



BIOGROWTH
DEVELOPMENT

Rapport voor Rijkswaterstaat
Opdracht Nr. 4300062804

KOOLSTOFOPSLAG IN DE KETEN VOOR HOUTACHTIGE BIOMASSA UIT HET DROGE AREAAL VAN RIJKSWATERSTAAT

**Kristiaan Tetteroo
Dries Vansteenkiste**

20 september 2021

Rapport voor Rijkswaterstaat
Opdracht Nr. 4300062804

KOOLSTOFOPSLAG IN DE KETEN VOOR HOUTACHTIGE BIOMASSA UIT HET DROGE AREAAL VAN RIJKSWATERSTAAT

Kristiaan Tetteroo
Dries Vansteenkiste

20 september 2021

BioGrowth Development B.V.

Boerenverdriet 20
4613 AK Bergen op Zoom
The Netherlands

NL +31 85 743 55 57
info@biogrowthdevelopment.com
www.biogrowthdevelopment.com

Disclaimer

- Acquisition, duplication and transmission of this publication is permitted with clear acknowledgement of the source.
- Acquisition, duplication and transmission is not permitted for commercial purposes and/or monetary gain.
- Acquisition, duplication and transmission is not permitted of any parts of this publication for which the copyrights clearly rest with other parties and/or are reserved.
- BioGrowth Development B.V assumes no liability for any losses resulting from the use of the analytical results or recommendations in this report.

INHOUD

Disclaimer.....	2
Samenvatting.....	5
Conclusies en aanbevelingen voor toekomstige opschaling van analyses m.b.t. de benutting van houtachtige biomassa.....	5
Huidige resultaten.....	5
Voordelen voor Rijkswaterstaat.....	6
Aanbevelingen voor opschaling naar nationaal niveau.....	7
1. Afbakening van de opdracht en het doel.....	8
2. Beschrijving van relevante producttoepassingen en markten voor houtachtige biomassa.....	10
2.1 Argumentatie voor te kiezen producttoepassingen voor houtachtige biomassa van Rijkswaterstaat.....	10
2.2 Focus op bouw- en chemiesector - ontwikkeling van de verwachte vraag.....	12
Definities bouw- en chemiesector.....	12
Ontwikkelingen in de bouwsector en verwachte vraag.....	12
Ontwikkelingen in de chemiesector en verwachte vraag.....	13
2.3 Prioritaire toepassingen voor houtachtige biomassa van RWS.....	14
2.4 Stimuleringseffecten voor de biobased producttoepassingen.....	15
CO ₂ prijzenstellingen.....	15
Stijgende prijzen voor hout.....	15
3. Methodologie voor het opstellen van biomassa- en C-balansen.....	16
3.1 Inleiding en achtergrond bij de opbouw van de methodologie.....	16
3.2 Beschikbaar gestelde informatie vanuit Rijkswaterstaat.....	18
3.3 Aanpak en aanvullende gegevens van BioGrowth Development.....	20
Biomassa en C-opslag op boomniveau.....	20
Biomassa en C-opslag op productniveau.....	22
4. Toepassing van de methodologie op de innovA58 inventaris.....	23
4.1 Biomassaverdeling en koolstofopslag op individueel boomniveau.....	23
4.2 Biomassaverdeling en koolstofopslag op boomsoort-, plot- en inventarisniveau.....	24
4.3 Biomassaverdeling en koolstofopslag in grondstoffen en oogstresidu's.....	25
4.4 Biomassaverdeling en koolstofopslag in producten en productiereststromen.....	26
4.5 Praktisch toepassingspotentieel op inventarisniveau: toplaag bio-asfalt.....	28
4.6 Intrinsieke waarde van innovA58 grondstoffen en koolstofopslag.....	28
5. Toekomst.....	31
Bronnenlijst.....	33
Bijlage A: InnovA58 inventaris: gegevens per deelgebied.....	34
Bijlage B: InnovA58 inventaris: gegevens voor het totale gebied.....	36
Bijlage C: Technology Readiness Levels (TRL).....	37

SAMENVATTING

Dit document presenteert de resultaten van de uitgevoerde pilot met de toolbox van BioGrowth Development BV (hierna BGD) voor geautomatiseerde gebieds- en ketenanalyse. Dit met als doel kostenbesparing en efficiëntieverhoging te realiseren voor Rijkswaterstaat. Hiervoor zijn automatisering en schaalbaarheid van dataverzameling, opslag, analyse en rapportage essentieel.

Dit document biedt een handleiding voor het interpreteren van de resultaten van een pilotstudie (project "innovA58") en de rekentools van BGD ("ROOTS"). Het geeft de onderbouwing weer van de ontwikkelde methodologie om te komen tot een beter overzicht van de bestaande resources en van het beheer en de producttoepassingen die een langjarige koolstofopslag kunnen garanderen voor Rijkswaterstaat.

Dit rapport laat Rijkswaterstaat toe om vanuit bestaande inventarisatiedata een zeer gedetailleerd inzicht te krijgen in waardenketens en het potentieel voor koolstofopslag in het areaal, alsook in grondstoffen en producten. Het rapport is een opstap naar een inventarisatie van het potentieel in het complete areaal en vormt de basis voor de bouw van een decision support tool voor beheerkosten, koolstofopslag en biomassa in het areaal, alsook voor vrijkomende producten in verschillende toepassingen.

In het rapport zijn mogelijkheden beschreven voor toekomstige opschaling en andere toepassingen voor houtachtige vegetatie en biograndstoffen in het RWS areaal. De voorgestelde aanpak en een deel van de bevindingen uit dit rapport werden op 30 september 2021 gepresenteerd voor een publiek van vertegenwoordigers van bedrijven en overheden op het event Natural Fibertastic 2021 in Bergen-op-Zoom (door Kristiaan Tetteroo in samenspraak met Jeroen Nagel).

Conclusies en aanbevelingen voor toekomstige opschaling van analyses m.b.t. de benutting van houtachtige biomassa

Huidige resultaten

Het biomassa- en koolstofopslagpotentieel is m.b.v. de BGD methodologie en onderdelen van ROOTS berekend op boomniveau, voor zes boomcompartimenten (bladeren, takken, stamhout, stamschors, stamvoet, dikke wortels) en voor een selectie van afgeleide grondstoffen (vb. stamhout, chips), biobased eindproducten (vb. bio-asfalt, OSB en zaaghout) en reststromen (vb. schors, zaagmeel).

De afgeleide inkomsten uit de (gecascadeerde) verkoop van grondstoffen en/of CO₂-certificaten zijn met realistische aannames van huidige en toekomstige marktprijzen ingeschat op boomniveau en geïntegreerd voor een gebied, per boomsoort en per ha. Dit is kwantitatief geïllustreerd met behulp van de data van de innovA58-inventaris (4.37 ha, 1568 bomen, 69 boomgroepen, 8 boomsoorten).

De gemaakte analyse is een gedetailleerde momentopname. Een deel van de boomgroepen is echter nog niet kaprijp. Door (per soort) een doeldiameter of kapleeftijd voor de oogst vast te stellen en op dezelfde manier alles te berekenen kan ook het toekomstpotentieel van een gebied ingeschat worden.

Voordelen voor Rijkswaterstaat

De gemaakte analyses kunnen in de toekomst worden gedaan voor het gehele areaal van Rijkswaterstaat en helpen bij verschillende vraagstukken over o.a. koolstofopslag, inschatting van beheerskosten en mogelijke opbrengsten uit verkoop van biogrondstoffen. Dit kan voor Rijkswaterstaat tot aanzienlijke kostenbesparingen leiden en nieuwe inkomsten via carbon credits uit de opslag van CO₂ in het areaal en/of in producten gemaakt met grondstoffen uit het eigen areaal. Een belangrijk voordeel voor Rijkswaterstaat is met name de mogelijkheid om meer gedetailleerd inzicht te krijgen in de mogelijkheden voor koolstofopslag en het beheer hierop afstemmen (o.a. via aangepaste keuze van boomsoorten en optimale kapleeftijden).

Met deze methodologie is het mogelijk op te schalen naar het complete areaal van RWS en daarnaast ook dat van andere overheden die gebieden beheren in Nederland, zoals Rijksground beheerders RVB, SBB en ProRail. Naast dat de methodologie schaalbaar is naar een landelijk niveau is het ook mogelijk om te werken met andere soorten biomassa dan houtachtige. Bij Rijkswaterstaat kan dit dan met name gaan om gras in droge en natte gebieden.

Hierdoor kan RWS in de toekomst beschikken over een landsdekkend systeem voor inventarisatie van het koolstof- en biogrondstoffenpotentieel, opgeslagen in bomen en andere gewassen, gekoppeld aan een inschatting van het potentieel voor verschillende toepassingen, met name voor bioraffinage en (hout)bouwmaterialen.

In de toekomst kan RWS mogelijk een systeem inbouwen dat werkzaamheden plant via klikmeldingen, aangestuurd door een automatische monitoring van de koolstofinventaris. Het is met name cruciaal om een accurate boekhouding te hebben voor de actuele en toekomstige status van koolstofopslag, als men wil gaan werken met certificaten voor bijvoorbeeld langdurige koolstofopslag en duurzaam bosbeheer en houtgebruik (FSC, PEFC).

Met deze methode is het mogelijk voor RWS en andere overheden om in de toekomst op boom- en landelijk niveau een goed overzicht te krijgen op:

- **Koolstofopslag in bodem, bomen en materialen voortkomende uit het areaal.**
- **Optimalisatie van beheer, inkomsten en mogelijke kostenbesparingen d.m.v. juiste timing van kaprijpe bomen, inschatting van voortkomende producten en de bijbehorende waarde.**
- **Toekomstige potentie voor biomassa uit het eigen areaal voor circulaire en biobased projecten.**

Aanbevelingen voor opschaling naar nationaal niveau

Aanbevelingen voor een opschaling naar een decision support tool voor nationaal niveau

In dit rapport is een methodologie voorgesteld voor het schatten van het potentieel van houtachtige biomassa en koolstofvastlegging in een pilotstudie (innovA58).

BGD beveelt voor RWS twee vervolgstappen aan om te komen tot een geïntegreerd nationaal systeem:



In dit tijdspad is het mogelijk om tegen 2023 te komen tot een volledig operationeel beslissingsondersteunend systeem en het completeren van de ontbrekende data. Hiermee is het mogelijk beter in te spelen op het toekomstige beheer en maximale CO₂ vastlegging in het areaal en voortkomende producten uit het areaal.

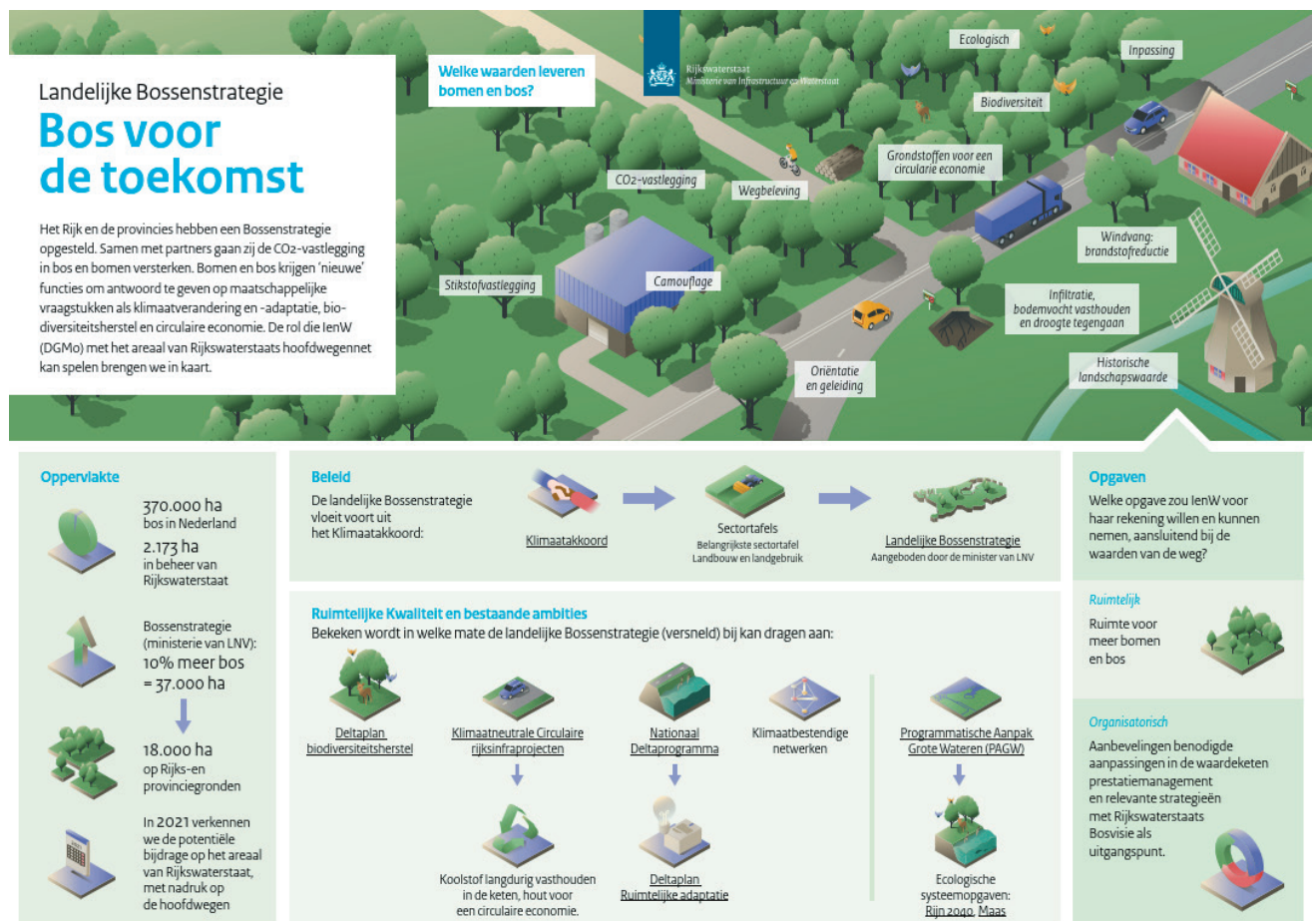
	Aanbevolen vervolgstap RWS
Fase: 1	In kaart brengen van welke functies een praktisch bruikbaar systeem voor RWS zou moeten hebben, aan de hand van de huidige en toekomstige behoeftes: type dashboard, gewenste outputs: monitoring, koolstofbank balansen, kwantificering grondstoffen en optimalisatie planning werkzaamheden.
Opbouw functionaliteiten platform	Verder vervolgstappen voorbereiden en implementeren, voor de effectieve verwaarding van koolstofopslag (via CO ₂ certificaten) en grondstoffen in het RWS areaal; validatie van data met veld-gegevens etc. (bijvoorbeeld materiaalpaspoorten voor grondstoffen).
Dashboard/ Reporting	Simulatietool voor optimalisatie van beheersvormen (data kaprijpe bomen, combinatie andere planten).

