



# Mariene bouwstenen

Een verkenning van de mogelijkheden van benutting van schelpen in cement- en betonproductie

Auteur(s): Edwin Foekema, Suzanne Poiesz, Marnix Poelman, Maarten Kootstra,  
Peter Geerdink

Wageningen University &  
Research rapport C002/24

---

# Mariene Bouwstenen

Een verkenning van de mogelijkheden van benutting van schelpen in cement- en betonproductie

Auteur(s): Edwin Foekema<sup>1</sup>, Suzanne Poiesz<sup>1</sup>, Marnix Poelman<sup>1</sup>, Maarten Kootstra<sup>2</sup>,  
Peter Geerdink<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Wageningen Marine Research

<sup>2</sup> Wageningen Biobased Products

Wageningen Marine Research  
Den Helder, Januari 2024

---

Wageningen Marine Research rapport  
Rapportnummer C002/24

---

Keywords: schelpvorming, biocalcificatie, carbon footprint, cement/beton, circulair

Opdrachtgever: TKI-Deltatechnologie  
Bezuidenhoutseweg 12  
2594 AV Den Haag

PPS projectcode: WMR03

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/645912>  
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Foto omslag: Wageningen University Research

#### © Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut  
binnen de rechtspersoon Stichting  
Wageningen Research, hierbij  
vertegenwoordigd door  
Drs. ir. M.T. van Manen,  
directeur bedrijfsvoering

KvK nr. 09098104,  
WMR BTW nr. NL 8113.83.696.B16.  
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U  
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

Wageningen Marine Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor gevolgschade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van Wageningen Marine Research. Opdrachtgever vrijwaart Wageningen Marine Research van aanspraken van derden in verband met deze toepassing. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag weergegeven en/of gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden zonder schriftelijke toestemming van de uitgever of auteur.

A\_4\_3\_1 V32 (2021)

---

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1 Projectorganisatie	6
<b>2 Koolstofvastlegging in schelpen</b>	<b>7</b>
<b>3 Beschikbaarheid en gebruik van schelpen</b>	<b>8</b>
3.1 Draagkracht voor schelpdierproductie in de Noordzee	8
3.1.1 Draagkracht	8
3.1.2 Ecologische draagkracht op basis van beschikbaarheid van nutriënten	9
3.1.3 Technische draagkracht	13
3.1.4 Conclusie en discussie	13
3.2 Ketenganalyse schelpdierkweek	14
3.2.1 Ecosysteemdiensten	14
3.2.2 Ketenganalyse Nederlandse schelpdierkweek	15
3.2.3 Verwaarding van mosselschelpen	18
<b>4 Analyse cement- en betonindustrie</b>	<b>22</b>
4.1 Koolstofstromen in cement-/betonproductie	22
4.1.1 Productie van cement	22
4.1.2 Productie van beton	23
4.1.3 Betonsoorten en CO <sub>2</sub> emissie	24
4.2 CO <sub>2</sub> emissies bij toepassing schelpen in cement/beton	25
4.3 Ketenganalyse duurzaam beton	26
4.3.1 Betonsamenstelling	26
4.3.2 Beton levenscyclus en footprint	27
4.3.3 Toepassing van schelpen in beton	29
4.3.4 Conclusie	30
<b>5 Conclusies/Toekomstperspectief</b>	<b>31</b>
<b>6 Kwaliteitsborging</b>	<b>32</b>
<b>7 Literatuur</b>	<b>33</b>
<b>8 Verantwoording</b>	<b>35</b>
<b>Bijlage 1 Toepassingsmogelijkheden schelpen in cement of als vulstof</b>	<b>36</b>
<b>Bijlage 2 Gebruikte data voor berekeningen bij Tabel 6</b>	<b>41</b>
<b>Bijlage 3 Grondstoffen en transport naar producent</b>	<b>42</b>
<b>Bijlage 4 Massabalans CaCO<sub>3</sub> uit schelp</b>	<b>44</b>
<b>Bijlage 5 Schelpproductie scenario's</b>	<b>46</b>

---

# Samenvatting

Schelpdierkweek in de kustgebieden vormt een duurzame vorm van eiwit/voedselproductie, maar resulteert ook in een koolstofrijke reststroom (de schelpen). In de onlangs opgestelde visie presenteert de schelpdiersector de ambitie om productie in 2030 te verdubbelen (o.a. door offshore kweek op de Noordzee), klimaatbestendigheid te vergroten en hergebruik van waardevolle reststromen te stimuleren. Tegelijkertijd is de betonsector actief op zoek naar duurzame grondstoffen voor de productie van cement. Schelpen bestaan voor meer dan 90% uit calciumcarbonaat ( $\text{CaCO}_3$ ) en zouden daarmee als grondstof voor cement en beton kunnen dienen.

Het doel van het project Mariene Bouwstenen was te verkennen:

- 1) Wat zijn duurzame onttrekkingsniveaus van schelpdieren aan de Noordzee?
- 2) Hoeveel klimaatwinst is te bereiken doordat het koolstof in de schelpen langdurig in cement of beton wordt vastgelegd?
- 3) Hoeveel natuurwinst is te bereiken doordat schelpenmateriaal als vervanging kan dienen voor grondstoffen die nu in de natuur worden gewonnen?

Het project heeft de volgende inzichten opgeleverd:

- 1) Op basis van indicatieve berekeningen lijkt er binnen het NCP voldoende natuurlijk voedselaanbod te zijn om op jaarbasis 0,4-0,6 miljoen ton mosselen te produceren zonder het ecosysteem teveel te belasten. Dit is ca. 10-15 keer meer dan de huidige schelpdierproductie in Nederland. Voor een betere inschatting van deze maximale productieruimte zijn echter uitgebreide (model)berekeningen noodzakelijk. Genoemde getallen dienen daarom slechts als eerste indicatie te worden beschouwd. Hoewel de situatie voor mosselkweek per locatie zal verschillen -de beste condities worden gevonden <35 km uit de kust- lijken de (geplande) windmolenparken voldoende ruimte te bieden om de mosselproductie op het NCP te maximaliseren. Uitgaande van de hierboven genoemde indicatieve schatting en een optimalisatie van de verwerkingsprocessen zou er maximaal ca. 299.000 ton schelpenmateriaal per jaar beschikbaar kunnen komen.
- 2) Volgens de huidige inzichten draagt koolstof dat is vastgelegd in schelpen van waterdieren, zoals mosselen en oesters, niet bij aan een vermindering van het  $\text{CO}_2$  gehalte in de atmosfeer. Dit komt doordat de  $\text{CO}_2$  equivalent die in de schelp als  $\text{CaCO}_3$  wordt vastgelegd niet uit de atmosfeer maar uit het water afkomstig is, in de vorm van carbonaat. Doordat door het biocalcificatie (schelpvorming) proces de alkaliniteit van het water daalt, daalt het vermogen van het water om  $\text{CO}_2$  vast te houden en kunnen de vastgelegde  $\text{CO}_2$  equivalenten niet vanuit de atmosfeer worden aangevuld. In schelpen vastgelegd koolstof levert daardoor geen klimaatwinst op. Ondanks bovenstaande constatering blijft de carbon footprint van schelpdier aquacultuur substantieel kleiner dan andere vormen van productie van dierlijke eiwitten.
- 3) Met bovengenoemde 299.000 ton schelpenmateriaal zou de  $\text{CaCO}_3$  behoefte van de Nederlandse cementindustrie voor ca. 8% kunnen worden gedekt. Om schelpen geschikt te maken voor gebruik als grondstof in cement en beton is echter meer energie nodig (voor schoonmaken middels spoelen, en branden) dan bij toepassing van traditionele grondstoffen. Hierdoor neemt de  $\text{CO}_2$ -footprint van het beton toe naarmate er meer schelpenmateriaal in gebruikt wordt. Bij gebruik als toeslagmateriaal (vergruisde schelpen) neemt de  $\text{CO}_2$ -footprint van het beton met ca 2% toe. Wanneer de schelpen tot cement worden verwerkt (waarbij Ca als grondstof uit de schelpen wordt gewonnen) dan zal de  $\text{CO}_2$ -footprint van het beton met ca. 20% toenemen.

Geconcludeerd moet worden dat het verwerken van vers schelpenmateriaal uit de aquacultuur in cement en beton geen (klimaat)voordeel oplevert, anders dan dat hiermee maximaal 8% van in de natuur gewonnen calciumcarbonaat kan worden vervangen.

---

# 1 Inleiding

Er is een toenemend besef dat de kringloopgedachte (circulariteit) ook voor de zee relevant is. Schelpdierkweek in de kustgebieden vormt daarbij een duurzame vorm van eiwit/voedsel productie, maar resulteert ook in een koolstofrijke reststroom (de schelpen). In de onlangs opgestelde visie presenteert de schelpdiersector de ambitie om productie in 2030 te verdubbelen (o.a. door offshore kweek op de Noordzee), klimaatbestendigheid te vergroten en hergebruik van waardevolle reststromen te stimuleren (gepresenteerd op <https://schelpdierconferentie.com/>).

Tegelijkertijd is de betonsector actief op zoek naar duurzame grondstoffen voor de productie van cement. Verduurzaming van de betonsector is o.a. vastgelegd in het betonakkoord (<https://www.betonakkoord.nl/>) waarbij aandacht is voor CO<sub>2</sub>-reductie, circulaire economie, innovatie en onderwijs, en natuurlijk kapitaal. Schelpen bestaan uit calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>) en zouden daarmee als grondstof voor cement en beton kunnen dienen. Gebruik van kort cyclische schelpen zal gebruik van lang cyclische (fossiele) minerale grondstoffen zoals kalksteen uit groeven (deels) kunnen vervangen door de hernieuwbare grondstof 'schelpmateriaal'.

De voorliggende vraag is dan ook of schelpen gebruikt kunnen worden als alternatieve grondstof, en in hoeverre dit een winst oplevert voor de koolstofbalans van de betonindustrie. Van belang daarbij is dat transitie in de beton- en de schelpdiersector op elkaar aansluiten, en dat vooraf kansen en knelpunten geïdentificeerd worden. Bij een mogelijke opschaling van de schelpdierproductie moet daarbij ook aandacht zijn voor, en waar mogelijk een versterking van, de natuurwaarden van het ecosysteem waarin gekweekt wordt, wat ook vanuit het betonakkoord ('natuurlijk kapitaal') een belangrijke pijler is.

De doelstelling van het in dit rapport beschreven project 'Mariene Bouwstenen' was het verkennen van de mogelijkheden om een reststroom (de schelpen) uit de schelpdierindustrie in te zetten als grondstof voor de cement- en betonindustrie. Hiermee wordt bijgedragen aan de ontwikkeling van een circulaire economie. Het project is uniek doordat het twee sectoren met elkaar verbindt die nu nog geheel gescheiden van elkaar opereren, maar waarbij de gezamenlijke klimaat- en natuurambities centraal staan. Uitgangspunt hierbij is dat de innovatie economisch rendabel moet zijn, maar dat ook behoud/versterking van natuurlijk kapitaal en daarmee de duurzaamheid aangetoond wordt.

De mogelijkheden om deze ambities in deze samenwerking nader in te vullen zijn in dit project onderzocht aan de hand van de volgende onderzoeksvragen:

- 1) Hoeveel klimaatwinst is te bereiken doordat het koolstof in de schelpen langdurig in cement of beton wordt vastgelegd?
- 2) Hoeveel natuurwinst is te bereiken doordat schelpenmateriaal als vervanging kan dienen voor grondstoffen die nu in de natuur worden gewonnen?
- 3) Wat zijn duurzame onttrekkingsniveaus van schelpdieren aan de Noordzee?

---

## 1.1 Projectorganisatie

Het project werd gecoördineerd door Wageningen Marine Research (WMR). Verder waren Wageningen Food and Biobased Research (WFBR) en TNO als onderzoeksinstituten betrokken. Financieel werd het project mogelijk gemaakt door een PPS-toeslag verleent in het kader van de Regeling van de Minister van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie van 31 augustus 2012, nr. WJZ/12045145, in combinatie met co-financiering door de volgende vier partners. De daarbij genoemde vertegenwoordigers hadden zitting in de begeleidingscommissie waarmee gedurende het project de voortgang en resultaten werden besproken:

1. Stichting Stimulering Kennisontwikkeling Kwaliteitsbeheersing Bouwconstructies (SKKB). Vertegenwoordigd door André Burger en Mark van Halderen.
2. Gemeente Den Haag (handelend namens collectief van publieke opdrachtgevers die samenwerken in het Betonakkoord en de Buyer Group CO2-arm Beton, waaronder RWS, Prorail, RVB, G4, P12). Vertegenwoordigd door Jack Amesz.
3. De Vereniging Producentenorganisatie van de Nederlandse Mosselcultuur (PO Mossel): De vereniging vertegenwoordigt alle 89 mosselkweekbedrijven die kweken op de bodem van de Waddenzee en Oosterschelde. Vertegenwoordigd door Addy Risseeuw.
4. Schelpdierhandel/Stichting de Mosselhandel: De schelpdierhandel vertegenwoordigt 13 bedrijven die schelpdieren verwerken en verhandelen van producenten naar retail en groothandel in Noordwest en Centraal Europa. Vertegenwoordigd door Wouter van Zandbrink.

---

## 2 Koolstofvastlegging in schelpen

Om de klimaatverandering te beperken wordt getracht de wereldwijde uitstoot van CO<sub>2</sub> drastisch te reduceren. Daarnaast kan het helpen om CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer te verwijderen en voor lange tijd vast te leggen.

Schelpen bestaan voor meer dan 90% uit calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>) dat voor 12% uit koolstof bestaat. Een kilo lege schelpen bevat dus circa 120 gram koolstof, wat overeenkomt met 440 gram CO<sub>2</sub>. Omdat calciumcarbonaat onder de meeste omstandigheden bijzonder stabiel is, is het hierin aanwezige koolstof voor lange tijd vastgelegd.

Landgebonden schelpdieren zoals huisjesslakken, gebruiken voor de vorming van de schelp het CO<sub>2</sub> dat zij uitademen (McConnaughey et al 2007). Door dit gerespireerde CO<sub>2</sub> in de schelp vast te leggen wordt emissie naar de atmosfeer verminderd, waardoor schelpvorming door landslakken, weliswaar op beperkte schaal, tot lagere CO<sub>2</sub> gehalten in de atmosfeer leidt.

De hoeveelheid gerespireerd koolstof dat een watergebonden schelpdier in de schelp vastlegt is echter nooit meer dan 10% van de totale hoeveelheid koolstof in de schelp (McConnaughey et al 2007). De rest, meer dan 90% van de schelp, wordt gevormd uit in water opgeloste calcium (Ca<sup>2+</sup>) en carbonaten (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) (McConnaughey et al 2007). Doordat bij de vorming van CaCO<sub>3</sub> (het bio-calcificatie proces) carbonaten uit het water worden onttrokken daalt de alkaliniteit. Hiermee vermindert het vermogen van zeewater om CO<sub>2</sub> vast te houden en zal er onder bepaalde omstandigheden zelfs CO<sub>2</sub> naar de atmosfeer kunnen ontsnappen (Ray et al 2018; Humphries et al., 2018, en 2020). Schelpvorming draagt daarom niet bij aan een verlaging van het atmosferisch CO<sub>2</sub>.

In beoordelingen van de CO<sub>2</sub> emissies van schelpdier-aquacultuur is dit aspect lang buiten beschouwing gebleven (Ray et al 2018) en werd schelpvorming vanwege de hoeveelheid vastgelegde koolstof als mogelijkheid gezien om de atmosferische CO<sub>2</sub> concentratie te verlagen. Sinds 2017 zijn er echter meerdere publicaties verschenen die de invloed van bio-calcificatie op de CO<sub>2</sub> flux van schelpdieren volgens bovengenoemde inzichten wegen (Fodrie et al 2017; Humphreys et al 2018; Ray et al 2018; Ray et al 2019; Morris et al 2019; Alvares-Salgado et al 2022; Zavell et al 2023).

Ook de klimaatdeskundigen van het IPCC (2018) concluderen dat: '*Precipitation of CaCO<sub>3</sub> by marine organisms (calcification) removes dissolved CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, thus decreasing surface water alkalinity and reducing the capacity of sea water to dissolve atmospheric CO<sub>2</sub>.*'

Dit betreft overigens niet alleen schelpdieren. Dezelfde processen zijn in 1992 reeds beschreven voor koralen (Ware et al 1992), en zijn ook van toepassing op kalkvormende algen (Martin et al 2007).

Volledigheidshalve moet genoemd worden dat er nog steeds publicaties verschijnen waarin het in de schelp vastgelegde koolstof wel als klimaatvoordeel wordt geïnterpreteerd (zie bijvoorbeeld Tamburini et al., 2022, Martini et al., 2022, Moore et al 2022 & 2023). Hierin wordt echter genegeerd dat het in de schelp vastgelegde koolstof reeds in zee was opgelost (en dus al niet meer niet in de atmosfeer aanwezig), en niet vanuit de atmosfeer kan worden aangevuld vanwege de door de biocalcificatie verlaagde alkaliniteit van het water.

Op een geologische tijdschaal wordt de oceaan in staat geacht zeer grote hoeveelheden atmosferisch CO<sub>2</sub> te kunnen bufferen door menging met diepzeewater met een zeer hoge alkaliniteit (Archer, 2005). Dit proces zal echter honderden of zelfs duizenden jaren in beslag nemen, en is daarmee niet relevant voor het behalen van de door de mens gestelde klimaatdoelen.

Voor dit rapport is als uitgangspunt genomen dat koolstofvastlegging in schelpen niet bijdraagt aan een verlaging van het atmosferisch CO<sub>2</sub>, conform de mening van de IPCC (2018) en hierboven aangehaalde publicaties (Fodrie et al 2017; Humphreys et al 2018; Ray et al 2018; Ray et al 2019; Morris et al 2019; Alvares-Salgado et al 2022, Zavell et al 2023).

Overigens blijkt ook met dit uitgangspunt de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van schelpdier-eiwit uit aquacultuur zeer laag in vergelijking met de productie van andere dierlijke eiwitten (Ray et al., 2019; Zavell et al 2023).



---

## 3 Beschikbaarheid en gebruik van schelpen

### 3.1 Draagkracht voor schelpdierproductie in de Noordzee

Op dit moment staan in het Nederlandse deel van de Noordzee 289 windturbines in vier grote offshore windparken. Het plan is om voor 2030 honderden extra windturbines te plaatsen. Andere plannen bestaan uit het gebruik van de Noordzee als nieuwe 'landbouwgrond' voor voedselproductie, waarvoor vooral de ruimte binnen de offshore windparken benut zal worden. Deze vorm van landbouw, of beter 'zeebouw', zal een overgang zijn van visserij naar offshore aquacultuur om voedsel uit de zee te produceren. Hierbij zal de meeste nadruk liggen op de teelt van schelpdieren en zeewier (Duarte et al. 2021). Bij deze vorm van aquacultuur wordt het voedsel benut dat van nature in de zee voorkomt.

De beschikbare hoeveelheid oppervlak voor aquacultuur is één factor die bepaalt hoeveel voedsel geproduceerd kan worden, maar grootschalige aanleg van mosselen en zeewierkwekerijen kan ook effect hebben op de nutriëntenhuishouding en daarmee op het gehele ecosysteem van de Noordzee. Met dergelijke grootschalige projecten in de planning, zal de grens aan groei van deze vorm van aquacultuur en de hoeveelheid voedsel die geproduceerd kan worden zonder onacceptabele consequenties voor het Noordzee-ecosysteem misschien bereikt of zelfs overschreden kunnen worden. Om dergelijke negatieve gevolgen te voorkomen is het noodzakelijk om inzicht te hebben in hoeveel voedsel de Noordzee kan produceren. Dit wordt de draagkracht van de Noordzee genoemd.

