

Stedelijke CO₂-concentraties: leven we in een +400 ppm CO₂ atmosfeer?

Merel Degroote

Stamnummer: 01501969

Promotor: Prof. dr. ir. Kathy Steppe

Tutor: ir. Fran Lauriks

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad in Master of Science in de bio-ingenieurswetenschappen: milieutechnologie

Academiejaar: 2019 - 2020

De auteur en de promotor geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit de masterproef.

Gent, juni 2020

De promotor

De tutor

Prof. dr. ir. Kathy Steppe

ir. Fran Lauriks

De auteur

Merel Degroote

Voorwoord

Ik wou een thesisonderwerp waar ik me volledig in kon vinden en bovendien ook 'makkelijk' uit te leggen is. Na het eerste enthousiaste gesprek met mijn promotor, Prof. dr. ir. Kathy Steppe, was het duidelijk dat stedelijke CO₂-concentraties het onderwerp zou zijn waar ik mij een jaar op zou toeleggen. Ik ben dan ook blij om te kunnen zeggen dat het een positieve ervaring was waar ik veel uit geleerd heb. Ik wil haar dan ook heel erg bedanken voor de begeleiding tijdens deze thesis.

Daarnaast wil ik ook mijn tutor, Fran Lauriks, oprecht bedanken voor de begeleiding tijdens deze thesis. Ondanks dat CO₂ in steden niet in haar onderzoeksgebied ligt, heeft ze me altijd zeer goed begeleid en mee nagedacht over hoe de dingen aan te pakken. Haar enthousiasme zorgde ervoor dat ik na iedere meeting opnieuw de moed had om er terug in te vliegen. Ondanks de vreemde omstandigheden waarin deze thesis moest worden afgewerkt, bleef ze altijd bereikbaar voor vragen en raad, waarvoor extra dank!

Mijn dank gaat ook uit naar Erik Moerman, Philip Deman en Geert Favvyts voor de technische ondersteuning en het ontwerpen van het mobiel meetstation. Zonder hen waren de metingen niet mogelijk geweest en ook voor technische problemen kon ik altijd heel snel bij hen terecht.

Ten slotte wil ik ook mijn familie en vrienden bedanken. In de eerste plaats mijn ouders om mij niet alleen bij het maken van deze thesis te steunen, maar ook doorheen mijn volledige studiercarrière. Het is niet altijd makkelijk geweest, maar mede dankzij hun nuchtere kijk en advies heb ik toch mijn doel kunnen bereiken. Bedankt om steeds naar mij te luisteren, terug moed te geven als ik het even niet meer zag zitten en zelfs mee te zoeken naar verklaringen! Daarnaast wil ik ook mijn vrienden bedanken om een luisterend oor aan te bieden. De laatste maanden was het contact vooral virtueel, maar het was fijn te weten dat iedereen in hetzelfde schuitje zat.

Preambule: Impact coronamaatregelen

Om de actuele CO₂-concentratie ([CO₂]) in en rond stad Gent te bepalen, werden voor deze thesis oorspronkelijk tot april metingen met een mobiel meetstation (geïnstalleerd op een fiets) gepland. Door het invoeren van de coronamaatregelen konden de fietstochten echter niet meer worden uitgevoerd en werd deze dataset beperkt tot 3 maart 2020. Het stationaire weerstation (faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent) bleef ook gedurende de coronamaatregelen data verzamelen, waardoor ook tijdens deze periode een globaal idee kon verkregen worden van de [CO₂] in Gent. Daarnaast werden de genomen maatregelen, door hun aard en het onderwerp van deze thesis, als een unieke kans gezien om te onderzoeken hoe de [CO₂] in de stad evolueert bij sterk verminderd verkeer. De impact van de coronamaatregelen werd daarom ook opgenomen in het onderzoek.

Deze preambule werd in overleg tussen de student en de promotor opgesteld en door beiden goedgekeurd.

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Preambule: Impact coronamaatregelen	III
Inhoudsopgave	V
Lijst met afkortingen	VII
Samenvatting.....	IX
Introductie.....	1
1. Literatuurstudie.....	2
1.1 Koolstofcyclus.....	2
1.1.1 Geologische component.....	2
1.1.2 Oceanen.....	5
1.1.3 Terrestrische component	5
1.2 Evolutie van de globale atmosferische CO ₂ -concentratie	6
1.3 Effecten stijgende atmosferische CO ₂ -concentratie	7
1.3.1 Klimaatopwarming	7
1.3.2 Effect op oceanen.....	8
1.3.3 Effect op planten	9
1.4 Gezondheidseffecten gerelateerd aan verhoogde CO ₂ -concentraties	9
1.4.1 Biologisch effect	9
1.4.2 Effecten door blootstelling binnenshuis	10
1.4.2.1 Sick-buildingsyndroom	10
1.4.2.2 Fysiologische en cognitieve effecten.....	11
1.5 CO ₂ -concentratie in de stad	11
1.5.1 Stedelijke CO ₂ -koepel	11
1.5.2 Temporele variaties.....	12
1.5.3 Parameters die de stedelijke CO ₂ -concentratie beïnvloeden	13
1.5.3.1 Meteorologische parameters.....	13
1.5.3.2 Verkeer	15
1.5.3.3 Vegetatie	15
1.6 Verder onderzoek.....	16
2. Materiaal en methoden	17
2.1 Stad Gent.....	17
2.2 Metingen	17
2.3 Instrumentatie.....	20
2.3.1 Weerstation.....	20

2.3.2	Mobiel meetstation.....	21
2.4	Data-analyse.....	21
3.	Resultaten.....	22
3.1	Meteo.....	22
3.2	Temporele CO ₂ -variaties.....	22
3.2.1	Dagelijkse variatie.....	22
3.2.2	Seizoensgebonden variatie.....	22
3.2.3	Wekelijkse variatie.....	24
3.2.4	Invloed van beleidsmaatregelen.....	24
3.3	Invloed van meteorologische parameters.....	24
3.4	CO ₂ -variaties in Gent.....	26
4.	Discussie.....	34
4.1	Invloed van meteorologische parameters.....	34
4.2	Temporele variaties.....	34
4.2.1	Dagelijkse variatie.....	34
4.2.2	Seizoensgebonden variatie.....	35
4.2.3	Wekelijkse variatie.....	36
4.2.4	Invloed van beleidsmaatregelen.....	36
4.3	CO ₂ -variaties in Gent.....	37
4.3.1	Verschil kernstad en buiten de R40.....	37
4.3.2	Invloed van stedelijk groen (zone 1, 4 en 5).....	37
4.3.3	Invloed van verkeersdoorstroming (zone 2, 3, 8 en 9).....	38
4.3.4	Invloed van stedelijke opbouw (zone 6, 7 en 10).....	39
5.	Conclusie.....	40
6.	Verder onderzoek.....	41
	Referentielijst.....	42

Lijst met afkortingen

Afkorting	Term
[H ⁺]	Concentratie waterstofionen
[CO ₂]	Koolstofdioxideconcentratie
C	Koolstof
CaCO ₃	Calciumcarbonaat
CO ₂	Koolstofdioxide
CO ₃ ²⁻	Carbonaation
DIC	Opgeloste anorganische koolstof
DOC	Opgeloste organische koolstof
FPI	Fabry-Pérot interferometer
H ₂ O	Water
HCO ₃ ⁻	Waterstofcarbonaation
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IR	Infraroodstraling
LEZ	Lage emissie zone
NO ₂	Stikstofdioxide
NO _x	Stikstofoxide
PAR	Fotosynthetisch actieve straling
paCO ₂	Koolstofdioxidespanning in het arterieel bloed
pCO ₂	Partieeldruk van koolstofdioxide
POI	<i>Point of interest</i>
SBS	Sick-buildingsyndroom
VMM	Vlaamse Milieumaatschappij

Samenvatting

Afgelopen 60 jaar nam de atmosferische koolstofdioxideconcentratie ($[CO_2]$) wereldwijd bijna 100 ppm toe. Door zijn grote impact op het antropogene broeikas effect leidde dit tot talrijke studies naar de oorzaken en de gevolgen van stijgende $[CO_2]$ op mens en plant. Toch blijven er nog vele vragen onbeantwoord. Pioniersonderzoek in 1990 (Berry & Colls, 1990) toonde een verhoogde $[CO_2]$ aan in stedelijk gebied in vergelijking met omliggende landelijke gebieden. Hoewel dit aanleiding gaf tot verschillende onderzoeken in steden over de hele wereld, blijft kennis rond dit thema gelimiteerd en gedetailleerde data op kleine schaal onbestaande. Deze thesis focust zich daarom op de actuele $[CO_2]$ in en rond stad Gent. Continue stationaire meteorologische metingen in stad Gent lieten toe de temporele variaties en weersafhankelijkheid van $[CO_2]$ te bepalen van oktober 2019 tot en met april 2020. Daarnaast werd met behulp van een mobiel meetstation gemonteerd op een stadsfiets de $[CO_2]$ langsheen een vaste route door stad Gent gekwantificeerd van oktober 2019 tot maart 2020.

De gemiddelde $[CO_2]$ zoals opgemeten in het weerstation gedurende de volledige periode bedroeg $410,9 \pm 0,9$ ppm. Het $[CO_2]$ -daggemiddelde was minimaal in de herfst ($409,6 \pm 0,3$ ppm) en winter ($409,9 \pm 0,2$ ppm) en het hoogst in de lente ($415,5 \pm 0,2$ ppm). Daarnaast werden ook dagelijkse variaties waargenomen, met maximale $[CO_2]$ opgemeten in de ochtend (8 uur) en minimale in de namiddag (15 uur). Deze konden worden verklaard door wisselende atmosferische stabiliteit, verkeer en biologische activiteit.

Het belang van meteorologische parameters op de $[CO_2]$ kon worden aangegeven met een stijging van de $[CO_2]$ bij lage windsnelheid en hoge luchtdruk, ten gevolge van een stabiele atmosfeer. Ook lage temperaturen, door het meer verwarmen van woningen en lange droge periodes, door reactie van CO_2 met H_2O , leidde tot een verhoging van de $[CO_2]$ in de stad. Tot slot bleek ook de windrichting een rol te spelen, waarbij wind uit oostelijke en zuidoostelijke richting voor een verhoging en wind uit zuidwestelijke richting voor een verlaging van de $[CO_2]$ zorgde.

Het verschil in $[CO_2]$ voor en na genomen beleidsmaatregelen gaf aan dat de invoering van de lage emissie zone in Gent op 1 januari 2020 niet voor een significante daling van de $[CO_2]$ zorgde ($413,4 \pm 0,3$ ppm voor vs $408,8 \pm 0,3$ ppm na). Dit aangezien de maatregelen voornamelijk gericht zijn op het verminderen van uitstoot van schadelijke pollutanten zoals fijn stof en stikstofoxiden. De opgemeten $[CO_2]$ tijdens de ingevoerde coronamaatregelen gaven een verhoging aan van $[CO_2]$ in stad Gent als gevolg van ongunstige meteorologische omstandigheden ondanks het verminderde verkeer ($402,2 \pm 0,2$ ppm voor vs $415,6 \pm 0,3$ ppm na).

Tijdens de fietstochten werden grote variaties in $[CO_2]$ op eenzelfde dag (tot $94,2$ ppm) waargenomen. Hoogste concentraties (tot $587,8$ ppm) werden opgemeten op de R40, ter hoogte van Dok-Zuid, laagste concentraties (minimaal $395,2$ ppm) werden opgemeten ter hoogte van de Blaarmeersen. Verhoging van de $[CO_2]$ kon worden gelinkt met een hoge verkeersintensiteit, hoog brandstofverbruik door strenge snelheidsrestricties, het vertragen en versnellen en stilstaan met draaiende motor (e.g. bij filevorming en verkeerslichten). Daarnaast zorgen smalle straten met hoge bebouwing langs beide zijden ervoor dat CO_2 blijft hangen waardoor de $[CO_2]$ toeneemt. Stedelijk groen zorgt voor een daling in $[CO_2]$ door opname van CO_2 tijdens fotosynthese.

Introductie

Koolstofdioxide (CO₂) is een belangrijk broeikasgas en de stijging van de atmosferische CO₂-concentratie ([CO₂]) wordt gezien als de voornaamste bijdrager aan het antropogene broeikaseffect (IPCC, 2007). Metingen op Mauna Loa (Hawaiï) tonen dat in de afgelopen 60 jaar de [CO₂] wereldwijd bijna 100 ppm toenam. Voor de Industriële revolutie, in 1750, bedroeg de [CO₂] 280 ppm, in 2019 was dit gemiddeld 411 ppm (Keeling, 2020; Tans, 2020).

Aan de hand van lange termijn [CO₂]-metingen kon de seizoensgebonden en dagelijkse variatie reeds bepaald worden op afgelegen locaties (Keeling et al., 1976). Deze konden voornamelijk worden verklaard door de variatie in fotosynthetische activiteit doorheen het jaar (Bacastow et al., 1985; Keeling, 1960). Steden verschillen echter sterk van natuurlijke ecosystemen. Door de dichte bevolking, bebouwing, transportnetwerken, energieverbruik en oppervlaktekarakteristieken is de koolstofcyclus, atmosferische samenstelling en klimaat anders in steden (Mills, 2007). Stedelijke gebieden zijn een netto antropogene bron van CO₂ (Velasco & Roth, 2010) en genereren meer dan 70% van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen (Fragkias et al., 2013). Menselijke activiteiten en verkeer blijken meer dan 80% bij te dragen aan atmosferische CO₂ in stedelijke omgeving (Koerner & Klopatek, 2002). Verschillende onderzoeken tonen verhoogde [CO₂] in steden (Berry & Colls, 1990; Briber et al., 2013; Büns & Kuttler, 2012; Gao et al., 2018; García et al., 2012; George et al., 2007; Gratani & Varone, 2005; Idso et al., 2001; Kumar & Nagendra, 2015; Rice & Bostrom, 2011; Soegaard & Møller-Jensen, 2003), maar de opgemeten concentratie kan echter sterk verschillen tussen steden. De [CO₂] blijkt dus afhankelijk van locatie en is daarnaast gerelateerd aan weersomstandigheden (Gratani & Varone, 2005).

Verschillende meetcampagnes onderzochten de concentraties stikstofdioxide (NO₂) in Gent. Zowel het onderzoek van CurieuzeNeuzen in 2016 en 2018 als een meetcampagne van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) in 2016 tonen grote lokale verschillen in de luchtkwaliteit in Gent. Luchtverontreiniging verschilt van straat tot straat. Bepalende factoren voor de opgemeten NO₂ bleken voornamelijk de emissies door verkeer en ruimtelijke ordening (Stad Gent, 2018; VMM, 2017). Ook fijn stof (PM₁₀ en PM_{2,5}) en zwarte koolstof werden reeds door de VMM gemonitord op verschillende plaatsen in Gent (VMM, 2019c). De [CO₂] in stad Gent werd echter eerder nog nooit onderzocht. In tegenstelling tot andere pollutanten is de biosfeer zowel een bron als opslagplaats voor CO₂ in stedelijke omgeving (Pataki et al., 2003), waardoor de verspreiding van CO₂ kan verschillen met die van andere pollutanten. De vraag in dit onderzoek is dan ook hoe de [CO₂] in Gent varieert, zowel in de tijd als in de ruimte en wat de invloed is van meteorologische parameters op de [CO₂].

1. Literatuurstudie

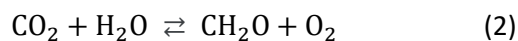
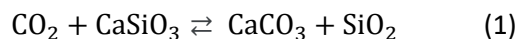
1.1 Koolstofcyclus

CO₂ aanwezig in de atmosfeer maakt deel uit van een aardse cyclus waarin koolstof (C) circuleert doorheen verschillende reservoirs en hierbij chemische veranderingen ondergaat. Deze reservoirs zijn de atmosfeer, de oceanen, de terrestrische biosfeer en het geologische reservoir (Post et al., 1990; IPCC 2001).

Deze natuurlijke koolstofcyclus wordt weergegeven in Figuur 1.1 (A). Het oceanische reservoir bevat veruit het grootste aandeel C. Oceanen slaan C op in drie vormen: opgeloste anorganische C, bestaande uit opgeloste CO₂, waterstofcarbonaat- en carbonaationen (HCO₃⁻ en CO₃²⁻), opgeloste organische C (DOC) en deeltjesvormige organische C, waaronder levende en dode organismen. Het terrestrische reservoir bevat verschillende opslagplaatsen, waaronder vegetatie en organische C in de bodem. Het C aandeel in de atmosfeer is het kleinst, maar wel belangrijk aangezien het de belangrijkste verbinding vormt tussen het land en de oceaan. Oceanen en de terrestrische biosfeer wisselen atmosferische CO₂ uit over kortere termijn, op een tijdschaal van jaren tot duizenden jaren. Over lange termijn, gedurende miljoenen jaren, is uitwisseling tussen het geologische reservoir en het aardoppervlak, bestaande uit de oceanen, atmosfeer, biosfeer en bodems belangrijk (IPCC, 2001; Post et al., 1990). Menselijke activiteiten hebben een invloed op de koolstoffluxen en zorgen voor een kleine, maar significante, verstoring van de globale cyclus (IPCC, 2001) zoals weergegeven in Figuur 1.1 (B).

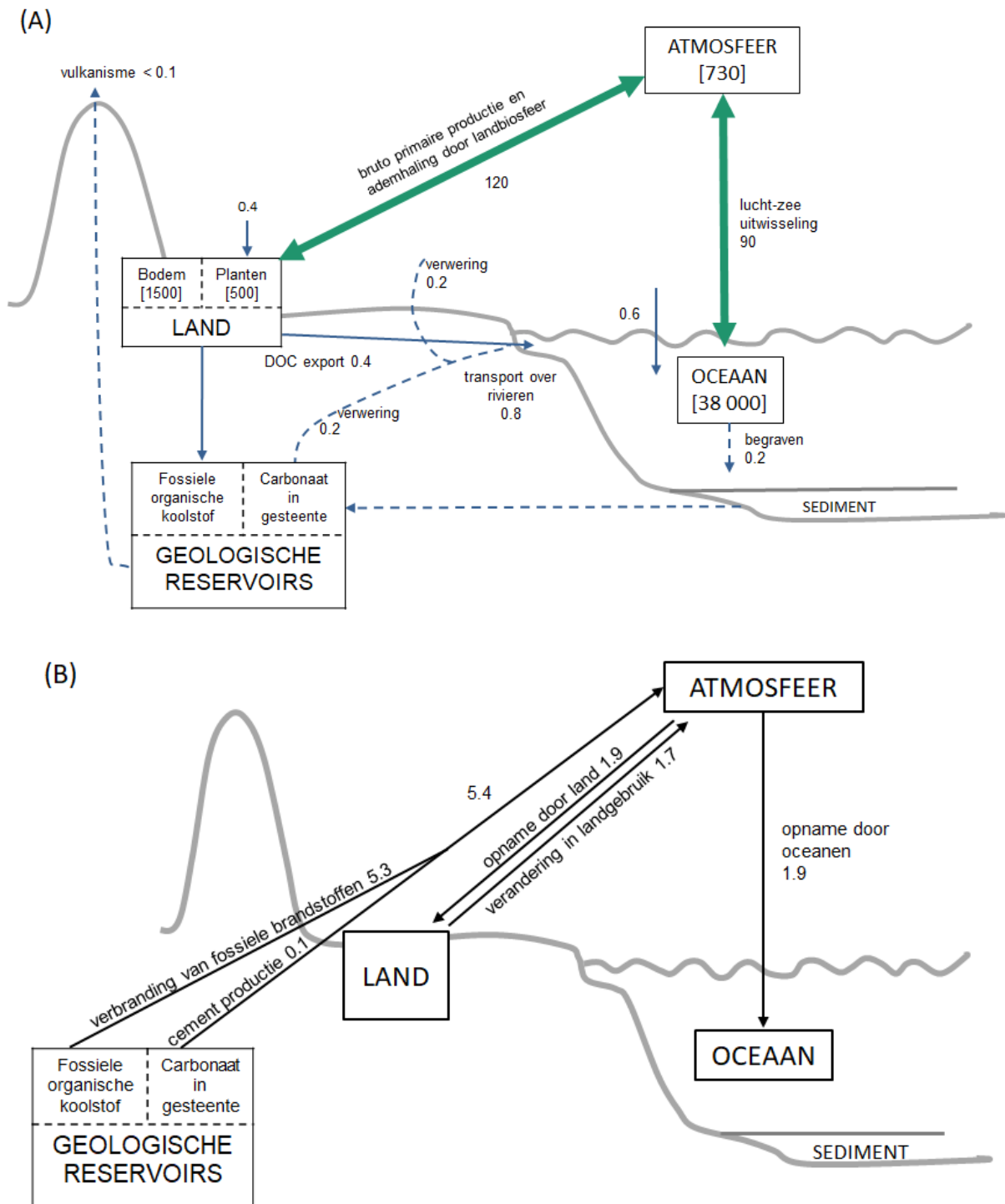
1.1.1 Geologische component

Uitwisseling van C tussen gesteenten en het aardoppervlak is de belangrijkste regelaar van de [CO₂] over geologische tijdschaal (Berner, 2003; Garrels et al., 1976). Deze uitwisseling beslaat miljoenen jaren en kan kort weergegeven worden met volgende vergelijkingen (Berner, 1998):

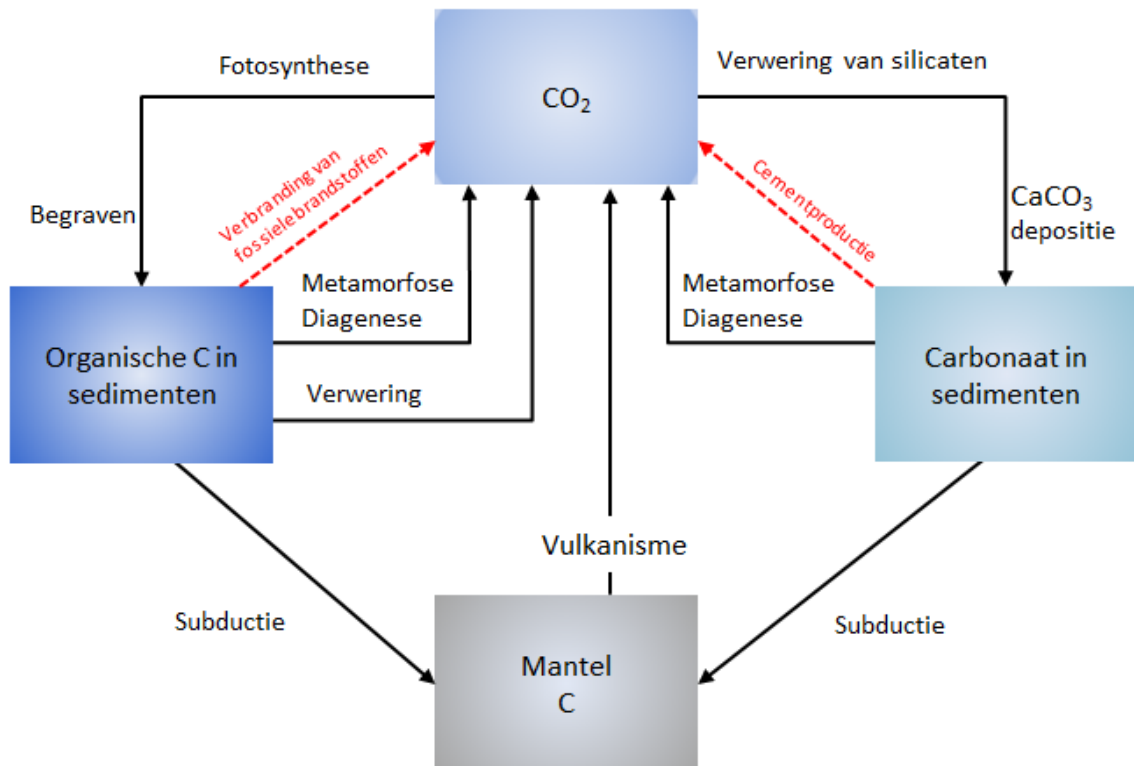


Bij verwerking van silicaten komen ionen vrij die via transport in oceanen terechtkomen en daar precipiteren als calcium- en magnesiumcarbonaten (CaCO₃ en MgCO₃) in sedimenten. Hierbij wordt netto CO₂ opgenomen. Bij de thermische afbraak van carbonaatmineralen via metamorfose, diagenese en vulkanisme komt CO₂ terug vrij in de atmosfeer en oceanen (Vergelijking 1). Dit proces wordt weergegeven aan de rechterzijde van Figuur 1.2 en door de stippellijnen in Figuur 1.1 A.