	Aanbevolen vervolgstap RWS
Fase: 2	Opschoning van bestaande data van delen van het bos, bomenrijen en individuele bomen in het droge areaal van RWS. BGD heeft hiervoor een passende oplossing voor het in kaart brengen, analyseren en completeren van ontbrekende data (zie 3.3 en 4.6).
Completeren inventarisatie data	Inventarisatie van ontbrekende data voor bos, bomenrijen en individuele bomen in het droge areaal van RWS. BGD heeft hiervoor een passende oplossing voor het in kaart brengen, analyseren en completeren van ontbrekende data (zie 3.3 en 4.6).
	Inventarisatie van andere niet-bosachtige delen (graslanden) van Rijkswaterstaat met waarde als bron van grondstoffen en reservoirs van koolstof (met name grasachtige biomassa). BGD heeft hiervoor eveneens passende oplossingen voor kartering en doorrekenen van data, volgens eenzelfde methodologie als beschreven in dit rapport.



AFBAKENING VAN HET DOEL EN DE OPDRACHT

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, DG Mobiliteit, onderzoekt een mogelijke rol in de Nationale Bossenstrategie (LNV), geïllustreerd in onderstaande infographic. Een van de onderdelen van deze verkenning is meer inzicht in de koolstofopslag die deze mogelijke bijdrage kan leveren, zowel in het areaal als bij toepassing in producten waarmee de koolstof langjarig aan de atmosfeer wordt onttrokken. Daartoe is dit project geïnitieerd.



De doelstelling van deze opdracht is een methodologie opstellen die het mogelijk maakt de koolstofopslag te berekenen in de houtachtige biomassa (nl. in bomen) binnen het bestaande areaal van Rijkswaterstaat (hierna afgekort RWS) en voor de bijbehorende ketens met producttoepassingen, a.d.h.v. de innovA58 case.

Het uiteindelijke resultaat is een opschaalbare methodologie die toelaat om vanuit bestaande (of nieuwe) inventarisatiegegevens en de meest geschikte producttoepassingen inzicht te geven in:

- Koolstofopslag in de ondergrondse boomdelen en wateropslagcapaciteit in de bodem.
- Koolstofopslag op het moment van het oogsten van houtachtige biomassa
- Koolstofopslag in materialen en gekozen producttoepassingen
- Opslagduur van koolstof in de geogoste biomassa en de verwachte levensduur in toegepaste producten.

Door middel van de opgestelde methodologie wordt het tevens mogelijk voor RWS om een objectieve inschatting te maken van de volgende zaken:

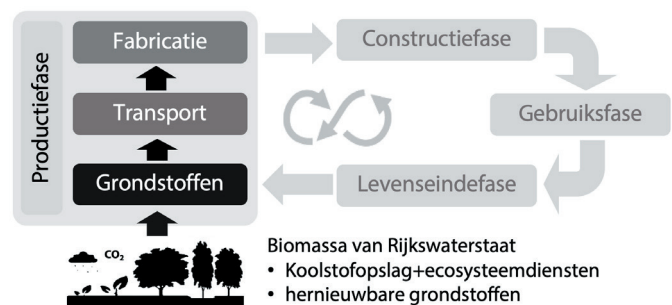
- De verwachte hoeveelheid biomassa uit eigen beheersgebieden in vorm van rondhout, houtchips en andere ruwe grondstoffen, alsook de mogelijke opbrengsten.
- De technisch mogelijke en duurzame producttoepassingen.
- Hoeveelheden van mogelijke producttoepassingen die zouden kunnen worden gebruikt in eigen interne projecten.

Binnen dit project is expliciet nog niet gekeken naar de gehele LCA van de productketens (d.w.z. geen doorrekeningen in detail per toepassing op gebied van koolstofopslag en emissies). Daarmee situeert de opdracht zich hoofdzakelijk in het eerste deel van de productiefase. Daarin kan RWS beschouwd worden als een (bos)beheerder en leverancier van primaire grondstoffen (hout, biomassa) - waarin biogene koolstof uit CO₂ is opgeslagen - die bij voorkeur in een circulair systeem gebruikt zullen worden (zie figuur 1).

De berekeningen zijn gedaan op basis van beschikbare informatie van RWS (rapporten en inventarisgegevens) en beogen een verdiepende calculatie op boomniveau in vergelijking met wat met generieke methodes eerder al is berekend voor RWS en/of Nederland (Arets 2018, Arets et al. 2020, Kupers et al. 2020, Bogaart en Lof 2021). Binnen dit project ligt de nadruk op het optuigen en illustreren van een innovatieve alternatieve methodologie en nog niet op de berekeningen voor het hele areaal van RWS. In hoofdstuk 2 wordt eerst ingegaan op de mogelijke toepassingen, de grondstoffen en de producten. De methodologie wordt in hoofdstuk 3 geïllustreerd a.d.h.v. een selectie van producttoepassingen die voor RWS relevant kunnen zijn.

Data-gedreven beslissingsondersteuning omtrent C-opslag en (eigen) grondstoffengebruik komt met deze methodologie binnen handbereik voor RWS. In deze opdracht worden enkele technische obstakels en potentiële oplossingen besproken die opschaling ervan mogelijk kunnen maken.

Figuur 1:
RWS als beheerder van het koolstofopslagpotentieel in biomassa en als leverancier van hernieuwbare grondstoffen: focus op de productiefase in een circulair systeem.





BESCHRIJVING VAN RELEVANTE PRODUCTTOEPASSINGEN EN MARKTEN VOOR HOUTACHTIGE BIOMASSA

2.1 Argumentatie voor te kiezen producttoepassingen voor houtachtige biomassa van Rijkswaterstaat

In dit hoofdstuk wordt de koppeling gemaakt tussen de beschikbare (en oogstbare) houtachtige biomassa van RWS en de mogelijke toepassingen. De voorgestelde eindtoepassingen zijn geselecteerd ter illustratie en er kan in de toekomst desgewenst ook worden gekeken naar andere toepassingen. Vanuit onderzoek en communicatie tussen RWS en BioGrowth Development (BGD) blijkt dat er voor de houtachtige biomassa van RWS vooral mogelijkheden bestaan voor toepassingen in de bouw en de chemie. Hierdoor ligt de focus in dit hoofdstuk op deze twee sectoren. RWS heeft in deze twee sectoren al verschillende projecten lopen voor plantaardige bindmiddelen in asfalt (o.a. demonstratieproject Chaplin).

Met de methodologische aanpak van BGD (ROOTS, zie Figuur 4 en paragraaf 3.3) is het mogelijk om in de toekomst circulaire concepten in te bouwen, zoals gebruik en/of hergebruik van eigen reststromen in bestaande eigen bouw- en infrastructuurprojecten, via verwerking met derden. In het Chaplin-project bijvoorbeeld zou RWS de eigen houtchips kunnen leveren aan Avantium en in vorm van lignine weer terug krijgen voor verwerking in bio-asfalt.

Voor elke biomassabron wordt er in ROOTS een cascaderingsconcept gevolgd, d.w.z. dat elke geoogste boom wordt opgedeeld in verschillende compartimenten of fracties die kunnen worden gelinkt aan verschillende toepassingen. Ook reststromen van oogst en verwerking worden zo veel mogelijk gevaloriseerd. Met een gedetailleerde massabalans van elke boom kan het verlies van houtachtige biomassa in het areaal van RWS geminimaliseerd en de verwaarding en langdurige C-opslag in producten gemaximaliseerd worden.

Tabel 1: Criteria voor beoordeling van de sectoren

Criteria beoordeling sectoren	Belangrijke aspecten voor RWS
De geschatte gemiddelde duur van CO ₂ -vastlegging	Biogene C-opslag zonder LCA aspecten
De marktsegmenten en de grootte van deze markt(en): grondstoffen en producten	Ruwe inschatting op basis van literatuurstudie
De gemiddelde prijzen van grondstoffen	Inkomsten uit verkoop van stamhout en houtchips die RWS afzet.
Trends in de markten	Marktrijpheid a.d.h.v. Technology Readiness Level (TRL)
CO ₂ prijzenstellingen	Inkomsten uit vrijwillige koolstofcertificaten, CORCs
Toepasbaarheid door RWS (relevantie)	Leverancier van grondstoffen en/of afnemer van biobased producten

Er zijn verschillende criteria gehanteerd om elke toepassing goed te kunnen benchmarken en om de gedetailleerde berekening van de biogene koolstofvastlegging per boomcompartiment, grondstof en eindproduct mogelijk te maken. Daarnaast werd ook naar de marktontwikkelingen van de verschillende producten gekeken (zie tabel 1).

Tabel 2 geeft een overzicht van verschillende toepassingen en productgroepen, met een inschatting van de marktrijpheid a.d.h.v. het Technology Readiness Level (TRL). Hierbij is een koppeling gemaakt met de boomcompartimenten die bruikbaar zijn voor de toepassingen en de soorten houtige grondstoffen die RWS kan afleveren uit het eigen areaal. In de laatste kolom wordt aangegeven welke producten eventueel zouden kunnen worden gebruikt door RWS in eigen projecten.

Tabel 2: Overzicht van producttoepassingen en sectoren gekoppeld aan de houtachtige biomassa van RWS

Product categorie	Producten / Toepassingen	Voorbeeld Product	Gebruikte boomdeel	Marktrijpheid (TRL niveau)	Relevant voor RWS
Agro & tuin	Grondverbeteraar	compost, mulch	n.v.t	9	n.v.t
Energie	Elektriciteit & warmte	houtchips	Alles	9	Ja
Pulp & papier	Drukwerk, verpakking	papier, karton	Stamhout (ook kleinere stammen)	9	n.v.t
Verpakking	Verpakkingsmateriaal	kisten, paletten	Stamhout (ook kleinere stammen)	9	n.v.t
Bouw	Composietplaatmateriaal	OSB	Stamdeel (en groter kroonhout)	8-9	Ja
Bouw	Zaaghout	CLS	Stamdeel	9	Ja
Bouw	Massieve samengestelde materialen	CLT	Stamdeel (ook kleinere)	8-9	Ja
Bouw	Vezeltoepassingen als vuller	Beton met vuller	Tak & top hout	5-8	Ja
Chemie	Lignine/cellulose via bioraffinage	bio-asfalt	Tak & top hout	4-7	Ja
Chemie	Koolstofproducten (pyrolyse)	biochar	Tak & top hout	5-8	Ja
Chemie	Adsorptieproducten	Actieve koolstof	Zuivere houtchips*	8-9	(Ja)

*Chips vrij van schors en andere onzuiverheden.

2.2 Focus op bouw- en chemiesector - ontwikkeling van de verwachte vraag

Definitie bouw- en chemiesector

Met de **chemiesector** wordt hier enkel de *primaire biobased chemie* bedoeld, als onderdeel van de gehele chemische sector. Dit omvat bedrijven die ruwe houtachtige biomassa (lignocellulose) kunnen omzetten naar chemische basisproducten. Voorbeelden hiervan zijn Avantium in Nederland, UPM en SWEETWOOD in het buitenland. Met de huidige kennis kan men uit houtachtige biomassa drie hoofdcomponenten halen, namelijk ruwe lignine, hemicellulose en cellulose, die ofwel direct kunnen gebruikt worden in een aantal toepassingen of verder kunnen worden omgezet tot andere biobased bouwstenen. Hierbij ligt de focus met name op de (gedeeltelijke) vervanging van fossiele grondstoffen (aardolieproducten) door biomassa, bijvoorbeeld lignine i.p.v. bitumen in asfalt en cellulose voor bioplastics.

Met de **bouwsector** worden *producenten van biobased bouwmaterialen* bedoeld, zoals biobased isolatie, CLT, LVL, spaan- en OSB-platen, etc., alsook de houtbouwbedrijven die van houtige biomassa hoogwaardige producten maken. Hierbij kunnen soms kruisingen ontstaan tussen bouwmaterialen van de traditionele bouwsector en biobased materialen, zoals bijvoorbeeld cement met natuurlijke vezels als vulmateriaal.

Ontwikkelingen in de bouwsector en verwachte vraag

Voor Nederland is de verwachting dat de vraag naar biobased bouwmaterialen de komende jaren flink zal stijgen. Dit heeft met name te maken met de enorme vraag naar nieuwe, duurzaam gebouwde woningen en met het feit dat de klassieke bouw zorgt voor enorm veel schadelijke uitstoot (bron). Hierdoor is het zeer voor de hand liggend om in de toekomst steeds meer te kiezen – al dan niet via opgelegde regels door de overheid - voor biobased bouwmaterialen met een lagere milieu-impact, met name op vlak van uitstoot van broeikasgassen. Bouwen met hout kan zelfs leiden tot negatieve emissies, omdat er bijvoorbeeld meer CO₂ wordt opgeslagen dan dat er uitgestoten wordt, zeker omdat zo enorme emissies verbonden aan het bouwen met beton en staal vermeden kunnen worden (De Circulaire Bouweconomie 2021).

Verskillende rapporten (o.a. Ruimte voor Biobased Bouwen Strategische Verkenning, 2020) melden dat in het afgelopen decennium (2010-2020) een gestage groei is te zien in het gebruik van biobased materialen voor de bouw, zoals o.a. kruisgelaagd hout (CLT). In 2010 bedroeg de CLT-productie slechts 60.000 m³ en in 2020 is dit gestegen tot ongeveer 1,5 miljoen m³. (Bron: Timber-Online estimation - TimberOnline 2017). Er wordt een sterke groei verwacht van het gebruik van rondhout tegen 2030. De hoeveelheden verschillen echter behoorlijk per rapport, maar aangenomen kan worden dat er sowieso een groeiende vraag zal komen (bron: Actieplan Bos en Hout, 2016). Gezien Nederland voor het gebruikte hout grotendeels afhankelijk is van import is er in de toekomst mogelijk een rol weggelegd voor RWS om lokaal meer bouwhout af te zetten.

