationaal kan dit dwingen tot herinrichting van rekenregels, tools, databases en referentiegebouwen, met risico op tijdelijke inconsistentie tussen projecten en jaren.

**Materiaal-specifieke eigenschappen wel/niet meenemen (bv. betoncarbonatatie) wijzigingen in de PCR**
Sommige materiaaleffecten zijn inhoudelijk relevant maar methodisch lastig te standaardiseren; betoncarbonatatie is het klassieke voorbeeld. Of je het meeneemt, en met welke aannames (blootstelling, oppervlak, gebruiksfase, slooproute, fragmentatie, tijd), kan de netto uitkomst voor beton merkbaar beïnvloeden; de literatuur is breed en sterk contextafhankelijk. Voor wlc-gwp is dit een gevoelig punt omdat het zowel de absolute score als de vergelijking met alternatieven (biobased, staal, gerecycled beton) kan verschuiven.
**Wijzigingen in RSL (reference service life), vooral installaties**
De RSL van installaties is vaak bepalend voor B-modules (vervanging/onderhoud) en kan dus de bepalend zijn voor de wlc-gwp,, zeker in gebouwen met veel techniek. Als RSL-uitgangspunten worden geactualiseerd (of als de praktijk afwijkt van de tabellen), verandert het aantal vervangingen richting 2050.

**Wijzigingen in forfaitaire einde-levensscenario's**
Forfaitaire EoL-scenario's (percentages hergebruik, recycling, verbranding, stort; plus transport en verwerkingsroutes) zijn één van de grootste "knoppen" in wlc-gwp, omdat ze zowel directe EoL-emissies als (indirect) Module D-credits sturen. Als deze EOL waardes worden aangepast (bijv. ambitieuzer hergebruik of strengere afvalroutes), verschuiven scores systematisch per materiaalstroom, en daarmee ook de relatieve aantrekkelijkheid van ontwerpkeuzes. Dit is beleidsmatig belangrijk: je wilt prikkels geven richting de gewenste praktijk, maar je wilt ook voorkomen dat scores vooral de rekenafspraak reflecteren in plaats van meetbare ketenprestaties.

Bijlage B

# Tabel conceptwoningen en de wlc-gwp

Tabel Inclusief varianten waarin biogene $CO_2$-opslag is meegenomen (zowel volgens de Franse methode, met een tijdcorrectiefactor van 0,578, als zonder toepassing van biogene $CO_2$-opslag). Bron conceptwoningen Woningconcepten en hun prestaties, Oktober 2024 [28]