Bij fotosynthese in planten wordt atmosferische CO₂ opgenomen en omgezet tot suikers. De gevormde organische stof kan worden begraven, waarna het wordt getransformeerd in kerogeen, al kunnen ook olie, gas of steenkool worden gevormd. Wanneer dit organisch materiaal blootgesteld wordt aan erosie, komt door natuurlijke verwerking CO₂ vrij (Vergelijking 2). Dit proces wordt weergegeven aan de linkerkant van Figuur 1.2.

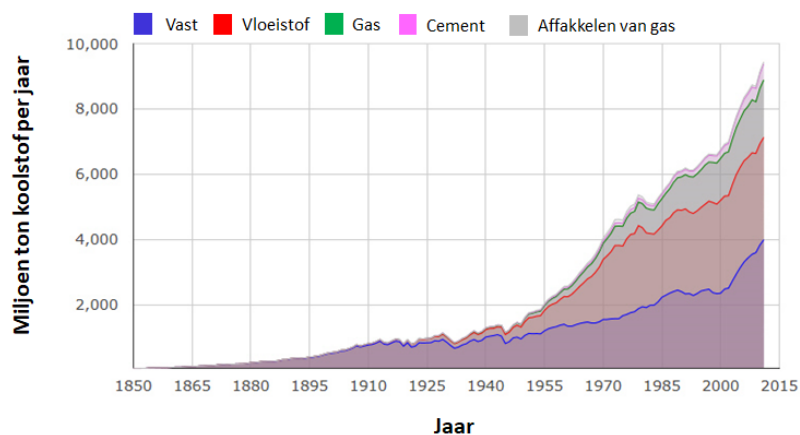


Figuur 1.1 De globale koolstofcyclus met de geschatte koolstofopslag (GtC) en -fluxen (GtC/jaar) voor 1980 - 1990. (A) De natuurlijke koolstofcyclus waarbij de groene pijlen de belangrijkste fluxen weergeven vanuit het oogpunt van de hedendaagse atmosferische CO₂-balans: bruto primaire productie en ademhaling door de landbiosfeer en fysieke lucht-zee uitwisseling. Deze fluxen zijn elk jaar ongeveer in evenwicht. De blauwe pijlen geven bijkomende natuurlijke fluxen weer, stippellijnen schetsen de CaCO₃ stromen die op grotere tijdschaal een belangrijke rol spelen. (B) De verstoringen van de natuurlijke koolstofcyclus veroorzaakt door menselijke activiteiten (aangepast van IPCC, 2001).



Figuur 1.2 Uitwisseling van koolstof (C) tussen gesteenten en het aardoppervlak. De zwarte pijlen geven de fluxen weer tussen de verschillende reservoirs. Deze cyclus kan worden onderverdeeld in twee subcycli, deze van organische stof (links) en deze van de silicaatverwering en carbonaatafzetting (rechts). De rode pijlen geven de verstoring van het natuurlijke proces door menselijke activiteiten weer (aangepast van Berner, 2003).

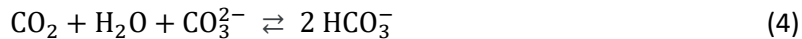
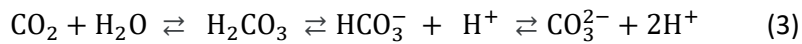
Sinds 1751 zorgde de verbranding van fossiele brandstoffen en cementproductie voor iets meer dan 400 miljard ton additionele C-uitstoot in de atmosfeer. De jaarlijkse wereldwijde antropogene C-emissies gedurende deze periode worden weergegeven in Figuur 1.3. In 2014 bedroeg de verbranding van vloeibare en vaste brandstoffen 75,1 % van de wereldwijde emissies, de verbranding van gasvormige brandstoffen 18,5 %, de cementproductie vertegenwoordigde 5,8 % en affakkelen was goed voor 1 % van de wereldwijde uitstoot (Boden et al., 2017).



Figuur 1.3 Jaarlijkse wereldwijde koolstofemissies van fossiele brandstoffen (aangepast van Boden et al., 2017).

1.1.2 Oceanen

Oceanen wisselen makkelijk C, in de vorm van CO₂, uit met de atmosfeer en zijn een belangrijke opslagplaats of *sink* voor CO₂ (IPCC, 2001). CO₂ lost op in oceanen door reactie met water (H₂O), waarbij carbonzuur (H₂CO₃) wordt gevormd. Dit reageert vervolgens verder tot vormen die niet kunnen ontsnappen naar de atmosfeer (Vergelijking 3). Daarnaast kan CO₂ ook oplossen door reactie met H₂O en CO₃²⁻ met vorming van HCO₃⁻ (Vergelijking 4). De som van CO₂, HCO₃⁻ en CO₃²⁻ wordt opgeloste anorganische C (DIC) genoemd (Doney et al., 2009; Le Quéré & Metzl, 2004).



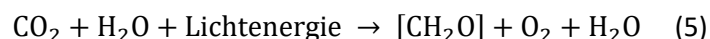
Verschillende chemische, fysische en biologische factoren beïnvloeden de opname van CO₂ door oceanen (IPCC, 2001). CO₂ is meer oplosbaar in koud dan warm water, waardoor in equatoriale gebieden CO₂ vrijkomt als gevolg van de opwarming van opwellend koud water. Dit CO₂-verlies wordt gecompenseerd door opname van CO₂ in hogere breedtegraden door koeling van het water (Murnane et al., 1999).

Alle drie de vormen van DIC zijn belangrijk voor de biologische mariene processen. Deze processen omvatten fotosynthese door zeealgen (meestal fytoplankton) en de productie van complexe organische koolstofmoleculen onder invloed van zonlicht en verkalking met structuren zoals CaCO₃-schelpen als resultaat. Wanneer deze organismen afsterven of worden geconsumeerd, blijft het grootste deel van de C aanwezig in het oppervlaktewater of wordt dit opnieuw vrijgegeven aan de atmosfeer. Een deel bezinkt echter als sediment en stapelt op in diepe oceanen. Dit proces waarbij C wordt overgedragen van de atmosfeer naar de diepe oceaan wordt de 'biologische pomp' genoemd. Door C uit het oppervlaktewater te verwijderen, neemt de oceanische capaciteit toe om als *sink* te fungeren voor atmosferische CO₂ (Le Quéré & Metzl, 2004; Murnane et al., 1999; Raven et al., 2005).

Oceanen hebben het potentieel om 70 – 78 % van de antropogene CO₂ te absorberen (Archer et al., 1997). Volgens Sabine et al. (2004) werd echter ongeveer 48 % van de antropogene CO₂ de voorbije 200 jaar opgenomen door de oceanen. Dit aangezien de snelheid van de CO₂-opname in oceanen afhankelijk is van de stijgende [CO₂] en de snelheid van oceanische vermenging. Aangezien het tientallen jaren tot eeuwen duurt om oppervlaktewater te mengen met intermediaire en diepe wateren, vormt er zich een vertraging tussen stijgende atmosferische [CO₂] en stijgende CO₂-opname in oceanen (Archer et al., 1997).

1.1.3 Terrestrische component

De opname van atmosferische CO₂ door planten is een belangrijke component van de koolstofcyclus op kortere termijn. Planten maken tijdens het fotosyntheseprocess gebruik van lichtenergie om CO₂ om te zetten tot koolhydraten, zuurstof en water (Vergelijking (5), Whitmarsh & Govindjee, 1999).



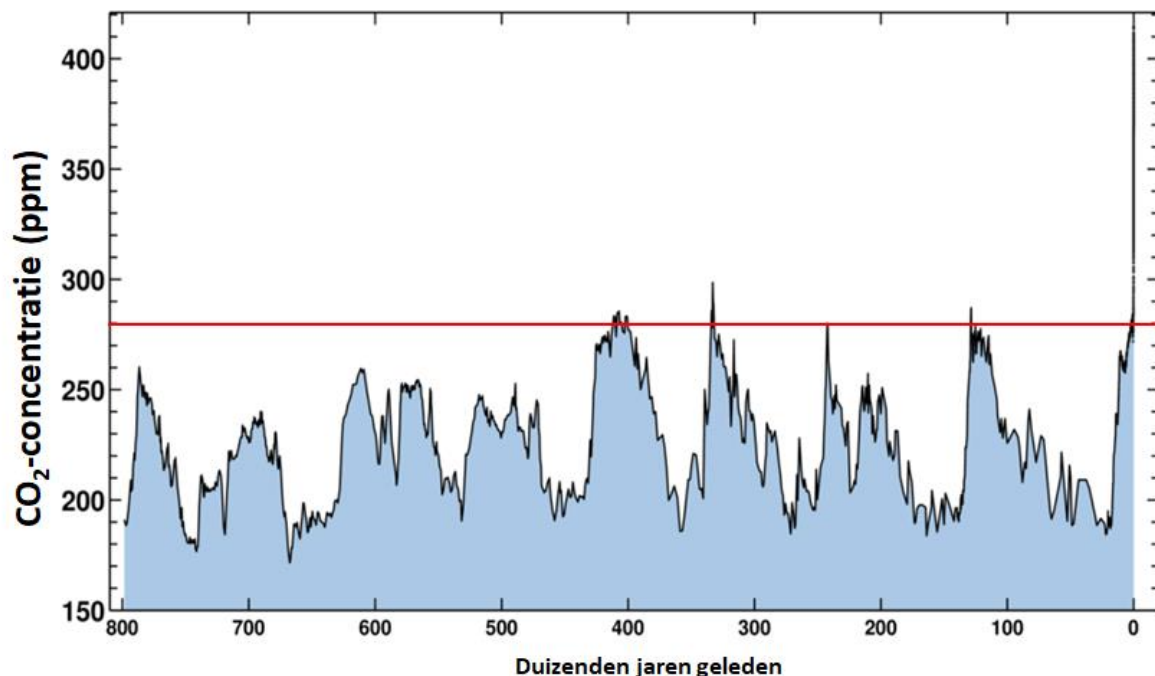
Het deel van de CO₂ dat wordt vastgelegd, door omzetting tot koolhydraten wordt de bruto primaire productie genoemd. Ongeveer de helft hiervan wordt omgezet in nieuw plantweefsel, het overige deel wordt opnieuw in CO₂ omgezet door autotrofe respiratie en vrijgegeven aan de atmosfeer (Lloyd & Farquhar, 1996; Waring et al., 1998). De netto primaire productie, de uiteindelijke jaarlijkse plantengroei, is het verschil tussen fotosynthese en autotrofe ademhaling. Uiteindelijk wordt vrijwel

alle gefixeerde C via heterotrofe ademhaling door reductanten (bacteriën en schimmels) en herbivoren of door verbranding teruggevoerd naar de atmosfeer (IPCC, 2001).

Verandering in landgebruik door menselijke activiteiten heeft een invloed op de hoeveelheid C opgeslagen in plantaardige biomassa en bodems. Met een afname van 20 % van het globale bosgebied sinds 1850, is ontbossing verantwoordelijk voor bijna 90 % van de geschatte emissies ten gevolge van veranderingen in landgebruik (Houghton, 1999). Conversie van natuurlijke vegetatie naar landbouwgebied is een tweede belangrijke bron van CO₂ door verandering in landgebruik. Dit door het verlies van plantaardige biomassa, de verhoogde afbraak van organisch materiaal in de bodem en de energiekosten van landbouwpraktijken zoals bemesting en irrigatie (IPCC, 2001; Schlesinger, 1999).

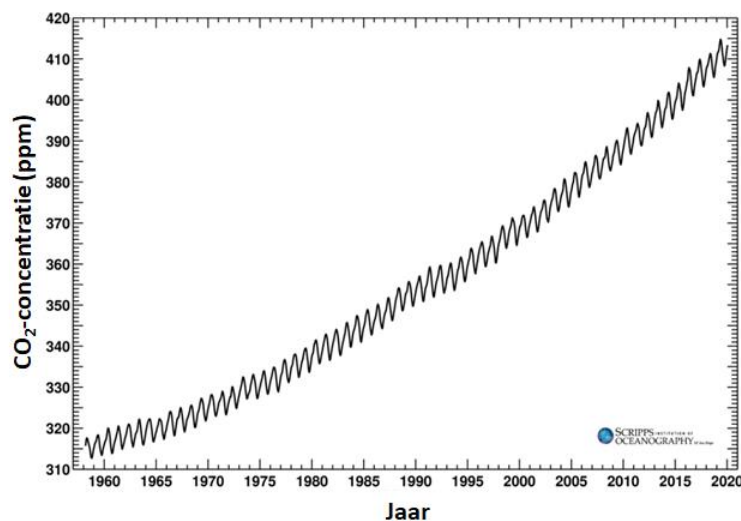
1.2 Evolutie van de globale atmosferische CO₂-concentratie

De [CO₂] wordt sinds 1958 continu gemeten in het Mauna Loa Observatorium op Hawaï. De ongestoorde lucht, afgelegen locatie en minimale invloeden door vegetatie of menselijke activiteit maken deze locatie ideaal voor het monitoren van broeikasgassen in de atmosfeer (Monroe, 2013). Om de [CO₂] te bepalen voor precieze atmosferische metingen van start gingen, wordt gebruik gemaakt van ijskernen afkomstig van Antarctica. Door de luchtbelletjes gevangen in het ijs te analyseren, kan de samenstelling van de atmosfeer tot 800 000 jaar geleden worden bestudeerd (Figuur 1.4). Metingen tonen aan dat de [CO₂] voor de start van de industriële revolutie schommelde tussen 170 en 300 ppm en grote overgangen kunnen geassocieerd worden met wisselingen tussen glaciële en interglaciële perioden (Lüthi et al., 2008; Petit et al., 1999).



Figuur 1.4 [CO₂] over de afgelopen 800 000 (jaar 0 is 2020). Data voor 1958 is afkomstig van ijskernen, data na 1958 is afkomstig van metingen op Mauna Loa. De rode lijn komt overeen met de gemiddelde pre-industriële [CO₂] (280 ppm) (aangepast van Scripps Institution of Oceanography, 2020).

In 1750, bij de start van de industriële revolutie, bedroeg de $[CO_2]$ 280 ppm. De $[CO_2]$ nam hierna eerst geleidelijk maar vervolgens steeds sneller toe, in navolging van de snelheid van wereldwijde landbouw- en industriële ontwikkeling (IPCC, 2001). Charles David Keeling was in 1960 de eerste die de $[CO_2]$ -toename linkte aan verbranding van fossiele brandstoffen en veranderingen in landgebruik (Keeling, 1960). De evolutie van de atmosferische $[CO_2]$ van 1958 tot nu wordt daarom ook weergegeven in de zogenaamde Keeling curve (Figuur 1.5). Naast een algemeen stijgende trend is ook een seizoensgebonden variatie zichtbaar. Jaarlijkse maxima worden steeds opgemeten tussen april en juni, of het begin van het groeiseizoen van het noordelijk halfrond. Minimale waarden worden opgemeten tussen september en november, of aan het einde van het groeiseizoen (Bacastow et al., 1985; Keeling, 1960).



Figuur 1.5 De Keeling curve: de evolutie in $[CO_2]$ van 1958 tot februari 2020, gemeten in het Mauna Loa Observatorium, Hawaï (aangepast van Scripps Institution of Oceanography, 2020).

Gedurende de afgelopen 40 jaar (1979 - 2018) nam de $[CO_2]$ gemiddeld 1,83 ppm per jaar toe. Bovendien versnelt de jaarlijkse $[CO_2]$ -toename, met een gemiddelde stijging van 1,6 ppm jaar⁻¹ in de jaren tachtig tot 2,3 ppm jaar⁻¹ in het afgelopen decennium (2009 - 2018) (Butler & Montzka, 2019).

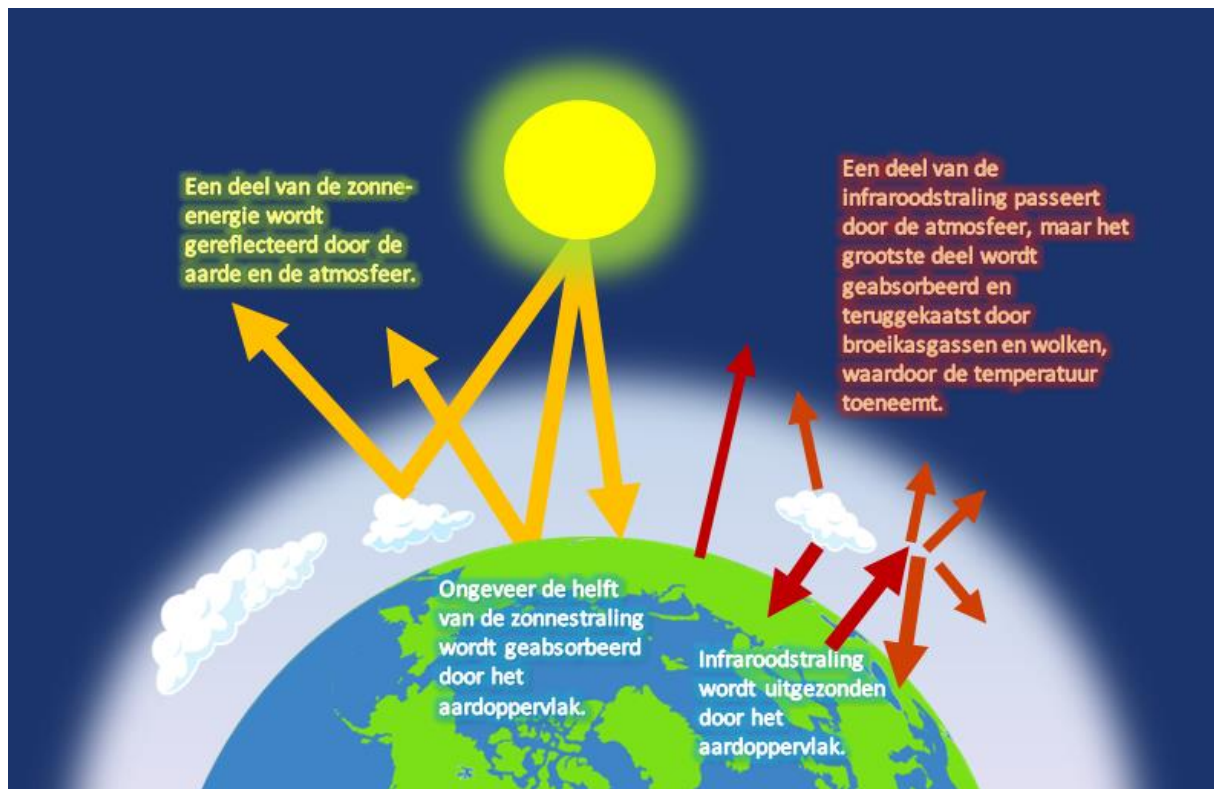
In 2014 werd de drempel van 400 ppm voor het eerst overschreven op Mauna Loa. In mei 2019 werd de hoogste seizoenspiek, van 414,8 ppm, geregistreerd in 61 jaar van waarnemingen. Bovendien was 2019 het zevende opeenvolgende jaar waarbij er een steile wereldwijde stijging in $[CO_2]$ werd waargenomen. De piekwaarde van 2019 was 3,5 ppm hoger dan de hoogst gemeten waarde in 2018 (mei 2018, 411,3 ppm), de op één na hoogste jaarlijkse sprong ooit (Monroe, 2019).

1.3 Effecten stijgende atmosferische CO_2 -concentratie

1.3.1 Klimaatopwarming

CO_2 wordt voornamelijk in verband gebracht met klimaatopwarming. Na waterdamp is CO_2 het belangrijkste broeikasgas. Het broeikaseffect is een natuurlijk verschijnsel dat de temperatuur op aarde verhoogt. Zonder het natuurlijke broeikaseffect zou de temperatuur op het aardoppervlak gemiddeld $-18\text{ }^\circ\text{C}$ zijn (IPCC, 2007).

De zon zendt energie uit in de vorm van straling. Ongeveer een derde van deze zonne-energie wordt weerkaatst door de dampkring. De resterende energie wordt geabsorbeerd door het aardoppervlak en, in mindere mate, door de atmosfeer. De aarde straalt die opgenomen energie opnieuw uit in de vorm van infraroodstraling of warmte. Ongeveer 85 % van deze warmtestraling wordt geabsorbeerd door broeikasgassen in de atmosfeer en opnieuw uitgestraald naar de aarde. Dit wordt het broeikaseffect genoemd, naar analogie van de werking van een serre of broeikas. Het natuurlijke broeikaseffect van de aarde maakt het leven zoals we dat kennen mogelijk. De toenemende concentratie broeikasgassen in de atmosfeer, als gevolg van menselijke activiteiten, zorgt voor een antropogeen (of versterkt) broeikaseffect waardoor de aarde verder opwarmt (IPCC, 2007).



Figuur 1.6 Het broeikaseffect (op basis van IPCC, 2007).

Volgens IPCC (2019) bedroeg de antropogene opwarming in 2017 ongeveer 1 °C (tussen 0,8 °C en 1,2 °C) boven het pre-industriële niveau. Dit komt overeen met een stijging van 0,2 °C (tussen 0,1 °C en 0,3 °C) per decennium. Tot op heden heeft deze temperatuurstijging reeds geleid tot ingrijpende veranderingen op natuurlijke systemen, waaronder toename van droogte, meer overstromingen, hogere frequentie van extreem weer, zeespiegelstijging en biodiversiteitsverlies. Deze veranderingen brengen ongekende risico's met zich mee voor kwetsbare personen en populaties (IPCC, 2019).

1.3.2 Effect op oceanen

Zoals vermeld in 1.1.2 lost CO₂ op in oceanen. Een van de algemene effecten is de verhoging van de concentratie waterstofionen ([H⁺]) in het water (Vergelijking 3). Dit verklaart de sterke invloed van de hoeveelheid opgeloste CO₂ op de resulterende pH van de oceanen (Raven et al., 2005). Uit berekeningen blijkt dat in 2003 de pH 0,1 eenheden hoger was in pre-industriële tijden (Caldeira & Wickett, 2003; Key et al., 2004). Deze 0,1 pH-verandering over de afgelopen 200 jaar komt overeen met een stijging van de [H⁺] van ongeveer 30 %. Prognoses over de toekomstige pH-verandering bij verderzetting van de huidige CO₂-emissie trends, geven een verlaging aan van de pH met 0,5

eenheden tegen 2100 (Raven et al., 2005). Dit komt overeen met een verdrievoudiging van de $[H^+]$ uit pre-industriële tijden.

Een van de belangrijkste implicaties van de veranderende zuurtegraad van de oceanen is het bemoeilijken van het verkalkingsproces, het aanmaken van schelpen en platen uit $CaCO_3$, voor vele mariene organismen. Dit proces is voor sommige mariene organismen belangrijk om te overleven en wordt geleidelijk belemmerd naarmate het water verzuurt (Kleypas, 1999; Riebesell et al., 2000). Met toenemende zuurtegraad wordt CO_3^{2-} relatief minder abundant (Vergelijking 4), en dus ook minder beschikbaar voor mariene organismen (Raven et al., 2005). Koraalriffen, kalkhoudend plankton en andere organismen waarvan de skeletten of schelpen $CaCO_3$ bevatten, kunnen als gevolg van dit fenomeen worden aangetast (Kleypas, 1999; Riebesell et al., 2000).

1.3.3 Effect op planten

Verhoogde $[CO_2]$ heeft een positief effect op de opbrengsten van gewassen. Bij een verdubbeling van de $[CO_2]$ kunnen opbrengsten tot 33 % verhogen (Idso, 1994; Kimball, 1983). Bij verhoogde $[CO_2]$ verminderen planten de stomatale geleidbaarheid en daalt de transpiratie. Dit zorgt voor een verhoging van de watergebruiksefficiëntie, er zal minder water worden gebruikt voor de productie van dezelfde hoeveelheid organisch materiaal (Jackson et al., 1994; Kimball & Idso, 1983). Bij langdurige continue blootstelling van planten aan verhoogde $[CO_2]$ treedt echter acclimatisatie op en verdwijnt de opbrengsttoename (Sybesma & Mortensen, 1984).