Een andere belangrijke evolutie in de Bouw - en dit wordt een toekomstige randvoorwaarde - is het streven naar circulaire systemen. Bouwmaterialen en constructies worden toenemend ontworpen zodat de producten erin kunnen worden hergebruikt of tot individuele grondstoffen teruggebracht

Ontwikkelingen in de chemiesector en verwachte vraag

De komende 10 jaar is de verwachting dat de vraag naar biobased producten gestaag zal groeien. Een voorbeeld is o.a. de productie van lignine voortkomende uit zogenaamd bioraffineren. De verwachte groei hiervoor zal tot 2030 op ongeveer 10% liggen ten opzichte van de huidige situatie in 2021 (bron: Potentie biobased materialen in de bouw, 2019). Dit is weliswaar nog lang niet wat nodig is om alle fossiele producten te vervangen, zoals bijvoorbeeld bitumen in asfalt, maar geeft wel weer dat de (biobased) chemische sector langzaam in beweging komt. Vanuit VNCI is ten doel gesteld om in 2030 minstens 30% biomassa als basisgrondstof te gebruiken in de chemie. De reden is dat de chemiesector in Nederland naast de energiesector tot de grootste uitstoters van CO₂ behoort (bron: Inventarisatie BioBased Economy in de Nederlandse chemie, 2013). Echter is niet precies duidelijk om welke soort biomassa het zal gaan; wel is er tot doel gesteld om zich meer te richten op gebruik van biomassa die niet ten koste gaat van voedselproductie. Hierin vormen o.a. houtchips vanuit een gecascadeerd principe een mogelijke duurzame bron voor de chemie. Mede hierdoor heeft Avantium haar technologie speciaal gericht op deze hernieuwbare grondstof. Vanuit het rapport EU Biorefinery Outlook to 2030 wordt een groei voorspeld tussen de 3-9% per jaar. Dit betekent dat de vraag naar biomassa sowieso zal stijgen in de komende jaren. Men ziet met name een grote stijging voor de zogenaamde "pathway E: C5 sugars, C6 sugars and lignin - biorefinery using lignocellulosic biomass". De verwachte totale productie zal liggen tussen 1.5 en 2.8 miljoen ton per jaar voor dit type van bioraffinageprocessen (Biorefinery Outlook, 2021).

Deze groep bioraffinaderijen zal vooral gebruik maken van lignocellulose biomassa zoals houtchips, stro of grassoorten. Voor de beschikbare grondstoffen in het areaal van RWS biedt dit zeker kansen voor de toekomst, mits een objectieve afweging kan gemaakt worden van het duurzame gebruik en de mogelijke impact op de koolstofbalans.

2.3 Prioritaire toepassingen voor houtachtige biomassa van RWS

In tabel 3 worden de verwachte marktontwikkelingen en de toetsingen van de criteria weergegeven die zijn gebruikt om de meest relevante toepassingen en producten te selecteren, enerzijds langdurige koolstofvastlegging en anderzijds de verwachte vraag voor de toekomst. Door al deze factoren te verbinden is het goed mogelijk om voor het beheer te sturen op langdurige koolstofvastlegging en te weten in welke richting de markt zich ontwikkelt voor houtachtige biomassa.

Tabel 3: Producten en verwachte marktontwikkeling versus koolstofvastlegging in de producten.

Voorbeeld Product	Productwaarde	Gemiddelde CO ₂ vastlegging levensduur	Primaire circulaire eigenschappen	Huidige omvang markten	Verwachte vraag markten 2030
compost, mulch	laag	0-1 jaar	biodegradeerbaar	zeer groot	stabiel
elektriciteit, warmte	Laag	0 jaar	hernieuwbare energie	zeer groot	onzeker
papier, karton	laag tot medium	1-2 jaar	recyclebaar	zeer groot	stabiel
kisten, palletten	laag tot medium	2-3 jaar	recyclebaar, herbruikbaar	medium	stabiel
OSB	medium tot hoog	25-50 jaar	recyclebaar, herbruikbaar	groot	stabiel of meer
CLS	medium tot hoog	25 -50 jaar	recyclebaar, herbruikbaar	groot	groeimarkt
CLT	hoog	25 -50 jaar	recyclebaar, herbruikbaar	groot	minder of stabiel
lignine/cellulose	zeer hoog	5-50 jaar*	(recyclebaar? herbruikbaar?)	klein	groeimarkt
biochar	hoog	5-100 jaar*	biodegradeerbaar	klein	groeimarkt
actieve koolstof	zeer hoog	1-5 jaar	recyclebaar	medium	groeimarkt

*Afhankelijk van de omstandigheden in het gebruik kan de opslagduur van CO₂ zeer sterk verschillen.

2.4 Stimulerings-effecten voor de biobased producttoepassingen

De vastlegging van koolstof wordt met name gezien als een mogelijk toekomstig instrument om biobased toepassingen te stimuleren. Ook de wereldwijde vraag naar hout is een belangrijke graadmeter voor biobased ontwikkelingen. Beide factoren zijn van belang voor RWS voor de toekomstige afzet van houtachtige biomassa en kunnen deels fungeren als stimulerings-effect om verschillen tussen fossiele en biobased alternatieven te overbruggen.

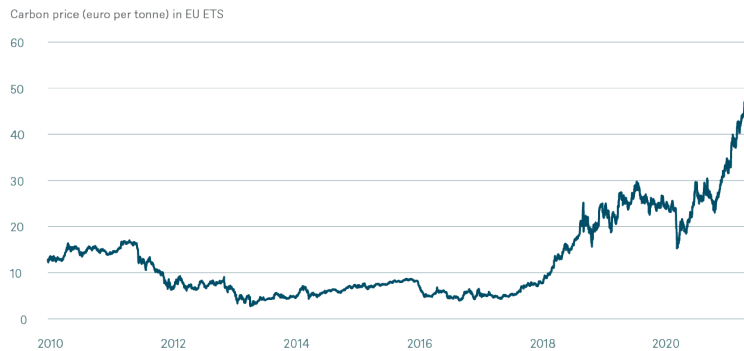
CO₂ prijzenstellingen

Door allerlei ontwikkelingen is in de afgelopen jaren er een omvangrijke markt ontstaan voor het langdurig vastleggen van CO₂. Dit geeft voor RWS twee mogelijke kansen, namelijk het vastleggen van CO₂ enerzijds in de biomassa en bodems en anderzijds in biobased producten waarin langdurig koolstof wordt vastgelegd (tot 30 jaar en langer afhankelijk van de toepassing). Als de trend zich verderzet is de verwachting dat de prijs van koolstofcertificaten de komende jaren verder zullen stijgen tot ca. 100 euro per ton C of nog veel hoger, zoals afgebeeld voor het EU ETS systeem in figuur 2.

Om in de toekomst mogelijk gebruik te kunnen maken van financiering via langdurige koolstofvastlegging is het uitermate belangrijk om gedetailleerd het potentieel in kaart te brengen voor mogelijke koolstofopslag. De mogelijkheden voor financiering via koolstofvastlegging worden in het laatste deel van het rapport besproken.

Figuur 2:

Evolutie van de koolstofprijs in euro per ton sedert 2010 (Bron: Bloomberg Finance L.P. and DWS Investment GmbH as of 5/10/21).



Stijgende prijzen voor hout

In het afgelopen decennia zijn de prijzen voor hout wereldwijd gestaag gestegen. Dit is niet alleen het gevolg van de covid19-pandemie en de verstoorde toeleveringsketens. De stijgende prijzen na de subprime crisis komen vooral doordat er wereldwijd steeds meer vraag is naar hout voor het bouwen van woningen, en door de lage rentes van de afgelopen jaren is het zeer aantrekkelijk geworden om te investeren in woningen en dus ook in houten bouwmaterialen. Nederland maakt tot heden vooral gebruik van geïmporteerd hout maar zou meer gebruik kunnen maken van lokaal gewonnen hout. De jaarlijkse bijgroei in Nederland is vele malen hoger dan de huidige vraag naar hout, ook al zou Nederland grotendeels gebruik maken van haar eigen voorraad (Nabuurs, 2021). Voor RWS biedt dit mogelijk ook kansen om hun houtvoorraden beter af te zetten, mits de kwaliteit voldoende is voor de vraag van de markt.

Figuur 3:

Procentuele evolutie van de houtprijzen in de periode 2008-2021, afgemeten aan de MSCI Global Timber ETF (Bron: www.etftrends.com. Record setting lumber prices lift timber etfs, 2021).





METHODOLOGIE VOOR HET OPSTELLEN VAN BIOMASSA- EN C-BALANSEN

3.1 Inleiding en achtergrond bij de opbouw van de methodologie

Om de vragen van RWS te kunnen beantwoorden betreffende de potentie voor koolstofopslag en voor gebruik van hun houtachtige biomassa in verschillende biobased toepassingen is een schaalbare methodologie ontworpen door BioGrowth Development BV (hierna afgekort BGD). Via gerichte dataverzameling en -analyse op maat wordt een objectieve afweging van verschillende producttoepassingen bekomen vanuit de momenteel beschikbare data over houtachtige biomassa in de beheersgebieden van RWS. In dit en volgend hoofdstuk wordt aan de hand van de InnovA58 dataset (een boominventaris van ca. 4,37 ha) gedemonstreerd hoe de methodologie in de praktijk gebruikt en uiteindelijk opgeschaald kan worden voor meer gedetailleerde analyses van het hele areaal van RWS en voor de (circulaire) verwerkingsketen. De algemene workflow die in de methodologie wordt gevolgd is samengevat in figuur 4.

Het resultaat is een overzicht van de potentie van ruwe grondstoffen op boom(groep)niveau, voor relevante materiaaltoepassingen van RWS, in vorm van duurzame afzetmogelijkheden, bijvoorbeeld:

- Volume rondhout voor zaaghout in m³.
- Volume houtchips vanuit tak- en tophout, in m³.
- Massa koolstof (of CO₂) opgeslagen in de boom en in verschillende bovengrondse en ondergrondse boomcompartimenten, op het moment van de kap, in kg.
- Het toekomstige potentieel van bovenstaande parameters indien nog gewacht wordt met de kap.

De onderzochte niveaus in de bomen en in de verschillende stappen in de primaire verwerkingsketen (productiefase, cf. figuur 1) staan samengevat in tabel 4.

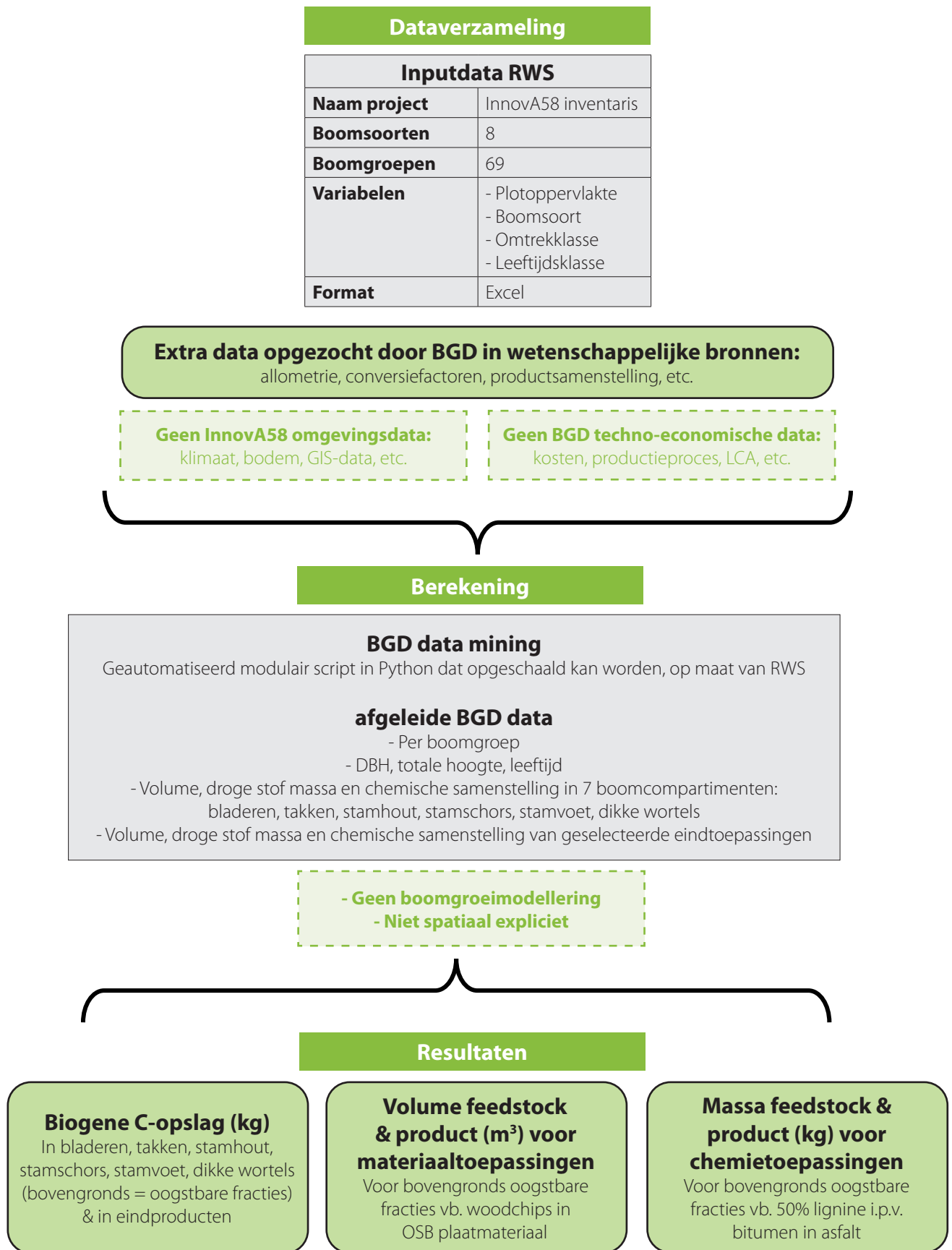
Tabel 4: Beschouwde biomassacomponenten en reservoirs van koolstof op het niveau van bomen, grondstoffen en producten

boomcomponent in het bos	geogoste fractie	oogstresidu's (in bos)	ruwe grondstof	toepassing
bladeren				
takken*	dikke takken*, ¹	fijne takken, schors	chips*	bio-asfalt
stamhout	stammen*, ¹	zaagmeel, valkerf	dun rondhout*, ¹	OSB
stamschors		schors	dik rondhout*, ¹	zaaghout
stamvoet				
dikke wortels				

* met schors

¹ minimale aftopdiameter 10 cm

Het potentieel van de grasachtige en andere types biomassa is niet onderzocht maar zou met dezelfde methodologie van BGD (ROOTS) geanalyseerd kunnen worden.

**Figuur 4:**

Afbakening en algemene workflow in de BGD methodologie: inputgegevens, geautomatiseerde dataverwerking en output van resultaten.

Tabel 5:

Boomsoorten en aantallen per soort in de InnovA58 inventaris in Excel aangeleverd (BGD analyse).