| Categorie | Organisatie | Concept | BVO (m2) | MPG_total (A1) | CO2_total | CO2_A1-A3 | CO2_A4-A5 | CO2_B1-B5 | CO2_C1-C4 | CO2_D | CO2_structure | CO2_skin | CO2_services | CO2_space_plan | CO2_stuff | Materiaalgebonden CO2-opslag (kg/m2) | CO2 totaal min CO2 Opslag | CO2 fase A1 t/m C4 - CO2 Opslag | Materiaalgebonden CO2-opslag (FRANSE METHODE) X 0.578 over 50 jaar | CO2 totaal min CO2 Opslag Franse methode | CO2 fase A1 t/m C4 - CO2 Franse methode | % Biobased |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eenpersoonswoning | BAM Wonen | Flow | 145 | 0.480 | 233 | 152 | 14 | 91 | 4 | 29 | 71 | 30 | 99 | 32 | 1 | 93 | 140 | 168 | 54 | 179 | 207 | 17% |
| Eenpersoonswoning | Bolton | Boltonwoning | 177 | 0.421 | 235 | 180 | 20 | 37 | 19 | 20 | 87 | 50 | 35 | 63 | 1 | 24 | 211 | 232 | 14 | 221 | 242 | 2% |
| Eenpersoonswoning | Bouwnovum | Shelfr | 148 | 0.266 | 121 | 108 | 8 | 43 | 2 | -39 | 50 | 41 | 24 | 5 | 1 | 442 | -321 | -281 | 255 | -134 | -94 | 89% |
| Eenpersoonswoning | Bouwonderneming Stout BV | HOUTmerk | 120 | 0.461 | 193 | 195 | 11 | 50 | 42 | 21 | 66 | 30 | 54 | 42 | 1 | 216 | -23 | 82 | 125 | 68 | 173 | 26% |
| Eenpersoonswoning | Draisma | Draisma Houtbouw-systeem | 67 | 0.399 | 172 | 154 | 10 | 55 | 25 | 22 | 64 | 32 | 59 | 16 | 2 | 228 | -56 | 16 | 132 | 40 | 112 | 33% |
| Eenpersoonswoning | Dura Vermeer | AER | 169 | 0.351 | 137 | 105 | 5 | 55 | 14 | 14 | 27 | 25 | 66 | 18 | 1 | 102 | 35 | 77 | 59 | 78 | 120 | 27% |
| Eenpersoonswoning | Emergo | Premodu | 144 | 0.351 | 160 | 112 | 9 | 51 | 5 | -18 | 63 | 19 | 40 | 37 | 1 | 77 | 83 | 100 | 45 | 116 | 132 | 19% |
| Eenpersoonswoning | geWOONhout | geWOONhout | 165 | 0.468 | 208 | 123 | 9 | 121 | 33 | 12 | 25 | 49 | 115 | 19 | 1 | 158 | 50 | 128 | 91 | 117 | 195 | 50% |
| Eenpersoonswoning | Heembouw | Slimm | 78 | 0.500 | 220 | 130 | 11 | 96 | 6 | 24 | 29 | 66 | 97 | 26 | 1 | 150 | 70 | 93 | 87 | 133 | 156 | 53% |
| Eenpersoonswoning | Heijmans | Horizon M | 148 | 0.365 | 166 | 135 | 11 | 46 | 15 | 11 | 56 | 34 | 34 | 42 | 1 | 105 | 61 | 102 | 61 | 105 | 146 | 20% |
| Eenpersoonswoning | Het Bouwbureau en Bouwbedrijf van Dillen | Kombie woning | 40 | 0.670 | 280 | 210 | 14 | 118 | -27 | -36 | 60 | 89 | 111 | 16 | 3 | 72 | 208 | 243 | 42 | 238 | 273 | 31% |
| Eenpersoonswoning | Hodes | Pluswoning PW01 | 68 | 0.457 | 220 | 191 | 13 | 69 | 6 | 58 | 51 | 69 | 57 | 41 | 2 | 88 | 132 | 191 | 51 | 169 | 228 | 15% |
| Eenpersoonswoning | Hurks | Da Vinci Green | 130 | 0.488 | 267 | 172 | 26 | 74 | 32 | 37 | 103 | 50 | 48 | 65 | 2 | 141 | 126 | 163 | 81 | 186 | 223 | 25% |