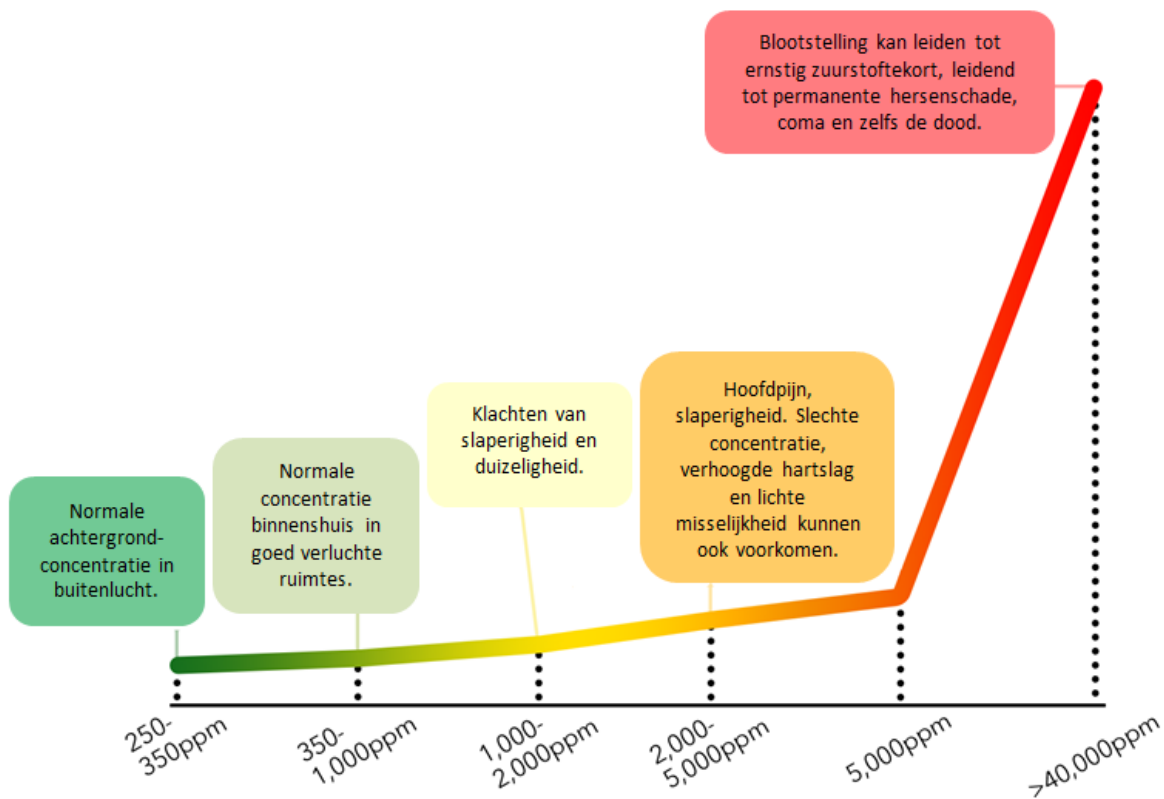
1.4 Gezondheidseffecten gerelateerd aan verhoogde CO_2 -concentraties

CO_2 is een kleurloos en geurloos gas dat zwaarder is dan lucht. Binnenshuis, in drukke en slecht geventileerde ruimtes, kan het gas accumuleren waardoor de $[CO_2]$ kan stijgen tot 2000 – 5000 ppm. Indien de concentratie verder toeneemt, kan dit leiden tot zuurstofgebrek (WHO, 2006). De grootste bron van CO_2 binnenshuis is het menselijk metabolisme (Alberts, 1994). De huidige $[CO_2]$, gemiddeld 411 ppm in 2019 (Keeling, 2020; Tans, 2020), in de omgevingslucht vormt geen gevaar voor de menselijke gezondheid. Verhoging van de $[CO_2]$ in de omgevingslucht, bemoeilijkt echter wel de controle van de concentraties binnenshuis (Azuma et al., 2018).

1.4.1 Biologisch effect

CO_2 wordt in het menselijk lichaam gevormd in de mitochondria tijdens de celademhaling. Accumulatie van CO_2 in het bloed leidt tot verlaging van de pH. CO_2 wordt verwijderd uit het lichaam via de longen om het zuur-base-evenwicht in het bloed in stand te houden (Geers & Gros, 2000; Guais et al., 2011).

Bij een toename van de partiële druk van CO_2 (pCO_2) in de lucht geleverd aan de longen, bijvoorbeeld door een verhoogde $[CO_2]$ in de omgeving, neemt de pCO_2 in de longblaasjes toe. Dit fenomeen heet hypercapnie. CO_2 diffundeert vrij door het alveolaire-capillaire membraan naar het bloed, wat kan zorgen voor een toename van de CO_2 -spanning in het arterieel bloed ($PaCO_2$). Als de $PaCO_2$ toename leidt tot een pH in het bloed onder 7,35, spreekt men over een respiratoire acidose. Acute acidose kan leiden tot onder meer benauwdheid, hoofdpijn, verwardheid, duizeligheid en angst. Chronische acidose veroorzaakt geheugenverlies, slaapstoornissen en persoonlijkheidsveranderingen (Guais et al., 2011). Extreem hoge $[CO_2]$ (vanaf 40 000 ppm) is dodelijk door zuurstofgebrek (DHS, 2019). Een overzicht van de gezondheidseffecten bij stijgende $[CO_2]$ wordt gegeven in Figuur 1.7.



Figuur 1.7 Overzicht gezondheidseffecten door verhoogde [CO₂] in de omgevingslucht (aangepast van Airthings, z.d.).

1.4.2 Effecten door blootstelling binnenshuis

1.4.2.1 Sick-buildingsyndroom

Het sick-buildingsyndroom (SBS) wordt gekarakteriseerd door een reeks symptomen waaronder irritatie van de slijmvliezen, hoofdpijn, vermoeidheid, concentratieverlies, huiduitslag en mentale klachten als depressie en prikkelbaarheid. Er bestaat geen eenduidige oorzaak van SBS, maar het wordt vaak geassocieerd met verschillende omgevingsfactoren waaronder luchtvervuiling (o.a. vluchtige organische componenten, fijn stof en bioaerosolen) en fysische factoren zoals temperatuur en luchtvochtigheid. Onvoldoende ventilatie en daarop volgende verhoogde [CO₂] in gebouwen, wordt het vaakst geassocieerd met SBS. De symptomen hangen samen met de aanwezigheid van de persoon in de vervuilde omgeving en verdwijnen zodra men het gebouw verlaat. Hoewel de ziekte niet levensbedreigend is, heeft deze wel een impact op de productiviteit van de werknemers in het gebouw (Redlich et al., 1997; WHO, 1990).

Bij vergelijking van 21 studies concludeerde Seppanen et al. (1999) dat ongeveer de helft van de studies aantonen dat het risico op SBS-symptomen significant vermindert bij [CO₂] onder de 800 ppm. Ook recente studies in kantoorgebouwen tonen een verband tussen toenemende [CO₂] en SBS (Lu et al., 2015; Norbäck & Nordström, 2008; Tsai et al., 2012). Ook andere epidemiologische studies geven een verband aan tussen [CO₂] en SBS. SBS wordt echter mogelijk ook beïnvloed door andere luchtvervuiling binnenshuis (Apte et al., 2000; Chao et al., 2003), wat het bewijzen van de relatie tussen [CO₂] en SBS bemoeilijkt (Azuma et al., 2018).

Om ervoor te zorgen dat werkruimtes voldoende geventileerd zijn en het risico op klachten geminimaliseerd wordt, moet volgens artikel III.1-34 van de Codex over het welzijn op het werk de

[CO₂] in werklokalen lager zijn dan 900 ppm (Belgisch Staatsblad, 2017). Indien de werkgever op basis van de risicoanalyse kan aantonen dat de werknemers een gelijkwaardige of betere bescherming genieten als gevolg van het uitschakelen of verminderen van zoveel mogelijk verontreinigingsbronnen, dan volstaat het dat de [CO₂] in de werklokalen lager is dan 1200 ppm.

1.4.2.2 *Fysiologische en cognitieve effecten*

Verschillende studies geven aan dat verhoogde [CO₂] fysiologische veranderingen veroorzaakt. Bij een [CO₂] tussen 500 – 5000 ppm neemt de pCO₂ in het weefsel en bloed toe en verhoogt de bloeddruk, hartslagfrequentie, perifere bloedcirculatie en sympathische stimulatie (Kajtár & Herczeg, 2012; MacNaughton et al., 2016; Vehviläinen et al., 2016).

Vanaf 1000 ppm beïnvloedt [CO₂] ook cognitieve prestaties, waaronder het maken van beslissingen en het vermogen om probleemoplossend te denken (Allen et al., 2016; Satish et al., 2012). Petersen et al. (2016) toont aan dat de schoolprestaties van kinderen tussen 10 en 12 jaar verbeteren bij dalende [CO₂]. Door verhoogde toevoer van buitenlucht daalde de [CO₂] van 1500 naar 900 ppm, en verbeterden de prestaties bij optellen, vergelijken van getallen, grammaticale redenering en begrijpend lezen.

Hoewel het onwaarschijnlijk is dat de [CO₂] in de omgevingslucht zal stijgen boven de 1000 ppm, bemoeilijkt verdere toename van de [CO₂] in de omgevingslucht het laaghouden van de [CO₂] binnenshuis. Mechanische ventilatie met omgevingslucht wordt hierdoor steeds meer noodzakelijk, wat de energieconsumptie verder opdrijft. Daarom is het belangrijk om de [CO₂]-toename verder te beperken (Azuma et al., 2018).

1.5 CO₂-concentratie in de stad

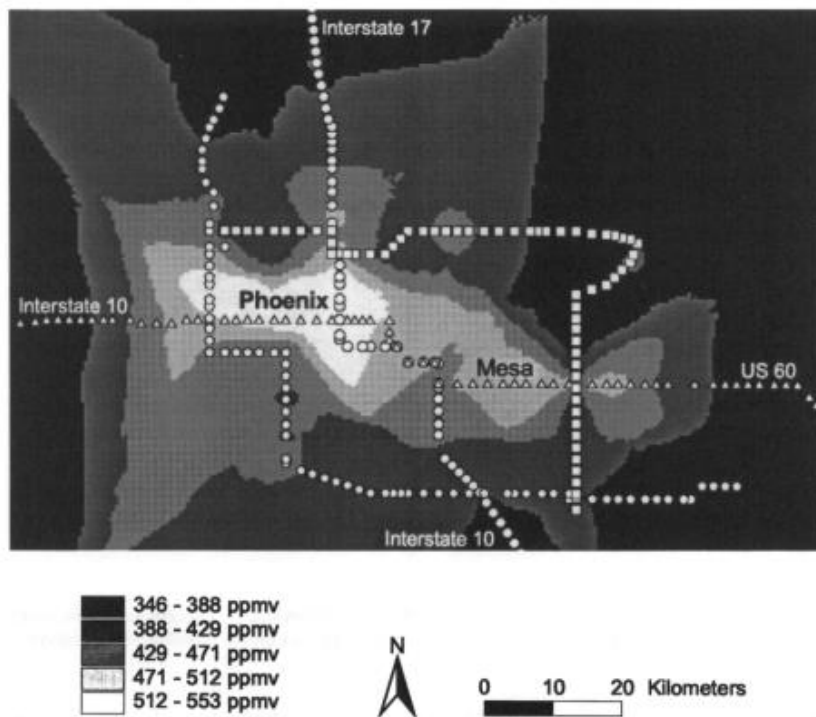
1.5.1 Stedelijke CO₂-koepel

Menselijke activiteiten hebben een invloed op het klimaat in stedelijke gebieden, met als bekendste fenomeen het stedelijk hitte-eilandeffect. Temperatuur in steden is doorgaans enkele graden, met uitschieters tot 8 °C, hoger in vergelijking met de omliggende rurale gebieden (Goward, 1981; Oke, 1982; VMM, 2019b). Ook [CO₂] kan op een stedelijke schaal beïnvloed worden door menselijke activiteit. Een *urban CO₂ dome* of stedelijke CO₂-koepel kan worden vergeleken met een hitte-eiland, alleen gaat het hier over de accumulatie van CO₂ in een stedelijk gebied (Idso et al., 1998). Hierdoor ontstaan verschillen tussen [CO₂] in steden en omliggende landelijke gebieden en kunnen verschillen bestaan tussen lokaal gemeten [CO₂] en globale metingen (Figuur 1.8). De aanwezigheid van een stedelijke CO₂-koepel werd reeds gerapporteerd in verschillende steden over de hele wereld. De sterkte van deze koepel kan echter sterk verschillen tussen steden (Tabel 1.1).

Er bestaan twee verschillende methodes om stedelijke [CO₂] te evalueren. [CO₂] kan continu gemonitord worden over een bepaalde periode in één of meerdere meetstations verspreid over het stedelijk gebied en de rurale omgeving (Büns & Kuttler, 2012; George et al., 2007; Gratani & Varone, 2005; Rice & Bostrom, 2011). Een tweede mogelijkheid is het opmeten van [CO₂] langs een route doorheen de stedelijke omgeving (Idso et al., 1998, 2001).

Tabel 1.1 Reeds opgemeten stedelijke CO₂-koepels, en de geregistreerde verhoging in vergelijking met landelijke gebieden, over de wereld.

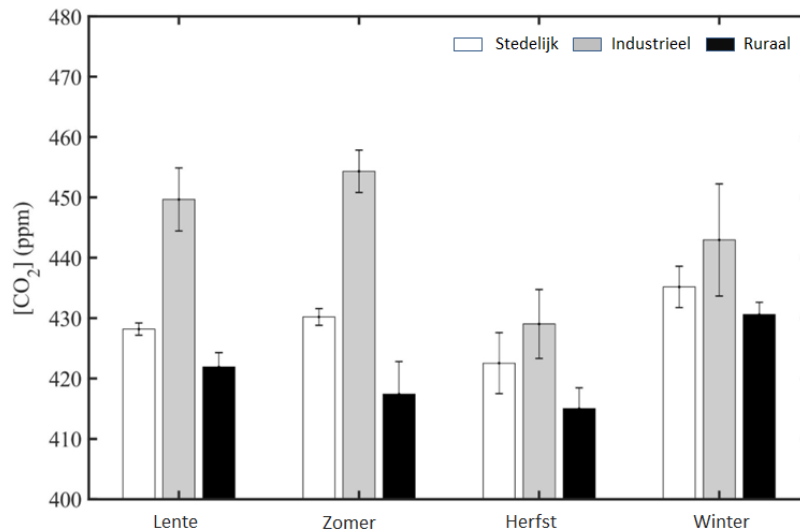
Stedelijk gebied	Sterkte van de stedelijke CO ₂ -koepel	Auteur
Nottingham (Verenigd Koninkrijk)	+5 ppm	Berry & Colls (1990)
Phoenix (Arizona, VSA)	+75 %	Idso et al. (2001)
Kopenhagen (Denemarken)	+50 %	Soegaard & Møller-Jensen (2003)
Rome (Italië)	+18 %	Gratani & Varone (2005)
Baltimore (Maryland, VSA)	+66 ppm	George et al. (2007)
Portland (Oregon, VSA)	+5-6 ppm	Rice & Bostrom (2011)
Essen (Duitsland)	+8,5 %	Büns & Kuttler (2012)
Noord-Spanje	+4,5 ppm	García et al. (2012)
Boston (Massachusetts, VSA)	+5 %	Briber et al. (2013)
Chennai (India)	+19 ppm	Kumar & Nagendra (2015)
Nanjing (China)	+8,1 ppm	Gao et al. (2018)



Figuur 1.8 Geïnterpoleerde [CO₂] in Phoenix (Arizona, VSA), gemeten om 5 uur 's ochtends in 1998. De witte punten geven de meetlocaties weer (Idso et al., 1998).

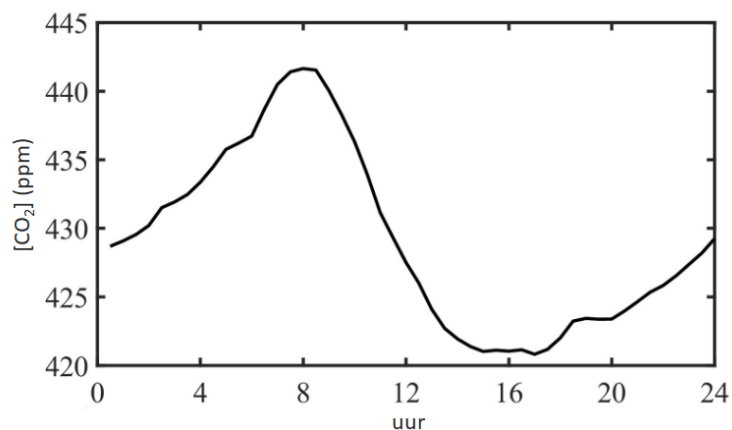
1.5.2 Temporele variaties

De stedelijke [CO₂] is hoger in de winter dan in de zomer en herfst (in het noordelijk halfrond) (Figuur 1.9) (Gao et al., 2018; García et al., 2008; Gratani & Varone, 2005; Hernández-Paniagua et al., 2015; Idso et al., 2002). Deze variatie is gedeeltelijk van natuurlijke oorsprong en is eenvoudig te verklaren door een hogere fotosynthetische activiteit en bijhorende CO₂-opname tijdens de zomermaanden (García et al., 2008). Menselijke activiteit versterkt deze cyclus door een verhoogd gebruik van fossiele brandstoffen voor verwarming in de koude wintermaanden. De verhoogde uitstoot en verminderde fotosynthese zorgen voor een verhoging van de [CO₂] in de winter (Figuur 1.9) (Rigby et al., 2008).



Figuur 1.9 Gemiddelde [CO₂] per seizoen in Nanjing (China) voor stedelijk, industrieel en ruraal gebied in 2014. De hogere [CO₂] in de zomer voor het industrieel gebied is te wijten aan een hogere industriële activiteit in deze periode (aangepast van Gao et al., 2018).

[CO₂] varieert ook dagelijks in een stedelijke omgeving als resultaat van antropogene, biogene en meteorologische factoren (Vogt et al., 2006). Maximale waarden worden opgemeten in de ochtend (8 uur), minimale waarden worden meestal in de namiddag (16 uur) opgemeten (Figuur 1.10) (Gao et al., 2018; Idso et al., 2002; Rice & Bostrom, 2011). De maximale [CO₂] in de ochtend wordt toegeschreven aan de hogere verkeersintensiteit tijdens spitsuren (Gratani & Varone, 2005; Idso et al., 2002; Nasrallah et al., 2003), de atmosferische stabiliteit en de biologische activiteit (fotosynthese en respiratie) (Rice & Bostrom, 2011).



Figuur 1.10 Dagelijks patroon van de [CO₂] in het stedelijk gebied in Nanjing (China) in 2014 (aangepast van Gao et al., 2018).

1.5.3 Parameters die de stedelijke CO₂-concentratie beïnvloeden

1.5.3.1 Meteorologische parameters

Variaties in meteorologische parameters controleren de beweging, dispersie en de verdunning van verontreinigende stoffen in de atmosfeer. De luchtkwaliteit, en dus ook de [CO₂], worden zo beïnvloed door deze parameters (Seinfeld & Pandis, 1998). Een overzicht van de effecten van de reeds onderzochte parameters wordt gegeven in Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Overzicht van de studies naar de verbanden tussen stedelijke [CO₂] en temperatuur (T), relatieve vochtigheid (RH), windsnelheid (v), windrichting (\vec{v}), atmosferische stabiliteit, verkeer en aanwezigheid van vegetatie. Hierbij duidt + op een positief verband, - een negatief verband, / geen verband en +/- zowel een positief als negatief verband.

Auteur	T	RH	v	\vec{v}	stabiliteit	verkeer	vegetatie
Berry & Colls (1990)							
Idso et al. (2001)	/	/		+/-	+	+	
Soegaard & Møller-Jensen (2003)						+	
Gratani & Varone (2005)		+				+	-
George et al. (2007)							
Rice & Bostrom (2011)	/	/	-	+/-	+	+	
Büns & Kuttler (2012)	-	+	-	+/-	+	+	
García et al. (2012)			-	+/-			
Nasrallah et al. (2003)			-				
Briber et al. (2013)							
Kumar & Nagendra (2015)					+		
Gao et al. (2018)			-				

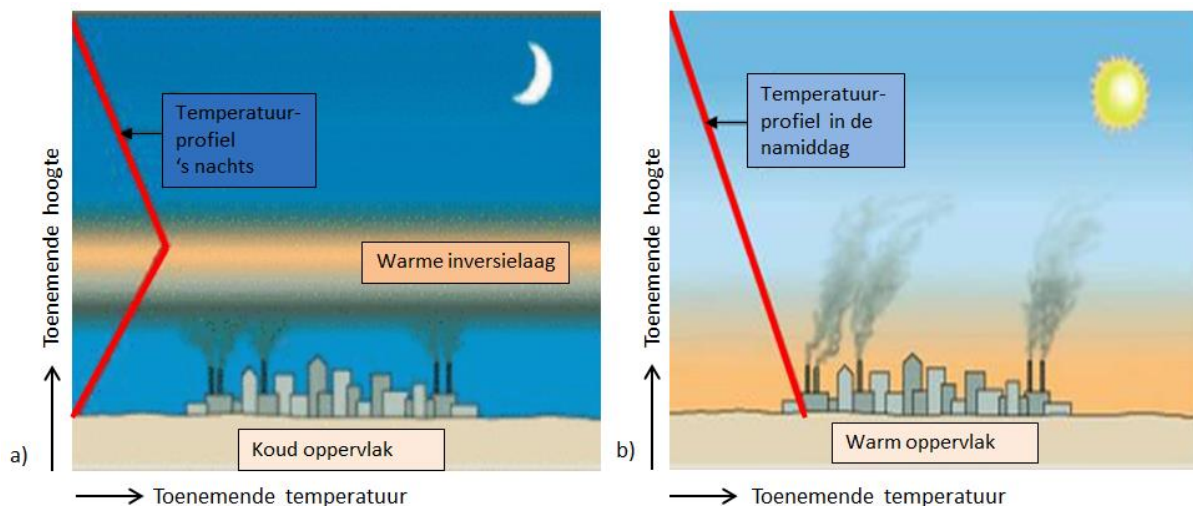
Onderzoek van Idso et al. (1998) in Phoenix (Arizona, VSA) geeft aan dat temperatuur en relatieve vochtigheid slechts een beperkte invloed uitoefenen op de stedelijke [CO₂]. Dit wordt echter tegengesproken door onderzoek uitgevoerd in Rome (Italië) waar wel een verband werd gevonden tussen [CO₂] en temperatuur en relatieve vochtigheid (Gratani & Varone, 2005). Onderzoek van Büns & Kuttler (2012) (Essen, Duitsland) toont een dalende trend van [CO₂] met stijgende temperatuur. Dit resultaat is gerelateerd aan de dagelijkse en seizoensgebonden afhankelijkheid van [CO₂] (García et al., 2010).

Verschillende studies tonen aan dat de [CO₂] hoog is bij lage windsnelheden (Büns & Kuttler, 2012; Gao et al., 2018). Uit resultaten van Gao et al. (2018) blijkt dat de [CO₂] het hoogst is wanneer de windsnelheid lager is dan 2 m s⁻¹. Als de windsnelheid hoger is dan deze waarde, toont de [CO₂] een dalende trend met toenemende windsnelheid. Andere studies tonen dat de [CO₂] sterk varieert bij lage windsnelheden, onder 2,5 m s⁻¹. Hogere windsnelheden worden gelinkt aan een constante, lagere [CO₂] (García et al., 2012; Rice & Bostrom, 2011). Dit aangezien een hoge windsnelheid verdunning bevordert en zorgt voor een daling van de [CO₂] in vergelijking met lage windsnelheden (García et al., 2010).