Boomsoort	Latijnse naam	Aantal bomen	Aandeel
Zomereik	<i>Quercus robur</i>	638	40,7%
Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	475	30,3%
Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	327	20,9%
Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	79	5,0%
Hulst	<i>Ilex aquifolium</i>	26	1,7%
Zilverden	<i>Abies alba</i>	11	0,7%
Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	10	0,6%
Tamme kastanje	<i>Castanea sativa</i>	2	0,1%
	Totaal	1.568	100,0%

3.2 Beschikbaar gestelde informatie vanuit Rijkswaterstaat

RWS stelde voor deze opdracht inventarisatiegegevens ter beschikking van het InnovA58 project in een Excelbestand: *Bomeninventarisatie ISKA58 Wiegert Steen ecoloog.xlsx* (zie tabellen in bijlage A en B). Deze inventaris bevat gegevens van de aantallen bomen, de omtrekklassse en de leeftijdsklasse van 8 boomsoorten verspreid over zes vlakken (aanplantingen in boomgroepen of in bosverband met een totale oppervlakte van 4,37 ha). De inventaris bevat gegevens van 69 boomgroepen (1568 bomen) met gemiddelde leeftijd variërend van 5 tot 50+ jaar en ingedeeld volgens omtrekklassen van 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-120 cm, 120-150 cm en 150+ cm. Van de ruw geschatte omtrekgegevens werd door BGD een gemiddelde stamdiameter afgeleid die als basis dient voor verdere berekeningen (zie 3.3).

Er kan besloten worden dat Zomereik (*Quercus robur*), Grove den (*Pinus sylvestris*) en Berk (*Betula pendula*) de hoofdboomsoorten vertegenwoordigen in de inventaris, met respectievelijk 41%, 30% en 21% van het totale aantal bomen. Ook Amerikaanse eik (*Quercus rubra*) is relatief sterk vertegenwoordigd (zie tabel 1).

RWS stelde tevens een aantal rapporten met inventarisgegevens en nuttige informatie ter beschikking voor het opstellen van de methodologie. Bogaart en Lof (2021) maakten in het CBS rapport over de "koolstofnulmeting" een inventaris op van de meest voorkomende boomsoorten en hun spreiding over de verschillende types boomaanplantingen onder RWS beheer:

- Puntelementen: 141.751 individuele bomen.
- Lijnvormige elementen: 457,1 km met in totaal 45.706 gerepertorieerde bomen.
- Vlakken met bosbestanden: 2348,1 ha.

Daarin komen vooral Zomereik en Populier naar voor met belangrijke aandelen in de inventaris van lijnaanplantingen en de individuele bomenlijst (puntvormige elementen). Een groot deel van de bomen in het areaal zijn evenwel niet geïdentificeerd, d.w.z. de soort is "onbekend", (bijvoorbeeld van 57% van de bomen in de lijnvormige aanplantingen is de soort niet bekend).

De gegevens van de InnovA58 inventaris kunnen als relatief representatief voor het RWS bosareaal worden beschouwd, met uitzondering van Populier die afwezig is in de InnovA58 inventaris. Populier komt vaker voor in lijnvormige elementen. Het is een snelle groeier die jaarlijks relatief veel meer koolstof kan vastleggen in het boomlichaam dan trager groeiende soorten zoals Zomereik (16.14 kg respectievelijk 3.34 kg koolstof per boom per jaar volgens Bogaart en Lof, 2021 – zie tabel 6). Snelle groeiers hebben dus doorgaans een hogere jaarlijkse opslagcapaciteit voor koolstof. Merken we op dat het C-opslagpotentieel van verschillende soorten en van onbekende soorten in Bogaart en Lof (2021) op eenzelfde gemiddelde niveau wordt geschat: 9.29 kg C per jaar. De cijfers zijn gemiddelden; er wordt geen onderscheid gemaakt volgens boomleeftijd.

Boomsoort	kg C/boom/jaar
Populier	16,14
Beuk	5,08
Es	4,10
Esdoorn	4,03
Zomereik	3,34
Els	1,99
Wilg	9,29
Iep	9,29
Linde	9,29
Overig	9,29
Onbekend	9,29

Tabel 6:

Potentieel voor C-opslag van verschillende boomsoorten (in lijnaanplantingen, Bogaart en Lof 2021).

Tabel 7:

Bosoppervlakte en jaarlijkse koolstofopslag in vlakke elementen van het RWS areaal (afgeleid uit Bogaart en Lof, 2021)

	oppervlak (ha)	koolstofvastlegging (ton C/ha/jaar)		
		laag	midden	hoog
loofbos (prod.)	2000,2	1,80	3,20	4,60
gemengd bos	173,0	1,40	2,00	2,60
naaldbos (prod.)	149,6	0,50	1,35	2,20
loofbos (nat.)	25,4	1,70	2,45	3,20
totaal	2348,1	1,69	2,99	4,28

Het totale bosareaal van RWS beslaat een oppervlakte van 2.348,1 hectare. Op basis van de generieke cijfers van Bogaart en Lof (2021) over de geschatte jaarlijkse koolstofvastlegging in bossen onder RWS beheer komt het potentieel omgerekend op 1,69, 2,99 en 4,28 ton C per ha per jaar in bosgebieden met respectievelijk laag, middelmatig en hoog opslagpotentieel (Tabel 7).

De in tabellen 6 en 7 gerapporteerde gemiddelde cijfers over koolstofopslag zijn richtinggevend om deze aan de ROOTS berekeningen te toetsen. Er dient echter rekening worden gehouden met het feit dat koolstofopslag in bomen sterk kan variëren met de boomleeftijd en met omgevingsfactoren die een invloed hebben op de boomgroei (met name klimaat en bodem). De nulmeting laat een ruwe inschatting van de totale potentie in het hele areaal toe maar ze houdt geen rekening met de relatie tussen boomsoorten, de koolstofopslag en de materiaaltoepassingen. De InnovA58 inventaris volstaat om de voorgestelde, meer gedetailleerde methodologie voor RWS op punt te stellen en de toepassing ervan te illustreren.

3.3 Aanpak en aanvullende gegevens van BioGrowth Development

Het BGD concept (ROOTS) vertrekt van een inschatting van plantengroei a.d.h.v. ecofysiologisch procesmodel waarvoor soortspecifieke, GIS- en klimaatdata gebruikt worden, en de berekening van een massabalans van de oogstbare grondstoffen en de ermee gemaakte tussen- of eindproducten. Een tijdsafhankelijke groeimodel-lering en een volledige ketenanalyse m.b.v. GIS is echter niet het doel van deze opdracht.

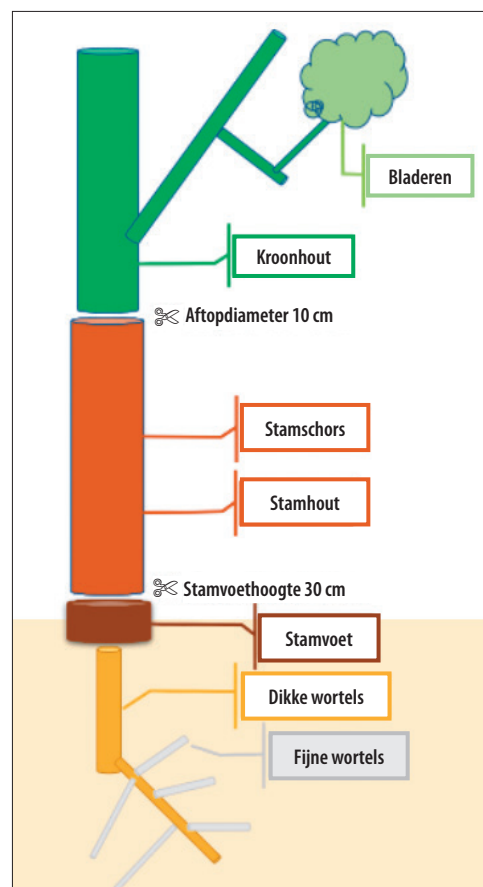
Biomassa en C-opslag op boomniveau

Een klassieke methode voor inschatting van het groeipotentieel a.d.h.v. in de wetenschappelijke literatuur gepubliceerde allometrische modellen is gebruikt om de methodologie globaal te illustreren. Dergelijke groeirelaties en opbrengsttabellen werden voor een reeks van representatieve loof- en naaldboomsoorten, die groeien in bosverband, in lijnaanplantingen of als vrijstaande bomen (zie o.a. Jansen en Oosterbaan 2018, McPherson et al. 2016, Jenkins et al. 2004), opgenomen in een aangepaste BGD database die vanuit een op maat geschreven Python-script geautomatiseerd bevroegd kan worden.

Vertrekkende van de uit de inventaris berekende diameter op borsthoogte (DBH) kon zo op boomniveau de totale biomassa (in kg), de totale hoogte (in m), de leeftijd (in jaar) en de verdeling van de biomassa over zes verschillende boomcompartimenten (in %) geschat worden (figuren 4 en 5). Deze aanpak volstaat om de methodologie uit de doeken te doen, maar ze zou verder verfijnd moeten worden voor opschaling. Inventarisgegevens zoals die van het InnovA58 project zijn nl. niet beschikbaar voor het hele RWS areaal en ze geven ook geen concrete informatie over de kwaliteit van de bomen en de biomassa. BGD onderscheidt hiervoor enkele potentieel waardevolle informatiebronnen die een toekomstige (geautomatiseerde) extractie van boomkarakteristieken zoals positie, hoogte, diameter, soort, etc., en dus een meer precieze boom- en bosinventarisatie mogelijk kunnen maken. Dit is publiek beschikbare GIS- en beeldinformatie (vb. KernGis Groenbeheer, AHN, Google Streetview, etc.) die gecombineerd met groeiproces-modellering (ROOTS) en nieuwe technologie zoals LIDAR en spectrale scans (vb. NDVI) krachtige mogelijkheden biedt voor boomidentificatie en meer precieze inschatting van de totale biomassaverdeling (zie figuren 16 en 17 in hoofdstuk 4). Bovendien kan ROOTS de evolutie van de C-vastlegging in de tijd en de invloed van klimaat en bodem berekenen.

Figuur 5:

Schematische verdeling van de biomassa in zes boomcompartimenten (bron: BGD).



Er worden zes boomcompartimenten onderscheiden in de BGD berekeningen (zie figuur 5):

- 1) Bladeren (of naalden)
- 2) Takken en tophout
- 3) Stamschors
- 4) Stamhout
- 5) Stamvoet
- 6) Dikke wortels

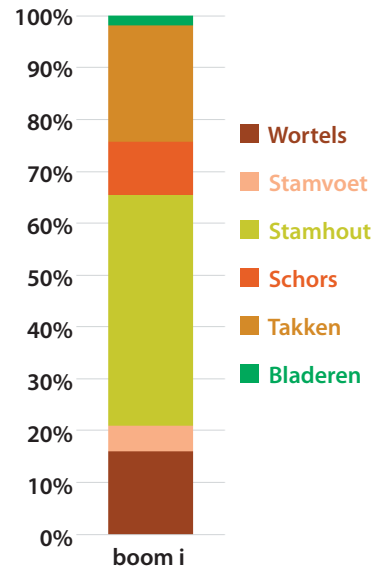
De massa van de stamvoet is de som van de massa's van de schors en van het hout in de stamvoet, die net als voor de stam apart berekend worden. De massa van fijne wortels werd niet geschat. Aftopdiameter van de stam en hoogte van de stamvoet zijn vrij te kiezen. Er werd voor de opdracht aangenomen dat het commerciële stamgedeelte afgekort wordt bij 10 cm puntdiameter en dat de stamvoet bij de oogst afgezet wordt op een hoogte van 30 cm. Deze parameters zijn aanpasbaar aan de inventarisatiemethoden van RWS.

Het resultaat van zo'n berekening van de biomassaverdeling op boom(groep)niveau is afgebeeld in figuur 6.

Voor de omrekening van de massa in elk compartiment naar een massief volume (vb. m³ rondhout), een bulk volume (vb. m³ houtchips) of een productvolume (vb. m³ OSB plaatmateriaal) werd gebruik gemaakt van een soortspecifieke dataset met volumieke massa's van hout, schors, takken en wortels (in kg/m³) en standaard conversiefactoren van houtproducten gepubliceerd in FAO, ITTO & UN (2020).

Voor de inschatting van de opgeslagen hoeveelheid koolstof (biogene C-opslag) in de verschillende boomcompartimenten en in eindproducten werd een BGD database gecompileerd met gegevens uit wetenschappelijke publicaties (o.a. Thomas en Martin (2012)). De aldus bekomen gemiddelde waarden en spreidingen van het C-gehalte in hout, schors, bladeren en wortels van loofhout en naaldhout worden weergegeven in figuur 8. Algemeen kan gesteld worden dat het C-gehalte in naaldhout gemiddeld 2 à 3% hoger ligt dan in loofhout (respectievelijk 50,5% en 48,0%).

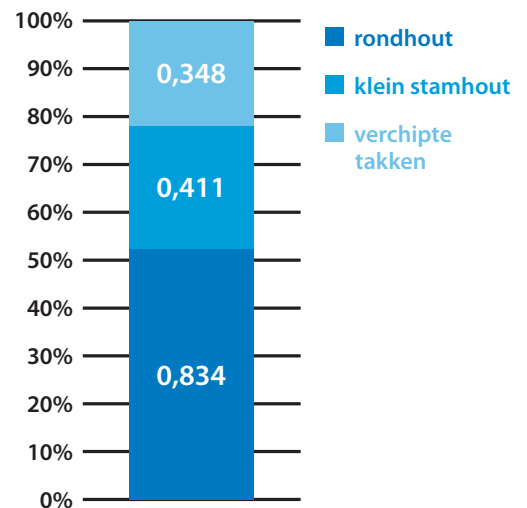
Biomassaverdeling (massa %)



Figuur 6:

Cumulatieve verdeling van de biomassa in een boomlichaam volgens zes compartimenten (BGD analyse).