| Eenpersoonswoning | Hurks | Da Vinci Green | 96 | 0.349 | 164 | 123 | 14 | 46 | 4 | 23 | 62 | 24 | 30 | 46 | 1 | 191 | -27 | -4 | 110 | 54 | 77 | 32% |
| Eenpersoonswoning | Janssen de Jong Bouw | ModuFair | 146 | 0.338 | 174 | 107 | 26 | 39 | 21 | -19 | 84 | 33 | 34 | 22 | 1 | 22 | 152 | 171 | 13 | 161 | 180 | 2% |
| Eenpersoonswoning | MorgenWonen | MorgenWonen | 165 | 0.455 | 242 | 181 | 16 | 52 | 12 | -20 | 59 | 93 | 41 | 48 | 1 | 19 | 223 | 242 | 11 | 231 | 250 | 3% |
| Eenpersoonswoning | Pleijt-Vos | Compact Wonen in Hout | 153 | 0.286 | 140 | 103 | 15 | 34 | 8 | -20 | 65 | 24 | 25 | 25 | 1 | 200 | -60 | -40 | 116 | 24 | 44 | 33% |
| Eenpersoonswoning | Pucok | De Glorius woning | 135 | 0.351 | 202 | 161 | 13 | 36 | 18 | -27 | 96 | 37 | 30 | 39 | 1 | 65 | 137 | 163 | 38 | 164 | 190 | 3% |
| Eenpersoonswoning | PUYCK – Van der Heijden bouwbedrijf b.v. | De Glorius woning | 135 | 0.318 | 175 | 133 | 15 | 37 | 18 | -28 | 67 | 38 | 30 | 39 | 1 | 207 | -32 | -4 | 120 | 55 | 83 | 24% |
| Eenpersoonswoning | Startblock | Startblock Roots hellend | 72 | 0.428 | 211 | 124 | 14 | 86 | 14 | -27 | 60 | 61 | 69 | 20 | 1 | 266 | -55 | -28 | 154 | 57 | 84 | 60% |
| Eenpersoonswoning | Tala | Nerf | 98 | 0.339 | 166 | 127 | 46 | 49 | 16 | -72 | 70 | 53 | 29 | 13 | 1 | 307 | -141 | -69 | 177 | -11 | 61 | 76% |
| Eenpersoonswoning | Tala | Noest | 52 | 0.293 | 148 | 107 | 34 | 48 | 12 | -53 | 55 | 55 | 25 | 11 | 1 | 375 | -227 | -174 | 217 | -69 | -16 | 69% |
| Eenpersoonswoning | Tala | Flex | 66 | 0.495 | 248 | 193 | 17 | 105 | 15 | -82 | 71 | 68 | 92 | 16 | 1 | 414 | -166 | -84 | 239 | 9 | 91 | 79% |
| Eenpersoonswoning | TBI | beterBASIShuis | 85 | 0.388 | 244 | 172 | 25 | 42 | 22 | -16 | 130 | 44 | 36 | 33 | 1 | 31 | 213 | 230 | 18 | 226 | 243 | 2% |
| Eenpersoonswoning | Ter Steege Bouw Vastgoed | LeefWEL | 136 | 0.379 | 219 | 163 | 24 | 31 | 17 | -16 | 86 | 69 | 39 | 23 | 1 | 13 | 206 | 222 | 8 | 211 | 227 | 1% |
| Eenpersoonswoning | Van de Klok | BaseHome | 155 | 0.399 | 238 | 172 | 24 | 41 | 18 | -17 | 123 | 36 | 40 | 39 | 1 | 15 | 224 | 240 | 9 | 230 | 246 | 1% |
| Eenpersoonswoning | Van de Klok | BaseHome | 121 | 0.463 | 273 | 169 | 22 | 81 | 18 | -17 | 113 | 33 | 85 | 41 | 1 | 19 | 254 | 271 | 11 | 262 | 279 | 2% |
| Eenpersoonswoning | Van Goeden Huizen | Van Goeden Huizen | 75 | 0.453 | 186 | 130 | 7 | 82 | 20 | -13 | 13 | 70 | 73 | 29 | 2 | 134 | 52 | 105 | 77 | 109 | 162 | 38% |
| Eenpersoonswoning | Waal | Woonslim | 122 | 0.388 | 214 | 156 | 13 | 42 | 21 | -18 | 109 | 29 | 45 | 30 | 1 | 31 | 183 | 201 | 18 | 196 | 214 | 2% |
| Eenpersoonswoning | Woonpioniers | Haybarn | 121 | 0.534 | 243 | 156 | 14 | 91 | 9 | -28 | 72 | 52 | 88 | 31 | 1 | 84 | 159 | 186 | 49 | 194 | 221 | 9% |