#### 3.1.1 Draagkracht

Voor marine-ecologen betekent draagkracht 'het maximale aantal individuen van een bepaalde soort of meerdere soorten dat in een bepaald gebied kan leven'. Er zijn verschillende theoretische modellen om draagkracht te berekenen.

Het eerste model beschrijft de groei van dierpopulaties. Dit houdt in dat de snelheid waarmee de populatieomvang verandert evenredig is met de populatieomvang wanneer deze exponentieel blijft groeien. Wanneer de groeisnelheid afneemt wordt het evenwicht bereikt, en zal de populatiegrootte gelijk zijn aan de draagkracht van de omgeving. Visserijbiologen gebruiken vaak een ander model om te berekenen hoeveel vissen uit een bepaald systeem duurzaam kunnen worden gevangen. Het is de maximale duurzame opbrengst (MSY) of liever de 'draagkracht van het ecosysteem'. In dit model wordt aangenomen dat de oogst evenredig is met het bestand.

Deze modellen illustreren dat er minstens twee definities van draagkracht zijn: 'de hoeveelheid aan dieren die in een gebied kunnen leven', en 'de hoeveelheid dieren dat uit een gebied kan worden onttrokken/geoogst'. Beide definities kunnen echter niet gelijktijdig worden gebruikt. Door visserijorganisaties wordt gezegd dat zij voornamelijk de *opbrengst* van een visbestand (de vangst) zal gebruiken en de *omzet* (hele visbestand) niet gebruikt.

De door ons gehanteerde definitie van de ecologische draagkracht voor schelpdierproductie in de Noordzee is de hoeveelheid schelpdieren die in het Nederlands Continentaal Plat (NCP) gekweekt kunnen worden zonder merkbare (negatieve) consequenties voor het ecosysteem. Centraal hierin staat het totale aanbod aan nutriënten dat de basis vormt voor het voedsel van de schelpdieren en de hoeveelheid nutriënten die hiervan onttrokken kunnen worden door de schelpdieren zonder consequenties voor het ecosysteem. Dit is de ecologische draagkracht.

Daarnaast bestaat er ook een technologische draagkracht, die bepaald wordt door de hoeveelheid ruimte die beschikbaar is/komt voor schelpdierproductie op de Noordzee.

In de volgende paragrafen worden zowel de ecologische en de technologische draagkracht geschat die samen de productieruimte voor schelpdieren op de Noordzee bepalen. Het betreft hier globale schattingen op basis van redelijke aannames en eenvoudige berekeningen. De resultaten dienen dan ook slechts als eerste indicatie te worden beschouwd. Met name de meer nauwkeurigere bepaling van de ecologische draagkracht vraagt om de ontwikkeling van specifieke modellen. Deze zijn momenteel in ontwikkeling, maar de resultaten zijn niet beschikbaar binnen het tijdframe van dit project.

### 3.1.2 Ecologische draagkracht op basis van beschikbaarheid van nutriënten

Microalgen (fytoplankton) vormen het belangrijkste voedsel voor mosselen en oesters die op zee gekweekt zouden kunnen worden. Microalgen vormen de basis van het gehele voedselweb, en in het algemeen geldt daarom ook dat hoe meer microalgen een ecosysteem produceert, hoe meer biomassa in hogere trofische niveaus (schelpdieren, vissen, zoogdieren) kan bestaan.

Microalgen hebben, naast licht, ook in het water opgeloste voedingsstoffen (nutriënten zoals stikstof en fosfaat) nodig om te groeien. De beschikbare hoeveelheid nutriënten bepaalt dus in belangrijke mate de draagkracht van een ecosysteem. De schatting van de ecologische draagkracht in dit rapport richt zich vooral op de interactie tussen schelpdieren en nutriënten. In werkelijkheid vervullen microalgen een brugfunctie in deze interactie. Schelpdieren zijn niet in staat opgeloste nutriënten direct te benutten.

Een essentieel verschil tussen landbouw en aquacultuur is dat water zich verplaatst van het ene naar het andere gebied. Dit betekent dat een mossel niet alleen afhankelijk is van microalgen in het lokale water, maar dat microalgen ook van elders worden aangevoerd. Omgekeerd betekent dit ook dat microalgen/nutriënten die elders al zijn gebruikt, op een andere locatie niet beschikbaar zijn.

Het gebruik en de mogelijke uitputting van microalgen/nutriënten kan op verschillende niveaus plaatsvinden. Wanneer er op grote schaal gekweekt wordt, zullen percelen die zich middenin de kwekerij bevinden minder microalgen tot hun beschikking hebben dan de percelen aan de buitenkant.

Dit fenomeen kan tot een verminderde productie leiden voor de schelpdierkweker, maar zolang er niet veel kwekerijen zijn, zou het geen probleem moeten worden voor de draagkracht van het omringende ecosysteem. Alleen wanneer er door schelpdierkweek een substantiële hoeveelheid van de totaal aanwezige microalgen wordt gebruikt, kan er een draagkrachtprobleem ontstaan.

#### 3.1.2.1 Aannames voor nutriëntenbeschikbaarheid in de Noordzee

In de Noordzee, zeker offshore, is opgelost anorganisch stikstof (DIN) het belangrijkste limiterende nutriënt (Vilmin & van Duren, 2021; Van Duren *et al.*, 2019) voor de ontwikkeling van het fytoplankton dat voor de te kweken schelpdieren als voedsel dient. De inschatting van de ecologische draagkracht (ecologische productieruimte) van de Noordzee is daarom uitgevoerd op basis van de beschikbaarheid van opgelost anorganisch stikstof zodat er geen overschatting van de productieruimte plaatsvindt.

Vanaf ca. 35 km uit de kust raakt de hoeveelheid beschikbaar stikstof in het voorjaar uitgeput. Dichter bij de kust blijven de gehalten wel gehandhaafd (Vilmin & van Duren, 2021) doordat aanvoer vanaf het land, voornamelijk via rivieren, plaatsvindt.

De gemiddelde winterconcentratie van stikstof (N) in het Noordzeewater bedraagt 0,1-0,2 mg N/L (Vilmin & van Duren, 2021). Voor onze berekening is daarvan het gemiddelde genomen, dus 0,15 mg N/L, of 0,15 g N/m<sup>3</sup>.

De gemiddelde diepte van het NCP bedraagt 25m, over gehele waterkolom is dus gemiddeld beschikbaar  $25 \times 0,15 = 3,75$  g N/m<sup>2</sup>. Omdat deze berekening gebaseerd is op de winterperiode en het stikstof in het voorjaar grotendeels uitgeput raakt, is dit getal voor de draagkrachtberekening door twee gedeeld. Hieruit volgt een beschikbaarheid van 1,88 g N/m<sup>2</sup>/jr.

Het oppervlak van het NCP is ca. 58000 km<sup>2</sup> (Compendium voor de Leefomgeving, 2008). De totale hoeveelheid beschikbaar N binnen het NCP is dan 108750 ton N/NCP/jr.

Van alle nutriënten in de Noordzee, dus ook stikstof, die in de winter beschikbaar zijn, is volgens Van Duren *et al.* (2019):

- 25% afkomstig van de Atlantische Oceaan;
- 25% afkomstig van antropogene oorsprong (via rivieren);
- 50% afkomstig van interne conversie (recycling van binnenuit de waterkolom).

Dit betekent dat jaarlijks slechts de helft van de nutriënten 'als nieuwe' nutriënten in de Noordzee terechtkomt. Duurzame exploitatie is dus alleen mogelijk op basis van maximaal de helft (de nieuwe aanvoer) van de totale hoeveelheid nutriënten, anders raakt de interne voorraad van de Noordzee uitgeput, wat per definitie niet duurzaam is.

Het wordt echter als niet acceptabel gezien als alle nieuwe binnenkomende voedingsstoffen volledig naar de schelpdierkweek gaan, omdat dit ten koste kan gaan van de rest van het ecosysteem. We gaan uit van een Noordzee die zich in een ecologisch evenwicht bevindt, waarbinnen alle beschikbare nutriënten efficiënt worden benut. De helft van de totale hoeveelheid nutriënten circuleert binnen het systeem, de andere helft wordt benut door organismen die zich in de Noordzee vestigen/ontwikkelen. Als hier kunstmatig extra organismen aan worden toegevoegd, in dit geval in de vorm van schelpdierkweek, zullen deze ook aanspraak maken op een deel van de aangevoerde nutriënten.

---

Aangezien de Noordzee een complex systeem is waarvan nog onvoldoende bekend is met betrekking tot de robuustheid en veerkracht, is in de vervolgberekening uitgegaan van een uitgangspunt passend binnen de kaders van het voorzorgsprincipe. Op basis hiervan hanteren wij voor het berekenen van de ecologische draagkracht de regel dat maximaal 5% van de aangevoerde nutriënten door schelpdierkweek gebruikt mag worden. Een dergelijk laag onttrekkingsniveau zal vrijwel zeker geen meetbaar effect op het ecosysteem hebben. De uiteindelijke hoeveelheid aan nutriënten dat voor schelpdierkweek gebruikt kan worden, dient gemaakt te worden op basis van een inschatting van de ecologische effecten enerzijds en de beleidsbeslissing welke effecten acceptabel worden geacht anderzijds. Dit betreft een beleidsmatige keuze.

Uitgaande van bovenstaande aannames en uitgangspunten is de hoeveelheid stikstof die voor schelpdierkweek binnen het NCP jaarlijks beschikbaar is 2719 ton N. Dit is 108.750 ton N [beschikbaar op geheel NCP inclusief 50% voor zomerdepletie] x 50% [nieuwe aanvoer] X 5% [voorzorgsprincipe]).

### 3.1.2.2 Berekende draagkracht voor schelpdierproductie in de Noordzee

Om te bepalen hoeveel mosselen gekweekt kunnen worden op de beschikbare hoeveelheid stikstof is het stikstofgehalte in mosselvlees een cruciale factor. In de literatuur zijn hiervoor verschillende getallen te vinden die onderling verschillen, waarschijnlijk door de omstandigheden waarin de mosselen opgroeien (*Tabel 1*). De getallen vallen wel binnen dezelfde ordegrootte.

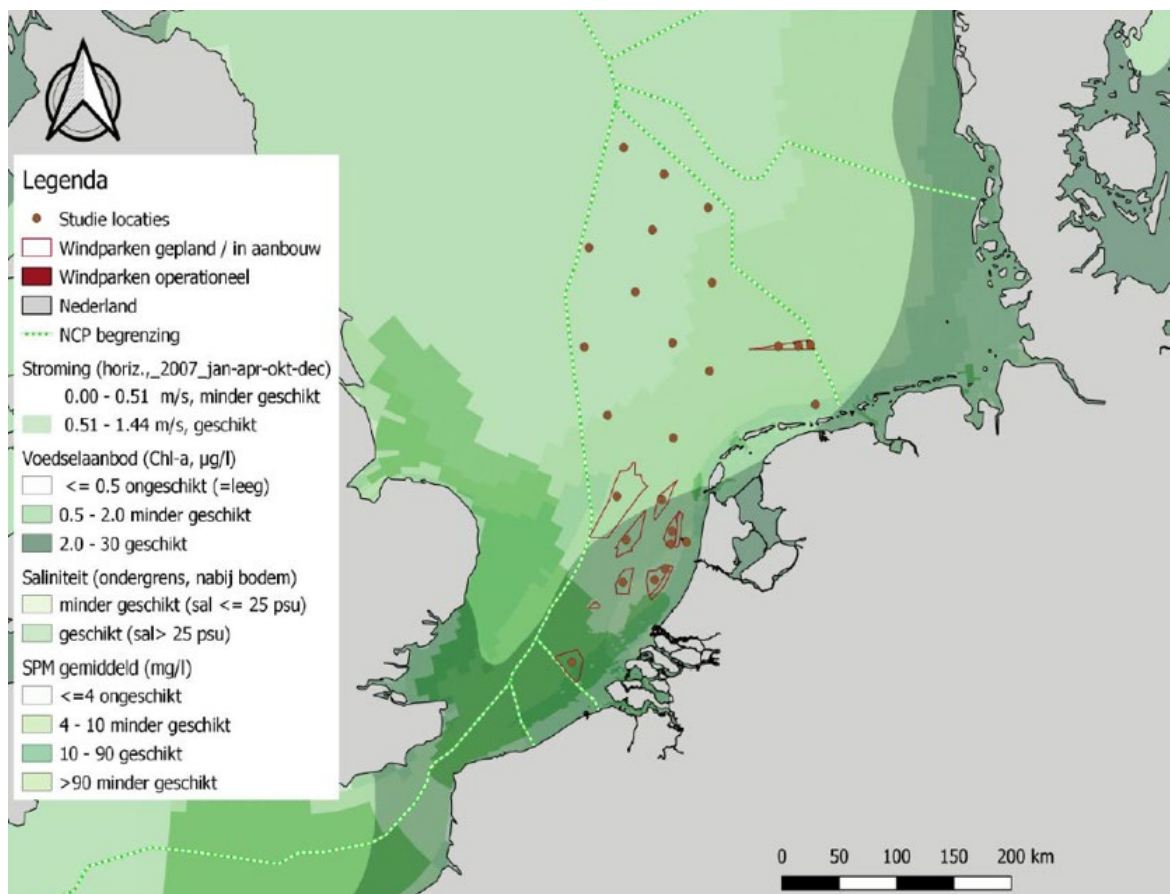
Op basis van deze en bovengenoemde uitgangspunten kan een jaarlijkse productieruimte voor het gehele NCP geschat worden op 0,4 tot 0,6 miljoen ton mosselen (*Tabel 1*).

*Tabel 1 Stikstofgehalten in mosselen volgens verschillende bronnen en de op basis daarvan geschatte jaarlijkse productieruimte voor mosselen op het NCP waarbij gebruik gemaakt wordt van 2.5% van de totale hoeveelheid beschikbare nutriënten. Berekend voor 'Mossel' als versgewicht inclusief schelp.*

Referentie	Kg N per 1000 kg mossel	Jaarlijkse productieruimte
Jorgensen (1997)	5,1	0,65 miljoen ton
Aubin et al (2018)	4,2	0,53 miljoen ton
Henrice (2019)	6,6	0,41 miljoen ton

Bovenstaande eenvoudige berekening heeft als aanname dat de nutriënten homogeen verdeeld zijn over het NCP en beschikbaar zijn voor alle daar te kweken mosselen. Dit is echter zeker niet het geval. Gebieden met hoge nutriëntenconcentraties en hoge stroomsnelheden (d.w.z. verversingssnelheden) zullen een hogere opbrengst hebben dan bijvoorbeeld gebieden met lage nutriëntenconcentraties en lage stroomsnelheden. Een grote bron van onzekerheid is daarom hoeveel opbrengst per km<sup>2</sup> kan worden verwacht. Dit zal sterk verschillen per gebied.

De berekening is gebaseerd op een evenredige verdeling van nutriënten (het homogeen zijn van de Noordzee) en mosselproductie over het NCP. In werkelijkheid zijn er meer nutriënten in het zuidelijke deel van het NCP en moet mogelijk een groot deel van de mosselproductie hier plaatsvinden. Om deze gradiënt te bepalen van het totaal aan 58.000 km<sup>2</sup> NCP, is op basis van het chlorofylgehalte (een maat voor de hoeveelheid microalgen in het water) de draagkracht bepaald van gebieden binnen het NCP (zie figuur 5; van Bogaart et al. 2020).



Figuur 5 Kansenkaart voor mosselweek in potentiële windparklocaties. Toegevoegd zijn de geschiktheid van de gebieden op basis van saliniteit (zoutgehalte), zwevend stofgehalte [SPM (gemiddeld)], voedselaanbod en stroming (zie van den Bogaart et al. 2020).

Uit het onderzoek van Van den Bogaart et al. 2020, blijkt dat er binnen het NCP drie gradiënten te vinden zijn voor chlorofyl x de stroomsnelheid. Op basis hiervan blijkt 19% van het oppervlak van het NCP het best geschikt voor mosselweek. Dit gebied bevindt zich met name nabij de kust; 54% is minder geschikt ('voldoende') en betreft vooral de verder op zee gelegen gebieden. Het is niet verassend dat dit beeld overeen komt met de verdeling van de nutriënten over het NCP waarbij de meest stabiele stikstofconcentraties worden gevonden binnen ca. 35 km uit de kust (Vilmin & van Duren, 2021). Het is mogelijk dat, door veranderende stromingen, windmolenparken de stratificatie van nutriënten in de Noordzee in de toekomst gaan veranderen.

Tabel 2 Oppervlakte (km<sup>2</sup>) van het totale NCP beschikbaar voor mosselweek en de geschiktheid van een hoeveelheid km<sup>2</sup> aan de hand van elke gradiënt (Bogaart et al. 2020).

Oppervlakte (km <sup>2</sup> ) beschikbaar voor mosselweek	Geschiktheidsklasse			Totaal
	Best	Goed	Voldoende	
Ton mosselen	11.020	15.660	31.320	58.000
Aandeel in totaal	19%	27%	54%	100%

---

### 3.1.3 Technische draagkracht

De technische draagkracht wordt vooral bepaald door de ruimte die op de Noordzee beschikbaar is /komt voor mosselkweek. In deze analyse is ervan uitgegaan dat offshore mosselkweek zal worden ontwikkeld binnen windmolenparken, omdat daar een deel van de infrastructuur reeds aanwezig is en er al strenge restricties gelden met betrekking tot vaarbewegingen. Van het totale NCP wordt 17%-20% aan oppervlak gebruikt voor windmolens en is nog 25% gereserveerd voor toekomstige windmolenparken. Dit betekent dat er uiteindelijk in totaal 45% van het NCP als windmolenpark zal zijn ingericht, waarbinnen mosselkweek mogelijk zou kunnen zijn. Op basis van een schatting van Deltares (Vilmin et al. 2021) is de verwachting dat 25% van dit oppervlak voor aquacultuur gebruikt zou kunnen worden. In totaal zou er dus  $58000 \times 45\% \times 25\% = 6525 \text{ km}^2$  beschikbaar komen voor aquacultuur binnen offshore windmolenparken.

Voor de maximaal te produceren hoeveelheid mosselen van 0,4-0,6 miljoen ton (ecologische draagkracht), is dus maximaal  $6525 \text{ km}^2$  beschikbaar. Dat komt neer op circa 60 tot 90 ton mosselen per  $\text{km}^2$ . In het Maribe project is geschat dat onder gunstige omstandigheden tot wel 3.700 ton/ $\text{km}^2$  gekweekt kan worden (van den Burg, 2017). In dat gunstige geval zou  $150 \text{ km}^2$  nodig zijn om de maximale mosselopbrengst te produceren. Dit is minder dan 3% van de geschatte maximale ruimte van  $6525 \text{ km}^2$ , zodat geconcludeerd kan worden dat de technische draagkracht op het NCP niet limiterend is wanneer de geplande windmolenparken voor aquacultuur beschikbaar komen.