Houtgrondstoffen (ton C)

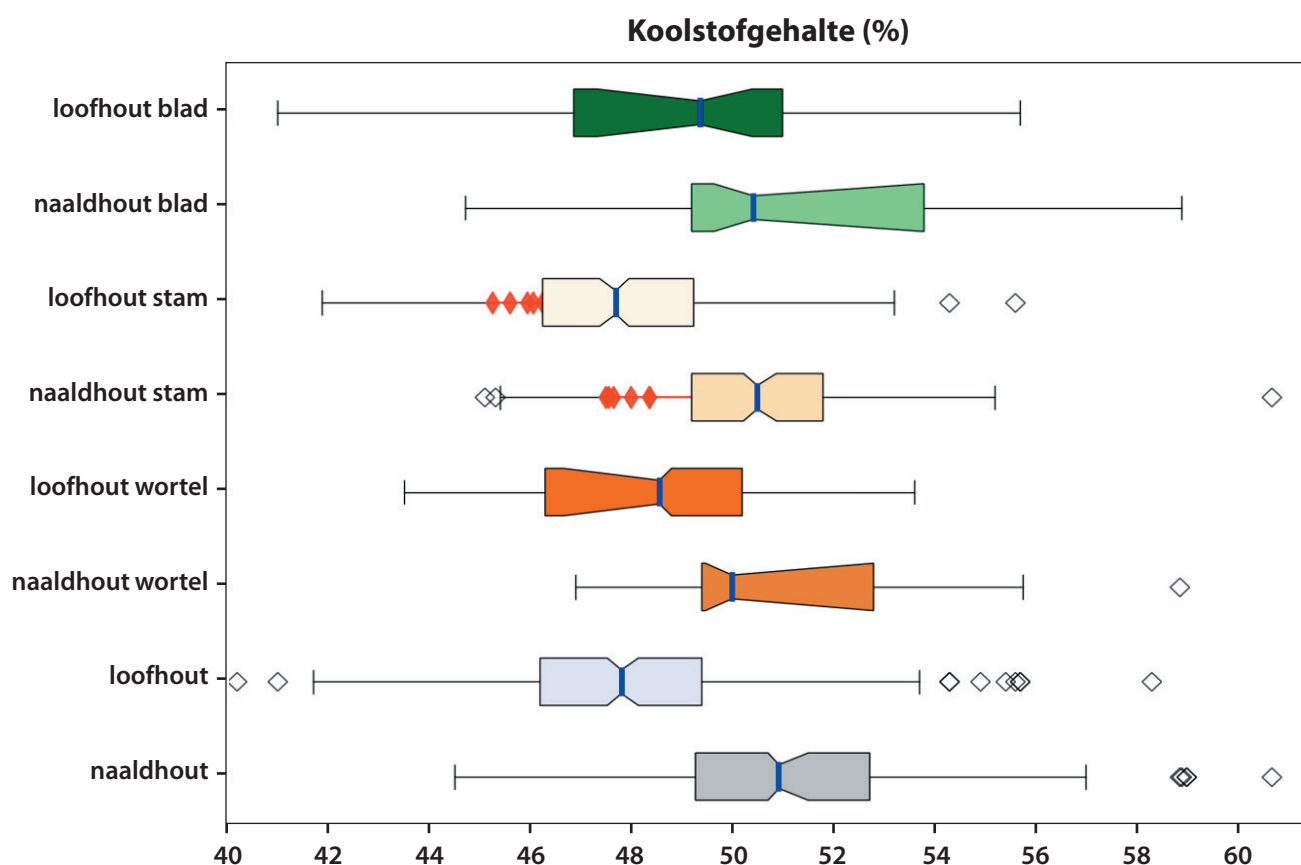


Figuur 7:

Schematische verdeling van de biomassa in zes boomcompartimenten (bron: BGD).

Biomassa en C-opslag op productniveau

Eens de biomassahoeveelheden (in ton droge stof) en de opgeslagen C-equivalenten berekend zijn kunnen de hoeveelheden grondstoffen geogst op boomniveau becijferd worden (figuur 7). Die bestaan enerzijds uit rondhout van grote en kleine dimensies gewonnen uit de boomstam (met schors) en anderzijds uit gehakselde biomassa (schors- en/of houtchips van tophout en grote takken). Daarbij wordt aangenomen dat bij de oogst ook een deel residu's ontstaan die ter plaatse blijven (d.w.z. niet geëxporteerd worden). Er werden "verliesfactoren" in rekening gebracht om de netto hoeveelheid geëxporteerde biomassa te kunnen becijferen. Wortels, stamvoet, een deel fijne takken en schors blijven aldus in de koolstofpool in het bos.



Figuur 8:

Gemiddelde en spreiding van het C-gehalte in verschillende boomcompartimenten van naaldhout en loofhout (N=1391 - afgeleid van Thomas & Martin 2012). Rode markers: C-analyse van Sass-Klaassen et al. 2018).

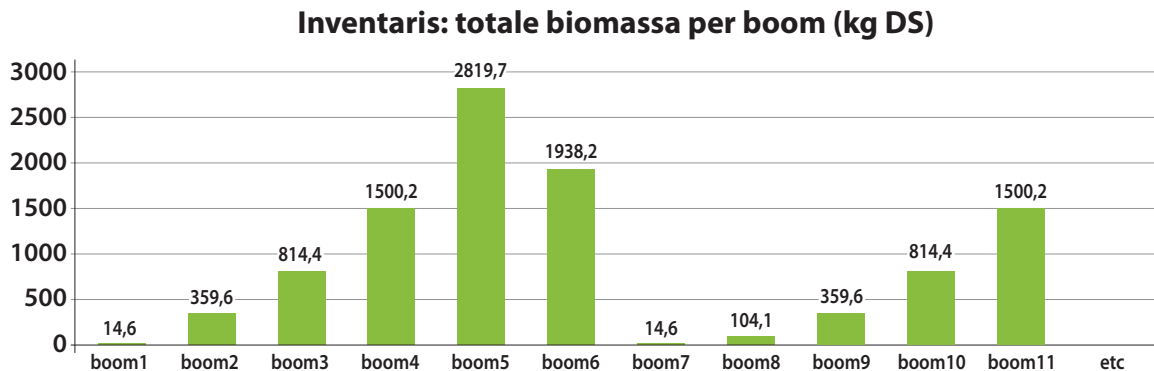
De geogste grondstoffen worden gebruikt in klassieke houtproducten en innovatieve biobased producten, zoals beschreven in hoofdstuk 2. Hiervoor werd informatie opgezocht over de samenstelling (vb. percentage lignine in hout, schors, wortels, etc.) en de conversierendementen (ratio input grondstof / product output), rekening houdend met de boomsoort of soortengroep. Sommige parameters zijn sterk leeftijd- en soortafhankelijk omwille van hun impact op de boomvorm. Het vergt extra data en analyse om deze verfijning in te bouwen in de berekeningen. In de berekeningen op productniveau werd de hoeveelheid benodigde grondstof, de grondstofkost of -waarde, de hoeveelheid reststromen en het potentieel voor biogene C-opslag becijferd op boom(groep)niveau.

Uiteindelijk leidt dit tot een gedetailleerd overzicht van de massabalansen van elke boom(groep) uit de geautomatiseerde analyse.



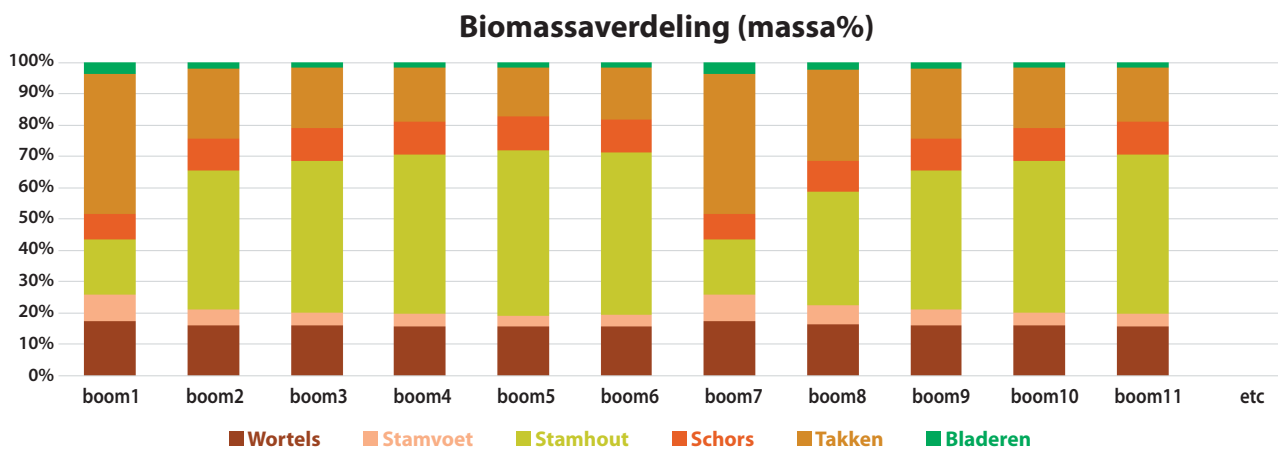
TOEPASSING VAN DE METHODOLOGIE OP DE INNOVA58 INVENTARIS

In dit hoofdstuk wordt de ROOTS analyse van de massabalansen toegepast op de bomengroepen in de innovA58 inventaris. In opeenvolgende stappen worden de massabalansen van droge stof en biogene koolstof gepresenteerd, op de volgende niveaus: individuele boom, boomgroep, boomsoort, plot, grondstof en product.



Figuur 9:

Huidige massa droge stof (in kg) geaccumuleerd op boomniveau in de bovengrondse en de ondergrondse compartimenten van 1568 bomen (hier voor de eerste 11 bomen in de innovA58 inventaris).



Figuur 10:

Procentuele verdeling (massa%) van de droge stof op boomniveau in zes compartimenten van 1568 bomen (hier getoond voor de eerste 11 bomen in de innovA58 inventaris).

4.1 Biomassaverdeling en koolstofopslag op individueel boomniveau

In figuur 9 en 10 staan respectievelijk de totale boombiomassa (in kg droge stof = kg DS) en de procentuele verdeling (massa%) ervan binnen de zes onderscheiden compartimenten van individuele bomen afgebeeld.

In de 69 bomengroepen (1568 bomen) varieert de massa droge stof van individuele bomen van 8,1 tot 2819,7 kg (gemiddeld 596,8 kg).

De opgeslagen massa koolstof varieert van 4,66 kg tot 1395,9 kg (gemiddeld 311,3 kg). In tabel 8 zijn de detailcijfers te lezen van de massa droge stof (DS in kg) en massa koolstof (C in kg) geaccumuleerd op boomniveau in deze zes compartimenten (hier telkens afgebeeld voor de eerste 11 bomen in de innovA58 inventaris).

4.2 Biomassaverdeling en koolstofopslag op boomsoort-, plot- en inventarisniveau

Rekening houdend met de verdeling van de bomen over de zes geïnventariseerde vlakken ("plots") kan de totale massa DS (in ton) per plot berekend worden (figuur 11). Deze cijfers kunnen later gebruikt worden om de massabalansen per hectare te schatten. Het grootste inventarisvlak (plot 5, 3,62 ha) bevat ca. 502 ton DS en de kleinste voorraad is opgeslagen in plot 1 (6 ton op 0,14 ha). In alle plots samen (4,37 ha) is de totale biomassa voorraad 678,8 ton DS (331,6 ton C).

De totale biomassa kan ook berekend worden per boomsoort in de inventaris (zie aantallen bomen van elke soort in tabel 5). Met 289,4 ton DS (150,4 ton C) vertegenwoordigt Zomereik de grootste biomassa voorraad in de innovA58 inventaris, nauw gevolgd door Grove den met in totaal 220,6 ton DS en 120,4 ton C (figuur 12). Met een ROOTS dashboard kunnen de cijfers van de massabalansen van elke boomgroep apart opgevraagd worden (keuze boomgroep 1 tot 69). De resultaten kunnen worden gevisualiseerd in tabellen en grafieken, zoals afgebeeld in figuur 13 voor boomgroep 69.

Tabel 8:

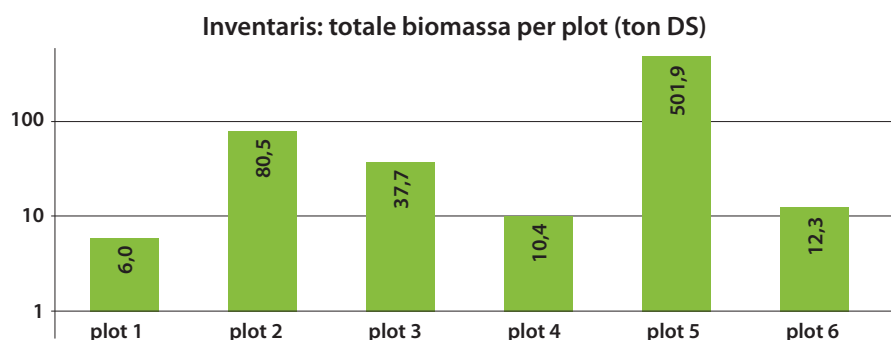
Massa droge stof (DS in kg) en massa koolstof (C in kg) geaccumuleerd op boomniveau in de bovengrondse en de ondergrondse compartimenten van 1568 bomen (hier afgebeeld voor de eerste 11 bomen in de innovA58 inventaris).

Massa DS [kg]	boom1	boom2	boom3	boom4	boom5	boom6	boom7	boom8	boom9	boom10	boom11	etc
Blad	0,5	6,5	13,8	24,5	44,6	31,2	0,5	2,2	6,5	13,8	24,5	...
Takken	6,5	80,8	155,5	256,9	436,8	318,2	6,5	30,6	80,8	155,5	256,9	...
Stamhout	2,6	159,8	394,8	763,4	1.492,1	1.003,3	2,6	37,7	159,8	394,8	763,4	...
Schors	1,2	37,1	86,0	160,6	305,1	208,4	1,2	10,2	37,1	86,0	160,6	...
Stamvoet	1,3	17,8	34,9	57,6	96,9	71,2	1,3	6,4	17,8	34,9	57,6	...
Wortels	2,5	57,6	129,4	237,2	444,3	306,0	2,5	17,0	57,6	129,4	237,2	...
Totaal	14,6	359,6	814,4	1.500,2	2.819,7	1.938,2	14,6	104,1	359,6	814,4	1.500,2	...

Massa C [kg]	boom1	boom2	boom3	boom4	boom5	boom6	boom7	boom8	boom9	boom10	boom11	etc
Blad	0,3	3,2	6,7	11,9	21,8	15,2	0,3	1,1	3,2	6,7	11,9	...
Takken	3,1	38,5	74,2	122,5	208,3	151,8	3,1	14,6	38,5	74,2	122,5	...
Stamhout	1,2	76,2	188,3	364,1	711,7	478,6	1,2	18,0	76,2	188,3	364,1	...
Schors	0,6	18,1	42,0	78,4	148,9	101,7	0,6	5,0	18,1	42,0	78,4	...
Stamvoet	0,6	8,5	16,6	27,5	46,2	34,0	0,6	3,1	8,5	16,6	27,5	...
Wortels	1,2	28,0	62,8	115,2	215,8	148,6	1,2	8,3	28,0	62,8	115,2	...
Totaal	7,0	172,5	390,7	719,7	1.352,7	929,8	7,0	49,9	172,5	390,7	719,7	...

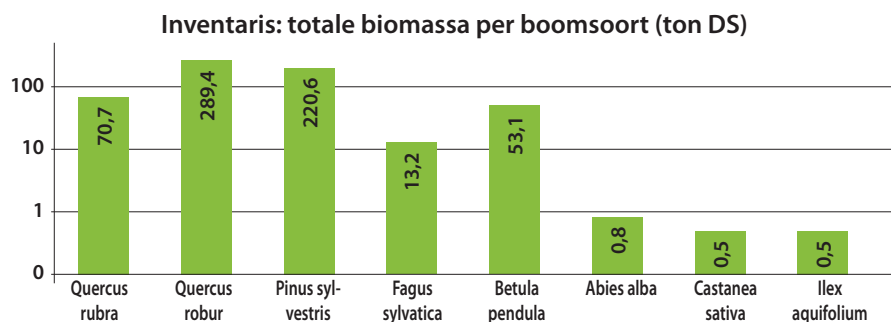
Figuur 11:

Totale massa droge stof (in ton) in zes compartimenten, geaccumuleerd per plot in de inventaris (1568 bomen - merk op: Y-as met logaritmische schaal).