Naast windsnelheid kan ook windrichting een invloed uitoefenen op de [CO₂]. Indien de wind afkomstig is uit landelijke gebieden, waar de [CO₂] lager is dan in de stad, kan dit zorgen voor verlaging van de stedelijk concentratie. Omgekeerd kan in landelijke gebieden de [CO₂] verhogen door aanvoer van lucht uit gebieden met verhoogde concentratie (García et al., 2008; Idso et al., 2001; Nasrallah et al., 2003).

Ook atmosferische stabiliteit beïnvloedt de [CO₂]. Hoge atmosferische stabiliteit en temperatuurinversie worden gerelateerd aan hoge [CO₂] (García et al., 2008; Idso et al., 2001; Kumar & Nagendra, 2015; Nasrallah et al., 2003). In normale omstandigheden neemt de temperatuur in de atmosfeer af met toenemende hoogte. Echter, bij temperatuurinversie stijgt, in een bepaalde laag van de atmosfeer, de temperatuur met toenemende hoogte. De luchtvervuiling, die in een normale situatie verticaal wordt verdund, wordt hierdoor vastgehouden onderaan deze inversielaag (Irceline, z.d.; KMI, z.d.). Dit fenomeen heeft een invloed op de dagelijkse [CO₂]-cyclus. Door afkoeling van het

aardoppervlak tijdens de nacht en in de vroege ochtend ontstaat temperatuurinversie (Figuur 1.11 a). Deze stabiele atmosfeer maakt verticale luchtuitwisseling onmogelijk en verklaart de hoge $[CO_2]$ in de nacht en ochtend (Nasrallah et al., 2003). De gevormde inversielaag breekt af in de loop van de ochtend door zonne-energie geïnduceerde convectieve menging (Figuur 1.11 b). De onstabiele condities verhogen de luchtvermenging en zorgen voor een daling van de $[CO_2]$ doorheen de dag (Idso et al., 1998, 2001; Nasrallah et al., 2003). Daarnaast komen temperatuurinversies vaker voor in de winter onder een hogedrukgebied (Irceline, z.d.). Dit kan mee de verhoogde $[CO_2]$ verklaren in de winter (Gao et al., 2018).



Figuur 1.11 Schematische voorstelling van de a) temperatuurinversie door afkoeling van het aardoppervlak tijdens de nacht b) temperatuurverloop in de namiddag met een afgebroken inversielaag (aangepast van Sajuni, 2015).

1.5.3.2 Verkeer

Verschillende onderzoeken tonen aan dat er een sterke invloed is van verkeer op de stedelijke $[CO_2]$ (Tabel 1.2). De dagelijkse $[CO_2]$ -variatie wordt beïnvloed door verkeersemissies, met pieken in de gemeten $[CO_2]$ bij hoge verkeersintensiteit tijdens de spitsuren (Gratani & Varone, 2005; Idso et al., 2002; Nasrallah et al., 2003). Onderzoek van Gratani & Varone (2005) in Rome (Italië) toonde daarboven een correlatie tussen verkeersintensiteit (aantal auto's per tijdseenheid) en $[CO_2]$. Vermindering van verkeer in het weekend, verlaagt de $[CO_2]$ in stedelijke gebieden (Gratani & Varone, 2005; Hernández-Paniagua et al., 2015; Idso et al., 2001; Nasrallah et al., 2003; Rice & Bostrom, 2011). Onderzoek van Gao et al. (2018) toont echter aan dat de $[CO_2]$ in stedelijke gebieden van Naging (China) hoger zijn gedurende het weekend. Dit wordt verklaard door het unieke verkeerspatroon in China, waarbij voornamelijk het openbaar vervoer gebruikt wordt voor woon-werkverkeer en de wagen tijdens het weekend.

1.5.3.3 Vegetatie

Aanwezigheid van stadsvegetatie heeft een effect op de stedelijke $[CO_2]$. Doorheen de dag zijn planten door fotosynthese in staat om CO_2 op te nemen waardoor de concentratie daalt. Gedurende de nacht zullen respiratieprocessen CO_2 vrijstellen. Het belang van stedelijk groen voor de captatie en reductie van $[CO_2]$ werd aangetoond in Rome (Italië) (Tabel 1.2). In het centrum van de stad werd een 3,5 % hogere $[CO_2]$ opgemeten in vergelijking met het park. Daarnaast verschilden ook de dagelijkse patronen. In het centrum werd een dagelijkse trend opgemeten waarbij de $[CO_2]$ het hoogst was tussen 7 en 9 uur. In de parken toonde de $[CO_2]$ echter een dalende trend van 7 tot 11

uur ten gevolge van de hoogste dagelijkse fotosynthesesnelheden van planten (Gratani et al., 1998; Gratani & Varone, 2005).

Zoals vermeld in 1.3.3, zorgen verhoogde $[CO_2]$ voor hogere opbrengsten en een hogere watergebruiksefficiëntie bij planten (Idso, 1994; Jackson et al., 1994; Kimball, 1983; Kimball & Idso, 1983). Stedelijke vegetatie zou dus de voordelen kunnen plukken van de verhoogde $[CO_2]$, die als lokale luchtbemesting kan fungeren. Bovendien maakt dit dat steden dienst kunnen doen als natuurlijke laboratoria voor impactonderzoeken op het gebied van klimaatverandering (Idso et al., 1998).

Verhoogde $[CO_2]$ zou bovendien de schadelijke effecten van luchtverontreinigende stoffen op planten kunnen verminderen. Door verlaging van de stomatale opening in een omgeving met hoge $[CO_2]$ worden minder verontreinigende stoffen in de bladeren opgenomen (Allen, 1990). Dit fenomeen is effectief voor het tegengaan van plantbeschadiging bij hoge concentraties troposferisch ozon (O_3), stikstofoxiden (NO_x) en zwaveldioxide (SO_2) (Bruggink et al., 1988; Carlson, 1983; Fiscus et al., 1997; Mckee et al., 1997). Onderzoek in Rome op *Quercus ilex* toont echter vermindering van de levensduur van de bladeren door een verandering in fenologie en productiviteit in zones met een hoge verkeersdichtheid (Gratani et al., 2000).

1.6 Verder onderzoek

Uit onderzoek naar de $[CO_2]$ in steden blijkt een duidelijk verschil te bestaan tussen stedelijke gebieden en hun landelijke omgeving (Berry & Colls, 1990; Briber et al., 2013; Büns & Kuttler, 2012; George et al., 2007; Gratani & Varone, 2005; Idso et al., 1998; Rice & Bostrom, 2011; Soegaard & Møller-Jensen, 2003). Daarnaast blijken ook grote verschillen tussen steden onderling te bestaan waardoor veralgemening onmogelijk is. Om uitspraken te doen over de $[CO_2]$ in een bepaalde stad, moet deze dan ook voor deze specifieke stad opgemeten worden. Bovendien is de kennis rond $[CO_2]$ -variëaties binnenin een stad erg beperkt. Enkel Gratani & Varone (2005) toont de verschillen aan tussen de drukke wegen in het stadscentrum en de stadsparken in Rome (Italië). Verder onderzoek naar de verschillen tussen drukke en autoluwe wegen en het effect van stedelijk groen en natuurzones in een stad is echter noodzakelijk.

Initiatieven als CurieuzeNeuzen Vlaanderen, een grootschalig burgeronderzoek waarbij gedurende een maand de concentratie NO_2 werd gemeten in de straat van 20 000 Vlaamse gezinnen, tonen de interesse van het brede publiek naar de luchtkwaliteit van hun leefomgeving. Daarnaast zorgen deze projecten ook voor toenemende bewustwording en gedragsverandering bij burgers (Huyse et al., 2019) en zijn luchtkwaliteitstudies van toenemend belang bij het nemen van beleidsmaatregelen. Zo stonden monitoringsprogramma's naar luchtkwaliteit mee aan de basis voor het invoeren van het circulatieplan en lage emissie zone (LEZ) in Gent (Departement Omgeving, 2016). Huidige meetprogramma's focussen zich voornamelijk op NO_x en fijn stof en laten $[CO_2]$ links liggen. Er is bijgevolg nood aan een meetsysteem dat op kleine schaal en met grote nauwkeurigheid $[CO_2]$ kan opmeten in en rond een stedelijk gebied.

2. Materiaal en methoden

2.1 Stad Gent

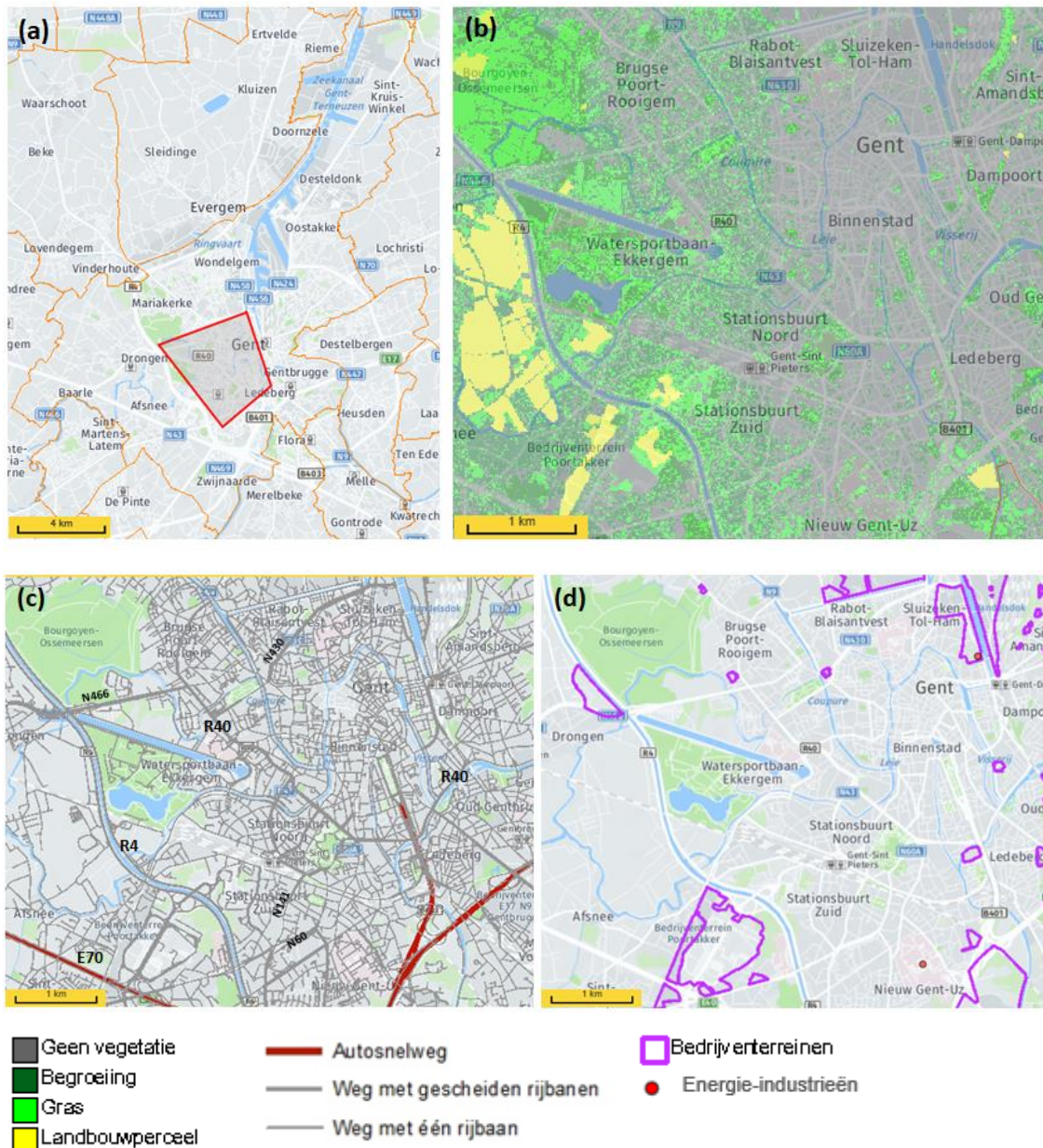
Metingen werden uitgevoerd in Gent (51 ° 3 ' NB, 3 ° 42 ' OL, Oost-Vlaanderen, België). Groot Gent heeft een totale oppervlakte van 157,96 km². In dit onderzoek wordt gefocust op de kernstad (de zone binnen de kleine stadsring (R40)) en een deel ten zuiden van de R40 maar binnen de ringweg R4 (Figuur 2.1 (a)). De kernstad heeft een oppervlakte van 7,42 km² en is met een bevolkingsdichtheid van 6299 inwoners km⁻² het dichtstbevolkte stadsdeel van Gent (Stad Gent, 2020a). Figuur 2.1 (b) duidt het stedelijk groen aan in het studiegebied. In 2014 was 19 % van de oppervlakte van Groot Gent natuur, de grootste fractie hiervan (40 %) bevindt zich in verstedelijkt gebied (Stad Gent, 2014). Binnen de kernstad gaat het vooral om parken. De meeste natuur bevindt zich in het westen van het studiegebied, buiten de R40, in het Stedelijk Natuurreservaat Bourgoyen-Ossemeersen en het Sport- en Recreatiepark Blaarmeersen. Figuur 2.1 (c) toont het wegennet. Enkele grote wegen, waaronder de R40 en de gewestwegen N430, N466, N141 en N60, doorkruisen het onderzoeksgebied. Sinds 1 januari 2019 is het gebied binnen de R40 een LEZ. Dit betekent dat, om de luchtkwaliteit te verbeteren, deze zone niet meer toegankelijk is voor de meest vervuilende wagens en vrije toegang beperkt is voor dieselwagens met euronorm 4 of lager en voor benzine wagens met euronorm 1 en ouder (Stad Gent, 2020b).

In het studiegebied bevinden zich ook enkele bedrijventerreinen (Figuur 2.1 (d)) waarvan het grootste zich bevindt ten noordoosten van de kernstad, ter hoogte van het Handelsdok. Op dit terrein bevindt zich onder meer de thermische centrale van EDF Luminus. Ten noorden van Gent, buiten de grenzen van de kaart, bevindt zich de haven van Gent waar diverse grote bedrijven zijn gevestigd (Geopunt Vlaanderen, 2020). Deze industriële activiteiten kunnen gezien hun nabijheid ook een invloed uitoefenen op de [CO₂] in het onderzoeksgebied.

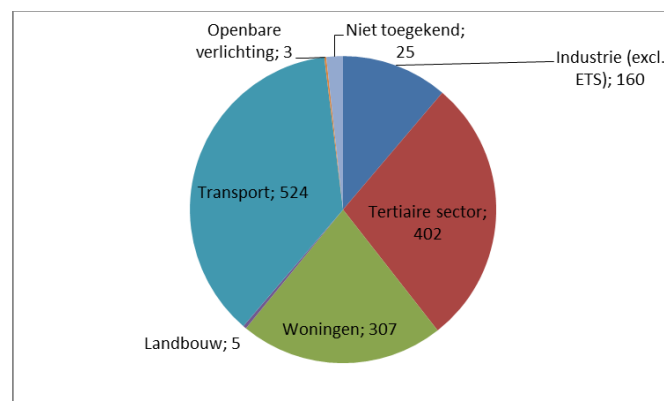
De totale CO₂-uitstoot in Gent in 2017 bedroeg 1426 kton CO₂ of 5,5 ton CO₂ inwoner⁻¹. Een overzicht van de CO₂-emissie in Gent per sector wordt gegeven in Figuur 2.2. De sectoren verantwoordelijk voor de grootste emissie zijn transport (37 %), de tertiaire sector (commerciële dienstensector) (28 %) en woningen (22 %) (Stad Gent, 2020a).

2.2 Metingen

Om de variatie in de tijd, weersafhankelijkheid en de invloed van beleidsmaatregelen op de [CO₂] in stad Gent te bepalen, werd er gebruik gemaakt van data afkomstig van het weerstation van het Laboratorium voor Plantecologie (Figuur 2.4, Universiteit Gent; www.ugentweeronline.be). Dit weerstation bevindt zich op het dak van de faculteit Bio-ingenieurswetenschappen van de Universiteit Gent (Coupure Links, 51 ° 3 ' 12,1 " NB, 3 ° 42 ' 30,1 " OL), in de kernstad (Figuur 2.3). Er werd gefocust op de periode van 8 oktober 2019 tot en met 30 april 2020.



Figuur 2.1 Kaarten van het onderzoeksgebied met aanduiding van (a) het onderzoeksgebied, (b) stedelijk groen (2002 – 2003), (c) het wegennet en (d) bedrijventerreinen met aanduiding van de energie-industrieën (Geopunt Vlaanderen, 2020).

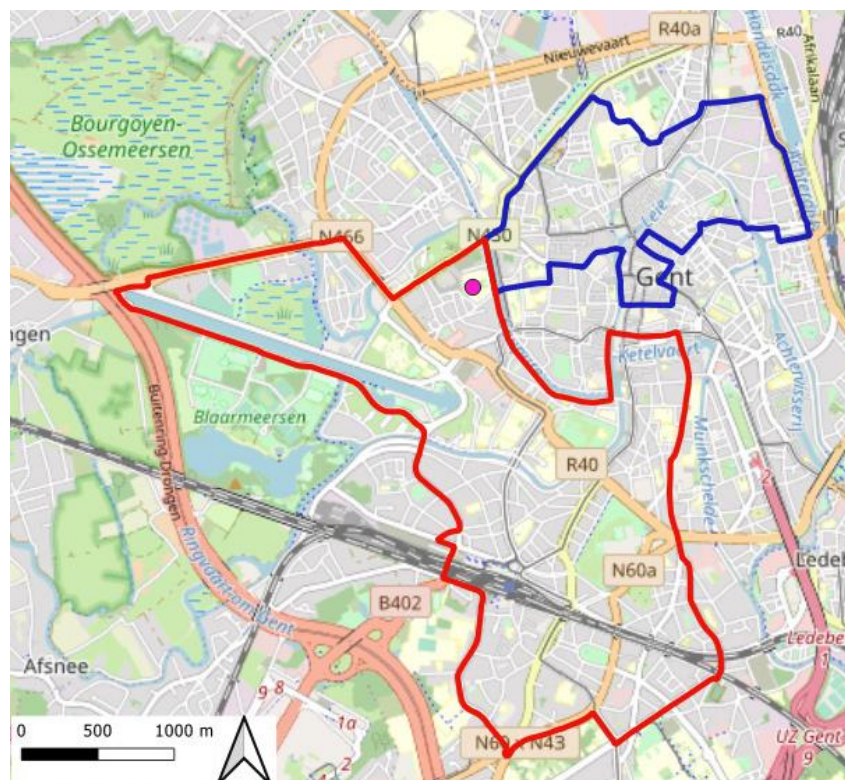


Figuur 2.2 CO₂-uitstoot in Gent in kton per sector in 2017 (Stad Gent, 2020a).

Om de temporele variaties en de invloed van de LEZ op de $[CO_2]$ te bepalen werd rekening gehouden met het invoeren van de coronamaatregelen. Op 18 maart 2020 werden essentiële verplaatsingen verboden, telewerk verplicht waar mogelijk en moesten niet-essentiële winkels sluiten. Eerder moesten de horeca (13 maart) en de scholen (16 maart) de deuren sluiten en in de week van 9 maart werd telewerk reeds aangemoedigd en werd in het hoger onderwijs veelal overgeschakeld op afstandsonderwijs. Deze maatregelen zorgden voor een vermindering van de verplaatsingen en bijgevolg daling van de verkeersdruk (Vlaams Verkeerscentrum, 2020). Gezien de vermoedelijke invloed hiervan op de $[CO_2]$ in de stad, werd de dataset opgesplitst in een periode voor de invoering van de coronamaatregelen (8 oktober 2019 tot en met 8 maart 2020) en een periode na invoering (18 maart 2020 tot en met 30 april 2020).

Om de $[CO_2]$ -variatie in de stad te bepalen werd gebruik gemaakt van een mobiel meetstation (Figuur 2.5) gemonteerd op een stadsfiets. Metingen werden uitgevoerd tussen 15 oktober 2019 en 3 maart 2020 en werden steeds verzameld op een dinsdag tussen 9 en 12 uur in de voormiddag. In totaal werd er zeven keer gefietst, op 15 en 29 oktober, 12 en 26 november en 3 december 2019, en op 18 februari en 3 maart 2020.

Figuur 2.3 toont de gefietste route waarlangs de $[CO_2]$ bepaald werd. Deze route is 22 km lang en bestaat uit twee lussen. De blauwe lus situeert zich in de kernstad, binnen de R40, de rode lus bevindt zich grotendeels buiten de R40, maar binnen de R4. De route werd zo gekozen dat verschillende stadsdelen aan bod kwamen om een zo volledig mogelijk beeld te kunnen schetsen van de $[CO_2]$ -variatie in stad Gent. Zo werd de $[CO_2]$ opgemeten langs verschillende drukke wegen waaronder delen van de R40 en delen van de gewestwegen N430, N60 en N466. Om de invloed van stedelijk groen na te gaan werd ook de $[CO_2]$ opgemeten in de Bourgoyen-Ossemeersen, de Blaarmeersen en het Groenevalleipark.

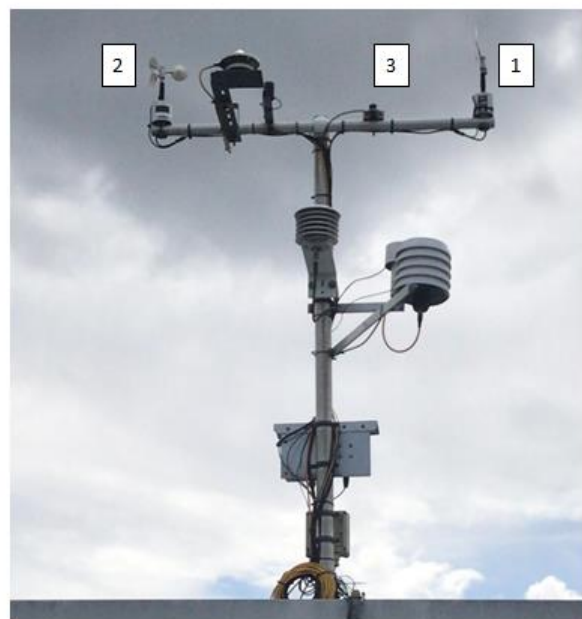


Figuur 2.3 Aanduiding van de gefietste route. De blauwe lus situeert zich in de kernstad, binnen de R40, de rode lus bevindt zich grotendeels buiten de R40, maar binnen de ringweg R4. Het roze punt geeft de locatie van het weerstation weer.

2.3 Instrumentatie

2.3.1 Weerstation

Het weerstation (Figuur 2.4) bevat sensoren die continu verschillende meteorologische parameters opmeten. Neerslag wordt opgemeten met een pluviometer (ARG100 rain gauge, EML, North Shields, Verenigd Koninkrijk), luchtdruk met een druksensor (MPX5100Ap, Freescale Semiconductor, Inc., Tempe, Arizona, VSA) en temperatuur en relatieve luchtvochtigheid worden gemeten met behulp van een temperatuur- en vochtigheidssensor (HMP50, Vaisala, Vantaa, Finland). Een windvaan (NRG 200P Wind Vane, NRG Systems, Hinesburg, Vermont, VSA) bepaalt de windrichting en voor de windsnelheid wordt een anemometer (A100R Anemometer, Vector Instruments, Rhyl, Verenigd Koninkrijk) gebruikt. Fotosynthetisch actieve straling (PAR) werd tot 16 oktober 2019 gemeten met de SKP 215 PAR Quantum Sensor (Skye, Llandrindod Wells, Verenigd Koninkrijk), sinds 16 oktober 2019 gebeurt dit met de LI-190R Quantum Sensor (LI-COR, Lincoln, Nebraska, VSA).