| Meergezinswoning | Barli | Barli Base | 647 | 0.684 | 349 | 242 | 25 | 100 | 5 | -24 | 102 | 94 | 50 | 100 | 2 | 92 | 257 | 280 | 53 | 296 | 319 | 13% |
| Meergezinswoning | Bouwnovum | Shelfr | 842 | 0.641 | 267 | 182 | 27 | 113 | -4 | -51 | 61 | 67 | 94 | 42 | 3 | 274 | -7 | 44 | 158 | 109 | 160 | 67% |
| Meergezinswoning | Daiwa | Daiwa | 5825 | 0.584 | 275 | 197 | 10 | 111 | 1 | -44 | 60 | 79 | 88 | 46 | 1 | 34 | 241 | 285 | 20 | 255 | 299 | 6% |
| Meergezinswoning | Draisma | Draisma houtbouwsysteem | 2314 | 0.391 | 179 | 164 | 13 | 47 | -9 | -36 | 54 | 57 | 33 | 35 | 1 | 135 | 44 | 80 | 78 | 101 | 137 | 24% |
| Meergezinswoning | Ekowood | Ekowood Houses Galerij | 1407 | 0.435 | 210 | 181 | 15 | 55 | 14 | -55 | 91 | 50 | 41 | 27 | 1 | 220 | -10 | 45 | 127 | 83 | 138 | 20% |
| Meergezinswoning | Elk® groep BV | elk® TransformMEER | 200 | 0.595 | 241 | 187 | 9 | 110 | -32 | -33 | 32 | 85 | 96 | 27 | 2 | 205 | 36 | 69 | 118 | 123 | 156 | 57% |
| Meergezinswoning | Finch | Finch Buildings | 5516 | 0.548 | 297 | 210 | 20 | 97 | 6 | -37 | 88 | 54 | 94 | 60 | 1 | 152 | 145 | 181 | 88 | 209 | 245 | 14% |
| Meergezinswoning | geWOONhout | geWOONhout | 6535 | 0.598 | 278 | 271 | 22 | 90 | -74 | -31 | 41 | 136 | 48 | 52 | 2 | 345 | -67 | -36 | 199 | 79 | 110 | 49% |
| Meergezinswoning | Heddes Bouw & Ontwikkeling / Ursem Modulair | IDS woonmodule | 4037 | 0.498 | 272 | 212 | 20 | 57 | 16 | -33 | 106 | 77 | 29 | 58 | 1 | 106 | 166 | 199 | 61 | 211 | 244 | 10% |
| Meergezinswoning | The New Makers | HoutenThuis | 482 | 0.676 | 269 | 199 | 39 | 102 | 2 | -73 | 112 | 58 | 52 | 43 | 4 | 367 | -98 | -25 | 212 | 57 | 130 | 63% |
| Meergezinswoning | Thimo365 | Thimo365 | 1282 | 0.600 | 268 | 204 | 12 | 107 | -12 | -43 | 64 | 69 | 100 | 33 | 2 | 138 | 130 | 173 | 80 | 188 | 231 | 37% |
| Meergezinswoning | Van de Klok | Wonivo | 2336 | 0.617 | 376 | 298 | 36 | 51 | 31 | -40 | 211 | 66 | 39 | 59 | 1 | 10 | 366 | 406 | 6 | 370 | 410 | 0% |
| Meergezinswoning | VDL De Meeuw | VDL De Meeuw - Wonen | 1425 | 0.441 | 198 | 151 | 12 | 67 | -7 | -25 | 62 | 61 | 46 | 27 | 2 | 125 | 73 | 98 | 72 | 126 | 151 | 27% |
| Meergezinswoning | Waal | MeerHout | 7970 | 0.546 | 287 | 238 | 23 | 58 | 20 | -52 | 128 | 45 | 60 | 55 | 1 | 186 | 101 | 153 | 108 | 179 | 231 | 12% |
| Optopconcept | Vorm | Optopper | 1008 | 0.570 | 239 | 227 | 12 | 97 | -71 | -8 | 52 | 93 | 21 | 90 | 1 | 219 | 20 | 46 | 127 | 112 | 138 | 50% |
| Optopconcept | Smits | Sum Optopconcept | 585 | 0.557 | 303 | 211 | 12 | 99 | -4 | -14 | 58 | 102 | 39 | 103 | 2 | 248 | 55 | 70 | 143 | 160 | 175 | 52% |