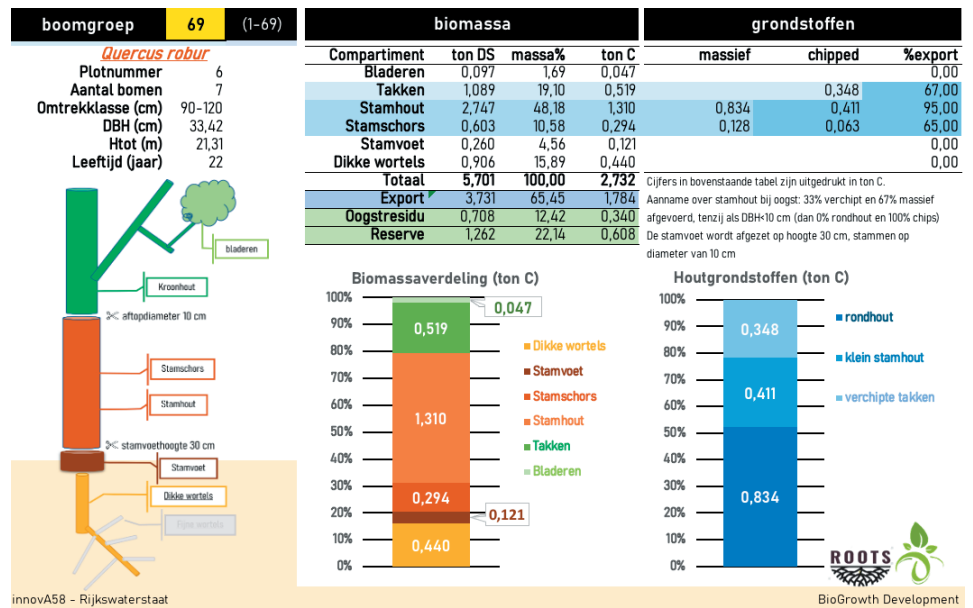
Figuur 12:

Totale massa droge stof (in ton) in zes compartimenten, geaccumuleerd per boomsoort in de inventaris (1568 bomen - merk op: Y-as met logaritmische schaal).



Figuur 13:

Voorbeeld van een samenvattende massabalans van de biomassaverdeling, de grondstoffen en oogstresten op boomgroepniveau (keuze uit 69 boomgroepen).



De gegevens van alle bomen samen worden tenslotte in een totale massabalans met cijfers per ha weergegeven (tabel 9). Gemiddeld herbergt de innovA58 inventaris 155,2 ton DS biomassa per ha, het grootste deel in het stamhout (74,9 ton DS/ha). In termen van koolstof en CO₂-opslag vertaalt zich dit in een totale koolstofreserve van 75,8 ton/ha (of 278,1 ton CO₂/ha) in de zes beschouwde boomcompartimenten.

Een deel van deze biomassa- en koolstofreserve kan worden geoogst om er biobased producten mee te fabriceren of om er energie mee op te wekken. De bekomen grondstoffen, reststromen en eindproducten worden in het volgende onderdeel besproken.

4.3 Biomassaverdeling en koolstofopslag in grondstoffen en oogstresidu's

Van elke boomgroep wordt verondersteld dat een deel van het kroonhout (grote takken, gehakseld) en stamhout van kleine en grote dimensies geoogst kan worden en verkocht aan producenten van materialen. De aandelen van deze grondstoffen en de oogstresidu's worden bepaald door de omvang van de oogstbare boomcompartimenten (tak- en stamhout) en technische verliezen tijdens het oogstproces. De resultaten kunnen eveneens in een ROOTS dashboard worden opgevraagd voor elke boomgroep apart (zie figuur 14. op blz 26) en/of geïntegreerd per ha (tabel 9).

Van het takhout wordt bijvoorbeeld aangenomen dat 67% (18,51 ton DS per ha) als gehakselde biomassa geëxporteerd kan worden uit het bos, bijvoorbeeld voor extractie van lignine via bioraffinage, voor verwerking in bioasfalt. Stamhout met schors wordt opgesplitst in rondhout van kleine dimensies voor OSB productie (26,8 ton DS per ha) en rondhout van grote dimensies voor zaaghoutproductie (52,5 ton DS per ha). In totaal wordt dus 97,9 ton DS geoogst per ha. Er blijft per ha 18,4 ton DS als oogstresidu achter in het bos en 36,8 ton DS wordt niet geoogst, nl. de dikke wortels, de stamvoeten, een deel van de stamschors, fijne takken en bladeren. De equivalenten koolstof en CO₂ staan eveneens in tabel 9. De massa droge stof kan met behulp van de volumieke massa omgerekend worden naar een massief of een bulk volume houtgrondstof, bijvoorbeeld aantal m³ houtchips of m³ rondhout met of zonder schors.

Voor elke boomgroep werden met reële prijzen van RWS de verwachte inkomsten van elke grondstoffenstroom in € per boomgroep of € per ha berekend. Deze resultaten kunnen eveneens voor elke boomgroep apart weergegeven worden in een ROOTS dashboard. Bijvoorbeeld voor boomgroep 69 wordt een inkomst van 23,21 euro verwacht uit de verkoop van 0,729 ton (3,49 bulk m³) gehakseld takhout, en de verkoop van dunne en dikke stammen als rondhout moet respectievelijk 54,03 € en 347,37 € opleveren (figuur 14).

4.4 Biomassaverdeling en koolstofopslag in producten en productiereststromen

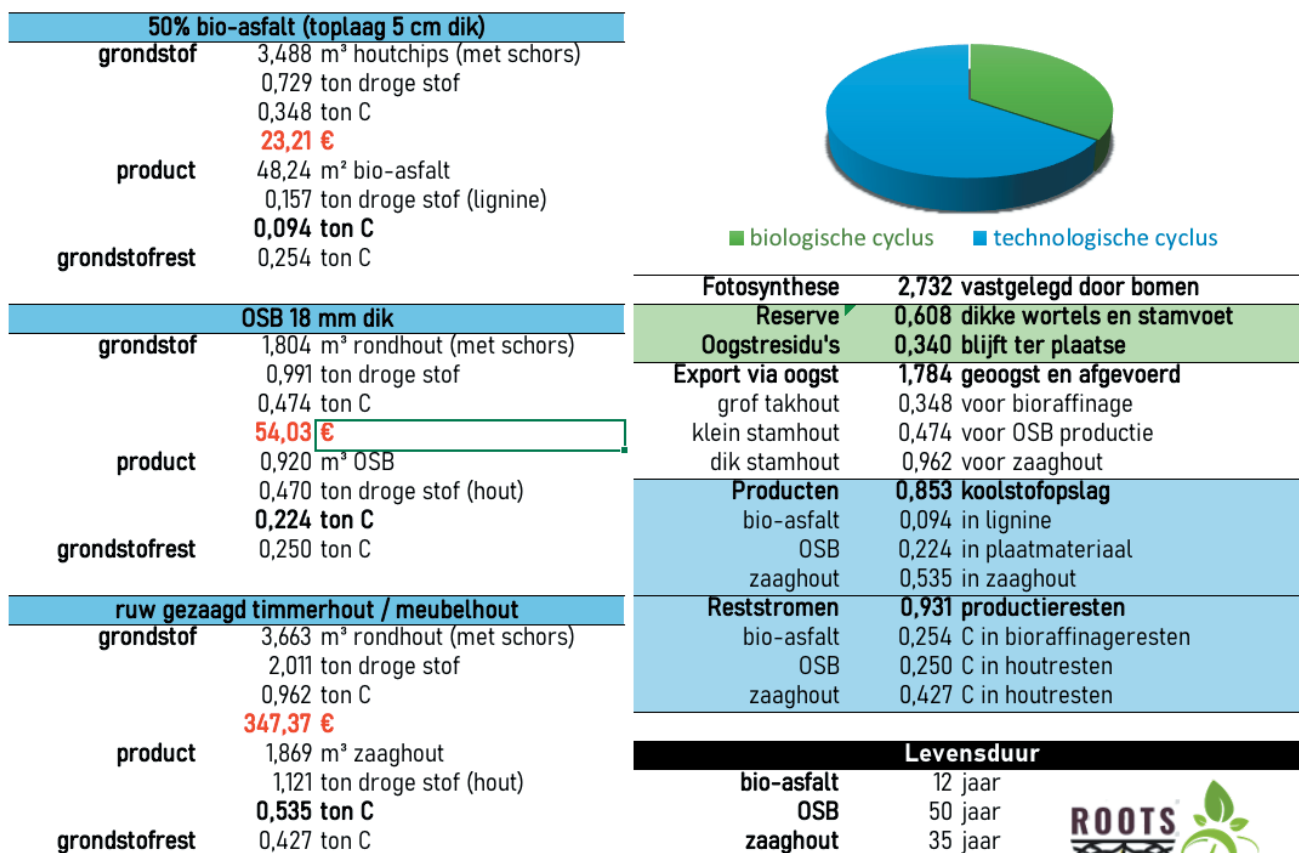
Aan de hand van cijfers over de productsamenstelling (vb. ligninegehalte van asfalt met 50% biobitumen, houtaandeel in OSB) en rendementsfactoren (vb. netto rendement in zaaghout-productie) werd de hoeveelheid eindproduct geschat en ook telkens het absolute C-gehalte ervan. Met bijvoorbeeld de 0,991 ton DS (0,474 ton C) in stamhout van kleine dimensies, geoogst in boomgroep 69, kan 0,920 m³ OSB (0,470 ton DS hout) gefabriceerd worden waarin 0,224 ton C opgeslagen ligt voor tientallen jaren, indien de OSB in een duurzame constructie wordt gebruikt. In de ontstane grondstofresten zit nog 0,250 ton C opgeslagen (zie figuur 13). Vaak worden deze resten energetisch gevaloriseerd, waardoor de koolstof instant terug vrijkomt als CO₂ (oxidatie, verbranding).

Op het niveau van de hele inventaris (4,37 ha, 1568 bomen) werden de resultaten ook per ha berekend (tabel 9). Van de 97,9 ton DS die gemiddeld geoogst werd per ha is 16,0 ton DS in OSB vastgelegd (als houtspanen), 4,3 ton DS in bio-asfalt (als lignine) en 30,3 ton DS in zaaghout (als massief hout). Ca. 50,5 ton DS van de totale geoogste hoeveelheid biomassa (97,9 ton DS per ha) werd dus in biobased producten verwerkt. Het saldo van de niet-verwerkte houtige materie (47,4 ton DS) komt in de productiereststromen terecht. De koolstof- en CO₂-equivalenten van deze bedragen staan eveneens in tabel 9 samengevat per ha.

Tabel 9:

Totale massa droge stof, koolstof en CO₂ (telkens in ton) verdeeld over zes boomcompartimenten, drie types van grondstoffen, reststromen en producten, omgerekend per ha voor de innovA58 inventaris (1568 bomen, oppervlakte 4,37 ha).

	droge stof	koolstof	CO ₂	
Totaal	155,220	75,832	278,076	Totale C-source in bos
Bladeren	4,325	2,202	8,075	C opgeslagen in bladeren en naalden
Takken	27,628	13,381	49,068	C opgeslagen in takken (kruin)
Stamhout	74,904	36,468	133,728	C opgeslagen in hout van stam (excl. stamvoet)
Stamschors	15,928	7,959	29,186	C opgeslagen in schors van stam (excl. stamvoet)
Stamvoet	6,836	3,257	11,943	C opgeslagen in stamvoet
Dikke wortels	25,599	12,565	46,076	C opgeslagen in dikke wortels
Export	97,892	47,754	175,114	C-sink in geoogste grondstoffen
grof takhout	18,511	8,965	32,875	C in grondstof verwerkt in bioraffinage
klein stamhout	26,833	13,108	48,067	C in grondstof verwerkt in OSB productie
dik stamhout	52,548	25,681	94,172	C in grondstof verwerkt in zaaghout
Oogstresidu	18,437	9,025	33,095	C-sink in achterblijvende schors, fijne takken, zaagsnede...
Reserve	36,760	18,024	66,094	C in stamvoet en dikke wortels
Producten	50,538	25,172	92,306	C-sink in producten
bio-asfalt	4,266	2,560	9,388	C in lignine
OSB	15,973	7,832	28,720	C in houtfractie van plaatmateriaal
zaaghout	30,299	14,780	54,198	C in zaaghout
Reststromen	47,354	22,583	82,812	C-sink in biomassaresten (houtverwerking)
bio-asfalt	14,245	6,406	23,491	C in reststroom van bioraffinage
OSB	10,860	5,276	19,347	C in reststroom van OSB productie
zaaghout	22,249	10,901	39,974	C in reststroom van houtzagerij

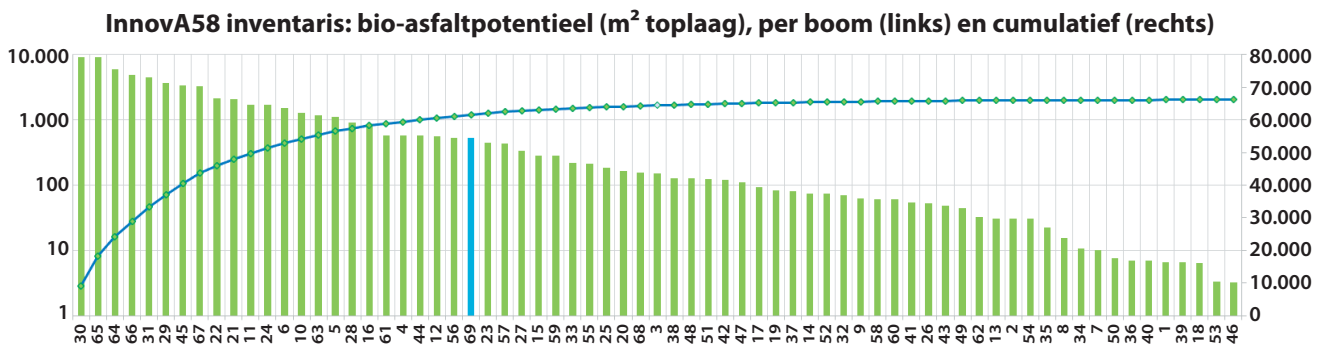
**Figuur 14:**

Voorbeeld van een massabalans van de grondstoffen en oogstresten en van drie afgeleide producten (bio-asfalt, OSB en zaaghout), inclusief de verwachte inkomsten uit de grondstoffenverkoop, berekend op boomgroepniveau (hier voor boomgroep 69).