### 3.1.4 Discussie en conclusie

Op basis van een versimpelde berekening en aannames bedraagt het productieniveau met een veilige marge (op basis van voorzorgsprincipes) om aan mosselkweek te produceren 0,4 tot 0,6 miljoen ton in het totale NCP. Deze getallen dienen slechts als eerste indicatie van de ecologische draagkracht te worden beschouwd. Met name het gedurende het jaar fluctuerende nutriënten/voedselaanbod vormt een grote onzekerheid die in onze berekening is meegenomen door te veronderstellen dat gedurende de helft van het jaar de nutriëntenvoorraad uitgeput is. Waarschijnlijk is deze periode korter waardoor de productiecapaciteit is onderschat. Anderzijds worden de hoogste nutriëntgehalten aangetroffen gedurende de winterperiode waarin de groei van de schelpdieren beperkt is, dit zou tot een overschatting van de productieruimte geleid kunnen hebben.

Voor meer accurate berekeningen is een beter inzicht in de effecten van nutriëntenopname door schelpdierculturen van groot belang. Hiervoor zijn rekenmodellen nodig die de beschikbaarheid van nutriënten gedurende het jaar en de verschillende trofische relaties en interacties daartussen in het Noordzee-ecosysteem beschrijven.

Uitgangspunt bij het vaststellen van de ecologische draagkracht is dat er geen ecologische (negatieve) effecten zullen. Nog steeds blijft een van de belangrijke factoren de beslissing wat een acceptabele opname van nutriënten zou zijn, in combinatie met andere plannen op de Noordzee. Als een doelstelling bijvoorbeeld is om substantiële oppervlakten oesterbanken te herstellen, zal de beschikbaarheid van fytoplankton (= voedsel voor de oesters) essentieel zijn. Ook grootschalige zeewierkweek, zoals ook als optie wordt genoemd binnen windmolenparken, zal invloed hebben op de beschikbare hoeveelheid nutriënten.

Uit onze indicatieve berekening blijkt dat de ecologische draagkracht van de Noordzee beperkt is en dat er geen ruimte kan worden opgeëist voor duizenden vierkante kilometers schelpdierkweek. De technische draagkracht is dus niet de beperkende factor.

Bij deze berekeningen is ervan uitgegaan dat de kweekomstandigheden op de gehele Noordzee gelijk zijn. Dit is niet het geval. Nutriëntgehalten zijn nabij de kust hoger dan off-shore en kunnen ook per gebied aanzienlijk verschillen. Eerder verkennend onderzoek heeft laten zien dat de Noordzee veel minder productief is voor schelpdierkweek dan de Oosterschelde. Indicatieve productiegetallen verschillen tussen 7,6 en 1,8 gram drooggewicht/ $\text{m}^2$ /jaar voor respectievelijk de Oosterschelde en de Noordzee (van der Meer, 2022).

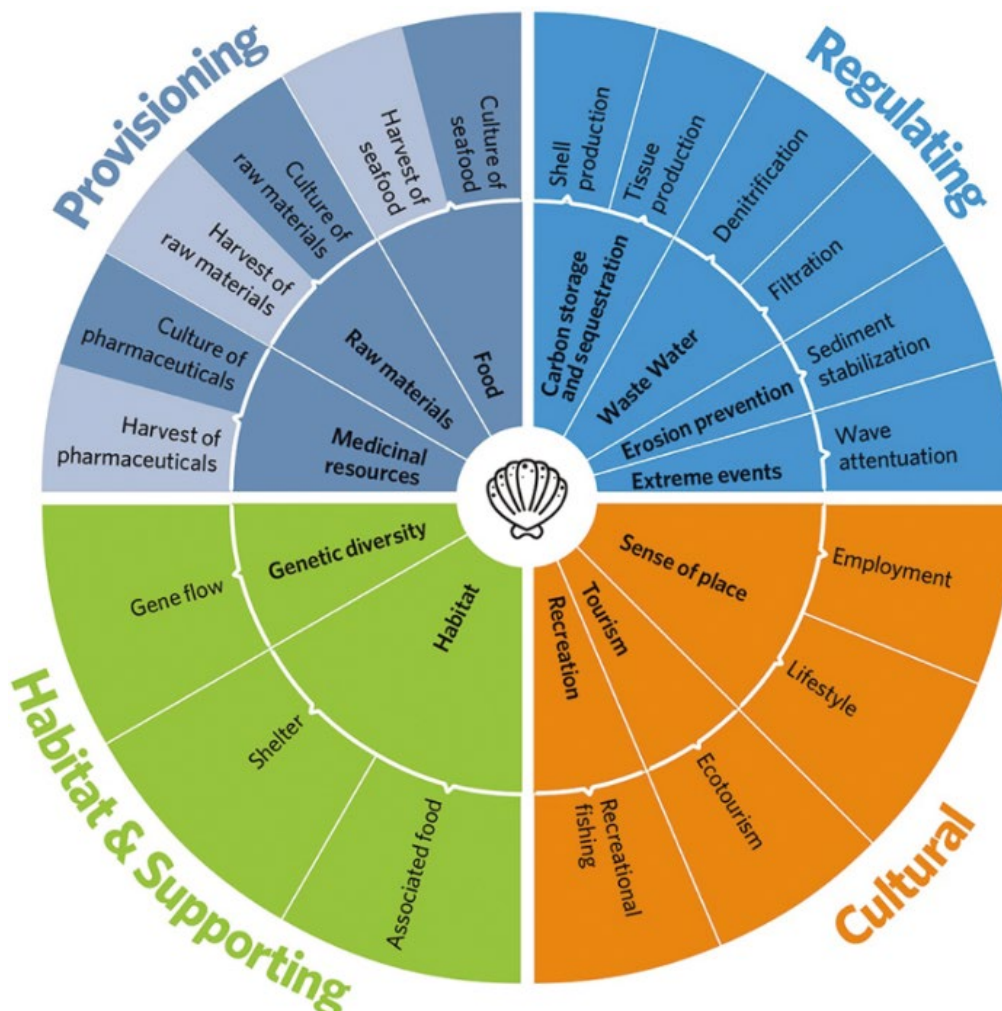
Om de bovengenoemde complexe interacties te kunnen wegen, is multidisciplinair fundamenteel en toegepast onderzoek nodig. Ook is het belangrijk om inzicht te krijgen in de directe impact en/of bijdrage van grootschalige schelpdierkweek op het natuurlijke kapitaal, waaronder biodiversiteit in de waterkolom en bodem.

## 3.2 Ketenanalyse schelpdierkweek

### 3.2.1 Ecosysteemdiensten

Tweekleppigen kunnen meerdere voordelen aan hun omgeving bieden waarvan maatschappelijk geproefteerd kan worden. Deze voordelen zijn zogenaamde ecosysteemdiensten en worden onderverdeeld in vier categorieën: voorzienend (provisioning), regulerend (regulating), cultureel en habitat/ondersteunend (Reid *et al.*, 2005). Over het algemeen zijn voorzienende diensten diensten die we als mens direct kunnen oogsten en consumeren. De regulerende diensten zijn diensten die niet geconsumeerd worden, maar waar we wel van profiteren door het (ecosysteem) proces dat ze bieden. De culturele diensten zijn niet-tastbare voordelen die het ecosysteem biedt, zoals recreatie/cultuur. Ten slotte zijn de habitat en ondersteunende diensten de processen die nodig zijn om andere ecosysteemdiensten te faciliteren. Ondanks de verschillen en aard in de diensten is het van belang om op te merken dat de verschillende diensten wel in relatie met elkaar staan. Samen zijn deze bepalend voor de ecosysteem diensten die we als maatschappij van belang vinden.

Als bijvoorbeeld een schelpdier groeit, dan zal het meer vlees en dus voedsel (=voorzienende dienst) leveren, tegelijkertijd zal zich tussen de schelpdieren -op de mosselbank- biodiversiteit ontwikkelen en hiermee leefruimte voor andere organismen ontwikkelen (=regulerende dienst). In Figuur 4 worden de potentiële ecosysteemdiensten van schelpdierkweek weergegeven zoals geïdentificeerd door Alleway *et al* (2019). In deze figuur wordt koolstofvastlegging bij schelpvorming nog wel als ecosysteemdienst aangemerkt, terwijl dit volgens nieuwe inzichten niet meer het geval is (zie hoofdstuk 2).



*Figuur 1 Potentiële voordelen van schelpdier aquacultuur verdeeld over de vier ecosysteem services (Alleway *et al*, 2019). Let op dat in deze figuur koolstofvastlegging bij schelpvorming nog wel als ecosysteem dienst wordt aangemerkt, terwijl dit volgens nieuwe inzichten niet meer het geval is (zie hoofdstuk 2).*

De voorzienende ecosysteemdienst is misschien wel de meest herkenbare van de vier ecosysteemdiensten. Het mosselvlees dat wordt geconsumeerd wordt geclassificeerd als ecosysteemdienst. Tweekleppigen worden al eeuwenlang geoogst voor hun vlees, de oogst van oesters in China gaat 2000 jaar terug en er wordt verondersteld dat tweekleppigen een cruciale rol speelden in de evolutie van de mens (Smaal et al, 2019). Het vlees van tweekleppigen heeft een laag vetgehalte, maar is het rijk aan omega-3, eiwitten en vitamines, waardoor het als gezond onderdeel in het dieet wordt gezien. Omdat tweekleppigen zogenaamde laag trofische soorten zijn en in open water worden gekweekt hebben ze geen toegevoegde voedingsstoffen nodig, maar voeden ze zich grotendeels met microalgen die ze opnemen uit hun omgeving (Dankers, & Fey-Hofstede, 2015). Ook worden bij de kweek geen pesticiden toegepast.

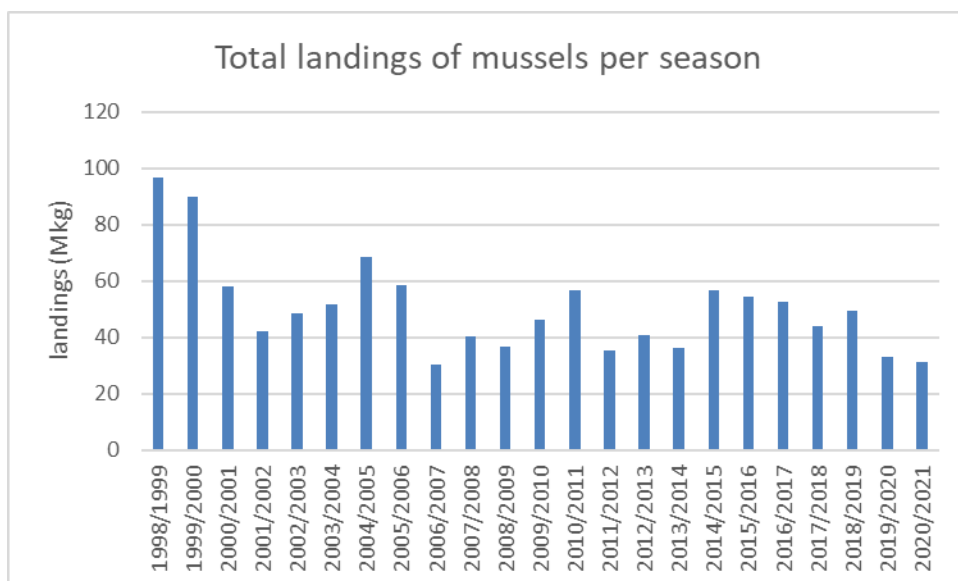
Als de populatie van de tweekleppigen toeneemt, zal ook de consumptie van de microalgen toenemen, en dit heeft een effect op het productiepotentieel (en draagkracht) van tweekleppigen en andere productiesoorten verder in het voedselweb (zoals in de vorige paragraaf besproken). Bovendien heeft de schelp, naast het vlees dat als voedsel wordt gebruikt, ook verschillende toepassingen, hoewel dit op een veel kleinere schaal is dan de schaal van de voedselproductie. Zo wordt onderzoek gedaan naar het gebruik van de schelp als buffermateriaal in de bodem en wordt in dit rapport de toepassing als ingrediënt in cement en beton behandeld (Álvarez et al, 2012; Martínez-García et al, 2019).

### 3.2.2 Ketenanalyse Nederlandse schelpdierkweek

De huidige keten van de schelpdierindustrie in Nederland is het startpunt van waaruit de Nederlandse industrie een ontwikkeling kan maken om bij te dragen aan een optimale inpassing van schelpdieren in het voedselsysteem. Onderstaand wordt hiertoe een overzicht gegeven van de schelpdierindustrie, waarbij specifiek naar de mosselsector en -keten wordt gekeken.

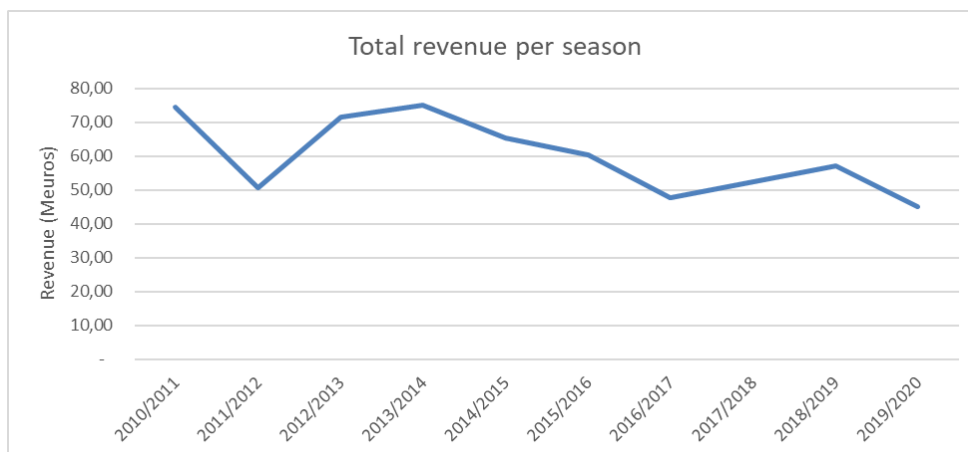
De aanvoer/aanlanding van in Nederland gekweekte mosselen is de afgelopen jaren afnemend, met een gemiddeld productievolume van gemiddeld 43.000 ton over de jaren 2016-2020 (CBS en Agrimatie, 2022).

De (blauwe) mossel (*Mytilus edulis* L.) is het belangrijkste aquacultuurproduct van Nederland. Ongeveer 50 bedrijven met 48 productieschepen produceerden in 2019/2020 33 Mkg mosselen op bodemkweekpercelen in de Waddenzee en Oosterschelde. In 2020-2021 bedroeg de productie 31,5 Mkg (Figuur 7). Tweederde hiervan kwam van kweekpercelen in de Oosterschelde en één derde in de Waddenzee. De mosselen worden via de mosselveiling door kwekers aan handelaren verkocht, maar de laatste jaren worden mosselen ook onderhands verkocht zonder geveild te worden. Het gevolg hiervan is dat de transparantie van de Nederlandse mosselprijs sterk wordt verminderd.



Figuur 7 Totale aanlanding van mosselen (in Mkg) in Nederland (Agrimatie.nl).





*Figuur 8 Totale omzet (revenue) van mosselen (in Meuros) in Nederland (Agrimatie.nl).*

De omzet van de mosselsector bedroeg 45 miljoen euro in 2019/2020 (Figuur 8). Het nettoresultaat wordt in hetzelfde seizoen geschat op 4 miljoen euro. In de voorgaande jaren schommelde het resultaat van 23 miljoen euro per seizoen positief, naar 2 miljoen euro negatief (2016/2017). In 2021-2022 was de totale aanvoer 33.000 ton, met een omzet van ongeveer 66 miljoen euro. De vier seizoenen daarvoor waren de resultaten relatief laag, door lagere productievolumes en/of lage prijzen. De oorzaak hiervan is in meerdere factoren te vinden, zoals mosselsterfte, geschiktheid percelen, beschikbaarheid kweekareaal, beschikbaarheid voedingsstoffen en andere oorzaken. In voorliggende studie gaan we voor onze case studie uit van een gemiddelde aanvoer uit Nederlandse kweek van 37.500 ton per jaar.

De productie in de huidige productiegebieden wordt vanwege de complexiteit in de productieopscaling als limiterend gezien, waardoor nieuwe productiegebieden worden verkend. De mosselsector heeft een akkoord met overheden en Ngo's over de transitie van de mosselkweek. Hierbij wordt ingezet op verbeteren van de productiviteit, duurzaamheid en productieperspectief, waardoor onder andere nieuwe methoden en nieuwe productiegebieden onder de aandacht staan. Mosselzaad wordt in Nederland meestal verzameld in belangrijke natuurgebieden, waar bijvoorbeeld ook (broed)vogels van de mosselvoorraad afhankelijk zijn. De hoeveelheid benodigde/inzetbare kweekpercelen is afhankelijk van vier factoren (Smaal et al. 2010): 1) de aanvoer van mosselzaad, 2) de groei en overleving op de kweekpercelen, en 3) de behoefte aan mosselbroed voor verzaaien naar andere gebieden, 4) oogst voor marktlevering. De grootte van de aanwezige bestanden (de biomassa) is variabel in tijd en ruimte, wat van invloed is op de dichtheid en verdeling van het bestand, wat weer van invloed is op de quota van mosselbroed (mosselzaad). De hoeveelheid beschikbaar zaad is belangrijk voor de mosselsector. De regering stelt quota vast op basis van een jaarlijkse beoordeling van de hoeveelheid aanwezig mosselzaad. Mosselzaad invang systemen (MZIs) worden toegepast om de afhankelijkheid van het wilde mosselbroed te verminderen (Smaal et al., 2019).

Naast de Nederlandse productiekanalen is er sprake van een aanvulling van de aanvoer vanuit buitenlandse mosselkweek. De landen van herkomst zijn o.a. Noord-Ierland, Ierland, Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Denemarken. De import gebeurt in de regel met vrachtwagens, waarbij de aanvoer bestaat uit levende verse mosselen, soms met aanhangend tarra (ongeveer 25% van het totaalgewicht). Deze mosselen worden hetzelfde verwerkt als de Nederlandse productie, waarbij indien nodig een zuiveringsstap aan het proces wordt toegevoegd (een verbeterd spoelproces).

Mosselen worden in Nederland voornamelijk gekweekt op bodempercelen. Hangculturen vormen slechts een beperkt percentage van het productievolume. Mosselen worden gekweekt in de Waddenzee en Oosterschelde, waarna de productie wordt overgebracht naar de verwerkingsbedrijven, waarvan het grootste deel geconcentreerd is in de Zuid Westelijke regio rond Yerseke. Daar zijn naast de mosselverwerking, ook oesterbedrijven, schelpdierbedrijven (kokkels, mesheften, spisula, garnalen etc), en fossiele schelpen verwerkers (kippengrit, isolatiemateriaal etc) actief in de Delta. Daarnaast heeft Yerseke, door de specialisatie in versproducten, zich ontwikkelt tot draaischijf voor diverse visserijproducten. Yerseke fungeert hiermee als een logistieke hub voor een groot deel van distributie in Europa, met Duitsland, België, Frankrijk, Spanje en Italië als belangrijke eindmarkten.

---

De vershandel in Yerseke bestaat voor een groot deel uit productie en verwerking van mosselen. De grootste productie vindt plaats op kweekpercelen in de Waddenzee en Oosterschelde. De mosselen worden traditioneel opgekweekt op bodem percelen of ingevangen met mosselzaad invangsystemen. Hierna worden de mosselen opgekweekt op bodempercelen (een natte akker), waarbij ze 1 of meerdere malen worden verplaatst naar geschiktere gebieden. Ieder gebied, productiefase (zaad, halfwas, consumptie) en kweker kent een aan de omstandigheden aangepaste manier van kweken.