De gevoeligheid van deze methodische keuze blijkt uit de analyse van 46 woningconcepten in Bijlage B. Bij volledige aftrek van de gerapporteerde $CO_2$-opslag zouden 14 concepten een negatieve productgebonden wlc-gwp krijgen. Bij toepassing van een Franse tijdweging over 50 jaar blijven 3 concepten negatief. Dit laat zien dat de waardering van koolstofvastlegging niet alleen een detailkeuze is, maar bepalend kan zijn voor de bandbreedte tussen worst-case en best-case scenario's, vooral bij scenario's met een hoog aandeel hout en andere biobased materialen.

# Bijlage C
# Andere Europese landen

Internationale ervaringen laten zien dat verschillende landen al stappen zetten met emissiedeclaraties, referentiewaarden en grenswaarden voor gebouwen, maar dat de resultaten sterk variëren door verschillen in methoden, systeemgrenzen, databronnen en aannames, de verschillen per lidstaat zijn weergeven in Overview of wlc-gwp approach in 18 European countries[80]. Daardoor zijn uitkomsten tussen landen beperkt vergelijkbaar en is verdere standaardisatie noodzakelijk, dit blijkt uit het rapport: *A systematic literature review of GHG emission declarations, limit values, and roadmaps for the decarbonisation of buildings* [81]. Belangrijke inzichten zijn dat referentiewaarden meestal bottom-up worden afgeleid uit bestaande gebouwen, terwijl toekomstdoelen vaak top-down worden gebaseerd op koolstofbudgetten; een combinatie van beide geeft de meest robuuste reductiepaden. Benchmarkwaarden voor gebouwen variëren in de literatuur grofweg van 5 tot 90 kg$CO_2$-eq/m²/jaar, met indicatieve doelwaarden rond circa 10 kg$CO_2$-eq/m²/jaar afhankelijk van aannames.

Recente Europese studies[82] laten zien dat de gebouwde omgeving een groot aandeel heeft in de totale uitstoot en dat verdere reductie richting 2050 alleen haalbaar is wanneer zowel operationele als productgebonden emissies gelijktijdig worden aangepakt. In energiezuinige nieuwbouw verschuift het zwaartepunt bovendien steeds meer naar de productgebonden emissies, waardoor beleid dat zich uitsluitend richt op energiegebruik onvoldoende is om de klimaatdoelen te halen.

Het rapport concludeert dat, zelfs bij verwachte verbeteringen in energieprestatie en een schonere energiemix, de uitstoot van de gebouwvoorraad slechts beperkt daalt en ver verwijderd blijft van een pad richting klimaatneutraliteit in 2050. Extra beleidsinterventies zijn daarom noodzakelijk. Scenario's die uitsluitend uitgaan van technologische oplossingen (zoals efficiëntere materialen en betere energieprestaties) leveren wel substantiële reducties op, maar leiden nog steeds niet tot net-zero.

Daarnaast benadrukt het rapport dat de uitkomsten sterk afhankelijk zijn van aannames en datakwaliteit. De meest bepalende factoren zijn de snelheid van de materiaaltransitie, de mate van industriële decarbonisatie en de beschikbaarheid van circulaire en lage-$CO_2$-materialen.

Tegelijkertijd bevinden Europese landen zich in verschillende fasen van beleidsontwikkeling. Sommige landen werken met verplichte emissiedeclaraties of grenswaarden voor gebouwen, terwijl andere nog vooral inzetten op vrijwillige instrumenten, databouw en referentiewaarden. De koploperlanden Denemarken en Frankijk, die al grenswaarden hebben, worden hierna behandeld.

# C.1 Denemarken

Denemarken geldt binnen Europa als een van de meest vergevorderde landen op het gebied van wlc-gwp beleid voor de gebouwde omgeving. De Deense aanpak combineert een sterke empirische onderzoeksbasis met bindende, stapsgewijs aangescherpte regelgeving.

Uit grootschalige Deense wlc-gwp-studies (o.a. BUILD/AAU, gebaseerd op circa 60 gerealiseerde gebouwen [83]) blijkt dat de GWP impact van bouwmaterialen structureel dominant is binnen de totale levenscyclus. In veel gevallen is de productgebonden uitstoot (met name module A1–A3) twee tot vier keer groter dan de bijdrage van operationele energie, zelfs wanneer vervangingen en energiegebruik over een lange levensduur worden meegerekend. Dit effect neemt richting 2050 verder toe door de verwachte verduurzaming van de elektriciteitsmix, waardoor operationele emissies dalen en de relatieve betekenis van “upfront carbon” toeneemt.[36]

De studies laten daarnaast zien dat biobased en houtconstructies weliswaar vaak een lage initiële GWP impact hebben, maar dat deze winst deels kan verschuiven naar de einde-levensfase (C3–C4), afhankelijk van de gehanteerde afval- en verwerkingsscenario’s. Dit onderstreept het belang van consistente aannames en rekenregels binnen wlc-gwp-methodieken voor alle materialen, waarbij met name de modellering van biogene koolstof, levensduur en eindelevensscenario’s een sterke invloed heeft op de uitkomsten.