4.5 Praktisch toepassingspotentieel op inventarisniveau: toplaag bio-asfalt

Om de schatting van het biobased potentieel van de hele inventaris in concreto te illustreren werd berekend hoeveel m² bio-asfalt (toplaag van 5 cm dik) aangelegd zou kunnen worden met de geogste takbiomassa van alle bomen, in een scenario met 50% substitutie van fossiele bitumen door lignine. In figuur 15 staan de individuele bijdragen van elke boomgroep afgebeeld als staafdiagram (op de linker as, log schaal) en de cumulatieve som van alle bijdragen als curve (op de rechter as, lineaire schaal). Op de horizontale as staan de boomgroepen gerangschikt van grootste (links) naar kleinste (rechts) bijdrage. Met de aannames omtrent de samenstelling van de biomassa (ligninegehalten verschillen per boomsoort) en de samenstelling van de bio-asfalt (Khandelwal 2019) werd een totaal potentieel van 66.128 m² bio-asfalt toplaag becijferd voor de innovA58 inventaris. Daarbij wordt theoretisch 41,0 ton CO₂ voor een 12-tal jaren vastgelegd.

Op dezelfde wijze kan het (substitutie)potentieel van OSB en zaaghout - of andere hout- of bioraffinageproducten - gemaakt van grondstoffen uit het innovA58 gebied geschat worden, bijvoorbeeld voor toepassingen in duurzame eigen constructieprojecten van RWS.



Figuur 15:

Geschatte bijdrage van alle boomgroepen in de innovA58 inventaris tot het bio-asfaltpotentieel (in m²). Linker-as: staafdiagram met individuele bijdragen (boomgroep 69 gemarkeerd als blauwe staaf, log-schaal); rechter-as: cumulatieve curve (groen, lineaire schaal).

4.6 Intrinsieke waarde van innovA58 grondstoffen en koolstofopslag

In dit hoofdstuk worden enkele mogelijke inkomstenstromen voor Rijkswaterstaat geschat a.d.h.v. de waarde van de grondstoffen, van koolstofemissierechten (CER) en van de koolstofopslag in materialen (via zogenaamde CORC), in drie scenario's (zie tabel 10). Dit geeft de potentie weer van CO₂ credits als financieringsbron voor nieuw bos. Aannames: vertrouwelijke marktprijzen voor houtgrondstoffen van RWS; marktwaarde 1 CER = 1 CORC = 41 €/ton C.

De inkomsten uit CER belopen theoretisch 11.401,11 €/ha (scenario 1). De inkomsten uit de grondstoffenverkoop (gehakselde takken, dun en dik stamhout) bedragen 8.693,14 €/ha (in scenario's 2 en 3). De verkoop van CORCs vertegenwoordigt een waarde van 3.784,53 €/ha (in scenario 2 en 3). Onder voorbehoud zou ook de resterende (ondergrondse) biomassa theoretisch ook een waarde kunnen hebben in emissiehandel: 2378,79 €/ha. Een belangrijk verschil is dat RWS in scenario's 1 en 3 de ontvanger is van de inkomsten uit de emissiehandel en in scenario's 2 en 3 is de producent van een biobased product met een netto koolstofopslag de ontvanger van de inkomsten uit de handel in CORCs.

De koolstofemissiehandel (scenario's 1 en 3) en de handel in CORCs (scenario's 2 en 3) is niet nieuw. Ze is gebaseerd op een gegarandeerde langdurige koolstofopslag, respectievelijk in bossen of in biobased producten. Die langdurigheid is moeilijker in te schatten in scenario 3 aangezien koolstof in biomassa van geoogste bossen als geoxideerd (= CO₂ emissie) moet worden beschouwd (IPCC 2014). Nochtans wordt een deel van de koolstofreserve in wortels en stamvoet opgenomen in de stabiele koolstofreserve van de bodem. Omdat er nog geen LCA werd uitgevoerd werden er nog geen emissies berekend die afgetrokken moeten worden van de biogene koolstofvoorraad om een correcte inschatting te maken van de netto koolstofopslag. De waarde van CORCs is daarom eveneens een overschatting omdat broeikasgasemissies in de productiefase nog in mindering moeten worden gebracht.

Tabel 10:

Scenario's met potentiële inkomstenstromen voor RWS (en/of derden) berekend voor de innovA58 inventaris

Scenario 1		
Bomen niet kappen, de biomassa heeft monetaire waarde op de markt van (verplichte of vrijwillige) koolstofemissierechten (CER).		
Emissiehandel (C-voorraad in bos)	11.401,11	€/ha

Scenario 2		
Oogst takken en stammen, verkoop de grondstoffen en verhandel de waarde van de koolstofopslag in de producten als CO ₂ Removal Credits (CORCs).		
Grondstoffenverkoop	8.693,14	€/ha
grof takhout	524,32	€/ha
klein stamhout	1.356,35	€/ha
dik stamhout	6.812,47	€/ha
CO ₂ Removal Certificates (CORC)	3.784,53	€/ha
CO ₂ in bio-asfalt	384,89	€/ha
CO ₂ in OSB	1.177,52	€/ha
CO ₂ in zaaghout	2.222,13	€/ha
Totaal	12.477,67	€/ha

Scenario 3		
Oogst takken en stammen, verkoop de grondstoffen en verhandel de waarde van de resterende koolstofopslag in wortels en stamvoet op de vrijwillige koolstofemissiemarkt (CER) en de waarde van de koolstofopslag in de producten als CO ₂ Removal Credits (CORCs).		
Grondstoffenverkoop	8.693,14	€/ha
grof takhout	524,32	€/ha
klein stamhout	1.356,35	€/ha
dik stamhout	6.812,47	€/ha
Emissiehandel	2.378,79	€/ha
CO ₂ in dikke wortels	1.889,11	€/ha
CO ₂ in stamvoet	489,68	€/ha
CO ₂ Removal Certificates (CORC)	3.784,53	€/ha
CO ₂ in bio-asfalt	384,89	€/ha
CO ₂ in OSB	1.177,52	€/ha
CO ₂ in zaaghout	2.222,13	€/ha
Totaal	14.856,46	€/ha

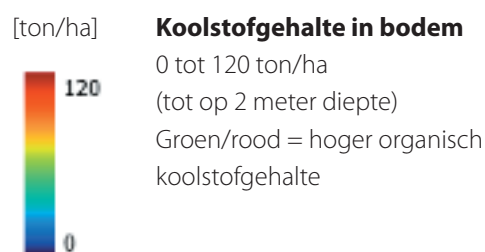
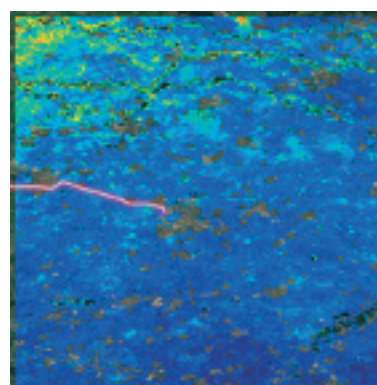
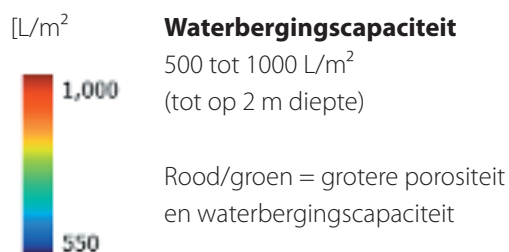
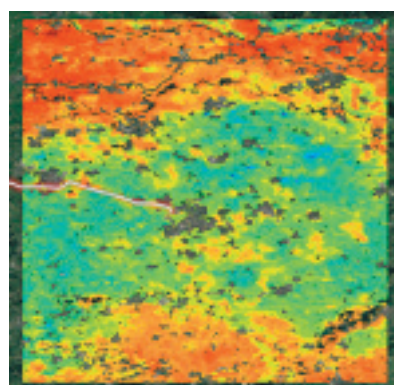
De werkelijke koolstofopslag per ha is anderzijds ook onderschat: tot 90 à 110 ton C per ha extra kan verwacht worden in de stabiele koolstofreserve in bosbodems (MINA 2021). De berekening van ondergrondse koolstofopslag is complex. Koolstofopslag in de bodem is een traag proces en blijft doorgaan tot een climaxvegetatie wordt bereikt. Vanaf dan is de koolstofvoorraad in evenwicht met de emissies (Arets 2018). In deze eerste globale analyse is de stabiele koolstofvoorraad in de bodem, in strooisel en in dood hout niet berekend.



TOEKOMST

BGD beveelt op basis van de bevindingen in dit rapport en vanuit zijn inzicht in biogebaseerde waardenketens voor RWS twee vervolgstappen aan, om op korte termijn te komen tot een geïntegreerd nationaal systeem voor het beheersen van koolstofopslag in biomassa en afgeleide producten in het droge areaal van RWS en op langere termijn voor heel Nederland. Hiermee kan o.a. het toekomstige beheer (met name i.k.v. de Nationale Bossenstrategie) beter worden aangestuurd en worden er objectieve handvaten gecreëerd voor maximale CO₂-vastlegging in beheersgebieden en biogebaseerde toepassingen:

- A. Opbouw en validatie van een digitaal, geospaatial beslissingondersteunend systeem o.b.v. alle huidige beschikbare data van RWS. Implementatie, verfijning en verdieping van de methodologie beschreven in dit rapport. Inbouwen van een stappenplan voor de effectieve verwaarding van koolstofopslag (via CO₂ certificaten) en grondstoffen in het droge RWS areaal (bos, bomenrijen en individuele bomen).
- B. Implementatie voor het volledige areaal via toevoeging van ontbrekende data en uitbreiding naar andere toepassingen (naast houtchips, zaaghout, OSB, lignine, bio-bitumen, die in dit rapport als voorbeeld werden gekozen). Dit opzet is uitbreidbaar naar andere types van gebieden met biomassareservoirs (niet-houtachtige vegetatie zoals grasbermen, rietkragen), naar monitoring van koolstofopslag in de bodem en naar andere gebiedsbeheerders. BGD ziet o.a. de volgende mogelijkheden voor verfijning en opschaling van de beschreven methodologie in deze twee stappen.



Figuur 16:

Waterbergingscapaciteit in L/m² (links) en koolstofgehalte in ton/ha (rechts), in bodems in het ruime gebied rond het innovA58 project (A58 = witte lijn), geïntegreerd tot op een diepte van 2 m (rasterkaarten afgeleid met ROOTS in QGIS op basis van SOILGRIDS kaarten van ISRIC).

Met behulp van ROOTS en GIS rasterdata over de koolstofopslag en -verdeling in Nederlandse bodems van ISRIC (zie figuur 16 rechts) zou een fijnmazige spatiaal expliciete en temporele schatting kunnen worden gemaakt van de koolstofpool in bodems en ondergrondse biomassa en dus van het totale potentieel voor inkomsten uit koolstofopslag.

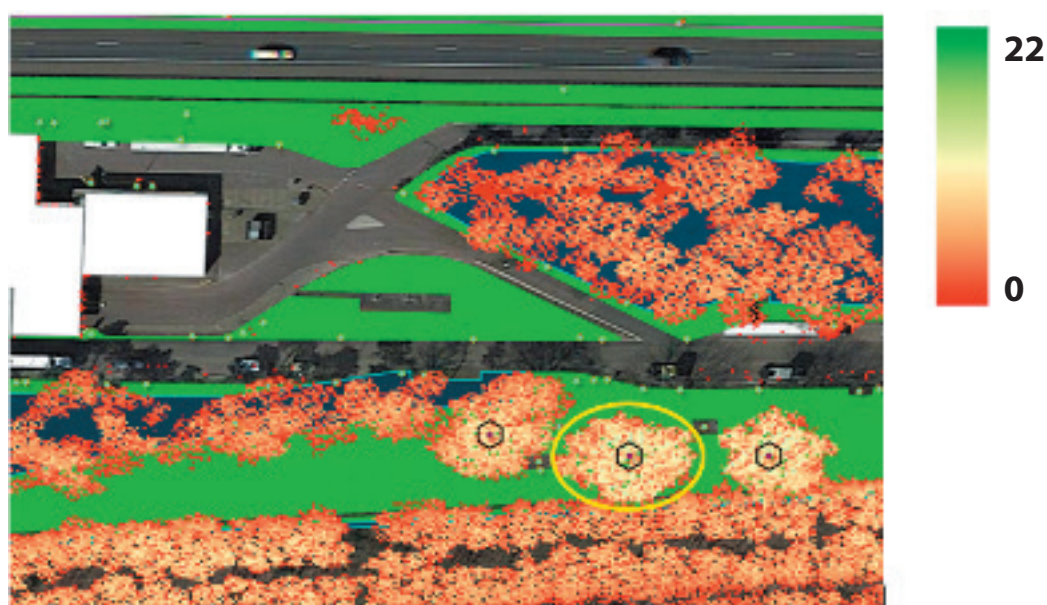
Met ROOTS kan het groei- en koolstofpotentieel voorts verder verfijnd worden via geospatiale (GIS) en temporele modellering van de groei, rekening houdend met variaties in klimaat, leeftijd, bodem, beheer, soorten, etc. De GIS kaarten in figuur 16 (een gebied van ca. 110 km bij 70 km) illustreren het soort van heatmaps die voor het hele of een deel van het RWS areaal gegenereerd kunnen worden, bijvoorbeeld van relevante groeiparameters of hydrologische variabelen (vb. bodemkwaliteit, waterbergingscapaciteit of waterbeschikbaarheid voor planten, afgeleid van de bodemtextuur), of voor KPI zoals het koolstofgehalte of -opslagpotentieel van bodems en de ondergrondse en bovengrondse biomassa.

Dit kan in principe ook voor andere types biomassa (vb. gras) en voor andere (biobased) waardenketens. Historische data (inventarisatie, veldmetingen, labo-analyses, etc.) en eventueel LIDAR of remote sensing data kunnen extra inzichten en ijkpunten bieden.

Er is voorts heel wat geografische vector en rasterdata beschikbaar (figuur 17), van RWS en andere providers, die toelaat om bijvoorbeeld de kroondekking (LAI) en de hoogterverdeling van bomen in bosbestanden te kwantificeren, om gaten en fouten in de nationale inventaris (kernGIS) op te vullen, en als stapsteen naar automatisatie en opschaling.

Tenslotte zijn er nog een reeks onbekende factoren, zoals de hout- en boomkwaliteit, innovaties die nog in een testfase zitten waarvan de uitkomst onzeker is (vb. bioraffinagetoepassingen) en effecten van klimaatverandering waarmee in de toekomst best rekening wordt gehouden. De aanpak via opbrengsttabellen en statistische allometrische modellen is robuust maar onderhevig aan beperkingen.