Als de mosselen consumptierijp zijn (>4.5cm) worden zij opgevist en per vrachtwagen (of schip) naar de verwerkende bedrijven getransporteerd. Hier wordt de mossel gespoeld, gezuiverd, ontbaard, ontpokt en uiteindelijk verpakt. Een deel van de mosselen wordt gekookt in de kokerij (5%), waarbij de mosselschelp en het mosselvlees gescheiden worden. Het mosselvocht wordt soms verwerkt tot sauzen of andere producten (mosselvocht), of afgevoerd. Mosselvlees wordt op diverse wijze verwerkt (ingevroren, ingeblikt, gepot op zuur, etc). De mosselschelp wordt doorgaans verkocht aan de oesterindustrie om broed in te vangen. De toepassing van de schelpen is afhankelijk van vraag en aanbod. Op het moment van schrijven is de vraag groter dan het aanbod, waardoor er een tekort aan schelpmateriaal is. Dit kan door veranderende macro-economische factoren variëren, waardoor er flexibiliteit in prijs en marktvraag is.

60-70% van de geproduceerde mosselen wordt geëxporteerd naar landen als België en Frankrijk. Een bescheiden deel wordt in Nederland geconsumeerd. Er wordt een kleine verscheidenheid aan productsoorten verkocht. De meeste mosselen worden vers of vacuümverpakt verkocht in verpakkingen van 2 tot 2,5 kg.

De grootste uitdaging van de mosselsector om een toename van de productie-efficiëntie en productie-potentieel te realiseren is het gebrek aan beschikbaar mosselzaad en voldoende kwalitatieve productiegronden. Een deel van de productie is het afgelopen decennium geoptimaliseerd door het onderzoek naar de ontwikkeling van mosselzaad invangsystemen. Daarnaast wordt verkend of er ook kansen buiten de bestaande productiegebieden zijn, die mogelijk beschikbaar komen door de verandering in ruimtelijke organisatie van de Noordzee.

De Nederlandse overheid heeft zich ten doel gesteld om de Noordzee om te vormen tot een gebied waar in 2050 voedselproductie, hernieuwbare energie, natuurbehoud en CO<sub>2</sub>-opslag gecombineerd kan worden (Strietman, Hamon & Mol, 2019). Voor duurzame energie worden windparken gebouwd in de Nederlandse economische exclusieve zone (EEZ). Doelstelling is om energieproductie uit windparken tussen 2024 en 2030 te verhogen van 4,5 gigawatt naar 11,5 gigawatt. Dit betekent dat steeds grotere gebieden van de Nederlandse EEZ zijn gereserveerd voor deze windparken (Rijksoverheid, 2018). Er is een Noordzee-akkoord waarin afspraken gemaakt worden over de ontwikkelingen op het gebied van voedsel uit zee. De overheid verkent voorbeelden zoals het kweken van zeewier in de Noordzee en het gebruik van mosselzaadverzamelaars. Daarom wordt gekeken naar de mogelijkheden van multifunctioneel gebruik van windparken (Ministerie van Infrastructuur en Milieu & ministerie van Economische Zaken, 2022).

Een project dat de mogelijkheid van komende windparken met grootschalige mosselkweek onderzocht is het project Blauwdruk (Lagerveld *et al.*, 2014). In dit project zijn meerdere ecologische en financiële risico's geïdentificeerd. Er werd geconcludeerd dat aquacultuur offshore mosselkweek zou kunnen worden toegepast en dat een combinatie van mosselzaad, halfwas en consumptie mosselen veelbelovende opties zijn (Lagerveld *et al.*, 2014). De aannames die in het project Blauwdruk staan worden gebruikt als leidraad voor productiemogelijkheden. Ondanks dat er ruimtelijk en qua draagkracht brede mogelijkheden zijn, lijkt een scenario waarbij de huidige mosselproductie verdubbeld, een realistische om als uitgangspunt te nemen.

Ontwikkelingen zoals offshore windparken kunnen mogelijkheden bieden om teeltstappen buiten de huidige teeltpercelen te implementeren of haalbare kleinere mosselen offshore te produceren. In dit rapport wordt rekening gehouden met het feit dat de huidige mosselsector kan veranderen naar een meer offshore-georiënteerde industrie. Op dit moment zijn er onzekerheden over de economische haalbaarheid, de toekomstige marktabsorptie. Verschillende trajecten rond vierkantsverwaarding van mosselen worden verkend om zodanig een verbeterd marktperspectief te genereren, passend bij de uitdagingen van de toekomst (veranderende consument, markt en productie).

---

### 3.2.3 Verwaardiging van mosselschelpen

Voor het verwaarden van mosselschelpen is het van belang om de keten te kennen. Bovenstaand is een beschrijving gegeven van de productie en verwerkingskant in de keten. Op dit moment zijn er veel scenario's aan te dragen om een verbetering en maximalisatie in productie aan te brengen. Echter, er wordt gekozen voor een opschaalbaar scenario over een periode van 10-20 jaar. Hierbij wordt een verdubbeling van de huidige sector ondanks onzekerheden als haalbaar gezien.

De opschaling van mosselproductie zal gepaard gaan met een verandering in de productieketen en de productie/verwerkingsstrategie. De markt voor verse mosselen zal mogelijk veranderen (maar waarschijnlijk niet significant groeien), waardoor er voor toekomstige ontwikkelingen zeker rekening gehouden moet worden met veranderende verwerkingsscenario's. Aangezien er vanuit de huidige markt geen specifieke consensus bestaat over de toekomst, zijn voor scenario's rond het gebruik van mosselschelpen als bijproduct verschillende scenario's uitgewerkt. In deze studie wordt maximaal ingezet op processen die bijdragen aan het scheiden van product en het concentreren van de bijproductstroom (specifiek de schelp).

Aangezien de aannamen in het Blauwdruk en Maribe project nog ruim zijn op basis van de huidige inzichten, is gekozen om voor het mosselproductie scenario uit te gaan van de maximale productie die binnen de draagkracht voor toevoeging van mosselen op de Noordzee valt en voor een scenario dat daar boven ligt. We gaan hierbij uit van 37.500 ton als referentie volume voor de huidige aanvoer keten. Daarnaast is er een aanvoer van 37.500 ton productie uit import (aanvoer uit Duitsland, Denemarken, Ierland en Verenigd Koninkrijk). Samen is het referentievolume voor productie en verwerking in Nederland hiermee 75.000 ton.

Voor de productie toename gaan we uit van een toename met 50% t.o.v. het referentie volume. Deze productie dient plaats te vinden in de Noordzee of Voordelta (als meest passende locaties). Hierdoor ontstaat een scenario waarbij het referentie scenario van 75.000 ton wordt aanvullend met 37.500 ton productie. Hieruit volgt een totaal te verwerkend productie van 112.500 ton.

Als derde "realistisch" scenario gaan we uit van een toename met 100% t.o.v. het referentie volume. Deze productie dient plaats te vinden in de Noordzee of Voordelta (als meest passende locaties). Hierdoor ontstaat een scenario waarbij het referentie scenario van 75.000 ton wordt aangevuld met 75.000 ton productie. Hieruit volgt een totaal te verwerken productie volume van 150.000 ton.

De draagkracht berekeningen laten zien dat er een totale draagkracht van 0,4 tot 0,6 miljoen ton is (paragraaf 3.1). In voorliggende studie selecteren we twee scenario's op basis van een maximale draagkracht van 0,4 mln ton (400.000 ton). In de berekening gaan we uit van een bewerking van 50% en 90% van de toegevoegde productie.

Daarnaast is een scenario geselecteerd met een productietoename van de helft van de ondergrens van de maximale draagkracht, dit is 200.000 ton productie. Voor dit, en zeker voor voorgaand scenario geldt dat de productiescenario's erg optimistisch zijn ingeschat qua haalbaarheid in de praktijk (beschikbare ruimte, kapitaal, kansen, risico's, impact etc.). Ook in deze berekening gaan we uit van een bewerking waarbij de schelpen kunnen worden verzameld van 50% en 90% van de toegevoegde productie.

Op basis van bovenstaande aannames zijn de volgende combinatie scenario's uitgewerkt:

- Geen productietoename, waarbij het percentage bewerkt product gelijk blijft (2%) (huidige status: 75.000 ton (37.500 ton aanvoer Nederland, 37.500 ton aanvoer import)
- Geen productietoename, maar wel een verandering in het percentage bewerkt product (50-100%)
- Geen productietoename, maar wel een verbeterd benuttingskanaal voor producten in de horeca (end point verzamelen)
- Productietoename 50% (toename 37.500 ton), waarbij 50 of 100% van de toename wordt bewerkt
- Productietoename 100% (toename 75.000 ton), waarbij 50 of 100% wordt bewerkt
- Productietoename 200.000 ton, waarbij 50 of 90% wordt bewerkt
- Productietoename 400.000 ton, waarbij 50 of 90% wordt bewerkt

In de verschillende scenario's kan berekend worden welke productstromen er op locaties aanwezig zullen zijn. Hierbij is in de uitwerking van de scenario's rekening gehouden met eventuele toekomstige keuzes. De locatie van verwerking is niet specifiek benoemd en kan overal aan de kust plaatsvinden (of bij de

---

huidige verwerkingskanalen gebeuren). Voor de logistiek van schelpmateriaal wordt uitgegaan van lokale verwerking (voor voorbehandeling t.b.v. proces beton/cement, zie verder).

Eindproducten kunnen bestaan uit verschillende bewerkte producten zoals:

- Mosselproducten op basis van het mosselvlees (gekookt of ongekookt mosselmateriaal)
- Mosselextracten (eiwit, olie, specifieke extracten etc.)
- Mosselolie en mosselvet gezuiverd
- Eiwit concentraten
- Traditioneel bewerkte producten (gekookt, bevroren, etc.)

In Figuur 5 en Figuur 6 is een overzicht gegeven van de verschillende productie scenario's, waarbij het doel is om de biomassa aan schelpmateriaal op verschillende locaties te achterhalen. Hierbij is uitgangspunt dat schelpdieren die op de verwerkingslocatie worden verwerkt (scheiding vlees en schelp) resulteren in een herbruikbare schelpenfractie.

Daarnaast zullen schelpdieren als vers product naar de consument gaan. Hierbij zijn we uitgegaan dat 30% van de schelpdieren naar de horeca gaat en 70% naar directe consumptie. Hierbij beschouwen we de fractie die naar de horeca gaat als herbruikbaar. Er is uitgegaan van een schelppercentage van 70% (uitgaande van een goede productiekwaliteit voor mosselvlees productie). Schelpen die bij consumenten, en andere kleinschalige distributiekkanalen terecht komen zijn als niet herbruikbaar aangemerkt. Vanzelfsprekend zijn er scenario's te bedenken die dit wel mogelijk maken in de toekomst (bijvoorbeeld door middel van specifieke separatie technieken). Deze zijn niet meegenomen, aangezien op dit moment de schelpen als reststroom diffuus zijn, en qua volumes beperkt. Dit neemt niet weg dat er in verschillende deelketens oplossingsmogelijkheden verkend/haalbaar kunnen worden.

Hierdoor ontstaat een serie aan mogelijke toekomstige verwerkingsscenario's met hieraan gekoppeld de betreffende schelpvolumes.

Figuur 5 toont de scenario's waarbij de productie met 50 of 100% wordt verhoogd ten opzichte van de huidige situatie waarin 75.000 ton mosselen, dus 52.500 ton (70%) schelpen wordt geproduceerd. De huidige keten resulteert in een potentieel hergebruik volume van 1.050 ton schelpen (uit verwerking) met de mogelijkheid tot toevoeging vanuit horecakanalen 15.435 ton. Er is in deze keten 36.015 ton als niet herbruikbaar berekend, dit zijn de volumes die buiten de horecakanalen gedistribueerd zijn.

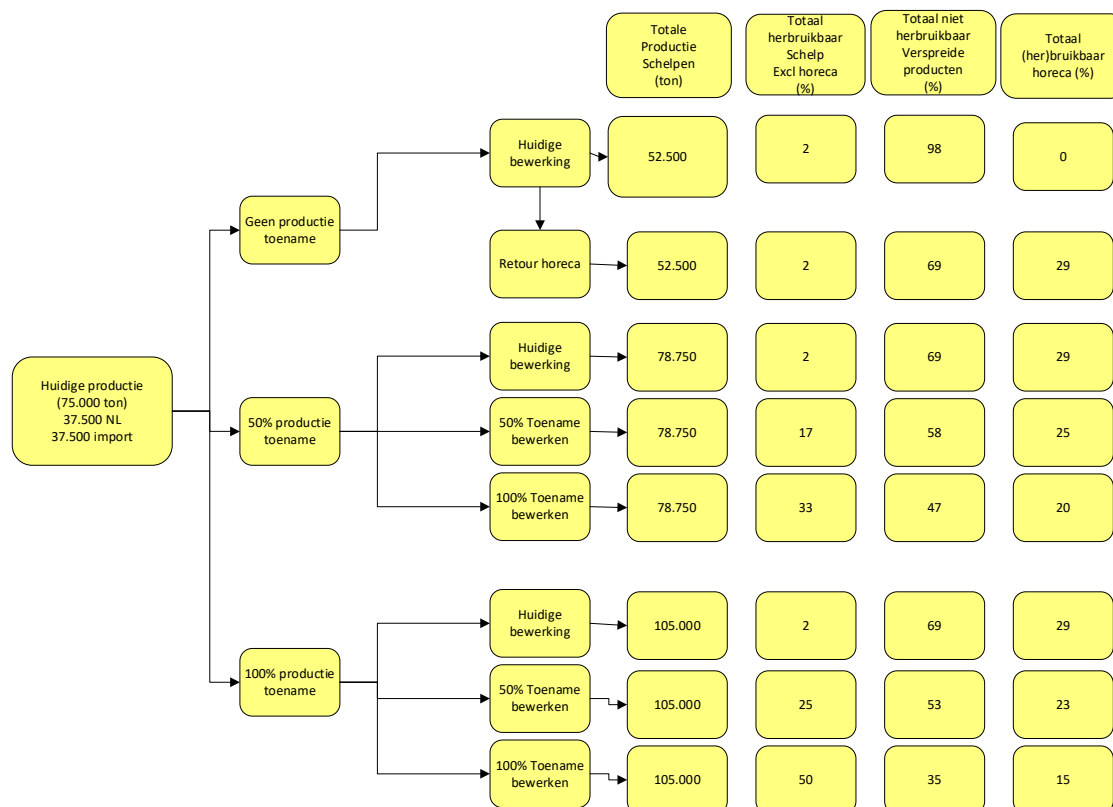
Het maximaal te hergebruiken schelpvolume is in productie verdubbelingsscenario's 52.500 ton (100% productie toename en 100% toename verwerkt). Hier kan een volume van 15.750 ton (15%) uit horecakanalen toegevoegd worden. Er is in dit scenario een productie van 36.750 ton (35%) schelpen, die niet herbruikbaar zijn.

*Figuur 6* toont de scenario's waarbij de huidige productie met 200.000 en 400.000 ton wordt opgevoerd.

Het maximaal te hergebruiken schelpvolume is in productie scenario's met een toename van 200.000 ton productie (90% toename verwerkt). Hier komt een volume van 173.250 ton (90%) vrij voor hergebruik. Hier kan een volume van 5.775 ton (3%) uit horeca kanalen toegevoegd worden. Er is in dit scenario een productie van 13.475 ton (7%) schelpen, die niet herbruikbaar zijn.

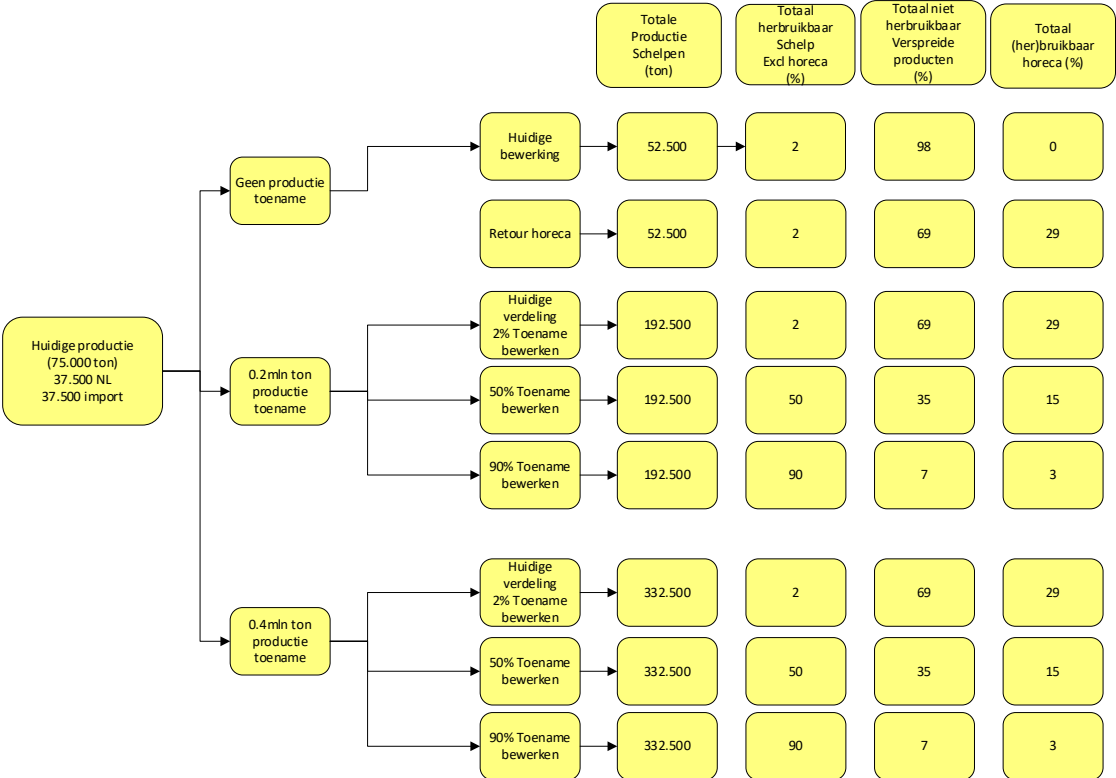
Het maximaal te hergebruiken schelpvolume is in productie scenario's met een toename van 400.000 ton productie (90% toename) verwerkt. Hier komt een volume van 299.250 ton (90%) vrij voor hergebruik. Hier kan een volume van 9.975 (3%) ton uit horeca kanalen toegevoegd worden. Er is in dit scenario een productie van 23.275 ton (7%) schelpen, die niet herbruikbaar zijn.

## Future Dutch Mussel production chain Options Shell volumes



*Figuur 2 Verschillende scenario's voor het hergebruiken van schelpen bij een toename van de mosselproductie in Nederland met 50 en 100%. Doel is om de biomassa aan schelpmateriaal op verschillende locaties inzichtelijk te maken. De totale volumes productie van schelpen zijn in metrische tonnen weergegeven. De volumes op de verschillende punten in de keten (al dan niet herbruikbaar) in percentages van het totaal.*

Future Dutch Mussel production chain Options Shell volumes



Figuur 3 Verschillende scenario's voor het hergebruiken van schelpen bij een toename van de mosselproductie in Nederland met 200.000 en 400.000 ton. Doel is om de biomassa aan schelpmateriaal op verschillende locaties inzichtelijk te maken. De totale volumes productie van schelpen zijn in metrische tonnen weergegeven. De volumes op de verschillende punten in de keten (al dan niet herbruikbaar) in percentages van het totaal.