Deze empirische inzichten zijn in Denemarken direct vertaald naar beleid. Sinds 2023 gelden er wettelijke wlc-gwp-grenswaarden voor nieuwbouw, die vanaf 2025 worden aangescherpt en uitgebreid naar vrijwel alle verwarmde gebouwen. De Deense roadmap kent gebouwtypespecifieke grenswaarden en een helder aanscherpingspad richting 2029. Daarmee biedt Denemarken marktpartijen langjarige voorspelbaarheid en ruimte voor innovatie, terwijl tegelijk wordt gestuurd op daadwerkelijke $CO_2$-reductie.

Denemarken hanteert sinds 2023 wettelijke grenswaarden voor de klimaatimpact van gebouwen over de levenscyclus, uitgedrukt in kg $CO_2$-eq./m² per jaar. De hoofdgrenswaarde omvat de modules A1–A3, B4, B6 en C3–C4. Sinds 1 juli 2025 zijn de grenswaarden gedifferentieerd naar gebruiksfunctie en geldt daarnaast een afzonderlijke grenswaarde voor de bouwplaatsmodules A4–A5. Module D wordt afzonderlijk gerapporteerd, maar telt niet mee bij de toetsing. Voor de grenswaarden is een aanscherpingspad richting 2029 vastgesteld[37]

Vanaf 1 juli 2025 worden de eisen aangescherpt en gelden ze voor (bijna) alle nieuwe verwarmde gebouwen, met limieten per gebouwtype. Denemarken hanteert een stapsgewijs aanscherpingspad voor wlc-gwp-eisen, waarbij de grenswaarden periodiek worden verlaagd. De omvang van deze aanscherpingen ligt in de orde van circa 10% per stap, maar varieert per gebouwtype en is niet vastgelegd als een generieke tweejaarlijkse reductieregel.

[36] Note: dit komt ook doordat ze de voorgenomen energie mix reductie van het elektriciteitsnet ook al meenemen.

**Tabel C.1:** Tabel met de grenswaardes van uit Denemarken  waardes zijn op de Deense methode bepaald en kunnen niet zonder meer gebruikt worden als referentiewaarde voor de NL rekenmethodiek)

| Gebouwtype | 2025 (kg $CO_2$e/m²·jr) | 2027 (kg $CO_2$e/m²·jr) | Reductie in 2027 t.o.v. 2025 | 2029 (kg $CO_2$e/m²·jr) | Reductie in 2029 tov 2025 |
|---|---|---|---|---|---|
| Gemiddelde limiet | 7,1 | 6,4 | 10% | 5,8 | 18% |
| Vakantiehuis < 150 m² | 4,0 | 3,6 | 10% | 3,2 | 20% |
| Eengezins- en rijwoningen / grotere vakantiehuizen | 6,7 | 6,0 | 10% | 5,4 | 19% |
| Appartementen en kantoren | 7,5 | 6,8 | 9% | 6,1 | 19% |
| Instituties en overige gebouwen | 8,0 | 7,2 | 10% | 6,4 | 20% |

# C.2 Frankrijk

Frankrijk behoort tot de Europese koplopers op het gebied van wettelijke verankering van Whole Life Carbon (wlc-gwp) in de bouwregelgeving. Met de invoering van RE2020 (Réglementation Environnementale 2020, LINK) is Frankrijk het eerste grote EU-land dat verplichte levenscyclus-$CO_2$-grenswaarden hanteert voor nieuwbouw, expliciet gescheiden naar operationele emissies en materiaalgebonden emissies. RE2020 stelt stapsgewijs aangescherpte grenswaarden vast voor zowel energiegebruik tijdens de gebruiksfase als de $CO_2$-impact van materialen over de levenscyclus, waarbij ook een tijdsafhankelijke weging van emissies wordt toegepast.