De modulaire procesgebaseerde en gecascadeerde ketenaanpak van ROOTS laat evenwel toe om onderdelen toe te voegen of uit te breiden, in functie van vraagstellingen over techno-economische haalbaarheid, en is minder of niet onderhevig aan voornoemde beperkingen.



Figuur 17:

Potentieel waardevolle vector- en rasterinformatiebronnen voor toekomstige (geautomatiseerde) boominventarisatie en gebiedsanalyse (BGD manuele rendering – bronnen: Nationaal Georegister NL). Schaal geeft hoogte van houtachtige vegetatie in m. Groene vlakken = gras. Witte vlakken = bebouwde infrastructuur, voertuigen.

Bronnenlijst

- Arets E (2018). Klimaatcijfers voor natuur, Cijfers voor koolstofopslag en -vastlegging in Nederlandse natuur. Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/468244>, 19 p.
- Arets E, van der Kolk JWH, Hengeveld GM, Lesschen JP, Kramer H, Kuikman PJ en Schelhaas MJ (2020). Greenhouse gas reporting of the LULUCF sector in the Netherlands. Methodological background, update 2020. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-technical report 168. 127 p.
- Biddy MJ, Scarlata C and Kinchin C (2016). Chemicals from Biomass: A Market Assessment of Bioproducts with Near-Term Potential. NREL technical report TP-5100-65509, 131 p.
- Bogaart P. en Lof M. (2021). Koolstofopslag Rijkswaterstaat droog areaal Nulmeting periode 2013–2020. Den Haag: Centraal Bureau voor de Statistiek, 28 p.
- De Circulaire Bouweconomie (2021). <https://circulairebouweconomie.nl/nieuws/ollongren-laat-co2-opslag-in-biobased-materialen-herwaarden/>
- FAO, ITTO and UN (2020). Forest product conversion factors. Rome, 70 p. <https://doi.org/10.4060/ca7952en>
- IPCC (2014). (2013) Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. in Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, Srivastava N, Baasansuren J, Fukuda M and Troxler TG, Eds. IPCC, Switzerland. 268 p.
- Jansen JJ & Oosterbaan A (redactie) (2018). Opbrengsttabellen Nederland 2018, 172 blz.
- Jenkins JC, Chojnacky DC, Heath LS & Birdsey RA (2004). Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species. Gen. Tech. Rep. NE-319. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 45 p.
- McPherson EG, van Doorn NS, Peper PJ. (2016). Urban tree database. Fort Collins, CO: Forest Service Research Data Archive.
- MINA (2021). Studie op eigen initiatief. Koolstofopslag via (semi-)natuurlijke processen. MINA raad Vlaanderen. 45 p.
- NIBE (2019). Potentie biobased materialen in de bouw, 2019. 31 p. <https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2019/07/CBE-Eindrapportage-potentie-biobased-materialen-NIBE-juli-2019.pdf>
- Sass-Klaassen U, René Klaassen, Copini P & Kramer K (2018). D1 - Pilot Bossen langs infrastructuur. Overzicht van geschikt houtkwaliteit voor veredeling binnen de groeiplaatsmogelijkheden en houtsoorten-, houtsortimentkeuze. Wageningen Environmental Research, 22 p.
- Thomas SC & Martin AR (2012). Wood carbon content database. Dryad Repository: <http://dx.doi.org/10.5061/dryad.69sg2>
- ACTIEPLAN BOS EN HOUT, (2016), <https://www.probos.nl/publicaties/in-de-pers/1325-actieplan-bos-en-hout>
- Inventarisatie BioBased Economy in de Nederlandse chemie, (2013), https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE_Delft_3849_Inventarisatie_BioBased_Economy_in_de_NL_chemie_def_1368792864.pdf
- Biorefinery Outlook (2021). EU Biorefinery Outlook to 2030. BTG, DG Research and Innovation, E4tech, FNR, ICONS, WUR (Eds.). 398 p. <https://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/7223cd2e-bf5b-11eb-a925-01aa75ed71a1>
- Khandelwal M (2019). Carbon footprint of lignin modified asphalt mix. MSc thesis in Energy Science, Utrecht University, 72 p.

Bijlage A: InnovA58 inventaris: gegevens per deelgebied

opp m2	Aantal	% van totaal	Dichtheid per m2	Nederlandse naam	Latijnse naam	Omtrek	Gem. Leeftijd
1420	3	20,0	0,0021	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	90-120	40
	1	6,7	0,0007	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	30-60	20
	4	26,7	0,0028	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	60-90	30
	1	6,7	0,0007	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	90-120	40
	1	6,7	0,0007	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	30-60	20
	3	20,0	0,0021	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	60-90	30
	2	13,3	0,0014	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	90-120	40
3485	10	6,7	0,0029	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	0-30	5
	1	0,7	0,0003	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	60-90	30
	2	1,3	0,0006	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	90-120	40
	4	2,7	0,0011	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	120-150	50
	4	2,7	0,0011	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	150+	50+
	5	3,3	0,0014	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	0-30	5
	4	2,7	0,0011	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	30-60	20
	7	4,7	0,0020	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	60-90	30
	7	4,7	0,0020	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	90-120	40
	3	2,0	0,0009	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	120-150	50
	38	25,3	0,0109	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	90-120	40
	21	14,0	0,0060	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	120-150	50
	10	6,7	0,0029	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	0-30	20
	1	0,7	0,0003	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	30-60	20
	1	0,7	0,0003	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	60-90	30
	1	0,7	0,0003	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	90-120	40
	2	1,3	0,0006	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	120-150	50
	3	2,0	0,0009	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	150+	50+
	25	16,7	0,0072	Hulst	<i>Ilex aquifolium</i>	0-30	5
	1	0,7	0,0003	Hulst	<i>Ilex aquifolium</i>	60-90	30
1920	19	29,7	0,0099	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	60-90	30
	31	48,4	0,0161	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	90-120	40
	2	3,1	0,0010	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	60-90	30
	2	3,1	0,0010	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	120-150	50
	2	3,1	0,0010	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	60-90	30
	8	12,5	0,0042	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	120-150	50
448	17	32,7	0,0379	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	30-60	20
	8	15,4	0,0179	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	30-60	20
	19	36,5	0,0424	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	60-90	30
	8	15,4	0,0179	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	60-90	30
36295	75	6,0	0,0021	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	0-30	5
	54	4,3	0,0015	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	30-60	20
	39	3,1	0,0011	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	60-90	30
	68	5,4	0,0019	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	90-120	40

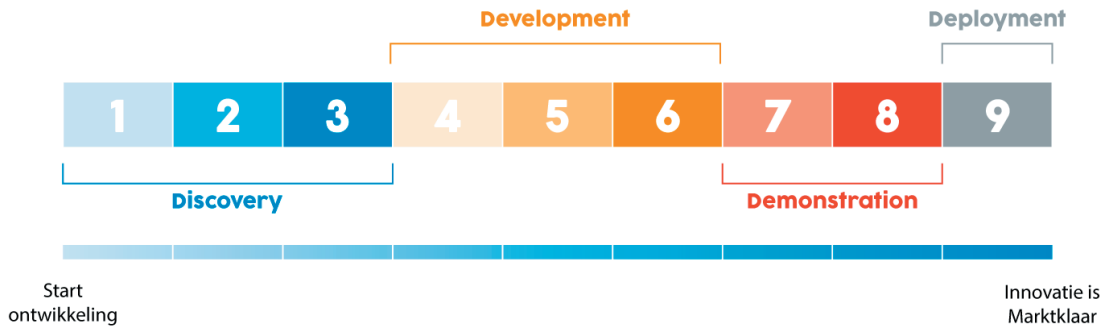
Bijlage A: InnovA58 inventaris: gegevens per deelgebied

opp m2	Aantal	% van totaal	Dichtheid per m2	Nederlandse naam	Latijnse naam	Omtrek	Gem, Leeftijd
	89	7,1	0,0025	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	120-150	50
	23	1,8	0,0006	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	150+	50+
	50	4,0	0,0014	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	0-30	5
	154	12,3	0,0042	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	30-60	20
	192	15,3	0,0053	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	60-90	30
	121	9,6	0,0033	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	90-120	40
	34	2,7	0,0009	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	120-150	50
	12	1,0	0,0003	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	150+	50+
	75	6,0	0,0021	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	0-30	5
	81	6,4	0,0022	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	30-60	20
	124	9,9	0,0034	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	60-90	30
	3	0,2	0,0001	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	60-90	30
	2	0,2	0,0001	Tamme kastanje	<i>Castanea sativa</i>	60-90	30
	15	1,2	0,0004	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	0-30	5
	2	0,2	0,0001	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	30-60	20
	2	0,2	0,0001	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	60-90	30
	17	1,4	0,0005	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	90-120	40
	12	1,0	0,0003	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	120-150	50
	2	0,2	0,0001	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	150+	50+
	8	0,6	0,0002	Gewone zilverspar	<i>Abies alba</i>	0-30	5
	3	0,2	0,0001	Gewone zilverspar	<i>Abies alba</i>	60-90	30
160	3	10,0	0,0188	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	60-90	30
	4	13,3	0,0250	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	90-120	40
	5	16,7	0,0313	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	60-90	30
	7	23,3	0,0438	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	90-120	40
	5	16,7	0,0313	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	0-30	5
	4	13,3	0,0250	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	60-90	30
	2	6,7	0,0125	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	90-120	40

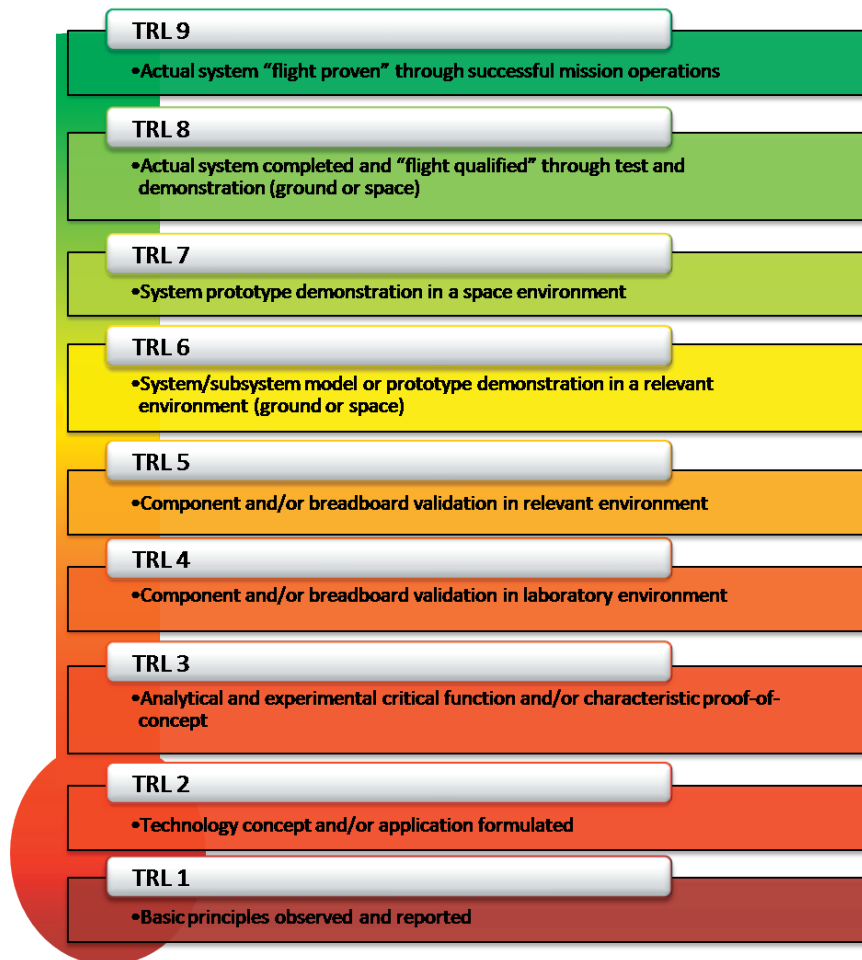
Bijlage B: InnovA58 inventaris: gegevens voor het totale gebied

opp m2	Aantal	% van totaal	Dichtheid per m2	Nederlandse naam	Latijnse naam	Omtrek	Gem, Leeftijd
43728	24	1,53	0,00055	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	120-150	50
43728	6	0,38	0,00014	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	150+	50+
43728	25	1,59	0,00057	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	0-30	5
43728	2	0,13	0,00005	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	30-60	20
43728	3	0,19	0,00007	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	60-90	30
43728	19	1,21	0,00043	Amerikaanse eik	<i>Quercus rubra</i>	90-120	40
43728	2	0,13	0,00005	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	120-150	50
43728	3	0,19	0,00007	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	150+	50+
43728	4	0,26	0,00009	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	60-90	30
43728	1	0,06	0,00002	Beuk	<i>Fagus sylvatica</i>	90-120	40
43728	8	0,51	0,00018	Gewone zilverspar	<i>Abies alba</i>	0-30	5
43728	3	0,19	0,00007	Gewone zilverspar	<i>Abies alba</i>	60-90	30
43728	110	7,02	0,00252	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	120-150	50
43728	23	1,47	0,00053	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	150+	50+
43728	75	4,78	0,00172	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	0-30	5
43728	54	3,44	0,00123	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	30-60	20
43728	69	4,40	0,00158	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	60-90	30
43728	144	9,18	0,00329	Grove den	<i>Pinus sylvestris</i>	90-120	40
43728	25	1,59	0,00057	Hulst	<i>Ilex aquifolium</i>	0-30	5
43728	1	0,06	0,00002	Hulst	<i>Ilex aquifolium</i>	60-90	30
43728	90	5,74	0,00206	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	0-30	5
43728	100	6,38	0,00229	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	30-60	20
43728	133	8,48	0,00304	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	60-90	30
43728	4	0,26	0,00009	Ruwe berk	<i>Betula pendula</i>	90-120	40
43728	2	0,13	0,00005	Tamme kastanje	<i>Castanea sativa</i>	60-90	30
43728	39	2,49	0,00089	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	120-150	50
43728	12	0,77	0,00027	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	150+	50+
43728	55	3,51	0,00126	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	0-30	5
43728	167	10,65	0,00382	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	30-60	20
43728	229	14,60	0,00524	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	60-90	30
43728	136	8,67	0,00311	Zomereik	<i>Quercus robur</i>	90-120	40

Bijlage C: Technology Readiness Levels (TRL)



bron: <https://www.snn.nl/kennisbank/trl-niveaus-uitgelegd>



Bron: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level

BioGrowth Development B.V.

Boerenverdriet 20, 4613 AK Bergen op Zoom, The Netherlands

NL +31 85 743 55 57, info@biogrowthdevelopment.com, www.biogrowthdevelopment.com