- 1 Windvaan
- 2 Anemometer
- 3 PAR-sensor

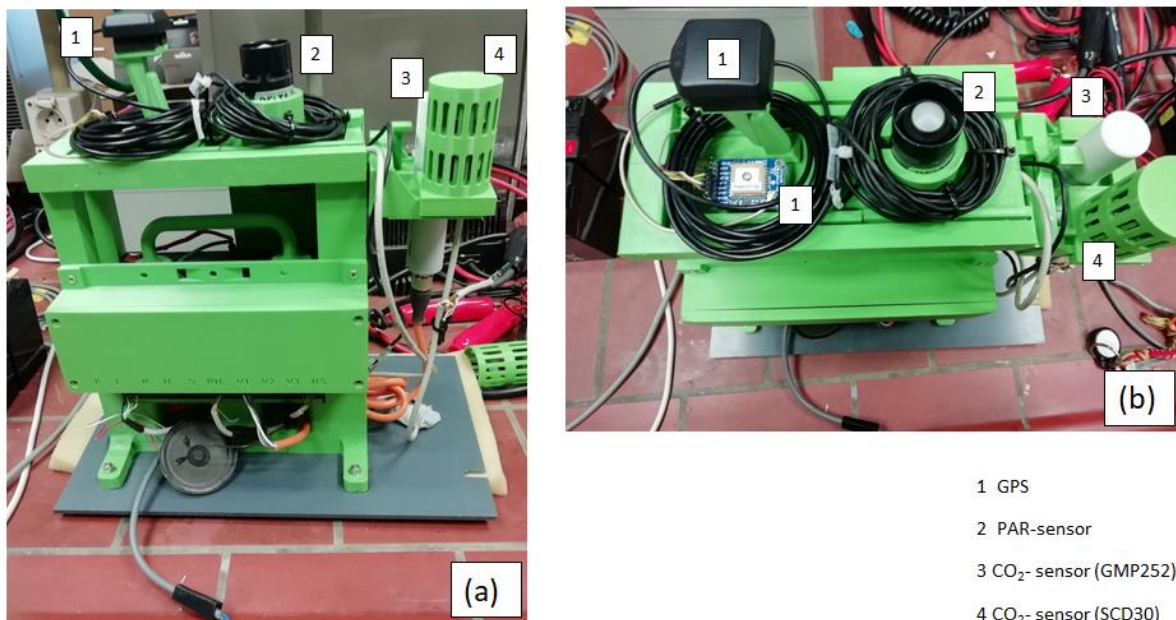
Figuur 2.4 Weerstation op het dak van de Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen van de Universiteit Gent.

Op 8 oktober 2020 werd een nieuwe CO₂-probe (GMP252, Vaisala, Vantaa, Finland) geïnstalleerd. Deze bestaat uit een meetcuve met een CARBOCAP® sensor en een polytetrafluorethyleenfilter. De sensor is een niet-dispersieve infraroodsensor. De gevoeligheid voor CO₂ is gebaseerd op absorptie van infraroodstraling (IR) bij een karakteristieke golflengte. Tijdens de meting wordt IR door de cuvet geleid die het te meten gas bevat. Een spiegel reflecteert het licht naar een thermozeildetector die de lichtintensiteit meet bij een golflengte bepaald door een Fabry-Pérot interferometer (FPI) en een bandfilter. De CO₂-meting verloopt in twee opeenvolgende stappen. In de eerste plaats wordt de FPI zo afgesteld dat de frequentieband samenvalt met de karakteristieke absorptiegolflengte van CO₂ waarna het IR-signaal wordt geregistreerd. Vervolgens wordt de doorlaatband verschoven naar een golflengte waar geen absorptie plaatsvindt om een referentiesignaal te verkrijgen. De verhouding

van deze twee signalen, één bij absorptiegolflengte en de andere bij referentiegolflengte, geeft de fractie van lichtabsorptie waaruit de $[CO_2]$ wordt berekend. Het meten van het referentiesignaal compenseert de mogelijke effecten van sensorveroudering en signaalverzwakking door vuil op optische oppervlakken, waardoor de sensor een stabiel signaal blijft geven doorheen de tijd (Vaisala, 2018).

2.3.2 Mobiel meetstation

Het meettoestel (Figuur 2.5) bevat twee CO_2 -sensoren, de GMP252 en de SCD30 (Sensirion, Staefa, Zwitserland). Enkel data afkomstig van de GMP252, hetzelfde sensortype als aanwezig in het stationaire weerstation, werd gebruikt in het onderzoek. Aan het mobiele meetstation werden ook sensoren toegevoegd voor het opmeten van de relatieve luchtvochtigheid en temperatuur (SHT25, Sensirion, Staefa, Zwitserland) en PAR (QS2, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, Verenigd Koninkrijk). Een GPS (GPS746, Adafruit, New York City, VSA) maakte het mogelijk de opgemeten meteo-data te relateren aan een geografische plaats.



Figuur 2.5 Het mobiel meetstation met aanduiding van de sensoren, (a) vooraanzicht, (b) bovenaanzicht.

2.4 Data-analyse

De data van het weerstation en het mobiel meetstation werden uitgemiddeld over een periode van vijf minuten en vervolgens doorgestuurd naar de PhytoSense (Phyto-IT, Gent, België) datamanagement en -visualisatie software. Het mobiele meetstation stuurde iedere 30 seconde een datapunt door naar hetzelfde softwaresysteem. De verwerking van de data van het weerstation en het opmaken van grafieken gebeurde in RStudio. De data werd getest op normaliteit, bij een niet-normaal verdeling werden de niet-parametrische Kruskal-Wallis toets en de Wilcoxon rank-sum toets gebruikt, correlatie werd bepaald met de Spearman correlatie methode (package ggpubr). De data van het mobiel meetstation werd gebruikt om de $[CO_2]$ -variatie in stad Gent te bepalen. Hiervoor werden de GPS coördinaten, die in graden en decimale minuten werden geregistreerd, eerst omgezet tot decimale graden waarna ze konden worden geploteerd en gevisualiseerd op kaarten in QGIS (QGIS.ORG, Grüt, Zwitserland).

3. Resultaten

3.1 Meteo

Om een algemeen beeld te schetsen van het klimaat in Gent toont Figuur 3.1 de daggemiddelden met standaardfout van de relatieve luchtvochtigheid, temperatuur, windsnelheid, windrichting, luchtdruk, neerslag, PAR en [CO₂] over de periode van 8 oktober 2019 tot en met 30 april 2020.

Tijdens de winter (21 december tot 20 maart) werden de laagste gemiddelde temperaturen (Figuur 3.1 (b)) en PAR (Figuur 3.1 (g)) opgemeten. De winter was ook de natste periode, met maxima tot $15,9 \pm 0,4$ mm neerslag, de droogste maand was april (Figuur 3.1 (f)).

Gemiddelde windsnelheden varieerden tussen $1,9 \pm 0,1$ km u⁻¹ en $25,9 \pm 0,4$ km u⁻¹, met maxima opgemeten op 16 februari tijdens storm Dennis (Figuur 3.1 (c)). De windrichting varieerde tussen $85,7 \pm 6,8$ ° (oostenwind) en $313,2 \pm 11,3$ ° (noordwestenwind), met zuidwestenwind ($112,5$ ° – $157,5$ °) als meest voorkomend (Figuur 3.1 (d)). De daggemiddelde luchtdruk varieerde tussen $975,1 \pm 0,1$ hPa en $1043,7 \pm 0,3$ hPa (Figuur 3.1 (e)).

De gemiddelde [CO₂] over heel de periode is $410,9 \pm 0,9$ ppm. De daggemiddelde [CO₂] varieerde tussen $380,1 \pm 0,2$ ppm en $489,8 \pm 2,7$ ppm op respectievelijk 2 november en 20 januari (Figuur 3.1 (h)). Variaties van [CO₂] in de tijd worden verder besproken in 3.2.

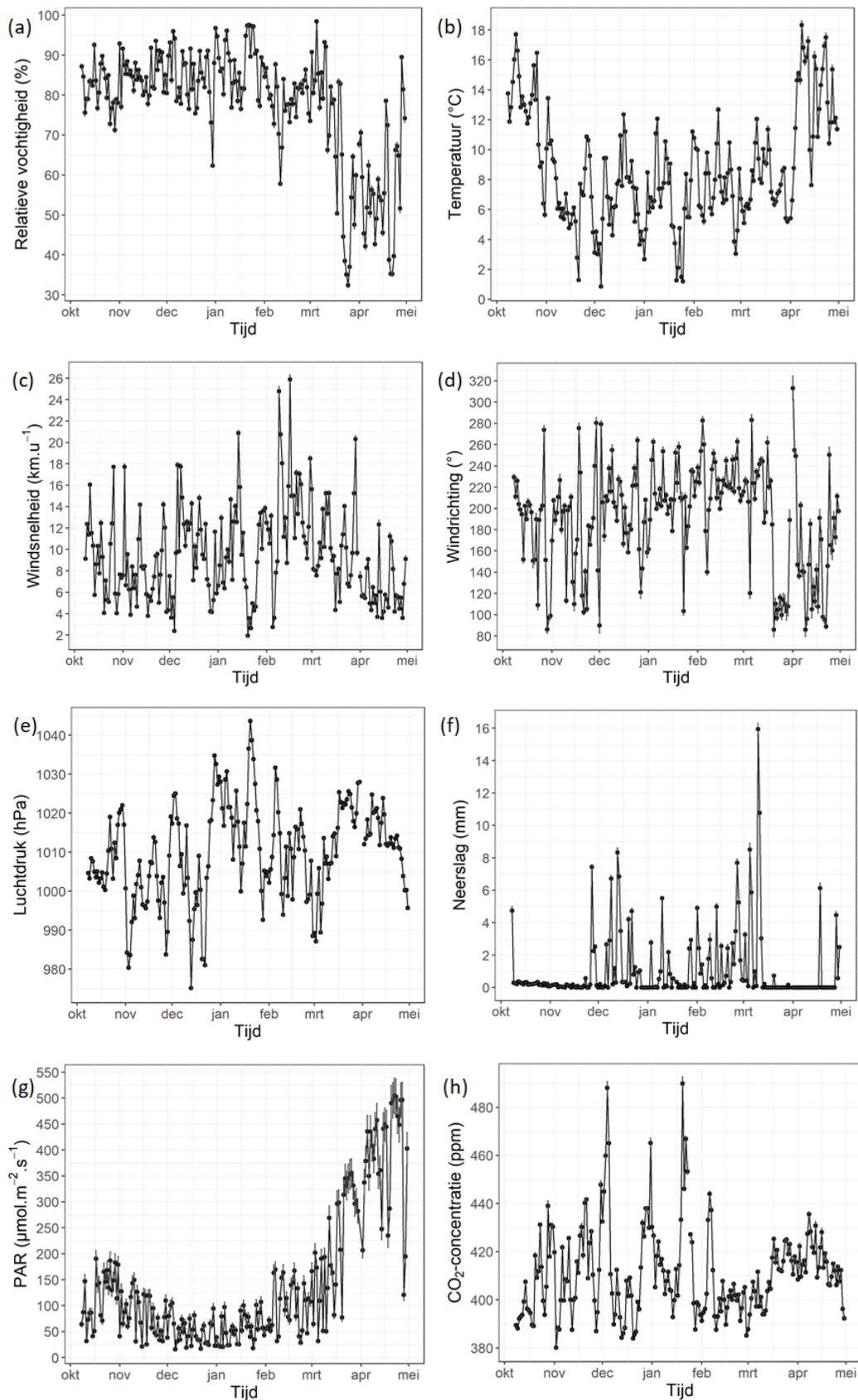
3.2 Temporele CO₂-variaties

3.2.1 Dagelijkse variatie

Figuur 3.2 (a) toont het dagelijks patroon van de [CO₂] voor en na de invoer van de coronamaatregelen op basis van de uurgemiddelde [CO₂]. Voor de invoering van de maatregelen tonen de dagelijkse [CO₂]-variaties een maximum in de ochtend om 8 uur van gemiddeld $418,5 \pm 0,7$ ppm. De [CO₂] daalt doorheen de dag en komt tot een minimum in de namiddag, om 15 uur, van gemiddeld $402,7 \pm 0,4$ ppm, waarna de [CO₂] opnieuw toeneemt. De [CO₂] blijft tijdens de nacht (vanaf 21 uur) vrij stabiel en stijgt opnieuw in de vroege ochtend (vanaf 4 uur). Het [CO₂]-patroon na de invoering van de coronamaatregelen toont een gelijkaardig verloop met een maximum in de ochtend, om 7 uur, waarna de [CO₂] daalt. Het minimum wordt echter pas later op de dag bekomen, om 19 uur. De [CO₂] blijft ook niet constant gedurende de nacht, maar stijgt verder tot 7 uur in de ochtend. De dagelijkse [CO₂]-variatie is groter dan in normale omstandigheden met gemiddelde extremen tussen $404,4 \pm 0,4$ ppm en $430,7 \pm 0,9$ ppm.

3.2.2 Seizoensgebonden variatie

Figuur 3.2 (b) toont de vergelijking van de [CO₂] tussen de drie opgemeten seizoenen (met de herfst vanaf 8 oktober en lente tot en met 30 april), bepaald op basis van de daggemiddelde [CO₂]. Het [CO₂]-daggemiddelde is minimaal in de herfst ($409,6 \pm 0,3$ ppm) en winter ($409,9 \pm 0,2$ ppm) en geen significant verschil tussen deze twee seizoenen kan worden opgemerkt ($p = 0,74$). Maximale daggemiddelden werden opgemeten in de lente ($415,5 \pm 0,2$ ppm) en waren significant hoger in vergelijking met de waarden opgemeten in herfst en winter (p respectievelijk 0,0032 en 0,00054).



Figuur 3.1 Daggemiddelde met standaard fout van (a) relatieve vochtigheid, (b) temperatuur, (c) windsnelheid, (d) windrichting, (e) luchtdruk, (f) neerslag, (g) PAR en (h) [CO₂] voor de periode van 8 oktober 2019 t.e.m. 30 april 2020. Voor de meeste parameters is de standaardfout eerder klein en bijgevolg niet altijd zichtbaar op de grafieken.

3.2.3 Wekelijkse variatie

Om een eventuele invloed na te gaan van de dag van de week en het verschil tussen werkweek en weekend op de $[CO_2]$ werd gebruik gemaakt van $[CO_2]$ -daggemiddelden in de periode 8 oktober 2019 tot en met 8 maart 2020, voor de aanvang van de coronamaatregelen.

Figuur 3.2 (c) toont de $[CO_2]$ voor de verschillende dagen van de week, er kan geen significant verschil in $[CO_2]$ tussen de dagen worden opgemerkt ($p = 0,77$). De gemiddelde $[CO_2]$ tijdens de werkweek is $411,5 \pm 0,2$ ppm en deze is, hoewel niet significant ($p = 0,21$), 5 ppm hoger dan de gemiddelde concentratie opgemeten tijdens het weekend ($406,5 \pm 0,4$ ppm) (Figuur 3.2 (d)).

3.2.4 Invloed van beleidsmaatregelen

Om de invloed van de invoering van de LEZ in Gent te bepalen, werd het $[CO_2]$ -daggemiddelde voor en na de invoering (1 januari 2020) vergeleken. Meetdagen na de invoering van de coronamaatregelen werden buiten beschouwing gelaten waardoor de periode na de invoering van de LEZ beperkt was van 1 januari 2020 tot en met 8 maart 2020. Om te kunnen vergelijken werd een periode met een gelijk aantal dagen geselecteerd voor de invoering van de LEZ, namelijk van 24 oktober 2019 tot en met 31 december 2019. Figuur 3.2 (e) toont de daggemiddelde $[CO_2]$ voor en na de invoering van de LEZ, respectievelijk $413,4 \pm 0,3$ ppm en $408,8 \pm 0,3$ ppm. De gemiddelde $[CO_2]$ is 4,6 ppm lager na de invoering van de LEZ, maar dit verschil is niet significant ($p = 0,23$).

De $[CO_2]$ -daggemiddelde voor en na de invoering van de coronamaatregelen wordt weergegeven in Figuur 3.2 (f). Na invoering van de maatregelen is de gemiddelde $[CO_2]$ gelijk aan $415,6 \pm 0,3$ ppm. Dit is significant ($p = 2,6e-9$) hoger dan voor de invoering van de coronamaatregelen ($402,2 \pm 0,2$ ppm).

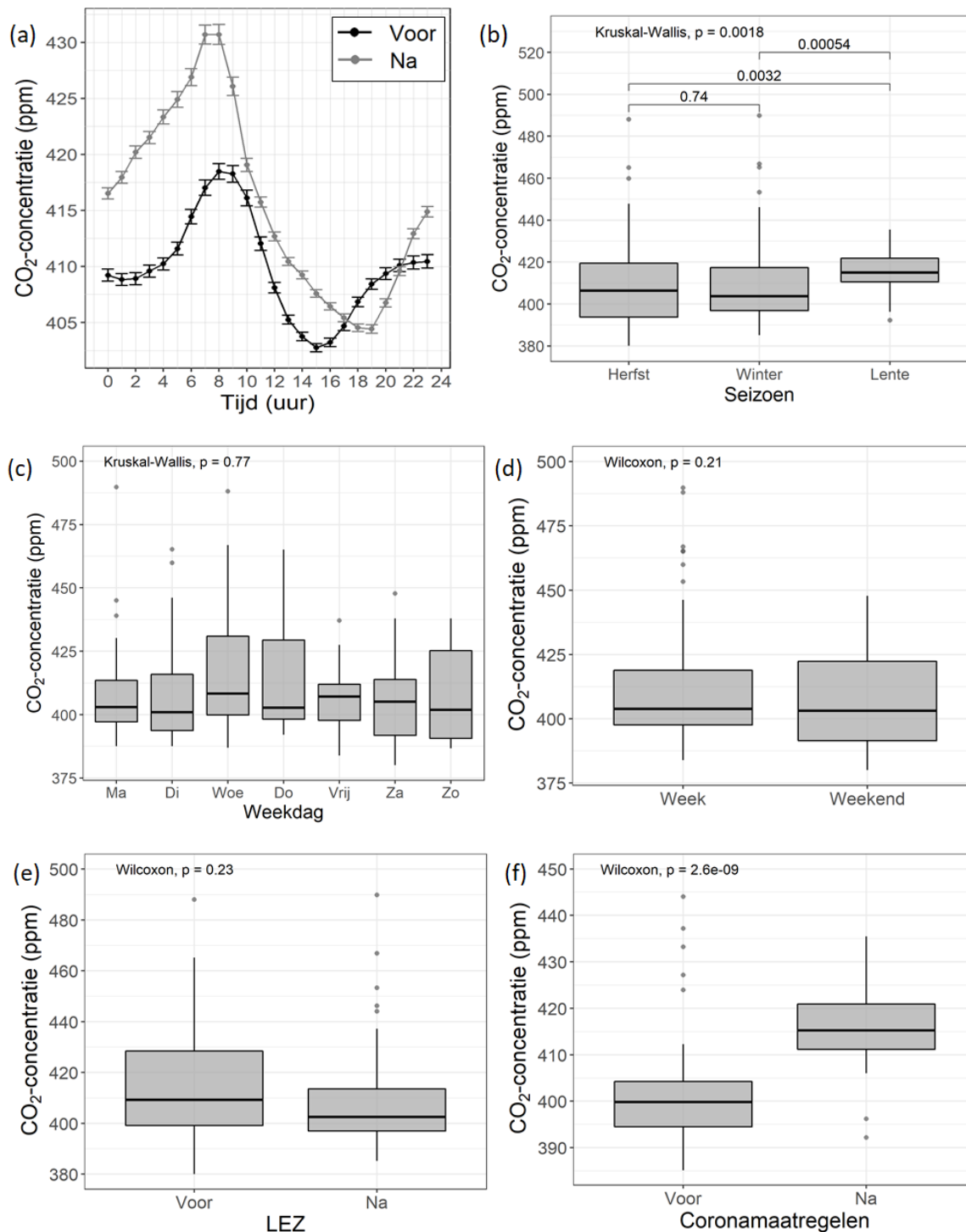
3.3 Invloed van meteorologische parameters

Om de invloed van de meteorologische parameters op de $[CO_2]$ te bepalen, werd de correlatie tussen de daggemiddelden van de verschillende parameters en de $[CO_2]$ -daggemiddelde voor de periode van 8 oktober 2019 tot en met 30 april bepaald. De resultaten worden samengevat in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Correlatie tussen $[CO_2]$ en relatieve luchtvochtigheid (RH), temperatuur (T), windsnelheid (v), windrichting (\vec{v}), luchtdruk (p), neerslag, en fotosynthetisch actieve straling (PAR) bepaald op basis van de daggemiddelden voor de periode van 8 oktober 2019 t.e.m. 30 april. Hierbij duidt + op een positieve correlatie, ++ een sterk positieve correlatie ($\rho > 0,7$), - een negatieve correlatie, -- een sterk negatieve correlatie ($\rho < -0,7$) en / op een niet-significante correlatie.

Variabele	RH	T	v	\vec{v}	p	neerslag	PAR
Correlatie	/	-	--	-	++	-	+

Een significante en sterk negatieve correlatie ($\rho = -0,73$) werd gevonden tussen $[CO_2]$ en windsnelheid. Luchtdruk blijkt sterk positief gecorreleerd ($\rho = 0,75$). Daarnaast werd ook voor temperatuur, windrichting en neerslag een negatieve correlatie gevonden (met ρ respectievelijk -0,33, -0,41, -0,59). Over de volledige meetperiode werd voor PAR een zwak positieve correlatie gevonden ($\rho = 0,18$). Wanneer enkel daggemiddelden afkomstig van voor de invoering van de coronamaatregelen in acht werden genomen, werd geen significante correlatie gevonden.



Figuur 3.2 (a) Het dagelijkse [CO₂]-patroon op basis van uurgemiddelden in Gent voor de invoering van de coronamaatregelen (zwarte cirkels, 8 oktober 2019 t.e.m. 8 maart 2020) en na de invoering (grijze cirkels, 18 maart t.e.m. 30 april). De horizontale balken geven de standaardfout weer. De [CO₂]-daggemiddelde voor (b) de verschillende seizoenen (8 oktober 2019 t.e.m. 30 april 2020), (c) de verschillende dagen van de week (8 oktober 2019 t.e.m. 8 maart 2020), (d) de werkweek en het weekend (8 oktober 2019 t.e.m. 8 maart 2020), (e) de periode voor (24 oktober t.e.m. 31 januari) en na (1 januari 2020 t.e.m. 8 maart) de invoering van de LEZ, en (f) de periode voor (25 januari t.e.m. 8 maart) en na (18 maart t.e.m. 30 april) de invoering van de coronamaatregelen met aanduiding van significantie.

Relatieve luchtvochtigheid toonde geen significante correlatie met de $[CO_2]$ over de meetperiode. Voor de aanvang van de coronamaatregelen kon wel een zwak positieve correlatie gevonden worden voor deze parameter ($\rho = 0,21$). Door de afwezigheid van een of zwak significant verband over de volledige periode, worden relatieve vochtigheid en PAR niet verder in rekening gebracht.

Figuur 3.3 toont de $[CO_2]$ in functie van de gecorreleerde meteorologische parameters. Een lineaire curve werd gefit aan de punten van enkele continue meteorologische parameters met als doel de algemene trend met de $[CO_2]$ te beschrijven. Dagen met een hoge gemiddelde $[CO_2]$ kunnen worden gelinkt met een gemiddelde lage temperatuur (a), hoge luchtdruk (b) en lage windsnelheid (c). Hierbij valt voornamelijk de sterke afhankelijkheid van de $[CO_2]$ met de windsnelheid op. De gemiddelde $[CO_2]$ neemt 2,75 ppm af bij toename van de windsnelheid met 1 km u^{-1} . Indien de windsnelheid wordt ingedeeld in intervallen volgens de schaal van Beaufort (Figuur 3.3 (d)), wordt een consequente significante daling van de $[CO_2]$ waargenomen bij alle intervallen tot het interval van 12 - 19 km u^{-1} , waarna de $[CO_2]$ constant blijft.