Centraal binnen RE2020 staat de indicator Ic construction, die de productgerelateerde $CO_2$-uitstoot over de volledige levenscyclus van het gebouw weergeeft (modules A1–A5, B4, C1–C4, inclusief biogene koolstof, maar **niet** module D). Uit de onderliggende Franse studies en praktijktoetsen blijkt dat, vergelijkbaar met Denemarken, materialen de dominante factor zijn binnen de totale wlc-gwp, met name bij goed geïsoleerde en energiezuinige gebouwen. Naarmate de operationele energie verder verduurzaamt, wordt deze dominantie sterker richting 2030–2050.

Frankrijk heeft er bewust voor gekozen om wlc-gwp gefaseerd en differentieert in te voeren. De Ic construction-grenswaarden worden stapsgewijs aangescherpt in 2022, 2025, 2028 en 2031, met verschillende limieten per gebouwtype (o.a. eengezinswoningen, appartementen en onderwijsgebouwen). Deze aanpak is gebaseerd op uitgebreide nationale LCA-datasets (INIES) en grootschalige pilots, waarin is vastgesteld dat directe, scherpe grenswaarden zonder overgangsperiode zou leiden tot marktverstoring en beperkte haalbaarheid.

Tegelijkertijd laten Franse evaluaties zien dat biobased oplossingen niet automatisch leiden tot een lagere wlc-gwp, doordat emissies aan het einde van de levensduur (verbranding, afbraak) substantieel kunnen zijn. Dit heeft ertoe geleid dat Frankrijk veel aandacht besteedt aan biogene koolstofboekhouding en consistente aannames voor eindelevensscenario's. Daarnaast wordt binnen RE2020 een tijdsafhankelijke weging van $CO_2$-emissies toegepast, die voor alle materialen geldt.

De eisen stelt Frankrijk los voor energieverbruik tijdens de gebruiksfase (B6) en de productgebonden wlc-gwp.

Hieronder de twee losse tabellen, let op in tegenstelling tot Denemarken zijn dit de eisen niet per jaar maar voor de gehele levensduur over 50 jaar.

**Tabel C.2:** wlc-gwp voor het energieverbruik fase B6.

| Gebruiksfunctie | 2025 Ic énergie (kg $CO_2e/m^2$) | 2028 Ic énergie (kg $CO_2e/m^2$) | Reductie in 2028 t.o.v. 2025 | 2031 Ic énergie (kg $CO_2e/m^2$) | Reductie in 2031 t.o.v. 2025 |
|---|---|---|---|---|---|
| eengezinswoningen | ~160 | ~140 | 13% | ~120 | 25% |
| appartementen | ~260 | ~230 | 12% | ~200 | 23% |
| kantoren | ~200 | ~180 | 10% | ~160 | 20% |
| scholen | ~220 | ~200 | 9% | ~180 | 18% |

**Tabel C.3:** wlc-gwp voor het productgebonden CO2 impact. Bron: LINK. Waardes zijn op de Franse methode bepaald en kunnen niet zonder meer gebruikt worden als referentiewaarde voor de NL rekenmethodiek)

| Gebruiksfunctie | 2025 Ic construction (kg $CO_2e/m^2$) | 2028 Ic construction (kg $CO_2e/m^2$) | Reductie in 2028 t.o.v. 2025 | 2031 Ic construction (kg $CO_2e/m^2$) | Reductie in 2031 t.o.v 2025 |
|---|---|---|---|---|---|
| eengezinswoningen | 530 | 475 | 10% | 415 | 10% |
| appartementen | 650 | 580 | 11% | 490 | 11% |
| kantoren | 810 | 710 | 12% | 600 | 12% |
| Scholen | 770 | 680 | 12% | 590 | 12% |

# Bijlage D
# Geraadpleegde experts

**Tabel D.1:** tabel met de geraadpleegde experts

| Expert | Bedrijf |
|---|---|
| Anshuman Pandy | TNO |
| Daan de Vries | Ministerie van EZK |
| Eric de Munck | Centrum Hout |
| Evert Bouwman | TNO |
| Frank Wubbolts | TNO |
| Gerben Broekhuijsen | Copper8 |
| Hannah Jung | TNO |
| Huub Keizers | TNO |
| Jeannette Levels-Vermeer | LBP\|SIGHT |
| Marije ter Steege | TNO |
| Mariusz Cieplik | TNO |
| Niels Ruijter | NVBT |
| Rik Blom | Ministerie van BZK |
| Ron Oorschot | TNO |
| Roberto Travesari | TNO |
| Sven van Aspert | HaskoningDHV |
| Wieger Dijkstra | Ministerie van IenW |
| Wouter Kroesen | TNO |