## 4 Analyse cement- en betonindustrie

### 4.1 Koolstofstromen in cement-/betonproductie

#### 4.1.1 Productie van cement

Cement wordt gebruikt als bindmiddel bij de productie van mortel en beton. Nadat het chemisch reageert met het aanwezige water, houdt het de andere componenten bij elkaar wat resulteert in een stevig composietmateriaal. Voor de productie van het standaard portlandcement wordt kalksteen ( $\text{CaCO}_3$ ) vermalen en gemengd met bronnen van siliciumoxide, ijzer(III)oxide en aluminiumoxide. Vervolgens wordt het mengsel verwarmd tot een hoge temperatuur ( $>600$  of  $800\text{ }^\circ\text{C}$ ) waarbij calcinatie plaatsvindt; het  $\text{CaCO}_3$  wordt afgebroken tot  $\text{CO}_2$  en  $\text{CaO}$ . Vervolgens wordt het mengsel verder verwarmd tot  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ , waarbij uit  $\text{CaO}$  en beliet ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) aliet ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) wordt gevormd. Het resulterende product wordt versmolten tot portlandcementklinkers van 0,5 tot 2,5 cm. Afhankelijk van het aanwezige gehalte aan onzuiverheden in de gebruikte kalksteen kunnen verschillende grondstoffen als bron van het silicium en aluminium dienen, zoals klei, schalie, zand, ijzererts, bauxiet, vliegas, koolas en slakken. Voor het vermalen tot een eindproduct (cement), kan gips aan de klinkers worden toegevoegd om de uithardingstijd te beïnvloeden [[https://en.wikipedia.org/wiki/Portland\\_cement](https://en.wikipedia.org/wiki/Portland_cement)]. De samenstelling van Portlandcement staat vermeld in Tabel 2.

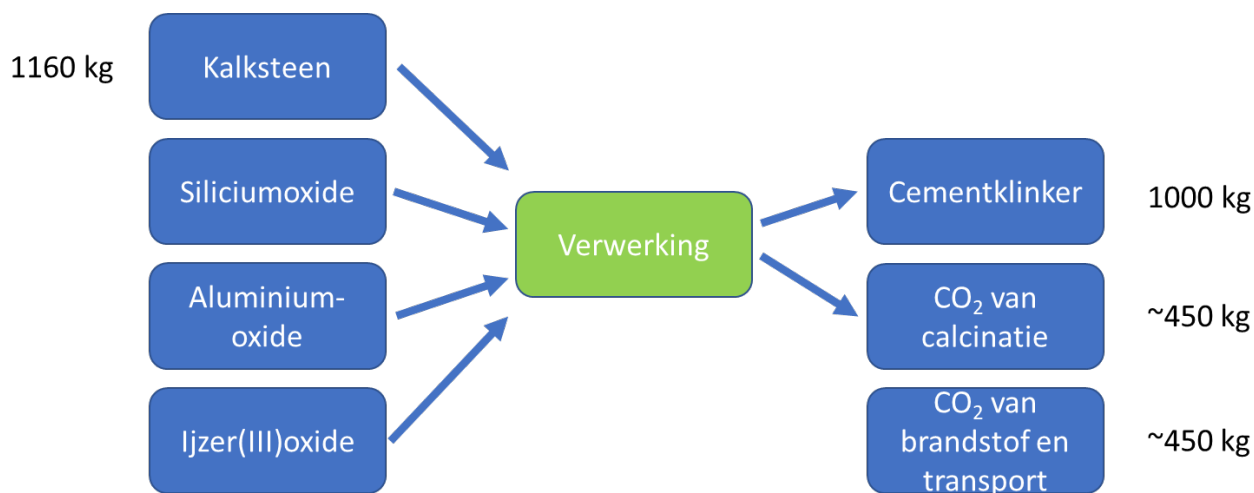
Tabel 3 Samenstelling van Portland cementklinker (Fayomi et al, 2019).

Component	Aandeel (%)	Chemische formule
Tricalcium silicaat (aliët)	50	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ of $3\text{Ca}.\text{SiO}_2$
Dicalcium silicaat (beliet)	25	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ of $2\text{Ca}.\text{SiO}_2$
Tricalcium aluminaat	10	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ of $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$
Tetracalcium aluminoferriet	10	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ of $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$
Gips	5	$\text{CaSO}_4.\text{H}_2\text{O}$

In 2017 bedroeg de wereldwijde cementproductie 4,1 miljard ton, waarbij China de grootste producent was met 2,3 miljard ton. De cementproductie in de EU28 in 2017 bedroeg 175 miljoen ton (<https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures/>).

Gemiddeld veroorzaakt de cementproductie ongeveer 0,9 ton  $\text{CO}_2$ -uitstoot per ton cement. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de emissies van de winning van grondstoffen en het transport van grondstoffen en producten. Voor een gemiddeld cementproduct is ongeveer 50% van de  $\text{CO}_2$ -uitstoot afkomstig van de grondstoffen en het productieproces, 40% van de verbranding van fossiele brandstoffen, en 10% van de  $\text{CO}_2$ -uitstoot is het gevolg van transport. Deze cijfers verschillen enigszins per product en wat betreft de gebruikte fossiele brandstof (kolen, stookolie, aardgas) (Fayomi et al., 2019).

Ongeveer 65% van de klinker bestaande uit  $\text{CaO}$  in de vorm van verschillende bestanddelen (Tabel 3), waaruit volgt dat 1160 kg kalksteen nodig is om 1 ton klinkers te maken (Figuur 6). Aangezien Portlandcement voor 95% uit klinkers bestaat, wordt deze hoeveelheid  $\sim 1100$  kg kalksteen per ton Portlandcement.



Figuur 4 Vereenvoudigde massabalans van de productie van cementklinker (naar Fayomi et al, 2019)

Gao *et al.* (2016) presenteren in hun onderzoek een gedetailleerde massabalans van het cement-productieproces, maar voor een iets ander type cement met 84% klinkers in plaats van 95%. Er zijn verschillende soorten cement ontwikkeld die lagere percentages klinkers bevatten. In Europa is ~50% van al het verkochte cement van het type CEMII-A. Bij deze cementsoort wordt klinker tot 20% vervangen door kalksteen (Favier *et al.*, 2018, in Xavier & Oliveira 2021). In Nederland wordt voornamelijk Portland-klinkercement (CEM I) geproduceerd, bestaande uit 95%-100% cementklinker, en Blast Furnace Slag (BFS) cement (CEM III), dat 36-95% BFS bevat. Het BFS wordt geleverd door Tata Steel, waar het ontstaat als bijproduct van de staalproductie (Xavier & Oliveira, 2021).

#### 4.1.2 Productie van beton

Bij de betonproductie wordt cement gemengd met water en een mengsel van toeslagstoffen van verschillende grootte, variërend van kleine stenen tot grind en zand. Extra ingrediënten kunnen worden toegevoegd voor functionaliteit. Beton kan worden gebruikt voor gebouwen en andere constructies, maar ook voor bestratingstegels en soortgelijke producten. In de bouw wordt gebruik gemaakt van een staalskelet, wat resulteert in gewapend beton. Zie *Tabel 4* voor een algemeen assortiment ingrediënten.

*Tabel 4* Algemene samenstelling van beton. Bron: <https://www.cement.org/cement-concrete-applications/how-concrete-is-made#>

Component	Percentage
Toeslagstoffen (zand, grind, stenen)	60% - 75%
Water	14% - 21%
Cement	7% - 15%
Lucht	Tot 8%

In 2007 werd 944 miljoen ton beton geproduceerd in de EU27 ([https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Cement\\_and\\_concrete\\_production\\_statistics\\_-\\_NACE\\_Rev.\\_1.1](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Cement_and_concrete_production_statistics_-_NACE_Rev._1.1)). Uitgaande van 60 – 75 % toeslagmaterialen, betekent dit dat er ongeveer 566 tot 708 miljoen ton aan toeslagstoffen werd gebruikt.



#### 4.1.3 Betonsoorten en CO<sub>2</sub> emissie

Er worden veel soorten constructiebeton geproduceerd, verschillend in samenstelling en betonsterkteklasse (SGS Search, 2020). In *Tabel 5* worden enkele samenstellingen weergegeven. Zoals hierboven vermeld, is CEM I-cement Portland-klinkercement dat bestaat uit 95%-100% cementklinker, en CEM III is Blast Furnace Slag (BFS) cement, dat een groot aandeel BSF bevat. Bij sommige betonmengsels wordt het grind deels vervangen door granulaat van oud beton, waardoor op grind wordt bespaard en oud beton wordt hergebruikt.

*Tabel 5 Samenstelling van verschillende soorten beton (in kg per m<sup>3</sup>). b.g. = betongranulaat. Bron: SGS Search, 2020*

	Grind	Beton-granulaat	Zand	CEM I	CEM III	Hulpstof	Water	Totaal
C12/15 CEM III	1090	-	865	-	210	0,5	145	2311
C20/25 CEM I	1050	-	820	280	-	-	182	2332
C20/25 CEM III	1060	-	825	-	290	-	190	2365
C30/37 CEM I	1075	-	805	285	-	0,5	170	2336
C30/37 CEM III	1090	-	815	-	320	0,5	160	2386
C20/25 CEM I; 30% b.g.	725	320	825	280	-	-	182	2332
C20/25 CEM III; 30% b.g.	745	325	825	-	290	-	190	2375
C30/37 CEM I; 30% b.g.	735	310	805	285	-	0,5	175	2311
C30/37 CEM III; 30% b.g.	760	330	810	-	320	0,5	170	2391

In dit rapport richten we ons op de CO<sub>2</sub>-uitstoot van verschillende onderdelen van het productieproces, namelijk: 1) grondstoffen, 2) transport naar producent, 3) productie en 4) transport naar de bouwplaats (*Tabel 6*). Zie Bijlage 2 voor meer details en berekeningen.

*Tabel 6 CO<sub>2</sub>-eq emissie van of verschillende soorten beton; van grondstoffen tot en met transport naar de bouwplaats. Uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-eq emissie per m<sup>3</sup> beton. b.g. = betongranulaat.*

	Grondstoffen CO <sub>2</sub> eq /m <sup>3</sup>	Transport naar productie CO <sub>2</sub> eq /m <sup>3</sup>	Productie CO <sub>2</sub> eq /m <sup>3</sup>	Transport naar bouwplaats CO <sub>2</sub> eq /m <sup>3</sup>	Totaal CO <sub>2</sub> eq /m <sup>3</sup>
C12/15 CEM III	99	8	3	12	122
C20/25 CEM I	338	11	3	12	364
C20/25 CEM III	125	11	3	12	152
C30/37 CEM I	344	11	3	12	370
C30/37 CEM III	137	13	3	13	165
C20/25 CEM I; 30% b.g.	334	13	3	12	362
C20/25 CEM III; 30% b.g.	121	14	3	12	150
C30/37 CEM I; 30% b.g.	340	13	3	12	368
C30/37 CEM III; 30% b.g.	133	15	3	13	163

---

## 4.2 CO<sub>2</sub> emissies bij toepassing schelpen in cement/beton

Schelpen die bestemd zijn voor gebruik in de productie van cement en beton moeten naar een centrale locatie voor verwerking worden getransporteerd. Aangenomen wordt dat de schelpen afkomstig zijn van een centrale verwerkingsfaciliteit voor schelpdieren, omdat het verzamelen van schelpen bij consumenten en restaurants waarschijnlijk inefficiënt is.

Schelpen die gebruikt gaan worden in de productie van beton en/of cement, moeten worden schoongemaakt. Verschillende toepassingen stellen verschillende eisen, maar resterend organisch materiaal is ongewenst en moet worden verwijderd. Chloride ionen, ruim aanwezig in zeewater, zijn ook ongewenst, maar dit is vooral van belang als het eindproduct wordt gebruikt voor gewapend beton, aangezien chloride zorgt voor roest van het gebruikte staal.

Er is weinig literatuur beschikbaar over op industriële schaal reinigen van schelpen. De meeste bronnen melden alleen reiniging op laboratoriumschaal, en doorgaans zonder veel detail. Barros *et al.* (2009) beschrijven een industriële verwerkingslocatie, een faciliteit met een theoretische productiecapaciteit van 80 kton CaCO<sub>3</sub> uit mosselschelpen per jaar. Iribarren *et al.* (2010) en Iribarren (2010) beschrijven ook een industrieel proces in Galicië (Spanje), vermoedelijk gaat het hier om dezelfde productielocatie. Het eindproduct dat deze auteurs beschrijven is gemalen CaCO<sub>3</sub> voor andere toepassingen dan cement en beton, maar de transport- en reinigingsstappen lijken bruikbaar. Zie Bijlage 3 voor details.

In de berekening is uitgegaan van de CO<sub>2</sub>-eq emissies voor het transport en het reinigen van het vuile schelpmateriaal. Als de beoogde toepassing vulmiddel voor beton is, moet ook het malen worden meegenomen, maar aangezien dit ook het geval is voor andere vulmiddelen, is dit nu buiten beschouwing gelaten. In het kort bestaat het proces uit 3 stappen: 1. het vervoeren van de vuile schelpen naar de verwerkingslocatie, 2. het wassen van de schelpen, inclusief het zuiveren van het gebruikte waswater, 3. het drogen gevolgd door het verhitten van de schelpen tot ~550 °C om het restant aan organisch materiaal te verwijderen. De in *Tabel 7* getoonde berekende waarden zijn dus inschattingen die 'extra' zijn als schelpen worden gebruikt, omdat deze moeten worden vervoerd en gereinigd. Voor het gebruikte water anders dan de waterzuivering bij de wasstap en voor de kleine hoeveelheden (per 100 ton ingaande stroom) aan gebruikte chemische hulpmiddelen zijn geen emissiedata bekend. De grootste bijdrage van 104 kg aan het totaal van 233 kg CO<sub>2</sub>-eq per ton uitgaande CaCO<sub>3</sub> lijkt te worden geleverd door het propaan dat wordt gebruikt bij het verhitten tot ~550 °C om het nog aanwezige organisch materiaal te verwijderen.

Bij een 'vertaling' naar de Nederlandse situatie moet rekening worden gehouden met een mogelijk andere gewenste grootte van de verwerkingslocatie. In de Spaanse bronnen wordt een installatie van 80 kton aan uitgaand CaCO<sub>3</sub> aangehouden. Verder is de gemiddelde transportafstand in de gebruikte bronnen vrij groot en waarschijnlijk kan dit voor een verwerkingsinstallatie in Nederland omlaag. Verder is het vermelden waard dat de ingaande stroom in de gebruikte Spaanse bronnen wordt geduid als "mussel shell and debris" en voor slechts ~60 % uit CaCO<sub>3</sub> bestaat. In hoeverre dit representatief is voor schelpmateriaal uit mosselverwerking in Nederland is een vraag die nog bekeken kan worden.

*Tabel 7 Berekende waarden van CO<sub>2</sub>-eq. emissie voor transport en reinigen van mosselschelpen uit inblikindustrie. Gebruikte input data per 100 ton vervuild schelpmateriaal dat voor 60% uit CaCO<sub>3</sub> bestaat. g.d. = geen data. (naar Barros et al, 2009; Iribarren et al., 2010; Iribarren, 2010).*

Stap	Type input	Aantal	Eenheid	CO <sub>2</sub> eq (kg) per 100 ton ingaand	CO <sub>2</sub> eq (kg) per ton ingaand	CO <sub>2</sub> eq (kg) per ton uitgaand CaCO <sub>3</sub>
Transport	Transport	216	km	2271	23	38
Wassen	Water	60	m <sup>3</sup>	g.d.	g.d.	g.d.
	Coagulant	55	L	g.d.	g.d.	g.d.
	DAF vlokmiddel	6	L	g.d.	g.d.	g.d.
	Vlokmiddel	7,5	kg	g.d.	g.d.	g.d.
	Elektriciteit	5100	kWh	2667	27	44
Drogen en schoon-branden	Propaan	2,1	ton	6246	62	104
	Antifouling	0,7	L	g.d.	g.d.	g.d.
	Biocide	0,7	L	g.d.	g.d.	g.d.
	Koelwater	35	m <sup>3</sup>	g.d.	g.d.	g.d.
	Elektriciteit	5300	kWh	2772	28	46
Totaal				13956	140	233

## 4.3 Ketenanalyse duurzaam beton

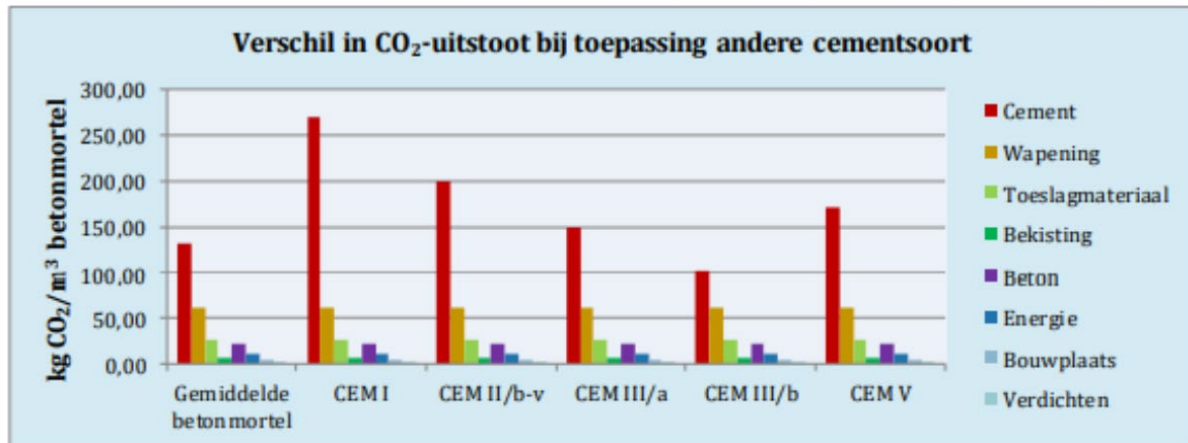
In dit hoofdstuk is een analyse uitgevoerd met betrekking tot de impact van schelpmateriaal als vulmiddel in beton of als grondstof voor cement op de carbon footprint van het product. Hiervoor zijn verschillende aannames uit de voorgaande hoofdstukken meegenomen als input. De informatie uit dit hoofdstuk is daarnaast verkregen uit de verschillende duurzaamheids- en ketenanalyses van de Nederlands betonindustrie.

### 4.3.1 Betonsamenstelling

Beton wordt geproduceerd in verschillende samenstellingen voor verschillende toepassingen. Met als doel deze ketenanalyse niet te complex te maken is ervoor gekozen om een gemiddelde samenstelling van beton te nemen zoals is weergegeven in *Tabel 8*. Zoals kan worden opgemaakt uit deze tabel, bestaat beton voor een groot deel uit zand en grind (78%). Daarnaast wordt restproduct uit de sloop (betongranulaat), vliegashout uit kolencentrales en kalksteenmeel toegevoegd in betrekkelijk kleine hoeveelheden. Houdt er hierbij rekening mee dat de totale betonproductie zeer groot is en daarmee ook kleine percentages resulteren in grote volumes. Gemiddeld bestaat beton voor 13,2% uit cement. Er bestaan verschillende soorten cement met verschillende eigenschappen. CEMI (portlandcement) en CEMIII/B (hoogovencement) worden het meeste toegepast. Portlandcement bestaat uit kalksteen dat in een cementoven wordt gebrand. Hoogovencement bestaat voor een groot deel uit restproduct uit de staalproductie. CO<sub>2</sub> die wordt uitgestoten bij de productie van hoogovencement wordt deels toegerekend aan staalproductie, waarmee de CO<sub>2</sub> voetafdruk van CEMIII/B veel lager is dan van CEMI (*Figuur 7*). De emissie die ontstaat bij de productie van beton is als een gewogen gemiddelde meegenomen in de berekening om de verschillen in CO<sub>2</sub> voetafdruk tussen de betonsoorten de resultaten niet teveel te laten beïnvloeden.