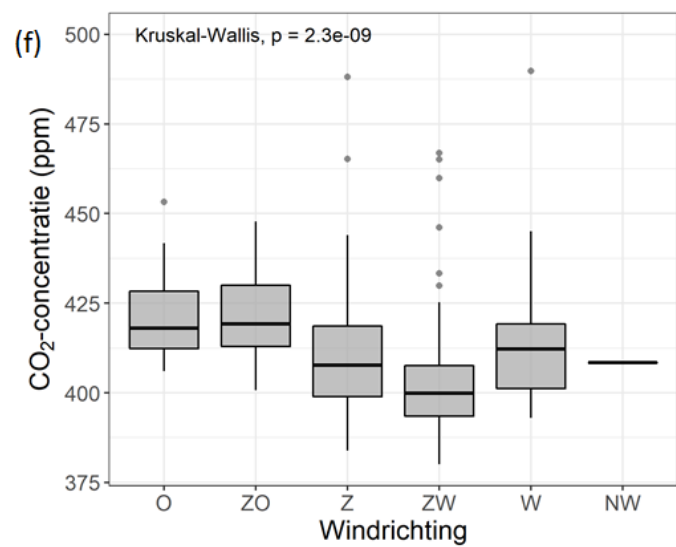
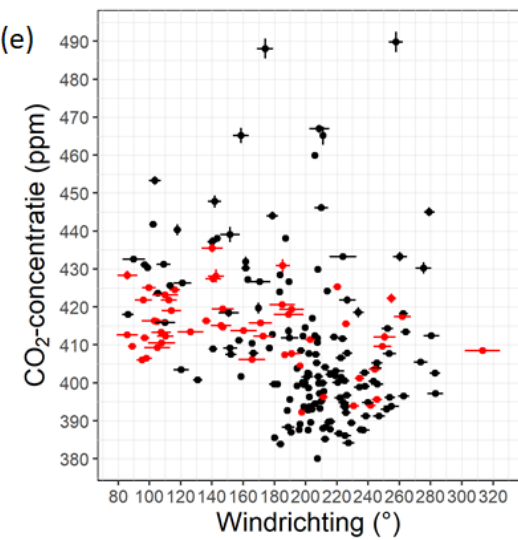
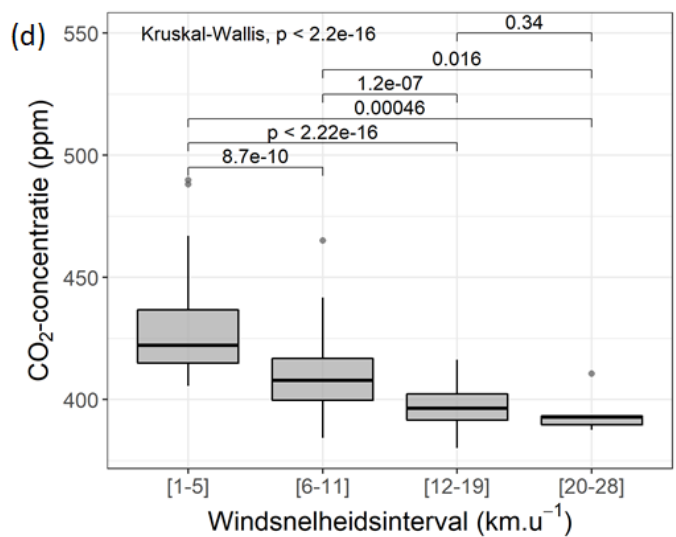
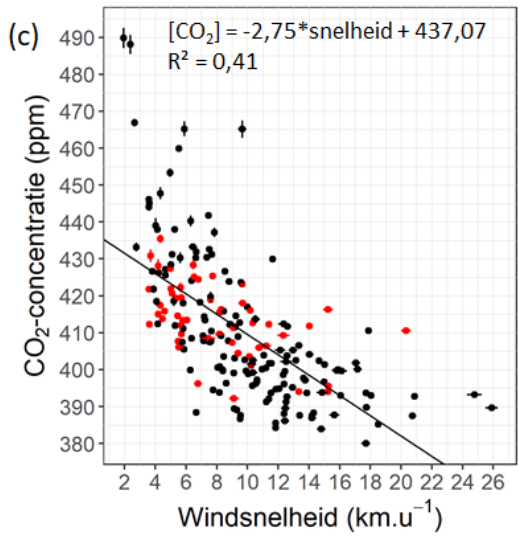
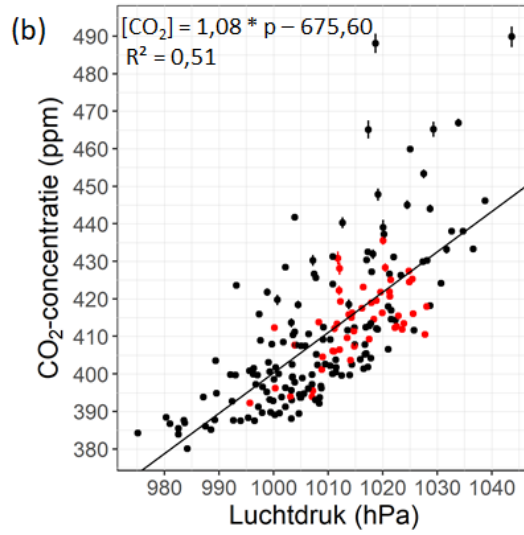
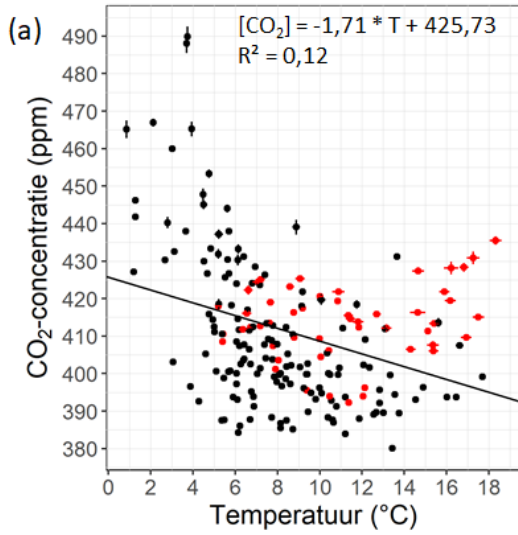
De $[CO_2]$ in functie van de windrichting uitgedrukt in graden (Figuur 3.3 (e)) en na onderverdeling in de acht windstreken (Figuur 3.3 (f)), toont significante verschillen tussen de windrichtingen met hoogste $[CO_2]$ bij oostelijke ($67,5^\circ - 112,5^\circ$) en zuidoostelijke ($112,5^\circ - 157,5^\circ$) wind en laagste $[CO_2]$ bij zuidwestenwind ($202,5^\circ - 247,5^\circ$). Het effect van neerslag wordt weergegeven in Figuur 3.3 (g - h). Grote $[CO_2]$ -variëaties worden opgemeten bij geen (0 mm) tot zeer lichte neerslag (0 - 3 mm) (Figuur 3.3 (g)). Een significantie daling van de $[CO_2]$ wordt waargenomen met toename van de neerslagintensiteit, met minimale $[CO_2]$ bij flinke buien (3 - 10 mm) en zware buien ($> 10 \text{ mm}$) (Figuur 3.3 (h)).

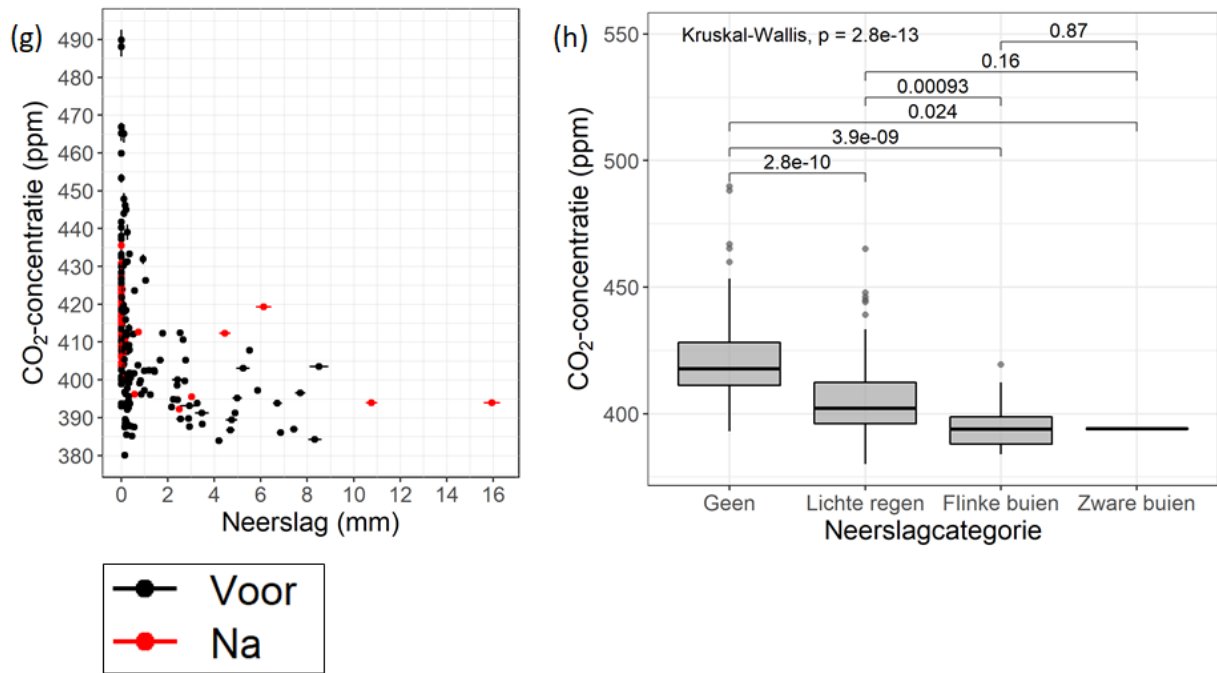
3.4 CO_2 -variëaties in Gent

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de minimale en maximale $[CO_2]$ opgemeten voor elke rit en toont de sterke variëatie in de $[CO_2]$ tussen de ritten. De minimale $[CO_2]$ gemeten over alle ritten heen is 395,2 ppm en werd gemeten op 26 oktober ter hoogte van de Rugbylaan, gelegen in de Blaarmeersen. De maximale gemeten $[CO_2]$ is 587,8 ppm en werd opgemeten op 3 december ter hoogte van Dok-Zuid, aan de rotonde aan Dampoort. Minimale $[CO_2]$ werd het vaakst opgemeten in de omgeving van de Blaarmeersen (Rugbylaan, Strandlaan of Zuiderlaan). Enkel op 16 oktober 2019 werd de minimale $[CO_2]$ opgemeten in de Hoogpoort, tijdens deze rit werd er niet door de Blaarmeersen gefietst. Maximale $[CO_2]$ werd het vaakst opgemeten op de R40 ter hoogte van Dok-Zuid. Op zowel 16 oktober, 19 november, als 3 december lag dit maximum aan de rotonde aan Dampoort. Per rit is er een groot verschil, variërend tussen 43,3 ppm en 94,2 ppm, tussen de opgemeten minimale en maximale $[CO_2]$.

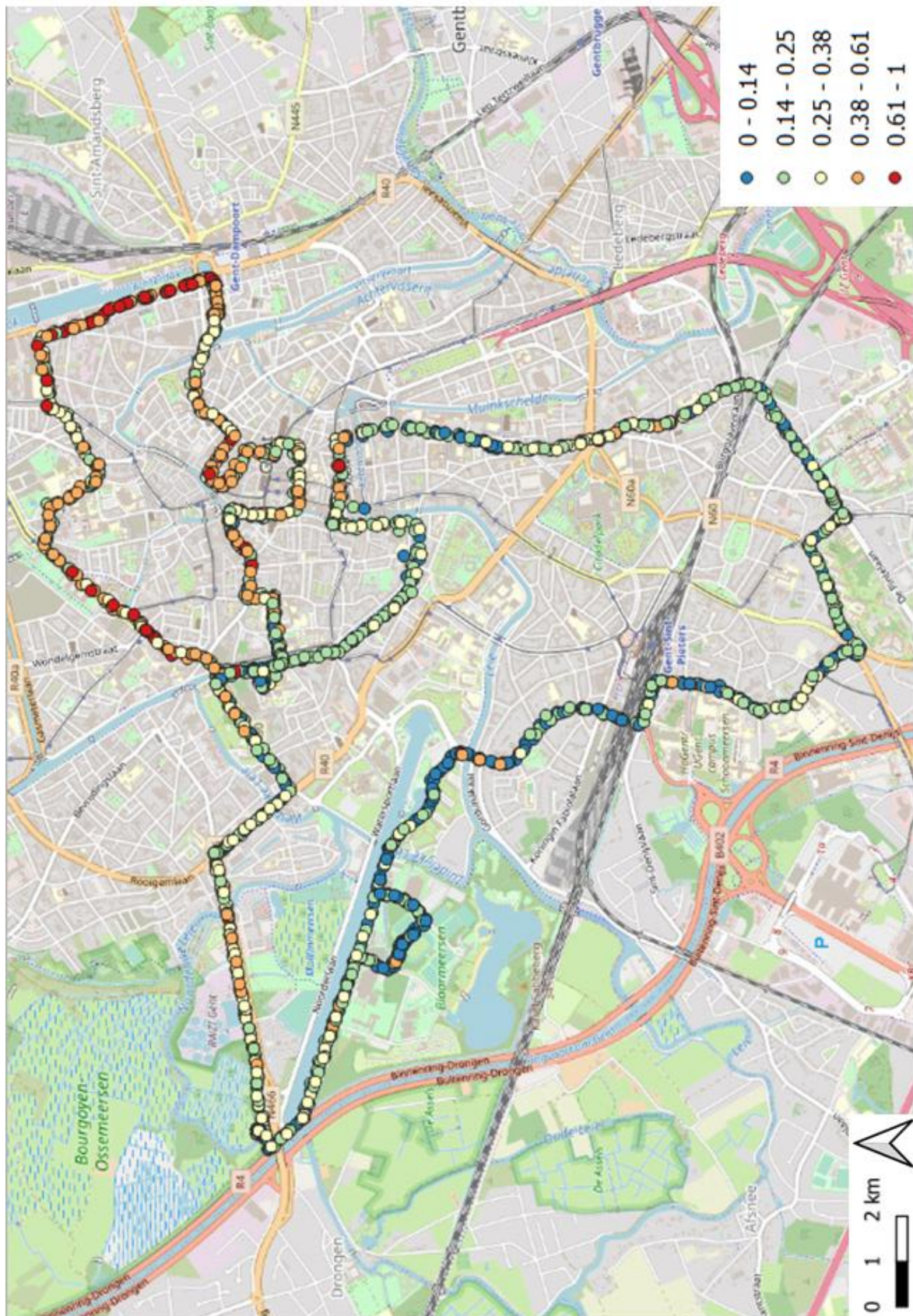
Tabel 3.2 Overzicht van de minimale en maximale gemeten $[CO_2]$ per rit.

Datum	Minimum	Locatie (straatnaam)	Maximum	Locatie (Straatnaam)
16/10/2019	398,0 ppm	Hoogpoort	480,2 ppm	Dok-Zuid
29/10/2019	418,2 ppm	Rugbylaan	512,4 ppm	Drongensesteenweg
19/11/2019	426,3 ppm	Zuiderlaan	506,2 ppm	Dok-Zuid
26/11/2019	395,2 ppm	Rugbylaan	464,3 ppm	Hoogpoort
3/12/2019	495,5 ppm	Strandlaan	587,8 ppm	Dok-Zuid
18/02/2020	406,0 ppm	Strandlaan	451,1 ppm	Dok-Zuid
3/03/2020	402,5 ppm	Strandlaan	445,8 ppm	Dok-Zuid





Figuur 3.3 De [CO₂]-daggemiddelde voor de periode van 8 oktober 2019 t.e.m. 30 april 2020 in functie van de daggemiddelde met standaard fout van (a) temperatuur, (b) luchtdruk, (c) windsnelheid, (e) windrichting en (g) neerslag. Indien mogelijk werd de regressievergelijking en R² toegevoegd, dagen voor (zwart) en na (rood) start van de coronamaatregelen (18 maart) worden gedifferentieerd. Indeling van de [CO₂]-daggemiddelde in categorieën met aanduiding van significantie verschillen voor (d) windsnelheid (schaal van Beaufort), (f) windrichting, en (h) neerslag (met 0 mm geen regen, < 3 mm lichte regen, 3 - 10 mm flinke buien, > 10 mm zware buien).



Figuur 3.4 Kaart met de resultaten van alle fietstochten (zeven ritjes tussen 16 oktober 2019 en 3 maart 2020). De $[CO_2]$ zijn per rit geschaald tussen 0 en 1, met 0 de laagste gemeten concentratie tijdens de rit en 1 de hoogste gemeten concentratie. Waarden dichterbij 0 duiden op lagere $[CO_2]$, waarden dichterbij 1 op hogere $[CO_2]$.

Door de sterke variatie van de $[CO_2]$ tussen de gefietste dagen onderling, werd de $[CO_2]$ per rit geschaald tussen 0 en 1, waarbij 0 de laagste gemeten en 1 de hoogste gemeten concentratie weergeeft. Hoe dichter het cijfer bij nul, hoe lager de $[CO_2]$. Het overkoepelende resultaat van de zeven fietstochten wordt gevisualiseerd in Figuur 3.4 en toont een merkbaar hogere $[CO_2]$ in de kernstad (binnen de R40) in vergelijking met de zone buiten de R40. De absoluut opgemeten $[CO_2]$ bevestigen de relatieve metingen. Over de zeven gefietste dagen bedroeg de $[CO_2]$ in de kernstad gemiddeld $436,14 \pm 0,04$ ppm, dit is $11,66$ ppm hoger dan de zone buiten de R40 ($424,48 \pm 0,03$ ppm) (Figuur 3.5).

Om een beter zicht te krijgen op de $[CO_2]$ op verschillende plaatsen in Gent, werden enkele belangrijke locaties of *points of interest* (POIs) uitgekozen (Figuur 3.6 (a)) die meer in detail zullen worden besproken.

De eerste POI is de Blaarmeersen (zone 1). In deze zone werd het vaakst de laagste $[CO_2]$ van de fietsrit opgemeten en kleurt daarom voornamelijk blauw ($0 - 0,14$ op relatieve schaal) in Figuur 3.4. Over de zeven fietsritten varieerde de absolute $[CO_2]$ op deze locatie tussen $395,2$ ppm en $504,3$ ppm met een gemiddelde van $427,4 \pm 0,5$ ppm (Figuur 3.6 (b)).

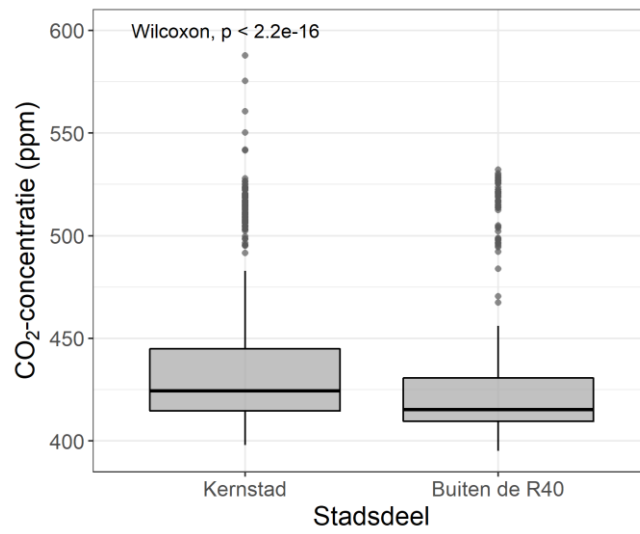
De zone waar de maximale $[CO_2]$ werd gemeten is de R40 ter hoogte van Dok-Zuid. Samen met Dok-Noord vormt dit daarom de tweede POI (zone 2). De $[CO_2]$ in deze zone varieert tussen $416,4$ ppm en $587,8$ ppm (Figuur 3.6 (c)) met een gemiddelde $[CO_2]$ van $459,0 \pm 0,6$ ppm. Een ander deel van de R40, ter hoogte van de Rooigemlaan, (zone 3, Figuur 3.6 (d)) kleurt echter geel en zelfs groen, wat een lagere $[CO_2]$ doet vermoeden. De $[CO_2]$ in zone 3 varieert tussen $405,8$ ppm en $522,8$ ppm en de gemiddelde $[CO_2]$ is $436,0 \pm 0,7$ ppm en is daarmee significant lager dan deze in zone 2 ($p = 8,379e-06$).

Een tweede opvallende zone met hogere relatieve $[CO_2]$ is de N430 ter hoogte van de Begijnhoflaan en Opgeestenaan (zone 4, Figuur 3.6 (e)). Deze kleurt bovendien ook een stuk roder in vergelijking met de Nieuwewandeling (zone 5, Figuur 3.6 (f)), die ook een deel is van de N430. De $[CO_2]$ in zone 4 varieert tussen $412,9$ ppm en $528,0$ ppm met een gemiddelde van $451,3 \pm 0,6$ ppm. In zone 5 is de $[CO_2]$ significant lager ($p = 0,001511$) met een gemiddelde van $437,4 \pm 0,5$ ppm (variatie tussen $404,1$ ppm en $520,2$ ppm).

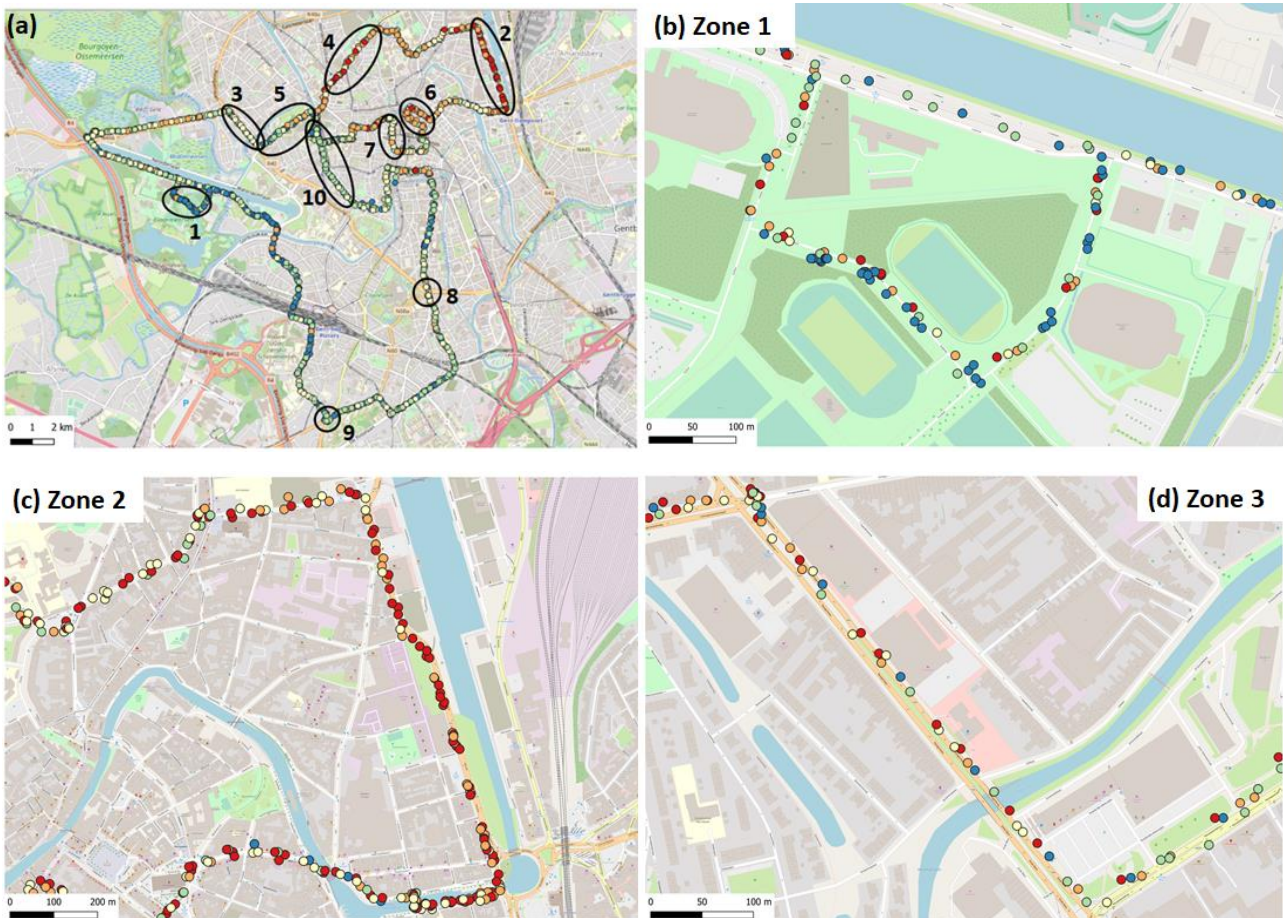
Ook binnen het stadscentrum worden, hoewel deels autovrij, lokaal hoge relatieve $[CO_2]$ opgemeten. Zone 6, Hoogpoort en Onderstraat (Figuur 3.6 (g)), en zone 7, Graslei en Predikherenlei (Figuur 3.6 (h)) werden onderscheiden. Uit Figuur 3.4 blijkt dat de relatieve $[CO_2]$ in zone 7 lager is dan deze in zone 6. Absolute $[CO_2]$ bevestigen dit met een gemiddelde van $444,3 \pm 0,6$ ppm in zone 6 en een significant lager gemiddelde ($p = 0,006139$) in zone 7 ($433,5 \pm 0,9$ ppm).