Bijlage E

# Voorbeeldberekening compensatie van fossiele primaire energie door lokaal opgewekte hernieuwbare elektriciteit

Onderstaand voorbeeld illustreert de wijze waarop lokaal opgewekte hernieuwbare elektriciteit binnen het toepassingsgebied van de EPBD IV kan bijdragen aan het compenseren van fossiele primaire energie afkomstig van netelektriciteit.

Het voorbeeld betreft een gebouw met een jaarlijks energieverbruik van in totaal 14 500 kWh binnen het toepassingsgebied van de EPBD IV. Dit bestaat uit:
- 6 500 kWh/jaar elektriciteitsverbruik;
- 8 000 kWh/jaar warmteverbruik.

De volledige warmtevraag wordt geleverd door een efficiënt stadsverwarmingssysteem.

Daarnaast beschikt het gebouw over een lokaal PV-systeem met een jaarlijkse productie van 6 400 kWh elektriciteit. Deze productie wordt als volgt benut:
- 2 000 kWh/jaar voor EPB-gerelateerde toepassingen binnen het gebouw;
- 1 800 kWh/jaar voor niet-EPB-toepassingen binnen het gebouw;
- 2 600 kWh/jaar teruglevering aan het elektriciteitsnet.

De aanvullende elektriciteitsvraag van het gebouw wordt geleverd door netelektriciteit met de volgende energiemix:
- 27% hernieuwbare energie;
- 37% kernenergie;
- 36% fossiele brandstoffen.

Hiervoor wordt een gemiddelde primaire energiefactor (PEF) van 2,3 gehanteerd, opgebouwd uit:
- PEF = 1 voor hernieuwbare elektriciteit;
- PEF = 3 voor kernenergie;
- PEF = 2,5 voor fossiele elektriciteit.

De gemiddelde PEF wordt daarmee:
$PEFel=0.27\times1+0.37\times3+0.36\times2.5=2.3$

De resterende netvraag bedraagt 6.500 - 2.000 = 4.500 kWh/jaar. Het fossiele primaire energieverbruik bedraagt vervolgens 4.500 × 36% × 2,5 = 4.050 $kWh_p$/jaar

Tegelijkertijd bedraagt de hoeveelheid lokaal opgewekte hernieuwbare elektriciteit die:
- wordt gebruikt voor niet-EPB-toepassingen; en
- wordt teruggeleverd aan het elektriciteitsnet:

De elektriciteit die niet voor EPB-toepassingen ter plaatse wordt gebruikt, bedraagt 4.400 kWh/jaar: 1.800 kWh/jaar voor niet-EPB-toepassingen ter plaatse en 2.600 kWh/jaar teruglevering aan het elektriciteitsnet.

Hieruit volgt dat de lokaal opgewekte hernieuwbare elektriciteit die buiten de EPB-toepassingen beschikbaar komt in totaal 4.400 kWh/jaar bedraagt. Deze hoeveelheid is groter dan de 4.050 kWh/jaar fossiele primaire energie die samenhangt met de van het net afgenomen elektriciteit. Binnen de gehanteerde systematiek kan deze lokaal opgewekte hernieuwbare elektriciteit daarom worden gebruikt om de fossiele primaire energie-invoer op jaarbasis volledig te compenseren.

Dit voorbeeld laat zien hoe lokaal opgewekte hernieuwbare elektriciteit, inclusief teruglevering aan het net en gebruik voor niet-EPB-toepassingen, binnen de systematiek kan bijdragen aan het neutraliseren van fossiele primaire energie-invoer op jaarbasis.

**Energy & Materials Transition**

Princetonlaan 6
3584 CB  Utrecht
www.tno.nl

TNO innovation for life