Tabel 8 Gemiddelde samenstelling van beton (Bijleveld, 2013)

Gemiddelde samenstelling beton	kg/m <sup>3</sup>	%
CEM I	119	5,0
CEM III/B	193	8,2
Rivierzand	823	34,8
Riviergrind	1.016	43,0
Betongranulaat	46	1,9
Poederkoolvliegass	10	0,4
Kalksteenmeel	16	0,7
Water	141	6,0
<b>Gemiddeld totaal</b>	<b>2.363</b>	<b>100,0</b>



Figuur 5 CO<sub>2</sub> emissie voetafdruk van beton, gemaakt van verschillende cementsoorten (uit: Kat, 2021)

#### 4.3.2 Beton levenscyclus en footprint

De levenscyclus van beton kent verschillende fases. Dit begint met de productie van de grondstoffen, gaat door naar de bouw en eindigt met sloop en hergebruik. De emissies die typisch ontstaan in de verschillende fases zijn weergegeven in Tabel 9. De hoogte van de CO<sub>2</sub>-footprint van beton wordt met name veroorzaakt door cement. Wapening voegt ook veel toe, maar deze post kan door hergebruik van staal voor een groot deel worden gereduceerd.

Tabel 9 CO<sub>2</sub> emissie van de verschillende materialen in beton per fase in de bouw (Kat, 2021)

Fase		Materiaal	Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> betonmortel
A1	Productie	Toeslagmateriaal	3,96
		Cement	124,28
		Betongranulaat	0,04
A2	Transport	Cement	7,81
		Toeslagmateriaal	21,41
		Betongranulaat	0,16
A3	Productie	Energie	4,92
A4	Transport bouwplaats	Bekisting	0,05
		Wapening	1,97
		Bouwplaats	4,56
A5	Bouwproces/aanleg	Bekisting	8,44
		Wapening	125,88
		Verdichting	0,03
		Energie	5,81
C2	Transport naar afvalverwerker	Bekisting	0,05
		Wapening	0,69
		Beton	15,94
C3	Afvalverwerking	Bekisting	0,03
		Beton	5,77
		Wapening	43,63
D	Afvalprocessen einde levenscyclus	Wapening	-111,77
		Bekisting	-1,38
TOTAAL			262,28

Wanneer de getallen uit *Tabel 9* worden samengevoegd, leidt dit tot de samenvatting in *Tabel 10*. Hierbij heeft cement een grote bijdrage aan de footprint van beton. Toeslagmateriaal (zand, grind, kalksteenmeel, poederkoolvliegass) heeft een beperkte bijdrage aan de footprint van beton en deze bijdrage wordt met name veroorzaakt door transport van dit materiaal. Het gebruik van gesloopt beton (betongranulaat) heeft een zeer beperkte bijdrage aan de footprint van beton. De reden dat deze footprint zo laag is, is onbekend.

Tabel 10 Netto CO<sub>2</sub> footprint per ingrediënt per m<sup>3</sup> betonmortel en per ton materiaal. Nvt = niet van toepassing.

Netto per ingrediënt	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> betonmortel	Kg CO <sub>2</sub> /ton materiaal
Toeslagmateriaal	25,37	13,6
Cement	132,09	423,4
Betongranulaat	0,2	4,3
Bekisting	7,11	nvt
Wapening	60,4	nvt

### 4.3.3 Toepassing van schelpen in beton

Het materiaal van schelpen in beton kan een vervanging zijn van verschillende stoffen. De hele schelpen zouden kunnen worden toegepast als een composiet. Dit is al eens getest en lijkt vooral een esthetische waarde te hebben; het ziet er leuk uit. Het schelpmateriaal zou ook een vervanging kunnen zijn voor het toeslagmateriaal dat nu wordt gebruikt in beton. Daarmee kan bijvoorbeeld kalksteenmeel worden vervangen. Tenslotte kan het schelpmateriaal worden gebruikt als grondstof voor de cementproductie. Hierbij wordt de schelp gebrand bij hoge temperatuur in een kalkoven waarbij de CO<sub>2</sub> uit het calciumcarbonaat wordt verwijderd.

In *Tabel 11* is de emissie van de verschillende stappen in het proces om van schelpmateriaal calciumcarbonaatmeel te maken weergegeven. Het malen van de schelpen is nu buiten beschouwing gelaten, evenals de afvalwaterzuivering na het afwassen van de chloride. Transport is een post waarin veel CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten. Dit wordt veroorzaakt doordat productiefaciliteiten nu op locaties zijn gebouwd naast kalksteengroeves. Wanneer schelpen een belangrijke grondstof worden voor beton zal een fabriek op een locatie dicht bij een schelpdierverwerker ervoor zorgen dat deze transport emissies veel lager uitvallen. Het schoonmaken van de schelpen zal een belangrijke post blijven, tenzij schelpdierverwerking op een nieuwe manier resulteert in de productie van zeer schone schelpen. Dat is nu zeker niet het geval.

*Tabel 11 CO<sub>2</sub> emissie bij het transporteren en voorbehandelen van schelpmateriaal (Hoofdstuk 4.2, Barros 2009, Iribarren 2010(2x))*

Proces stap	CO <sub>2</sub> emissie (kg/ton product)	Details
Transport	37,9	216 km
Pretreatment (afwassen chloride)	44,5	
Drogen en afbranden organisch materiaal (550°C)	150,3	
<b>TOTAAL</b>	<b>234,7</b>	

Vanuit de voetafdruk van schelpen zijn een aantal scenario's denkbaar om de voetafdruk van beton dat geproduceerd is uit schelpen te bepalen:

- Beton met cement, geproduceerd uit schelpen
- Beton met schelpen als vervanger van kalksteenmeel (0,7% kg/kg van het beton)

Deze scenario's zijn berekend inclusief en exclusief transport omdat de emissies van transport nihil zouden zijn als een verwerker naar een schelpdierkokerij zou worden geplaatst, zoals deze nu naast steengroeves staan. Daarbij is het transport van de schelpen naar de verwerkingslocatie gemiddeld 216 km per vrachtwagen.

Er is bij het berekenen van de footprint van cement is uitgegaan van 75% schelp (CaCO<sub>3</sub>) in het cement en 25% andere materialen. (NEN-EN 197-1:2011).

*Tabel 12 CO<sub>2</sub> voetafdruk van beton in verschillende scenario's, waarbij transport niet (beperkte emissies) of wel (volledige emissies) is meegenomen.*

CO <sub>2</sub> voetafdruk voor verschillende scenario's (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> betonmortel)					
		Beton met schelpcement		Beton met schelp als toeslagmateriaal	
	Standaard beton	beperkte emissies	volledige emissies	beperkte emissies	volledige emissies
Toeslagmateriaal	25,4	25,4	25,4	28,3	28,3
Cement	132,1	170,8	182,6	132,1	132,1
Betongranulaat	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>TOTAAL</b>	<b>157,7</b>	<b>196,3</b>	<b>208,2</b>	<b>160,6</b>	<b>161,2</b>

---

Zoals weergegeven in *Tabel 12* wordt de CO<sub>2</sub> voetafdruk groter wanneer schelpen worden gebruikt in beton. De toename is beperkt als schelpen als toeslagmateriaal worden ingezet, maar dan gaat het ook om slechts zeer kleine hoeveelheden (0,7% w/w) vervanging in het beton.

#### 4.3.4 Conclusie

De grote hoeveelheden energie die nodig zijn voor de verwerking van schelpen om deze geschikt te maken voor toepassing in beton (afwassen van chloride en afbranden van organisch materiaal) maken een toepassing in cement of beton op dit moment niet gunstig met het oog op de CO<sub>2</sub> voetafdruk.

---

## 5 Conclusies/Toekomstperspectief

Het project Mariene Bouwstenen heeft de volgende inzichten opgeleverd:

- 1) Volgens de huidige inzichten draagt koolstof dat is vastgelegd in schelpen van waterdieren, zoals mosselen en oesters, niet bij aan een vermindering van het CO<sub>2</sub> gehalte in de atmosfeer. Dit komt doordat de CO<sub>2</sub> equivalent die in de schelp als CaCO<sub>3</sub> wordt vastgelegd niet uit de atmosfeer maar uit het water afkomstig is, in de vorm van carbonaat. Doordat door het biocalcificatie (schelpvorming) proces de alkaliniteit van het water daalt, daalt het vermogen van het water om CO<sub>2</sub> vast te houden en kunnen de vastgelegde CO<sub>2</sub> equivalenten niet vanuit de atmosfeer worden aangevuld.
- 2) Ondanks bovenstaande constatering blijft de carbon footprint van schelpdier aquacultuur substantieel kleiner dan andere vormen van productie van dierlijke eiwitten.
- 3) Voor directe toepassing als grondstof voor cement en beton bevatten schelpen die uit de verwerkingsindustrie beschikbaar komen waarschijnlijk teveel organisch materiaal, sulfaat en chloride. Een deel hiervan wordt verwijderd door te spoelen. Het resterende organische materiaal kan verwijderd worden door de schelpen te verhitten. Mogelijk wordt met de verhitting ook nog eventueel bij het spoelen achtergebleven sulfaat en chloride verwijderd.
- 4) Om schelpen geschikt te maken voor gebruik als grondstof in cement en beton is meer energie nodig (voor spoelen en branden) dan bij toepassing van traditionele grondstoffen. Hierdoor neemt de CO<sub>2</sub>-footprint van het beton toe naarmate er meer schelpenmateriaal in gebruikt wordt. Bij gebruik als toeslag neemt de CO<sub>2</sub>-footprint van het beton met ca 2% toe. Wanneer de schelpen tot cement worden verwerkt dan zal de CO<sub>2</sub>-footprint van het beton met ca. 20% toenemen.
- 5) Op basis van indicatieve berekeningen lijkt er binnen het NCP voldoende natuurlijk voedselaanbod te zijn om op jaarbasis 0,4-0,6 miljoen ton mosselen te produceren zonder het ecosysteem teveel te belasten. Dit is ca. 10-15 keer meer dan de huidige schelpdierproductie in Nederland. Voor een betere inschatting van deze maximale productieruimte zijn echter uitgebreide (model)berekeningen noodzakelijk waarbij onder andere rekening wordt gehouden met seizoenseffecten en interacties tussen organismen en hun omgeving en ander gebruik van het gebied (bijvoorbeeld voor zeewierkweek). Genoemde getallen dienen daarom slechts als eerste indicatie te worden beschouwd.
- 6) Het geschatte oppervlak dat binnen geplande windmolenparken op het NCP maximaal beschikbaar zou kunnen komen voor aquacultuur is ca. 6525 km<sup>2</sup>. Onder gunstige omstandigheden kan de mosselproductie oplopen tot 3700 ton/km<sup>2</sup>. Om de maximale productieruimte te benutten zou dus minder dan 10% van de beschikbare ruimte voldoen. Hoewel de situatie voor mosselkweek per locatie zal verschillen -de beste condities worden gevonden <35 km uit de kust- lijken de (geplande) windmolenparken voldoende ruimte te bieden om de mosselproductie op het NCP te maximaliseren.
- 7) In de huidige situatie is op jaarbasis rond 1000 ton schelpenmateriaal uit de verwerking van mosselproducten beschikbaar voor hergebruik. Wanneer schelpen uit horecakanalen hieraan worden toegevoegd kan dit oplopen tot ruim 15.000 ton op jaarbasis. Uitgaande van de hierboven genoemde indicatieve schatting van de productieruimte op het gehele NCP en een optimalisatie van de verwerkingsprocessen zou dit maximaal kunnen oplopen tot ca. 299.000 ton per jaar.
- 8) De jaarlijkse cementproductie in Nederland bedraagt 5000 miljoen kg, uitgaande van NEN-EN 197-1:2011 wordt hiervoor 3750 miljoen kg (75%) CaCO<sub>3</sub> gebruikt. Bij volledige optimalisatie van de schelpdierproductie en verwerking zou met de dan beschikbaar komende 299.000 ton schelpenmateriaal, de CaCO<sub>3</sub> behoefte van de cementindustrie voor 8% kunnen worden gedekt.



---

## 6 Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2015 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV.

---

## 7 Literatuur

- Álvarez-Salgado XA, Fernández-Reiriz MJ, Fuentes-Santos I, Antelo LT, Alonso AA, Labarta U (2022): CO<sub>2</sub> budget of cultured mussels metabolism in the highly productive Northwest Iberian upwelling system. *Science of The Total Environment*. Volume 849, 25 November 2022, 157867. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157867>
- Archer, D. (2005), Fate of fossil fuel CO<sub>2</sub> in geologic time, *J. Geophys. Res.*, 110, C09S05, doi:10.1029/2004JC002625.
- Aubin, J., Fontaine, C., Callier, M., & Roque d'orbcastel, E. (2018). Blue mussel (*Mytilus edulis*) bouchot culture in Mont-St Michel Bay: potential mitigation effects on climate change and eutrophication. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(5), 1030-1041.
- Bijleveld, M.M., Bergsma, G.C., van Lieshout, M. (2013) Milieu-impact van betongebruik in de Nederlandse bouw. CE Delft.
- BRL 1804: 2019. Beoordelingsrichtlijn voor het KOMO productcertificaat voor: 'Vulstof voor toepassing in beton en mortel. KIWA Nederland B.V.
- Duarte, C. M., Bhruun, A., & Krause-Jensen, D. (2021). A seaweed aquaculture imperative to meet global sustainability targets. *Nature Sustainability*, 5(3), 185– 193. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00773-9>
- Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K., & Habert, G. (2018). A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry: Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050. ETH Zurich.
- Fayomi, G. U., Mini, S. E., Fayomi, O. S. I., & Ayoola, A. A. (2019). Perspectives on environmental CO<sub>2</sub> emission and energy factor in Cement Industry. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 331, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Fodrie FJ, Rodriguez AB, Gittman RK, Grabowski JH, Lindquist NL, Peterson CH, Piehler MF, Ridge JT. 2017 Oyster reefs as carbon sources and sinks. *Proc. R. Soc. B* 284: 20170891. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.0891>
- Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., & Chen, F. (2016). Analysis of material flow and consumption in cement production process. *Journal of Cleaner Production*, 112, 553-565.
- Humphreys, M. P., Lewis, E. R., Sharp, J. D., and Pierrot, D. (2020). PyCO<sub>2</sub>SYN v1.8: marine carbonate system calculations in Python, *Geosci. Model Dev.*, 15, 15–43, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-15-2022>, 2022.
- Humphreys M P, Daniels C J, Wolf-Gladrow D A, Tyrrell T, Achterberg E P (2018) On the influence of marine biogeochemical processes over CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and ocean *Marine Chemistry*. Volume 199, 20 February 2018, Pages 1-11
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2018): TAR 3 The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide
- Iribarren, D., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2010). Implementing by-product management into the life cycle assessment of the mussel sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1219-1230.
- Iribarren, D. (2010). Life cycle assessment of mussel and turbot aquaculture: application and insights. PhD thesis.
- Isa MT, Extraction and Characterization of Chitin and Chitosan from Mussel Shell, (2015).
- Jorgensen S.E. 1979. Handbook of environmental data and ecological parameters. Pergamon Press. ISBN 0-08-023436-4
- Kat, A. (2021) Ketenganalyse Beton. W.A. Benecke Beheer B.V.
- Martin S, Clavier J, Chauvaud L, Thouzeau G. 2007 Community metabolism in temperate maerl beds. I. Carbon and carbonate fluxes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 335, 19 – 29.
- Martini A, Calì M, Capoccioni F, Martinoli M, Pulcini D, Buttazzoni L, Moranduzzo T, Pirlo G (2022): Environmental performance and shell formation-related carbon flows for mussel farming systems. *Science of The Total Environment*. Volume 831, 20 July 2022, 154891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154891>
- McConnaughey T A, Burdett J, Whelan J F, Paull C K (1997): Carbon isotopes in biological carbonates: Respiration and photosynthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Volume 61, Issue 3, February 1997, Pages 611-622
- McConnaughey T A & Gillikin D P (2007) Carbon isotopes in mollusk shell carbonates. *Geo-Mar Lett* (2008) 28:287–299. DOI 10.1007/s00367-008-0116-4
- Moore, D., M. Heilweck & P. Petros. 2022. Aquaculture: ocean blue carbon meets UN-SDGS. Cham: Springer. 270 pp.

- 
- Moore, D., M. Heilweck, W. B. Fears, P. Petros, S. J. Squires, E. Tamburini & R. P. Waldron. 2023. Potential of ocean calcifiers to sequester atmospheric carbon in quantity and even reverse climate change. *J. Fish. Res.* 7:132.
- Morris J P, Humphreys M P (2019), Modelling seawater carbonate chemistry in shellfish aquaculture regions: Insights into CO<sub>2</sub> release associated with shell formation and growth. *Aquaculture*. Volume 501, 25 February 2019, Pages 338-344
- NEN-EN 197-1 (2011) Cement - Deel 1: Samenstelling, specificaties en conformiteitscriteria voor gewone cementsoorten.
- NEN-EN 12620 + A1 (nl): Toeslagmateriaal voor beton.
- SGS Search Consultancy (2020). Ongetoetst LCA rapport voor betonmortel.
- Tamburini E, Turolla E, Lanzoni M, Moore D, Castaldellia G. (2022): Manila clam and Mediterranean mussel aquaculture is sustainable and a net carbon sink. *Science of The Total Environment*. Volume 848, 20 November 2022, 157508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157508>
- van den Burg, S. W. K., Kamermans, P., Blanch, M., Pletsas, D., Poelman, M., Soma, K., & Dalton, G. (2017). Business case for mussel aquaculture in offshore wind farms in the North Sea. *Marine Policy*, 85, 1-7. DOI: 10.1016/j.marpol.2017.08.007
- Van der Meer, J. (2022) Ecologische randvoorwaarden voor kweek op zee. Presentatie tijdens Schelpdierconferentie 2022. <https://schelpdierconferentie.com/wp-content/uploads/2021/10/ecologische-randvoorwaarden.-j-vd-meer.keynote.pdf>
- Van Duren, L., Poelman, M., Jansen, H., & Timmermans, K. (2019). Een realistische kijk op zeewierproductie in de Noordzee. Gezamenlijke notitie van Wageningen Marine Research, NIOZ en Deltares, als onderdeel van Beleidsondersteunend Onderzoek Natuurinclusieve energie (BO-43-023.03-005). Yerseke: Wageningen Marine Research, (1930336-MP).
- Vilmin, L., Van Duren, L., Nauta, R., & Jansen, H. (2021). Modelling seaweed cultivation on the Dutch continental shelf (pp. 11205769-002). Report 11205769-002-ZKS-0001.
- Ware JR, Smith SV, Reaka-Kudla ML. 1992 Coral reefs: sources or sinks of atmospheric CO<sub>2</sub>? *Coral Reefs* 11, 127– 130.
- Ray NE, O'Meara T, Williamson T, Izursa JL, Kangas PC, (2018). Consideration of carbon dioxide release during shell production in LCA of bivalves: *Int J Life Cycle Assess* (2018) 23:1042–1048. DOI 10.1007/s11367-017-1394-8
- Ray NE, Maguire TJ, Al-Haj AN, Henning MV, Fulweiler RW (2019). Low Greenhouse Gas Emissions from Oyster Aquaculture. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 9118–9127. DOI: 10.1021/acs.est.9b02965
- Xavier, C., & Oliveira, C. (2021). Decarbonisation options for the Dutch cement industry. PBL Netherlands Environment Assessment agency, Hague.
- Zavell MD, Lindahl O, Filgueira R, Shumway SE (2023). An Estimate of Carbon Storage Capabilities from Wild and Cultured Shellfish in the Northwest Atlantic and Their Potential Inclusion in a Carbon Economy. *Journal of Shellfish Research*, 42(2) : 325-342. National Shellfisheries Association. URL: <https://doi.org/10.2983/035.042.0214>

---

## 8 Verantwoording

Rapport C002/24

Projectnummer: 4315100172

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het verantwoordelijk lid van het managementteam van Wageningen Marine Research

Akkoord: dr. L. Tonk  
Onderzoeker

Handtekening:



Datum: 11 Januari 2024

Akkoord: dr. Ir. T.P. Bult  
Director

Handtekening:



Datum: 11 Januari 2024

# Bijlage 1 Toepassingsmogelijkheden schelpen in cement of als vulstof

**Door: J.H.M. Visser**

**TNO Building, Materials & Structures**

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven ten aanzien van de kwaliteitseisen waaraan schelpen moeten voldoen om te kunnen worden toegepast in cement of als vulmiddel. Tevens wordt geschat welke van deze kwaliteitseisen mogelijk over de grenswaarden gaan en waar dan extra bewerking nodig is.