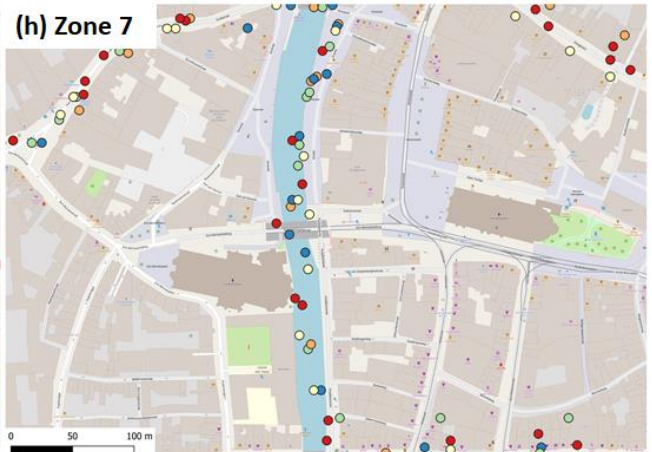
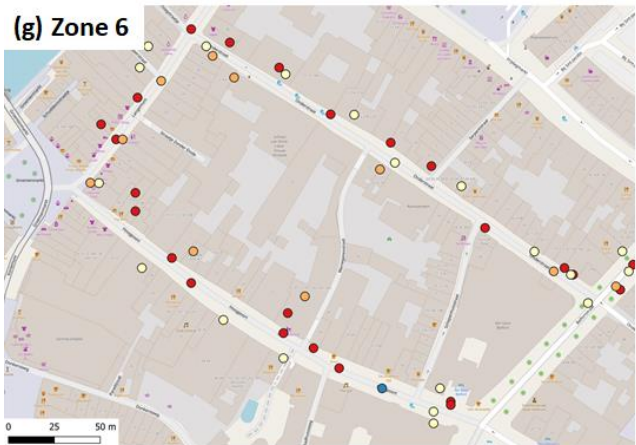
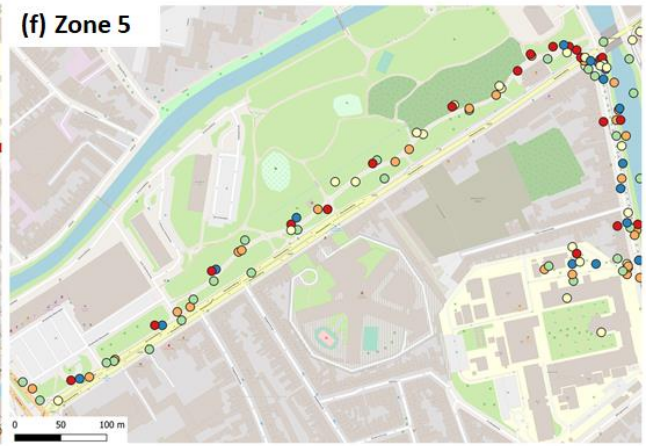
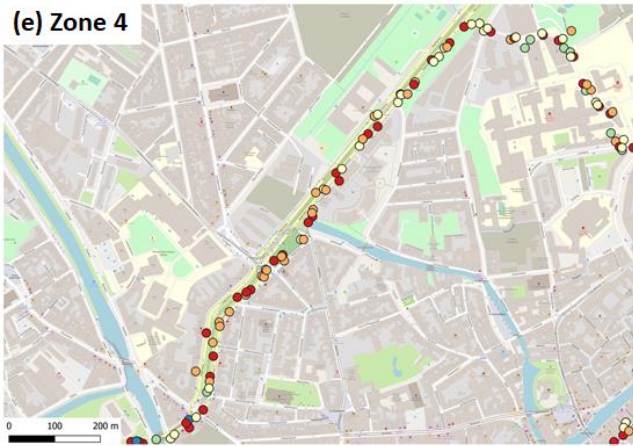
Een ander POI binnen de kernstad is de Coupure Links (zone 10, Figuur 3.6 (k)). Deze fietsstraat is gelegen langs het water en is een opvallende groene strook binnen de kernstad (Figuur 3.4). De gemiddelde $[CO_2]$ bedraagt hier $423,8 \pm 0,2$ ppm en ligt daarmee zelfs onder de gemiddelde $[CO_2]$ opgemeten aan de Blaarmeersen.

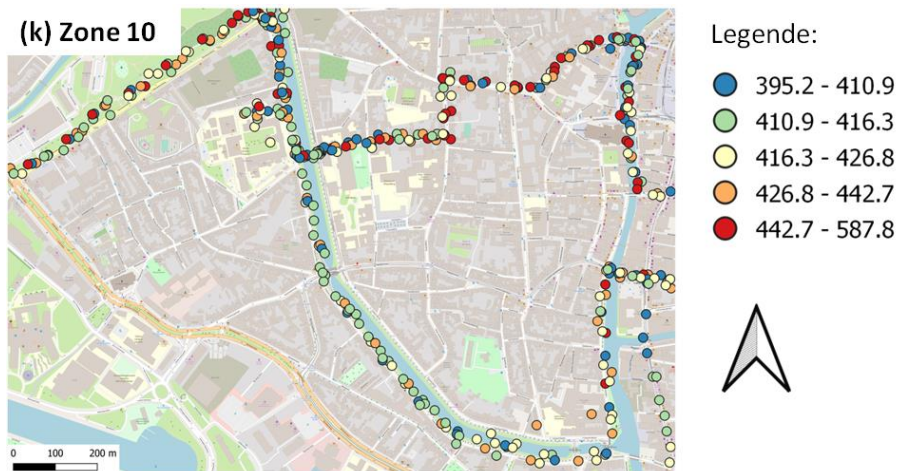
Om het effect van verkeerscirculatie na te gaan, worden de opgemeten $[CO_2]$ in de omgeving van een kruispunt (Citadellaan en de Overpoortstraat (zone 8, Figuur 3.6 (i))) en rondpunt (rotonde aan de Sterre (zone 9, Figuur 3.6 (j))) met elkaar vergeleken. Hoewel de verkeersintensiteit op beide punten vergelijkbaar is, tonen de relatieve waarden een lagere concentratie in de omgeving van de rotonde. Dit wordt bevestigd door de absolute metingen met een significant hogere $[CO_2]$ ($p = 0,003606$) in zone 8 in vergelijking met zone 9 (respectievelijk $426,8 \pm 0,9$ ppm en $416,1 \pm 1,0$ ppm).



Figuur 3.5 Vergelijking van de opgemeten [CO₂] in de kernstad en het gebied buiten de R40 tijdens de fietstochten (zeven ritjes tussen 16 oktober 2019 en 3 maart 2020) met aanduiding van significantie.







Figuur 3.6 (a) Lokalisatie van de verschillende *Points of Interest* (POIs) binnen de gefietste route en (b - k) detailkaarten van ieder POI met $[CO_2]$ weergegeven in ppm met (b) zone 1: Blaarmeersen, (c) zone 2: R40 ter hoogte van Dok-Noord en Dok-Zuid, (d) zone 3: R40 ter hoogte van de Rooigemlaan, (e) zone 4: N430 ter hoogte van de Begijnhoflaan en Opgeëistenlaan, (f) zone 5: N430 ter hoogte van Nieuwewandeling, (g) zone 6: Hoogpoort en Onderstraat, (h) zone 7: Predikherenlei en Graslei, (i) zone 8: kruispunt van Citadellaan met Overpoortstraat, (j) zone 9: rotonde aan de Sterre, en (k) zone 10: Coupure Links.

4. Discussie

4.1 Invloed van meteorologische parameters

Zoals blijkt uit Figuur 3.3 (a - d) kan hoge gemiddelde $[\text{CO}_2]$ gerelateerd worden aan gemiddelde lage temperatuur en windsnelheid en hoge luchtdruk. De negatieve relatie tussen $[\text{CO}_2]$ en temperatuur kan worden verklaard door het toenemend belang van de uitstoot van woningen, gemiddeld verantwoordelijk voor 22% van de CO_2 -uitstoot in Gent (Figuur 2.2), op koude dagen. Bij lage dagtemperatuur worden woningen meer verwarmd, met een hogere CO_2 -emissie tot gevolg. Daarnaast komen lage temperaturen voornamelijk voor in de winter, wanneer de biosfeer minder CO_2 opneemt (Rigby et al., 2008).

Situaties met hoge luchtdruk en lage windsnelheid leiden tot de vorming van een stabiele atmosfeer (Stull, 1988) waardoor pollutanten accumuleren en $[\text{CO}_2]$ toeneemt (Rigby et al., 2008). Hoge windsnelheden zullen zorgen voor een verdunning van de lucht waardoor de $[\text{CO}_2]$ daalt (García et al., 2010). Figuur 3.3 (d) geeft aan dat de $[\text{CO}_2]$ daalt met de windsnelheid tot het interval van 12 - 19 km u^{-1} waarna de $[\text{CO}_2]$ niet verder wordt beïnvloed. Het reducerende effect van windsnelheid op de $[\text{CO}_2]$ werd reeds eerder waargenomen (Tabel 1.2), al verschilt de dalende trend tussen de onderzoeken. Verschillende onderzoeken rapporteren een sterke variatie in $[\text{CO}_2]$ bij windsnelheden tot 7,2 km u^{-1} (Rice & Bostrom, 2011) en 9 km u^{-1} (García et al., 2012), terwijl hogere windsnelheden geassocieerd worden met constante, lage $[\text{CO}_2]$. Gao et al. (2018) toonden hoge $[\text{CO}_2]$ wanneer de windsnelheid lager is dan 7,2 km u^{-1} , hogere windsnelheden zorgden voor een lineaire daling.

Naast de windsnelheid blijkt ook de windrichting een effect uit te oefenen op de $[\text{CO}_2]$ in stad Gent (Figuur 3.3 (f)). Hogere $[\text{CO}_2]$ komt voor bij oostelijke en zuidoostelijke wind, lagere $[\text{CO}_2]$ bij zuidwestenwind. Wind uit zuidwestelijke richting ten opzichte van het weerstation wordt aangevoerd van gebieden buiten de R40. In deze richting liggen ook de Blaarmeersen (Figuur 2.3), waar steeds de laagste $[\text{CO}_2]$ werd opgemeten tijdens de fietstochten (Figuur 3.4). Wind uit oostelijke en zuidoostelijke richting voert lucht aan afkomstig uit de kernstad. De verhoogde opgemeten $[\text{CO}_2]$ door het weerstation kan daarom worden gelinkt met de hogere $[\text{CO}_2]$ opgemeten in dit gebied (Figuur 3.4 en Figuur 3.5). Deze resultaten zijn in overeenstemming met voorgaand onderzoek dat aantoonde dat wind aangevoerd uit gebieden met hogere of lagere $[\text{CO}_2]$ de lokale $[\text{CO}_2]$ kan beïnvloeden (Tabel 1.2) (García et al., 2008; Idso et al., 2001; Nasrallah et al., 2003). Op iets grotere schaal wordt oostelijke wind aangevoerd van over het continent, in vergelijking met zuidwestelijke wind aangevoerd van de Atlantische Oceaan. In onderzoek naar luchtvervuiling door fijn stof werd daarom reeds vastgesteld dat oostelijke wind vaak veel meer vervuild is in vergelijking met wind uit zuidwestelijke richting (Irceline, z.d.).

Figuur 3.3 (g - h) toont dat de $[\text{CO}_2]$ daalt bij toename van de neerslagintensiteit. CO_2 lost op in water en dus ook in regendruppels waar het HCO_3^- vormt (Pruppacher & Klett, 2010). Ook Mahesh et al. (2014) rapporteerde lagere $[\text{CO}_2]$ als gevolg van regenbuien door het binden van atmosferisch CO_2 in waterdruppels.

4.2 Temporele variaties

4.2.1 Dagelijkse variatie

Zoals weergegeven in Figuur 3.2 (a) volgt de $[\text{CO}_2]$ een dagelijks patroon waarbij maximale waarden worden opgemeten in de ochtend en minimale waarden in de namiddag. Het bekomen patroon komt

overeen met bevindingen uit ander onderzoek (Gao et al., 2018; Idso et al., 2002; Rice & Bostrom, 2011). Tijdens normale (voor corona) omstandigheden valt het maximum in de ochtend samen met de ochtendspits (7 uur – 9 uur), ook de stijging van de $[CO_2]$ in de namiddag komt overeen met het toenemend verkeer tijdens de avondspits (16 uur – 18 uur). Daarnaast kan de hoge $[CO_2]$ in de vroege ochtend en de daling na 8 uur verklaard worden door de aanwezigheid van een stabiele atmosfeer tijdens de nacht en vroege ochtend en de afbraak van deze inversielaag door convectieve menging onder invloed van de toenemende zonne-energie (Figuur 1.11). Door de toenemende onstabiele condities na zonsopgang, neemt de luchtvermenging toe en daalt de $[CO_2]$ (Idso et al., 1998, 2001; Nasrallah et al., 2003). Een derde factor die een invloed heeft op dit dagelijks patroon is biologische activiteit, meer bepaald fotosynthese en respiratie. Overdag nemen planten CO_2 op voor de vorming van suikers, waardoor de atmosferische $[CO_2]$ daalt doorheen de dag. Bij afwezigheid van zonlicht doen planten enkel aan respiratie en zijn ze een bron van CO_2 met toenemende $[CO_2]$ tot gevolg (Rice & Bostrom, 2011).

Na de invoering van de coronamaatregelen werd een verschuiving waargenomen van het dagelijkse $[CO_2]$ -patroon (Figuur 3.2 (a)). De maximale gemeten $[CO_2]$ werd vroeger opgemeten (7 uur in vergelijking met 8 uur) en het minimum later (19 uur in plaats van 15 uur). Een mogelijke verklaring voor het vervroegde $[CO_2]$ maximum in de ochtend is dat de zonsopkomst in de periode na invoering van de coronamaatregelen vroeger valt (tussen 06:18 en 07:27) dan voor de invoering (tussen 07:12 en 08:45, (Koninklijke Sterrenwacht van België, z.d.)). Dit betekent dat de inversielaag vroeger zal afgebroken worden en de daling in $[CO_2]$ zich vroeger inzet. Dit wordt bevestigd door onderzoek van Rigby et al. (2008) waar een latere ochtenddaling in $[CO_2]$ werd waargenomen tijdens de winter als gevolg van de latere zonsopkomst. Het verminderde verkeer en de afwezigheid van een echte avondspits in de periode na invoering van de coronamaatregelen (Vlaams Verkeerscentrum, 2020) kan ervoor zorgen dat de $[CO_2]$ pas later op de avond opnieuw stijgt.

Voor de invoering van de coronamaatregelen varieert de $[CO_2]$ gemiddeld 15,8 ppm doorheen de dag. Na de invoering is dit hoger met een gemiddelde van 26,3 ppm. Beide waarden zijn overeenkomstig aan de eerder gerapporteerde waarden voor andere steden. De gemiddelde dagelijkse amplitude is 15,2 ppm in Nanjing (China) (Gao et al., 2018), 30 ppm in Londen (Verenigd Koninkrijk) (Rigby et al., 2008) en 20 – 30 ppm in Portland (Oregon, VSA) (Rice & Bostrom, 2011). Ander onderzoek rapporteert een grotere dagelijkse amplitude, zoals 61 ppm in Bazel (Zwitserland) (Vogt et al., 2006). In Londen werd een grotere amplitude waargenomen in de zomer (26,3 ppm) in vergelijking met de winter (10,2 ppm) ten gevolge van een hogere biologische activiteit (fotosynthese en respiratie) in de zomerperiode (Hernández-Paniagua et al., 2015). Gezien de periode na de invoering van de coronamaatregelen grotendeels gesitueerd is in de lente, kan de waargenomen hogere $[CO_2]$ -variatie verklaard worden door hogere biologische activiteit tijdens deze periode.

4.2.2 Seizoensgebonden variatie

In steden wordt de laagste $[CO_2]$ meestal in de zomer opgemeten en de hoogste in de winter (Gao et al., 2018; García et al., 2008; Gratani & Varone, 2005; Hernández-Paniagua et al., 2015; Idso et al., 2002), voornamelijk ten gevolge van de biologische activiteit in de zomer (García et al., 2008). Aangezien er geen metingen werden uitgevoerd in de zomer kunnen hierover echter geen conclusies worden getrokken voor stad Gent. Tegen de verwachting in, door de verhoging van de biologische activiteit en de vermindering van verkeer na invoering van de coronamaatregelen, werden de hoogste $[CO_2]$ in Gent opgemeten in de lente (Figuur 3.2 (b)). Een verklaring hiervoor kan worden teruggevonden bij de invloed van de meteorologische parameters. In de lente werd een hogere luchtdruk opgemeten (gemiddeld $1015,7 \pm 0,2$ hPa lente vs $1010,0 \pm 0,1$ hPa winter), was er minder

neerslag ($0,35 \pm 0,03$ mm lente vs $1,50 \pm 0,03$ mm winter) en was de gemiddelde windsnelheid lager ($7,50 \pm 0,09$ km u⁻¹ lente vs $10,50 \pm 0,04$ km u⁻¹ winter). Daarnaast was de wind voornamelijk afkomstig uit oostelijke richting, terwijl dit tijdens de winter overheersend zuidwestelijk was.

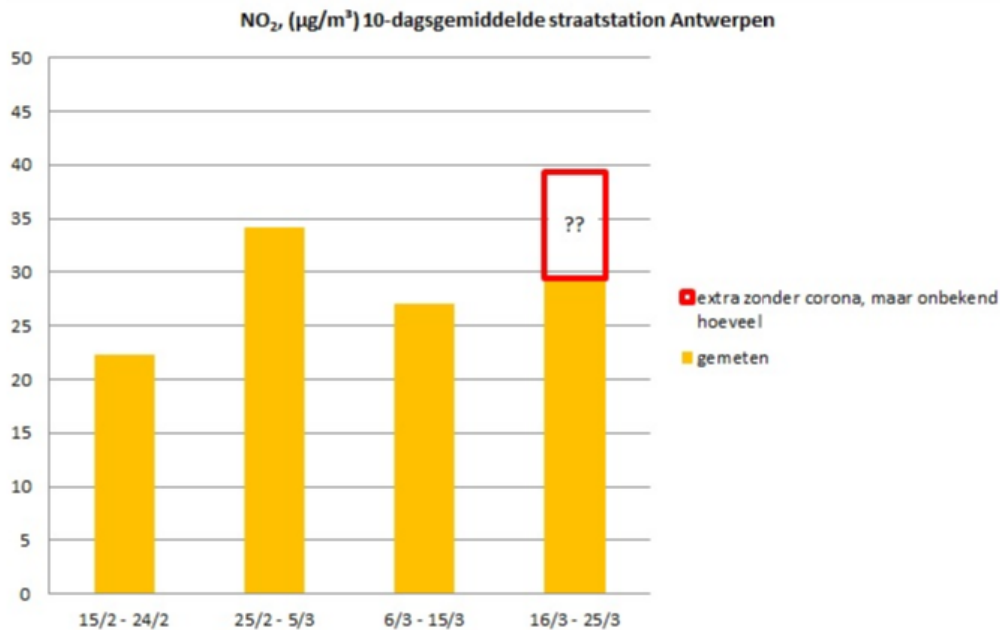
4.2.3 Wekelijkse variatie

De afwezigheid van woon-werkverkeer in het weekend kan leiden tot een vermindering van de [CO₂]. Verschillen in [CO₂] tussen week en weekend kunnen variëren tussen 28 ppm zoals opgemeten in Rome (Gratani & Varone, 2005) en 0,55 ppm in Koeweit (Nasrallah et al., 2003). In Gent is de [CO₂] gemiddeld 5 ppm lager in het weekend dan tijdens de werkweek (Figuur 3.2 (d)). Hoewel niet significant, werd een verschil tussen week en weekend van gelijkaardige grootteorde opgemeten in Portland (tot 4 ppm) (Rice & Bostrom, 2011), Boston (5,1 ppm) (Briber et al., 2013), Chennai (tot 5 ppm) (Kumar & Nagendra, 2015) en Londen (2,3 ppm) (Hernández-Paniagua et al., 2015).

4.2.4 Invloed van beleidsmaatregelen

Na de invoering van de LEZ was de gemiddelde [CO₂], hoewel niet significant, gemiddeld 4,6 ppm lager dan voor de invoering (Figuur 3.2 (e)). De LEZ werd ingevoerd om de luchtkwaliteit in de kernstad te verbeteren. Hierbij wordt de nadruk gelegd op het beperken van de uitstoot van schadelijke stoffen waaronder fijnstof en NO_x (Stad Gent, 2020b) en wordt voornamelijk een beperking opgelegd voor dieselwagens. Hoewel dieselwagens vervuilerder zijn, hebben deze doorgaans echter een lagere CO₂-uitstoot in vergelijking met vergelijkbare benzinewagens (VMM, 2019a). Gezien voor niet-dieselwagens enkel de oudste modellen worden geweerd in de LEZ, wordt er geen impact verwacht op de [CO₂] bij gelijke verkeersintensiteit. Nieuwe wagens moeten echter voldoen aan steeds strengere CO₂-emissienormen opgelegd door de Europese Unie (VMM, 2019a). Hierdoor kan het verstrengen van de toelatingsvoorwaarden in de toekomst, door het weren van meer oudere wagens, mogelijks wel een positieve impact hebben op de [CO₂].

De gemiddelde [CO₂] na de invoering van de coronamaatregelen is significant hoger dan ervoor (Figuur 3.2 (f)), ondanks het verminderde verkeer. Aangezien de periode na invoering voornamelijk in de lente ligt, spelen dezelfde meteorologische parameters zoals aangehaald in 4.2.2 een rol. Na invoering van de maatregelen was de luchtdruk hoger (rode cirkels, Figuur 3.3 (b)) en viel er weinig neerslag (rode cirkels, Figuur 3.3 (g)). De wind kwam voor de invoering voornamelijk uit zuidwestelijke richting, wat geassocieerd wordt met lagere [CO₂], terwijl dit na de invoering voornamelijk oostelijke wind was (rode cirkels, Figuur 3.3 (e)). Door de aanmoediging van thuiswerk en daling van de werkgelegenheid, zijn meer mensen aanwezig in hun woning doorheen de dag, waardoor een toename van de CO₂-uitstoot door verwarming kan worden verwacht (VMM, 2020a). Ook andere luchtkwaliteitsparameters waren niet beter na invoering van de coronamaatregelen: op 9 april werd zelfs de informatiedrempel voor fijn stof overschreden (PM₁₀ concentraties hoger dan 50 µg m⁻³) (VMM, 2020b). Dit kan worden verklaard door hevige wind en regen de laatste weken voor de invoering van de coronamaatregelen, wat de luchtkwaliteit ten goede kwam. Deze resultaten tonen aan dat meteorologische parameters een grote invloed uitoefenen op de [CO₂] en algemene luchtkwaliteit en daardoor essentieel zijn bij het interpreteren van de resultaten. Dit bemoeilijkt de vergelijking van [CO₂] voor en na het nemen van de coronamaatregelen aangezien het moeilijk te bepalen is wat de [CO₂] was geweest zonder de genomen maatregelen (zoals weergegeven in Figuur 4.1 voor NO₂ (VMM, 2020a)). Door de vermindering van verkeer (Vlaams Verkeerscentrum, 2020) en economische activiteiten (FOD Economie, 2020) kan worden verwacht dat de genomen maatregelen de [CO₂] in stad Gent hebben gereduceerd in de periode van 18 maart tot en met 30 april. Echter, door de afwezigheid van [CO₂]-metingen in eenzelfde periode tijdens andere jaren kan er niet vergeleken worden met normale omstandigheden.