Ten aanzien van de te stellen kwaliteitseisen zijn er drie vervangingsmogelijkheden waarvoor de kwaliteitseisen moeten worden getoetst:

- Als grondstof voor de klinkerbereiding (vervanging van met name mergel);
- Als nevenbestanddeel van cement (vervanging van met name kalksteenmeel in de cementen CEM II/A-L of -LL en CEM II/B-L of -LL )
- Als vulstof in beton (vervanging van met name kalksteenmeel)

Voor de beoogde toepassingen als grondstof voor de klinkerbereiding (mergelvervanging) of als vulstof in cement of beton (kalksteenmeelvervanging) zijn de kwaliteitseisen vastgelegd in normen. Met betrekking tot de grondstof voor klinkerbereiding, gelden zowel algemene als fabriek specifieke eisen.

Verse mosselschelpen kunnen onzuiverheden bevatten ten aanzien van:

- zout en andere onzuiverheden (zand etc.)
- organisch materiaal, bestaande uit restanten van de mossel zelf, materiaal aanhangend aan de schelp, en als onderdeel van de schelp
- zwellende klei

De mate waarin de schelpen ontdaan zullen moeten zijn van deze verontreinigingen zal afhangen van de beoogde toepassing: als kalksteenmeelvervanging liggen de eisen direct op poederniveau vast maar als vervanging van de mergel in de klinkerbereiding is aanhangende klei waarschijnlijk minder bezwaarlijk (dit is/kan ook een grondstof zijn) terwijl organisch materiaal verbrand wordt. Aangezien dit kan worden aangemerkt als brandstof, zullen ook de eisen ten aanzien van brandstoffen worden meegenomen in de beschouwing.

## Samenstelling van schelpen

Een chemische samenstelling van de mosselschelp zoals bepaald door Hamester *et al.* (2012) is gegeven in Tabel B1.1. De samenstelling is bepaald nadat het materiaal is gebroken en gesmolten op zo'n wijze dat alleen zwaardere chemische elementen in de vorm van oxiden aanwezig blijven (dit betekent dat onder meer dat  $\text{CaCO}_3$  nu nog aanwezig is als  $\text{CaO}$ , indien er ook andere Ca-verbindingen aanwezig waren is dit bij deze analysemethode niet meer te achterhalen).

*Tabel B1.1 Chemische samenstelling (als oxiden) van mossel- en oesterschelpen t.o.v. commercieel gewonnen kalksteen (carbonaat) (Hamester et al., 2012)*

Oxides	Mussel (%)	Oyster (%)	$\text{CaCO}_3$ (%)
CaO	95.7	98.2	99.1
$\text{K}_2\text{O}$	0.5	-	0.4
$\text{SiO}_2$	0.9	-	-
$\text{SrO}$	0.4	-	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.7	-	-
$\text{SO}_3$	0.7	0.7	-
MgO	0.6	-	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.4	-	-

Uit Tabel B1.1 blijkt dat de anorganische samenstelling van de onderzochte mosselschelpen een bredere range aan componenten bevat dan de meegenomen commercieel gewonnen kalksteen of de oesterschelpen. Van de oesterschelpen is niet gerapporteerd of ze van dezelfde locatie afkomstig zijn als de mosselschelpen (de kalksteen is dit zeker niet). De samenstelling van de mosselschelpen (en waarschijnlijk ook van de oesterschelpen) blijkt namelijk af te hangen van het milieu: vooral andere kationen (Mg, Sr, maar ook zware metalen) blijken ook gemakkelijk te worden opgenomen (AAS 2022; Ballester et al., 2007; Papadimitriou, 2020) in de schelpen.

Volgens AAS, (2022) bestaan schelpen uit zowel calciëet als aragoniet (twee verschillende vormen van  $\text{CaCO}_3$ ) waarbij voor de blauwe mossel lagen van calciëet worden toegevoegd voor de lengtegroei en lagen van aragoniet voor de dikte- / breedtegroei. Uster et al. (2014) citeren onderzoek waaruit blijkt dat de mineralogische samenstelling voor 96 % uit  $\text{CaCO}_3$  bestond, waarvan 90 % calciëet en 10 % aragoniet (in zeemilieu is aragoniet instabieler dan calciëet). De eerste laag van de schelp bestaat uit een eiwit met chitine. Daarna worden de volgende lagen gebouwd, waarschijnlijk uit een uitgescheiden vloeistof dat onder meer opgelost carbonaat bevat. Hierbij wordt steeds een eiwitlaag tussen de verschillende  $\text{CaCO}_3$ -groeilagen afgezet. Ook wordt de hele schelp ter bescherming door middel van een eiwitlaag afgedekt.

De in de literatuur gerapporteerde (anorganische + organische) samenstellingen van schelpen blijken sterk te variëren en lijken vooral af te hangen van de voorbereiding van de schelpen ten behoeve van de analyses. Vooral de voorbereidingstemperatuur waaraan de schelpen worden blootgesteld lijkt hierbij bepalend, samen met de mogelijkheid om de vluchtige bestanddelen gelijktijdig te analyseren (bijvoorbeeld C uit  $\text{CO}_3$  of uit organische materialen). Waarden van anorganische componenten tussen de 50 en bijna 100 % worden vermeld in de literatuur. Een snelle controle van data in de literatuur waarbij is aangenomen dat alle Ca aanwezig is als  $\text{CaCO}_3$  lijkt dan de meest betrouwbare indicatie van de samenstelling. Op basis daarvan blijken gerapporteerde waarden van de mosselschelpen met een CaO gehalte van zo'n 52 % een  $\text{CaCO}_3$  gehalte te bevatten van zo'n 95-99 %. Dit past ook beter bij de gerapporteerde gegevens in Hung et al. (2018), waarbij de totale hoeveelheid organisch materiaal voor mosselschelpen tussen de 0.3-2.2 % lag. Volgens Uster et al. (2014) bestaat de volledige mosselschelp voor 10 % uit organisch materiaal, inclusief resten van mosseldiertjes en zeewier. De hoeveelheid organisch materiaal in de analyseresultaten hangt dus mede af van de mate waarin de schelpen zijn schoongemaakt voorafgaand aan de analyse.

Chlorideconcentraties in de schelp, zoals gerapporteerd in Hung et al. (2018), bedroegen 0,3-0,5 % specifiek voor 1 studie met mosselen. Ander onderzoek toonde aan dat oesterschelpen zelf mogelijk een bepaald zoutgehalte bevatten. Calcineren hielp bij het verlagen van het zoutgehalte, een verlaging van 3,7 % naar 1,3 % bij 650°C werd gemeten (waarschijnlijk t.g.v. de vluchtigheid van het chloride of zijn verbindingen). De invloed van langer / meer spoelen was hierbij niet meegenomen.

### **Samenstellingseisen voor de klinkerbereiding**

In Tabel B1.2 en Tabel B1.3 zijn de samenstellingseisen gegeven voor de grondstoffen voor de klinkerbereiding. Ten opzichte van de anorganische samenstelling van de mosselschelpen valt vooral op dat het chloridegehalte en het zwavelgehalte voldoende laag moeten blijven. Voor chloride betekent dit dat de mosselschelpen voldoende gespoeld moeten worden.

Het zwavelgehalte in de mosselschelp lijkt voldoende laag om aan de norm te voldoen. Aanvullende eisen betreffen met name chroom en het totaal aan halogeniden (Cl + Br + I). Uiteraard dienen ten allen tijde onder meer gehalten zware metalen laag te blijven. Deze hangen met name af van het milieu waarin de mosselen worden gekweekt. Locaties met hoge gehalten aan zware metalen zullen niet gebruikt worden om mosselen voor consumptie te kweken.

Als grondstof voor klinkerbereiding is ook de geur/stank een afweging voor geschiktheid.

Op basis van de totale samenstelling (organisch en anorganisch) voldoen de mosselen mogelijk niet aan de grondstof-eisen ten aanzien van het organisch gehalte wanneer ze niet verhit worden. In Barros et al. (2009) is een procesgang weergegeven voor het vervaardigen van hoogwaardig  $\text{CaCO}_3$  waarbij wordt verhit tot 500-600°C en waarbij het totaal organisch gehalte terug kan worden gebracht naar minder dan 1,5 %. Uit ander onderzoek (Uster et al., 2014) lijkt dat lagere temperaturen mogelijk ook nog voldoende zijn om het organische stof gehalte beneden de limiet te brengen maar enige verhitting zal mogelijk nodig zijn.

Tabel B1.2 Samenstellingseisen voor de voorbereiden van klinkers voor brandstoffen en grondstoffen ENCI. In geel zijn de eisen aangegeven die mogelijk kritisch zijn bij het gebruik van schelpen als grondstof.

Voor brandstoffen:	Voor grondstoffen:
• Euralcode moet op lijst 5A, 5B of 5C voorkomen	Idem
• Vocht < 25 %	< 50 %
• Stookwaarde >6 GJ/t	Organisch gehalte < 2 %
• Chloorgehalte < 0,6 %	< 0,6 %
• Fosforgehalte (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) < 8 %	Idem
• Kwikgehalte < 3 ppm	idem
• Cadmiumgehalte < 100 ppm	Idem
• Zwavelgehalte (S) < 4 %	Idem
• Korrelgrootte < 20 mm	< 5 mm

Tabel B1.3 Aanvullende samenstellingseisen voor de voorbereiden van klinkers (data: ENCI). In geel zijn de eisen aangegeven die mogelijk kritisch zijn bij het gebruik van schelpen als grondstof.

**Additional criteria of ENCI based on threshold values (ppm)**

Dioxines, furanen	< level of detection
EOX	1.000 (according to permit)
PCB	<0.5
PAK	10
Hg	10 (internal: 3)
Tl	10 (internal: 1)
Cd	100
Be	40
Se	50
As	150
Cu	2.000
Cr	500
Co	250
Cl+Br+J	6.000
F	no treshhold value defined
S	40.000
Pb	2.000
Ni	500
Sn	1.000
Sb	1.000
Zn	5.000
V	2.000
Ba	5.000

**Samenstellingseisen grondstof voor cement**

Volgens de cementnorm NEN-EN 197-1:2011 worden er aan kalksteenmeel dat in Portlandkalksteencement wordt gebruikt de volgende eisen gesteld:

- CaCO<sub>3</sub> > 75 % m/m
- Kleigehalte < 1,20g/100g
- Totaal Organisch Carbon (koolstof) (TOC) volgens EN 13639
  - 1) Kalksteen met een totaal organisch koolstofgehalte < 0,20% (m/m) (cement-code LL)
  - 2) Kalksteen met een organisch koolstofgehalte < 0,50% (m/m) (cement-code L)

Het is mogelijk om Portland cement zelf te mengen met kalksteenmeel (d.w.z. na afzonderlijke productie van Portland cement en kalksteenmeel. Dit zijn zogenaamde post-blended (kalksteenmeel-)cementen. De kwaliteit van deze post-blended cementen mag niet a-priori gelijk worden genomen aan het cement dat in de fabriek wordt vervaardigd (pre-blended cement). Dit komt onder meer omdat kalksteenmeel en klinker gelijktijdig worden gemalen en hulpstoffen onder meer t.b.v. de verharding worden geoptimaliseerd op het samen gemalen mengsel. Voor post-blended cementen dient daarom vooraf een keuring te worden uitgevoerd waarop een KOMO-certificaat kan worden aangevraagd. Hiervoor liggen de eisen aan de kalksteenmeel vast op grondstofniveau in de BRL 1804:2019 (Kalksteenmeel) en NEN-EN 12620 (toeslag inclusief vulstof). Dit zijn dezelfde normen als waarvoor kalksteenmeel als vulstof wordt gebruikt.

De samenstellingseisen ten aanzien van vulstofgebruik is dus volgens NEN-EN 12620, met de volgende aanvulling voor toepassing in beton volgens BRL 1804:2019:

- $\text{CaCO}_3 > 75 \text{ \% m/m}$
- $(\text{MgCO}_3 + \text{CaCO}_3) > 90 \text{ \% m/m}$
- $\text{SiO}_2 < 2 \text{ \%}$  (tbv vermijden van ASR in cementgebonden beton, anders aantonen dat ze inert zijn).
- $\text{S (als SO}_3) < 0,5 \text{ \% m/m}$  en totaal  $\text{S} < 0,40 \text{ \% (m/m)}$
- $\text{Cl} < 0,1 \text{ \% m/m}$
- gehalte (zwellende) kleimineralen door middel van methyleenblauwadsorptie ( $< 1,2 \text{ \% m/m}$ )
- TOC (totaal organisch koolstof):  $< 0,5 \text{ \% m/m}$

Eisen op betonniveau (= totaal van de grondstoffen):

- $\text{Na}_2\text{Oeq, (Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}) < 5 \text{ \% m/m}$  (of minder, afhankelijk van type cement)

Qua samenstelling is het zwavelgehalte (in de vorm van sulfaat,  $\text{SO}_3$ ) in de mosselen voor toepassing als vulstof mogelijk te hoog. Er wordt maximaal 0,5 % geëist, maar er is 0,7 % gemeten door Hamester *et al.* (2012). De eis ten aanzien van sulfaat is gebaseerd op zijn negatief effect indien het oplost tijdens de verharding van het beton of tijdens gebruik. Of dit voor de sulfaat in de schelp ook geldt is (nog) onbekend. Mogelijk is deze minder toegankelijk en kunnen hogere gehalten ook worden toegelaten. Dit dient eerst bewezen te worden en d.m.v. attestering worden vastgelegd. Een andere mogelijkheid is de schelpen zodanig te bewerken dat het sulfaatgehalte verlaagd wordt. De eisen ten aanzien van (aanhangende) zouten (vooral Cl, en alkaliën Na en K) zijn streng, en het is gebleken dat dit gehalte in schelpen overschreden kan worden (Hung *et al.*, 2018). Het is alleen niet duidelijk of dit komt door onvoldoende spoeling van de oesterschelpen waarop deze bevindingen zijn gebaseerd, of omdat oesterschelpen (en mogelijk ook mosselschelpen) zout bevatten in hun chemische make-up die niet door meer spoelen verwijderd kan worden. Ook het TOC moet laag blijven. Zonder verhitting lijkt het op basis van de mosselsamenstelling met de overwegingen die in de eerste sub-paragraaf zijn genoemd het lastig om onder deze grenzen te blijven.

### Discussie en conclusies

Ten aanzien van de kwaliteitseisen tbv de drie vervangingsmogelijkheden van kalksteenmeel door gemalen mosselschelpen is het volgende geconcludeerd:

- Als grondstof voor de klinkerbereiding (mergelvervanging) lijken er meerdere mogelijke probleemcomponenten: gehalte sulfaat, gehalte chloride en TOC (totaal organisch koolstof).
- Als vervanging van kalksteenmeel in de cementproductie (pre-blending) gelden de grenzen ten aanzien van de samenstelling voor het gehele cement. Alleen voor TOC zijn nog apart eisen gesteld. Deze worden mogelijk overschreden.
- Als grondstof ter vervanging van kalksteenmeel (ten behoeve van post-blending en /of vulstofgebruik) zal het sulfaatgehalte mogelijk te hoog zijn indien de schelpenpoeder de grondstoffennorm moet volgen. De eis ten aanzien van sulfaat is gebaseerd op zijn negatief effect indien het oplost tijdens de verharding van het beton of tijdens gebruik. Of dit het geval is dient te worden bewezen en d.m.v. attestering worden vastgelegd. Een andere mogelijkheid is mogelijk het verwijderen van sulfaat door middel van een voorbewerking van de schelpen. Tevens zullen chloride, TOC en mogelijk gehalte alkaliën de kwaliteitseisen overschrijden.

De belangrijkste probleemcomponent in de schelp is de TOC, waarvoor de limiet voor alle drie de vervangingsmogelijkheden mogelijk wordt overschreden. De in de literatuur genoemde percentages zijn echter variabel en het valt niet uit te sluiten dat de Nederlandse mosselschelpen wel aan de eisen m.b.t. TOC voldoen. Mocht dit niet het geval zijn, dan lijkt verhitting tot 500-600 °C de meest efficiënte methode om toch nog onder de limiet te komen. Verhitting zorgt er voor dat eventueel achtergebleven restanten mosselvlies of ander aanhangend organisch materiaal wordt verwijderd. Een deel van het gehalte organisch materiaal zit echter in de schelp zelf, waarbij de hoeveelheid afhangt van de wijze (snelheid, vorm) waarop de schelpen groeien. Omdat het erop lijkt dat een deel van dit organisch materiaal als tussenlaag in de schelp zit, is dit niet zo gemakkelijk te verwijderen. Het organische materiaal voor de buiten- en binnenlaag van de schelp is mogelijk wel gemakkelijker te verwijderen, onder meer door verhitting. Als alternatief suggereert AAS (2022) om de buitenste laag van de lege schelpen door bacteriën te laten afbreken.



---

Verder zijn de gehalten van sulfaat en mogelijk ook chloride aan de hoge kant. Indien deze componenten ook met name in het organisch materiaal aanwezig zijn, kan verwijdering van deze componenten meteen ook de andere probleemcomponenten aanpakken. Dit lijkt aannemelijk, maar zeker is dit niet. Van kationen zoals magnesium is bekend dat ze het Ca kunnen vervangen in de anorganische  $\text{CaCO}_3$  (en dus  $\text{MgCO}_3$  vormend) maar er is geen literatuur gevonden waaruit blijkt dat zulke 'weeffoutjes' ook kunnen plaatsvinden voor  $\text{SO}_4$  of Cl (voor veel mineralen geldt dit wel, zogenaamde substitutie kan plaatsvinden voor zowel kationen als anionen).

Tot slot kan nog worden opgemerkt dat zware metalen in de mosselschelp kunnen worden opgenomen. Dit vindt plaats in verontreinigde milieus die daardoor niet geschikt zijn om consumptiemosselen te kweken. De kans dat gehalten van zware metalen of andere chemische verontreinigingen te hoog zijn in mosselschelpen die voor consumptie gekweekt zijn is daarom nihil.

## Referenties

- AAS Australian Academy of Science. (2022): She sells sea shells...,  
<https://www.science.org.au/curious/earth-environment/sea-shells>.
- Ballester P, I. Mármol, J. Morales, L. Sánchez, Use of limestone obtained from waste of the mussel cannery industry for the production of mortars, 37 (2007) 559–564.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.004>.
- Barros MC, P.M. Bello, M. Bao, J.J. Torrado, From waste to commodity : transforming shells into high purity calcium carbonate, J. Clean. Prod. 17 (2009) 400–407.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.08.013>.
- Hamester M.R.R., P.S. Balzer, D. Becker, Characterization of Calcium Carbonate Obtained from Oyster and Mussel Shells and Incorporation in Polypropylene Characterization of Calcium Carbonate Obtained from Oyster and Mussel Shells, (2012). <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000014>.
- Hung K, U.J. Alengaram, M. Zamin, S. Cheng, Recycling of seashell waste in concrete : A review, Constr. Build. Mater. 162 (2018) 751–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>.
- Papadimitriou CA, T. Anagnostopoulos, S. Galinou-mitsoudi (2020): The use of waste mussel shells as an aggregate replacement in concrete, International Conference of Protection and Restoration of the Environment XV (2020).
- Uster, B. D. Trumm, Waste Mussel Shells to Treat Acid Mine Drainage : A New Zealand Initiative, (2014).

---

## Bijlage 2    Gebruikte data voor berekeningen bij Tabel 6

Elektriciteit: 0,523 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh; grijze stroom; [www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/](http://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/)

Propaan: 1,725 kg CO<sub>2</sub>-eq/L; [www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/](http://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/)  
dichtheid 0,58 kg/L (bij -42 C); 2,974 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg

Transport: 0,105 CO<sub>2</sub>-eq/tonkm; Vrachtwagen >20 ton met aanhanger;  
[www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/](http://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/)

## Bijlage 3 Grondstoffen en transport naar producent

Voor de CO<sub>2</sub>-eq emissies van grind, zand en hulpstoffen zijn geen data gevonden over de grondstoffen zelf en het transport naar de producent. Deze emissies kunnen worden berekend uit de GWP-fractie (Global Warming Potential) van de MKI-waarde (MilieuKostenIndicator) [SGS Search, 2020] door deze fractie met 20 te vermenigvuldigen om een waarde in kg CO<sub>2</sub>-eq per m<sup>3</sup> beton te bereiken, zoals geadviseerd door dubocalc.nl [dubocalc.nl 2022]. Voor water wordt aangenomen dat het op de productielocatie aanwezig is en de CO<sub>2</sub> uitstoot voor zowel 'grondstof' als 'transport naar producent' wordt dan ook als verwaarloosbaar gezien. De berekende CO<sub>2</sub>-uitstoot die wordt toegerekend aan de grondstoffen van de verschillende soorten beton staan vermeld in Tabel Y.

Table Y. CO<sub>2</sub>-eq emissies voor de grondstoffen van verschillende betonsoorten, resulterend uit de GWP-fractie van de MKI cijfers. Uitgedrukt per m<sup>3</sup> beton.

Grondstoffen	CO <sub>2</sub> eq /m <sup>3</sup>
C12/15 CEM III	99
C20/25 CEM I	338
C20/25 CEM III	125
C30/37 CEM I	344
C30/37 CEM III	137
C20/25 CEM I; 30% betongranulaat	334
C20/25 CEM III; 30% betongranulaat	121
C30/37 CEM I; 30% betongranulaat	340
C30/37 CEM III; 30% betongranulaat	133

Voor de verschillende betonsoorten kan een berekening worden gemaakt voor de CO<sub>2</sub>-eq emissie voor 'transport naar producent', zonder rekening te houden met transport voor grind, zand en hulpstoffen (Tabel Y2). Voor de berekening van het aantal t.km's (ton-km's) wordt uitgegaan van een gemiddelde afstand van 50 km en een CO<sub>2</sub>-eq-uitstoot van 0,105 kg/t.km ([www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/](http://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/)). Een vergelijking met de uitkomsten in Tabel X1 geeft aan dat het transport van grind, zand, en hulpstoffen naar de producent ongeveer 1 a 3 kg CO<sub>2</sub>-eq kost, per m<sup>3</sup> beton. Waarschijnlijk kan dit gelijk verdeeld worden over grind en zand, aangezien beton hier gelijkwaardige hoeveelheden van bevat. De CO<sub>2</sub>-eq uitstoot van het vervoer van de hulpstoffen is verwaarloosbaar, omdat er in vergelijking met grind en zand zeer weinig van in beton zit.

Tabel Y2. CO<sub>2</sub>-eq emissies voor het transport naar de producent voor verschillende betonsoorten; berekend zonder data voor grind, zand en hulpstoffen. Uitgedrukt per m<sup>3</sup> beton.

	Beton granulaat	CEM I	CEM III	Water	Total	CO <sub>2</sub> - eq
	(t.km)	(t.km)	(t.km)	(t.km)	(t.km)	(kg)
C12/15 CEM III	-	-	63	0	63	7
C20/25 CEM I	-	84	-	0	84	9
C20/25 CEM III	-	-	87	0	87	9
C30/37 CEM I	-	85.5	-	0	86	9
C30/37 CEM III	-	-	96	0	96	10
C20/25 CEM I; 30% b.g.	16	84	-	0	100	11
C20/25 CEM III; 30% b.g.	16.3	-	87	0	103	11
C30/37 CEM I; 30% b.g.	15.5	85.5	-	0	101	11
C30/37 CEM III; 30% b.g.	16.5	-	96	0	113	12

b.g. = betongranulaat

### Productie

Tabel Y3. Energiebronnen voor mengen bij producent. CO<sub>2</sub>-emissie uitgedrukt per m<sup>3</sup> beton.

	kWh	MJ	kg	L	Nm <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> (kg)
Elektriciteit	3,63					1,9
Diesel		4,43	0,10	0,12		0,4
Aardgas		4,96			0,16	0,3
Totaal						2,7

Aanname: alle soorten beton hebben dezelfde hoeveelheid energie nodig voor mengen.  
Data hoeveelheid elektriciteit, diesel en aardgas uit [SGS search, 2020]

Elektriciteit	0,523	kg CO <sub>2</sub> -eq /kWh	Grijze stroom; <a href="http://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/">www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/</a>
Diesel (B7 blend)	3,473	kg CO <sub>2</sub> -eq /L	kg CO <sub>2</sub> /L, Well-to-wheel (opwerking en verbranding)
	42,7	Mj/kg	energieinhoud
	0,83	kg/L	Dichtheid EN590 diesel (820-845 kg/m <sup>3</sup> )
Aardgas	2,085	kg/Nm <sup>3</sup>	aardgas, kg CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> , well-to-wheel (opwerking en verbranding)
	31,65	Mj/Nm <sup>3</sup>	

### Transport naar bouwplaats

Tabel Y4 CO<sub>2</sub> emissie voor transport van geproduceerd beton naar bouwplaats. Uitgedrukt per m<sup>3</sup> beton.

	t.km	CO <sub>2</sub> (kg)
C12/15 CEM III	116	12,2
C20/25 CEM I	116,6	12,2
C20/25 CEM III	118,25	12,4
C30/37 CEM I	116,8	12,3
C30/37 CEM III	119,3	12,5
C20/25 CEM I; 30% betongranulaat	116,6	12,2
C20/25 CEM III; 30% betongranulaat	118,75	12,5
C30/37 CEM I; 30% betongranulaat	115,5	12,1
C30/37 CEM III; 30% betongranulaat	119,5	12,5

Transport per vrachtwagen: 0,105 kg CO<sub>2</sub>/tonkm; Vrachtwagen >20 ton plus aanhanger  
[www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/](http://www.co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/)

---

## Bijlage 4      Massabalans $\text{CaCO}_3$ uit schelp

Onderstaande tekst en diagram (figuur Y) komen uit een rapport van KB34-3D-1 Project 'Negative GHG WP4 Working document 2021'.

The composition of the ingoing 'Mussel shell and debris' as well that of the throughputs after each stage have been recalculated, using assumptions as stated at each processing step.

1. The first step in processing 100 tonnes of mussel shell & debris is haulage. This is quite straight forward: the material is transported, presumably by truck, over an average distance of 216.33 km.
2. In the washing step, 60 tonnes of fresh water are used, as well as 5100 kWh of electric energy. After washing, the material is left to drip. The outgoing water goes to a wastewater plant, for which the input of coagulant and flocculants is needed. The outgoing sludge is assumed to consist of 30 % or 0.75 t of dry organics, and 70 % or 1.75 t of water. As the total of throughput is 95 t, this means that an additional 2.5 t of dripping water exists the system. In addition to the exiting sledge and water, other small streams leave the process to the environment.
3. In the drying & hot cleaning step, all remaining 22.1 t water is removed. The drying step is followed by a heating step at  $\sim 550^\circ\text{C}$ , ensuring all 12.9 dry organics are burned and removed. To estimate the amount of organics, it is assumed that all exiting 6020  $\text{m}^3$  of  $\text{CO}_2$  originates from organics in the processed material. This leads to an estimated 10.9 t of non-ash dry organics. How the estimated 2 t of ash leaves the system is unknown. The energy requirements for this step are quite large, with 2.1 t of propane and 5100 kWh of electricity. The  $\sim 4000 \text{ m}^3$  of  $\text{CO}_2$  resulting from burning the propane is assumed not to be part of the analysed outgoing stream. If it is to be considered as such, this would mean the ingoing level of organics would be  $\sim 7 \text{ t}$  lower, and the ingoing water content higher by the same amount. All cooling water that enters the system, also leaves as the resulting throughput is considered 100% dry. The other minor ingoing (antifouling and biocide) and remaining outgoing streams (air,  $\text{NH}_3$ , particles,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$  and  $\text{CO}$ ) are not considered for the mass balance.

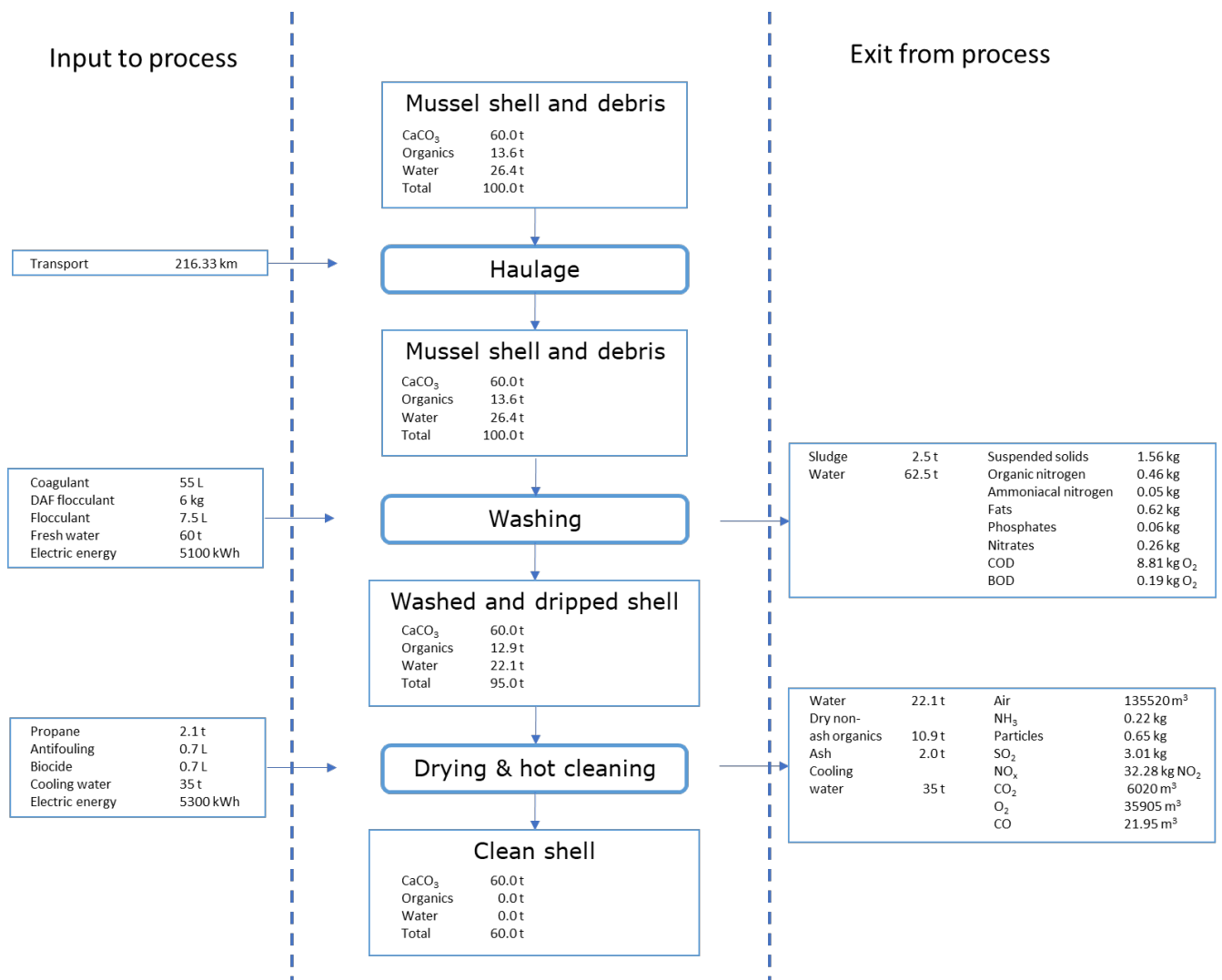


Fig Y. Schematic mass balance for the production of cleaned CaCO<sub>3</sub> from mussel shell and debris. Adapted from Iribarren [2010].

# Bijlage 5 Schelpproductie scenario's

<i>verdubbeling totale huidige verwerking (import+NL productie)</i>			Huidig (75.000 ton)	Huidig + horeca retour	50% productie toename	100% productie toename	50% productie toename + 50% toename bewerkt	50% productie toename 100% toename bewerkt	100% productie toename 50% toename bewerkt	100% productie toename 100% toename bewerkt
Netto tonnage		ton	75000	75000	112500	150000	112500	112500	150000	150000
Verwerkt product		%	2	2	2	2	16.7	33	25	50
Vers product		%	98	98	98	98	83.3	67	75	50
Horeca vers product		%	30	30	30	30	30	30	30	30
Andere kanalen vers product		%	70	70	70	70	70	70	70	70
Schelp gewicht		%	70	70	70	70	70	70	70	70
Totaal product	Totaal	ton	75000	75000	112500	150000	112500	112500	150000	150000
Totaal product verwerkt lokaal	Totaal product verwerkt lokaal	ton	1500	1500	2250	3000	18750	37500	37500	75000
Totaal product vers horeca	Totaal product vers horeca	ton	22050	22050	33075	44100	28125	22500	33750	22500
Totaal product verspreid	Totaal product verspreid	ton	51450	51450	77175	102900	65625	52500	78750	52500
Totaal schelp uit product	Totaal schelp uit product	ton	52500	52500	78750	105000	78750	78750	105000	105000
Schelp t.b.v. verwerking lokaal	verwerking lokaal	ton	1050	1050	1575	2100	13125	26250	26250	52500
Schelp t.b.v. verwerking horeca	Verwerking horeca	ton	15435	15435	23152.5	30870	19687.5	15750	23625	15750
Schelp t.b.v. verwerking verspreid	Verwerking verspreid	ton	36015	36015	54022.5	72030	45937.5	36750	55125	36750
Totaal herbruikbaar schelp	Totaal herbruikbaar schelp excl. horeca	ton	1050	1050	1575	2100	13125	26250	26250	52500
	Niet herbruikbaar verspreide distributie	ton	51450	36015	54022.5	72030	45937.5	36750	55125	36750
	Herbruikbaar uit horeca kanalen	ton	0	15435	23152.5	30870	19687.5	15750	23625	15750
<b>PERCENTAGES</b>	Totaal schelpen uit productie	ton	52500	52500	78750	105000	78750	78750	105000	105000
Totaal herbruikbaar schelp	Totaal herbruikbaar schelp excl. horeca	%	2	2	2	2	17	33	25	50
	Niet herbruikbaar verspreide distributie	%	98	68.6	68.6	68.6	58	47	52.5	35
	Herbruikbaar uit horeca kanalen	%	0	29.4	29.4	29.4	25	20	22.5	15

<i>toekomstige productie scenario's 200.000 en 400.000 ton productie toename</i>			Huidig (75.000 ton)	Huidig + horeca retour	200.000 ton	400.000 ton	200.000 ton + 50% toename bewerkt	200.000 ton + 90% toename bewerkt	400.000 ton + 50% toename bewerkt	400.000 ton + 90% toename bewerkt
Netto tonnage		ton	75000	75000	275000	475000	275000	275000	475000	475000
Verwerkt product		%	2	2	2	2	50	90	50	90
Vers product		%	98	98	98	98	50	10	50	10
Horeca vers product		%	30	30	30	30	30	30	30	30
Andere kanalen vers product		%	70	70	70	70	70	70	70	70
Schelp gewicht		%	70	70	70	70	70	70	70	70
Totaal product	Totaal	ton	75000	75000	275000	475000	275000	275000	475000	475000
Totaal product verwerkt lokaal	Totaal product verwerkt lokaal	ton	1500	1500	5500	9500	137500	247500	237500	427500
Totaal product vers horeca	Totaal product vers horeca	ton	22050	22050	80850	139650	41250	8250	71250	14250
Totaal product verspreid	Totaal product verspreid	ton	51450	51450	188650	325850	96250	19250	166250	33250
Totaal schelp uit product	Totaal schelp uit product	ton	52500	52500	192500	332500	192500	192500	332500	332500
Schelp t.b.v. verwerking lokaal	verwerking lokaal	ton	1050	1050	3850	6650	96250	173250	166250	299250
Schelp t.b.v. verwerking horeca	Verwerking horeca	ton	15435	15435	56595	97755	28875	5775	49875	9975
Schelp t.b.v. verwerking verspreid	Verwerking verspreid	ton	36015	36015	132055	228095	67375	13475	116375	23275
Totaal herbruikbaar schelp	Totaal herbruikbaar schelp excl. horeca	ton	1050	1050	3850	6650	96250	173250	166250	299250
	Niet herbruikbaar verspreide distributie	ton	51450	36015	132055	228095	67375	13475	116375	23275
	Herbruikbaar uit horeca kanalen	ton	0	15435	56595	97755	28875	5775	49875	9975
<b>PERCENTAGES</b>	Totaal schelpen uit productie	ton	52500	52500	192500	332500	192500	192500	332500	332500
Totaal herbruikbaar schelp	Totaal herbruikbaar schelp excl. horeca	%	2	2	2	2	50	90	50	90
	Niet herbruikbaar verspreide distributie	%	98	69	69	69	35	7	35	7
	Herbruikbaar uit horeca kanalen	%	0	29	29	29	15	3	15	3

---

Wageningen Marine Research

T: +31 (0)317 48 70 00

E: [marine-research@wur.nl](mailto:marine-research@wur.nl)

[www.wur.nl/marine-research](http://www.wur.nl/marine-research)

Bezoekers adres:

- Ankerpark 27 1781 AG Den Helder
- Korringaweg 7, 4401 NT Yerseke
- Haringkade 1, 1976 CP IJmuiden

---

**Wageningen Marine Research** levert met kennis, onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek en advies een wezenlijke bijdrage aan een duurzamer, zorgvuldiger beheer, gebruik en bescherming van de natuurlijke rijkdommen in zee-, kust- en zoetwatergebieden.



Wageningen Marine Research is onderdeel van Wageningen University & Research. Wageningen University & Research is het samenwerkingsverband tussen Wageningen University en Stichting Wageningen Research en heeft als **missie**: 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'

---