Figuur 4.1 De daggemiddelde NO₂-concentraties in blokken van 10 dagen tijdens de periode van de coronamaatregelen (rechterblok: situatie van 16 maart tot 25 maart) en de 30 dagen voor de afkondiging van de maatregelen (VMM, 2020a).

4.3 CO₂-variaties in Gent

Voor alle data verzameld tijdens eenzelfde fietstocht worden meteorologische parameters gelijk verondersteld. Variaties in [CO₂] zijn dus het gevolg van variaties in de stad zoals bebouwing, vegetatie en verkeer. Aangezien geen bruikbare verkeersmetingen beschikbaar zijn voor het onderzoeksgebied, kunnen verschillen in [CO₂] niet rechtstreeks worden gelinkt aan verkeersintensiteit (aantal auto's per tijdseenheid).

4.3.1 Verschil kernstad en buiten de R40

Figuur 3.5 geeft aan dat de [CO₂] hoger is in de kernstad dan in het gebied buiten de R40. Een verklaring hiervoor kan worden gevonden bij de opgelegde snelheidslimieten die strenger zijn in de kernstad dan buiten de R40. Voor het grootste deel van de kernstad geldt een snelheidslimiet van 30 km u⁻¹. Onderzoek toont aan dat lage snelheden tot meer brandstofverbruik en hogere CO₂-emissies leiden (Fontaras, 2017). Daarnaast is de binnenstad dichter bebouwd en komen er meer smalle straten voor met hoge bebouwing, zogenaamde *street canyons*. In deze straten worden pollutanten minder goed verdund waardoor hogere concentraties opstapelen (VMM, z.d.). De aanwezigheid van *street canyons* en hun rol bij de verhoging van atmosferische NO₂-concentraties werd eerder al aangetoond in stad Gent (Stad Gent, 2018).

4.3.2 Invloed van stedelijk groen (zone 1, 4 en 5)

De gefietste straten in zone 1 (Figuur 3.6 (b)) zijn omringd door vegetatie en worden gekenmerkt door weinig verkeer. Deze waarneming bevestigt het belang van stadsvegetatie door het opnemen van CO₂ (fotosynthese) en het verlagen van de [CO₂] (Gratani & Varone, 2005). Toch werden in deze zone op relatieve schaal niet enkel blauwe en groene punten (< 0,25), maar ook enkele gele (0,25 - 0,38) en oranje (0,38 - 0,61) punten waargenomen (Figuur 3.4). Deze punten met een relatief hoge

[CO₂] zijn afkomstig van de fietsrit op 3 maart. Op deze dag waren er werken ter hoogte van de Duiklaan waardoor er vrachtverkeer was binnen zone 1. Dit was in sterk contrast met andere ritten, waarbij amper verkeer werd opgemerkt in deze zone. Dat de aanwezigheid van dit vrachtverkeer zichtbaar is in de relatieve [CO₂]-metingen, toont het belang van verkeer op de lokale [CO₂].

Ondanks de aanwezigheid van stadsvegetatie is de gemiddelde [CO₂] in zone 1 niet het laagst van de onderzochte POIs. De gemiddelde [CO₂] is lager in zone 8, 9 en 10. Hoewel de gemiddelde [CO₂] in zone 10 lager is, is de [CO₂]-variatie in deze zone groter (zone 1: 395,2 ppm - 504,3 ppm en zone 10: 401,7 ppm - 510,0 ppm). De oorzaak voor de lagere gemiddelde [CO₂] voor zone 10 kan waarschijnlijk worden teruggevonden door het lage aantal metingen in zone 10 op 3 december in vergelijking met het aantal meetpunten in zone 1 en ten opzichte van andere fietstochten. De algemene [CO₂] tijdens de rit op 3 december was heel hoog (tussen 495,5 ppm en 587,8 ppm) waardoor het beperkt aantal meetpunten voor zone 10 mogelijk een vertekend beeld geeft van het totale gemiddelde. In zone 8 en 9 zijn er zoals zichtbaar in Figuur 3.6 (i – j) minder meetpunten dan andere zones. Bovendien zijn er voor beide zones geen meetpunten beschikbaar op 3 december, wat ook een vertekend beeld kan veroorzaken.

Zone 4 is een zone met hoge [CO₂] en kan, als deel van een gewestweg, worden beschouwd als een drukke weg. Zone 5 maakt deel uit van dezelfde gewestweg, toch zijn de opgemeten [CO₂] hier lager (Figuur 3.6 (e - f)). In beide zones zijn enkele stoplichten aanwezig waardoor de CO₂-uitstoot wordt versterkt door het herhaaldelijk starten en stoppen van voertuigen en het stationair draaien van de motor bij stilstand (Barth & Boriboonsomsin, 2008; Fonseca et al., 2011). Daarnaast geldt in beide zones eenzelfde snelheidsbeperking, en kan worden verondersteld dat dit de uitstoot van de wagens niet beïnvloedt. Het grootste verschil tussen beide zones is dat in zone 5 het Groenevallenpark ligt. Onderzoek toonde lagere [CO₂] in stadsparken door de opname van CO₂ overdag door de vegetatie (Gratani & Varone, 2005). Net zoals in zone 1 bevestigen deze resultaten het belang van stedelijk groen en geven ze bovendien aan dat deze reducerende effecten ook zichtbaar zijn op korte afstand van een drukke weg.

4.3.3 Invloed van verkeersdoorstroming (zone 2, 3, 8 en 9)

Hoogste [CO₂] werd opgemeten in zone 2 (Figuur 3.6 (c)). Ondanks de afwezigheid van verkeerscijfers om de verkeersintensiteit te kwantificeren, bevindt de R40 zich in zone 2 waardoor kan worden aangenomen dat deze zone gekenmerkt wordt door een hoge verkeersintensiteit. Een hogere verkeersintensiteit zorgt voor hogere [CO₂] (Gratani & Varone, 2005). Daarnaast is deze zone filegevoelig en zijn er verkeerslichten ter hoogte van de rotonde aan Dampoort. Files zorgen voor het herhaaldelijk starten en stoppen van voertuigen en resulteren in hogere CO₂-emissies (Barth & Boriboonsomsin, 2008). Ook het stationair draaien van de motor bij stilstand, zoals in het geval van files en bij verkeerslichten, zorgt voor een extra emissie indien de wagen niet over een start-stopstelsel beschikt waarbij de motor automatisch afslaat bij stilstand (Fonseca et al., 2011).

Hoewel ook zone 3 deel uitmaakt van de R40, liggen de opgemeten [CO₂] hier lager dan in zone 2 (Figuur 3.6 (d)). De afwezigheid van verkeerscijfers maakt het onmogelijk verkeersintensiteit te vergelijken, maar ook zone 3 kan worden beschouwd als een belangrijke verkeersas. Wellicht zijn de opgemeten [CO₂] in zone 3 lager door een betere verkeersdoorstroming in vergelijking met zone 2. Zone 3 bestaat immers over de volledige lengte uit twee rijstroken per rijrichting, terwijl in zone 2 de weg deels bestaat uit één rijstrook per rijrichting en deels uit twee rijstroken per rijrichting.

De [CO₂] in zone 8, een kruispunt met verkeerslichten, is hoger dan in zone 9, een rotonde (Figuur 3.6 (i - j)). De emissie op kruispunten met verkeerslichten is doorgaans hoger in vergelijking met

rotondes (Gastaldi et al., 2014; Mandavilli et al., 2008). Het vertragen en versnellen en het stationair draaien van de motor bij stilstand zorgt voor hogere emissies. Hoe langer de voertuigen stilstaan, hoe hoger het brandstofgebruik en de daarmee gepaard gaande voertuigemissies. Bij rotondes is er een betere doorstroming van verkeer en staan auto's minder lang stil (Mandavilli et al., 2008).

4.3.4 Invloed van stedelijke opbouw (zone 6, 7 en 10)

Hoewel zone 6 en 7 zich in autovrij gebied bevinden, worden in beide zones hoge $[CO_2]$ opgemeten (Figuur 3.6 (g - h)). Het is echter belangrijk op te merken dat een autovrije zone niet betekent dat auto's geheel afwezig zijn in deze zones: met een vergunning is het wel mogelijk in dit gebied te rijden (Stad Gent, z.d.). Ondanks dat zowel zone 6 als 7 in een vergelijkbaar autovrij gebied zijn gelegen en dit op beperkte afstand van elkaar, is de opgemeten $[CO_2]$ in zone 7 lager dan deze in zone 6. Dit schuift het vermoeden naar voor dat de stedelijke opbouw, net zoals bij NO_2 (Stad Gent, 2018) en bij temperatuur (Goward, 1981), een belangrijke rol speelt bij de lokale $[CO_2]$. De smalle straten met hoge bebouwing of *street canyons* zoals aanwezig in zone 6 maken het moeilijker voor pollutanten om te verdunnen waardoor hogere concentraties voorkomen (VMM, z.d.). Zone 7 daarentegen ligt langs het water met slechts langs een enkele kant bebouwing, waardoor er meer verdunning mogelijk is met lagere $[CO_2]$ tot gevolg.

Zone 10 is een fietsstraat, auto's mogen er niet sneller rijden dan 30 km u^{-1} en geen fietsers inhalen. Daarnaast is er in deze straat eenrichtingsverkeer voor wagens. Hoewel de strikte snelheidsrestrictie een hoge CO_2 -emissie van de aanwezige wagens doet vermoeden (Fontaras et al. (2017)), duiden de metingen echter op een relatief lage $[CO_2]$ in vergelijking met andere zones in de kernstad (Figuur 3.4). Vermoedelijk speelt in deze zone ook de stedelijke opbouw een rol. Deze straat ligt langs het water met maar aan één kant bebouwing waardoor verdunning van $[CO_2]$ mogelijk is. Bovendien staat een bomenrij langs het water, die eventueel ook een invloed kan uitoefenen door de opname van CO_2 doorheen de dag en het verlagen van de $[CO_2]$ in de omgeving (Gratani & Varone, 2005).

5. Conclusie

In dit onderzoek werd de invloed van meteorologische parameters, temporele variaties en locatie op de $[CO_2]$ in stad Gent bepaald. Om een idee te krijgen van de algemene $[CO_2]$ in de stad werd in de periode van 8 oktober 2019 tot en met 30 april 2020 de $[CO_2]$ opgemeten in een stationair meetstation. Hierbij werd in de eerste plaats het belang van meteorologische parameters duidelijk. In overeenstemming met voorgaande studies konden hoge $[CO_2]$ worden gelinkt met een lage windsnelheid en hoge luchtdruk (Rigby et al., 2008) als gevolg van een stabiele atmosfeer. Ook lage temperaturen, door het meer verwarmen van woningen, en lange droge periodes, door reactie van CO_2 met H_2O , hadden een verhoging van de $[CO_2]$ in de stad tot gevolg. Tot slot bleek ook de windrichting een essentiële rol te spelen, waarbij wind uit oostelijke en zuidoostelijke richting voor een verhoging en wind uit zuidwestelijke richting voor een verlaging van de $[CO_2]$ zorgde.

Deze meteorologische parameters zijn belangrijk bij het verklaren van temporele variaties. Zo is de $[CO_2]$ hoger na het invoeren van de coronamaatregelen, ondanks de vermindering van verkeer. Dit ten gevolge van ongunstige meteorologische omstandigheden. Het is echter moeilijk om de invloed van het verminderde verkeer te bepalen door het gebrek aan $[CO_2]$ -metingen in eenzelfde periode van het jaar onder normale omstandigheden. De invoering van de LEZ in Gent heeft geen significant effect op de $[CO_2]$. Dit komt doordat de maatregelen gericht zijn op het verminderen van uitstoot van schadelijke pollutanten zoals fijn stof en NO_x . Van de huidige maatregelen wordt bijgevolg niet verwacht dat deze zorgen voor een vermindering in CO_2 -uitstoot.

Ook de temporele variatie op korte termijn, d.i. de dagelijkse variatie in $[CO_2]$ waarbij hoogste concentratie wordt opgemeten in de ochtend en laagste in de namiddag, wordt voor een belangrijk deel bepaald door meteorologische parameters. Naast de invloed van atmosferische stabiliteit speelt ook het verkeer in de ochtend- en avondspits en biologische activiteit een belangrijke rol.

De variatie van de $[CO_2]$ in stad Gent werd bepaald met een mobiel meetstation geïnstalleerd op een fiets. Op eenzelfde dag werden grote variaties (tot 94,2 ppm) waargenomen ten gevolge van invloed uitgeoefend door het verkeer, stedelijke opbouw en vegetatie. Toenemende verkeersintensiteit zorgt voor een hogere CO_2 -uitstoot. Daarnaast zorgen ook het vertragen, versnellen en stilstaan met draaiende motor (e.g. bij filevorming en verkeerslichten) voor meer brandstofverbruik en hogere emissies van CO_2 . Ook strenge snelheidsrestricties zorgen voor een hoger brandstofverbruik en hogere CO_2 -emissie. Na de eerder aangetoonde invloed op NO_2 (Stad Gent, 2018), lijkt stedelijke opbouw ook een effect uit te oefenen op de $[CO_2]$ in stad Gent. Smalle straten met hoge bebouwing langs beide zijden zorgt ervoor dat CO_2 blijft hangen waardoor de concentratie toeneemt. De combinatie van lage snelheden van voertuigen en een dichte bebouwing zorgt ervoor dat de $[CO_2]$ in Gent hoger is in de kernstad dan buiten de R40. Daarnaast werd ook het belang van stedelijk groen aangeduid, waarbij de $[CO_2]$ niet enkel werd verlaagd in parken (Blaarmeersen), maar ook de aanwezigheid van een park naast een drukke weg (zone 5) en een bomenrij naast een straat met traag autoverkeer (zone 10) de $[CO_2]$ lijkt te verlagen.

6. Verder onderzoek

Dit onderzoek uitgevoerd in stad Gent heeft aangetoond dat de $[CO_2]$ het hoogst is in de lente. Aangezien de meetperiode van 8 oktober 2019 tot en met 30 april 2020 liep, konden de temporele variaties slechts over een beperkte periode bepaald worden. Het zou interessant zijn om de $[CO_2]$ over een volledig jaar of zelfs meerdere jaren op te volgen. Zo kan de seizoensgebonden invloed worden vastgesteld en kunnen ook de $[CO_2]$ -trends in Gent over lange termijn bepaald worden. Dit zal het mogelijk maken effecten van genomen maatregelen beter in kaart te brengen en bij te sturen, en de evolutie van stedelijke $[CO_2]$ op te volgen en te vergelijken met globale $[CO_2]$ -stijgingen.

Hoewel duidelijke verschillen tussen de kernstad en het gebied buiten de R40 werden opgemerkt, kan aan de hand van huidig onderzoek de aanwezigheid van een stedelijke CO_2 -koepel niet bepaald worden. Metingen over een groter gebied zijn hiervoor noodzakelijk. Dit zal het mogelijk maken de $[CO_2]$ in het centrum van de stad te vergelijken met deze in omliggende landelijke gebieden. Daarnaast zouden verkeersmetingen een grote meerwaarde zijn voor het onderzoek. Zo kan $[CO_2]$ beter worden gerelateerd aan de verkeersintensiteit en kunnen betere conclusies worden gevormd omtrent het effect van verkeer op de $[CO_2]$ in Gent. Als er meer metingen worden uitgevoerd met het mobiel meetstation, zou de $[CO_2]$ -variatie in Gent nog beter in kaart kunnen worden gebracht. Zo kan worden aangetoond of het verschil in moment op de dag of verschil in weekdag ook een verschillende $[CO_2]$ -variatie in de stad veroorzaakt.

Referentielijst

- Airthings. (z.d.). What is CO₂? Geraadpleegd 10 september 2019, van <https://www.airthings.com/es/what-is-carbon-dioxide>
- Alberts, W. M. (1994). Indoor air pollution : NO, NO₂, CO, and CO₂. *Journal of allergy and clinical immunology*, 94(2), 289–295.
- Allen, L. H. (1990). Plant Responses to Rising Carbon Dioxide and Potential Interactions with Air Pollutants. *Journal of Environmental Quality*, 19(1), 15–34. <https://doi.org/10.2134/jeq1990.00472425001900010002x>
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805–812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Apte, M. G., Fisk, W. J., & Daisey, J. M. (2000). Associations Between Indoor CO₂ Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in U.S. Office Buildings: An Analysis of the 1994-1996 BASE Study Data. *Indoor Air*, 10(4), 246–257. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010004246.x>
- Archer, D., Kheshgi, H., & Maier-Reimer, E. (1997). Multiple timescales for neutralization of fossil fuel CO₂. *Geophysical Research Letters*, 24(4), 405–408.
- Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., & Osawa, H. (2018). Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment International*, 121, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.059>
- Bacastow, R. B., Keeling, C. D., & Whorf, T. P. (1985). Seasonal amplitude increase in atmospheric CO₂ concentration at Mauna Loa, Hawaii, 1959-1982. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 90(D6), 10529–10540. <https://doi.org/10.1029/JD090iD06p10529>
- Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2058(1), 163–171. <https://doi.org/10.3141/2058-20>
- Berner, R. A. (1998). The Carbon Cycle and CO₂ Over Phanerozoic Time: The Role of Land Plants. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 353(1365), 75–82.
- Berner, R. A. (2003). The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 426(6964), 323–326. <https://doi.org/10.1038/nature02131>
- Berry, R. D., & Colls, J. J. (1990). Atmospheric carbon dioxide and sulphur dioxide on an urban/rural transect—I. Continuous measurements at the transect ends. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 24(10), 2681–2688. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(90\)90148-G](https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90148-G)
- Boden, T. A., Marland, G., & Andres, R. J. (2017). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Geraadpleegd 3 april 2020, van Carbon Dioxide Information Analysis Center website: https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/glo_2014.html
- Briber, B., Hutyra, L., Dunn, A., Raciti, S., & Munger, J. (2013). Variations in Atmospheric CO₂ Mixing Ratios across a Boston, MA Urban to Rural Gradient. *Land*, 2(3), 304–327. <https://doi.org/10.3390/land2030304>
- Bruggink, G. T., Wolting, H. G., Dassen, J. H. A., & Bus, V. G. M. (1988). The effect of nitric oxide fumigation at two CO₂ concentrations on net photosynthesis and stomatal resistance of tomato (*Lycopersicon lycopersicum* L. cv. Abunda). *New Phytologist*, 110(2), 185–191.

- Büns, C., & Kuttler, W. (2012). Path-integrated measurements of carbon dioxide in the urban canopy layer. *Atmospheric Environment*, *46*, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.077>
- Butler, J. H., & Montzka, S. A. (2019). The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). Geraadpleegd 1 april 2019, van National Oceanic and Atmospheric Administration website: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>
- Caldeira, K., & Wickett, M. E. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, *425*(6956), 365–365. <https://doi.org/10.1038/425365a>
- Carlson, R. W. (1983). The effect of SO₂ on photosynthesis and leaf resistance at varying concentrations of CO₂. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*, *30*(4), 309–321. [https://doi.org/10.1016/0143-1471\(83\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0143-1471(83)90057-0)
- Chao, H. J., Schwartz, J., Milton, D. K., & Burge, H. A. (2003). The work environment and workers' health in four large office buildings. *Environmental Health Perspectives*, *111*(9), 1242–1248. <https://doi.org/10.1289/ehp.5697>
- Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2007). Cambridge.
- Codex over het welzijn op het werk. (2017). *Belgisch Staatsblad*, p. 60905.
- Departement Omgeving. (2016). *Actieplan fijn stof en NO₂ voor agglomeratie Gent en Gentse kanaalzone (2016 – 2020)*. 101.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annual Review of Marine Science*, *1*(1), 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Fiscus, E. L., Reid, C. D., Miller, J. E., & Heagle, A. S. (1997). Elevated CO₂ reduces O₃ flux and O₃-induced yield losses in soybeans: possible implications for elevated CO₂ studies. *Journal of Experimental Botany*, *48*(2), 307–313. <https://doi.org/10.1093/jxb/48.2.307>
- FOD Economie. (2020). Economische impact van het coronavirus. Geraadpleegd 22 mei 2020, van <https://economie.fgov.be/nl/themas/ondernemingen/coronavirus/economische-impact-van-het>
- Fonseca, N., Casanova, J., & Valdés, M. (2011). Influence of the stop/start system on CO₂ emissions of a diesel vehicle in urban traffic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *16*(2), 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.10.001>
- Fontaras, G., Zacharof, N.-G., & Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, *60*, 97–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.004>
- Fragkias, M., Lobo, J., Strumsky, D., & Seto, K. C. (2013). Does Size Matter? Scaling of CO₂ Emissions and U.S. Urban Areas. *PLoS ONE*, *8*(6), e64727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064727>
- Gao, Y., Lee, X., Liu, S., Hu, N., Wei, X., Hu, C., ... Yang, Y. (2018). Spatiotemporal variability of the near-surface CO₂ concentration across an industrial-urban-rural transect, Nanjing, China. *Science of The Total Environment*, *631–632*, 1192–1200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.126>
- García, M. A., Sánchez, M. L., Pérez, I. A., & de Torre, B. (2008). Continuous Carbon Dioxide Measurements in a Rural Area in the Upper Spanish Plateau. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *58*(7), 940–946. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.7.940>
- García, M. A., Sánchez, M. L., & Pérez, I. A. (2010). Synoptic weather patterns associated with carbon dioxide levels in Northern Spain. *Science of The Total Environment*, *408*(16), 3411–3417.

- García, M. A., Sánchez, M. L., & Pérez, I. A. (2012). Differences between carbon dioxide levels over suburban and rural sites in Northern Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, *19*(2), 432–439. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0575-4>
- Garrels, R. M., Lerman, A., & Mackenzie, F. T. (1976). Controls of atmospheric O₂ and CO₂: past, present, and future. *American Scientist*, *64*(3), 306–315.
- Gastaldi, M., Meneguzzer, C., Rossi, R., Lucia, L. Della, & Gecchele, G. (2014). Evaluation of Air Pollution Impacts of a Signal Control to Roundabout Conversion Using Microsimulation. *Transportation Research Procedia*, *3*, 1031–1040. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.083>
- Geers, C., & Gros, G. (2000). Carbon dioxide transport and carbonic anhydrase in blood and muscle. *Physiological Reviews*, *80*(2), 681–715. <https://doi.org/10.1152/physrev.2000.80.2.681>
- Geopunt Vlaanderen. (2020). Geopunt-kaart. Geraadpleegd 24 april 2020, van <https://www.geopunt.be/>
- George, K., Ziska, L. H., Bunce, J. A., & Quebedeaux, B. (2007). Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban–rural transect. *Atmospheric Environment*, *41*(35), 7654–7665. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.018>
- Goward, S. N. (1981). Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island. *Physical Geography*, *2*(1), 19–33. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642202>
- Gratani, L., Pesoli, P., & Crescente, M. F. (1998). Relationship between Photosynthetic Activity and Chlorophyll Content in an Isolated Quercus ilex L. Tree during the Year. *Photosynthetica*, *35*(3), 445–451. <https://doi.org/10.1023/A:1006924621078>
- Gratani, L., Crescente, M. F., & Petrucci, M. (2000). Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of Quercus ilex in polluted urban areas (Rome). *Environmental Pollution*, *110*(1), 19–28. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00285-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00285-7)
- Gratani, L., & Varone, L. (2005). Daily and seasonal variation of CO₂ in the city of Rome in relationship with the traffic volume. *Atmospheric Environment*, *39*(14), 2619–2624. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.013>
- Guais, A., Brand, G., Jacquot, L., Karrer, M., Dukan, S., Grévillet, G., ... Schwartz, L. (2011). Toxicity of carbon dioxide: A review. *Chemical Research in Toxicology*, *24*(12), 2061–2070. <https://doi.org/10.1021/tx200220r>
- Hernández-Paniagua, I. Y., Lowry, D., Clemitshaw, K. C., Fisher, R. E., France, J. L., Lanoisellé, M., ... Nisbet, E. G. (2015). Diurnal, seasonal, and annual trends in atmospheric CO₂ at southwest London during 2000–2012: Wind sector analysis and comparison with Mace Head, Ireland. *Atmospheric Environment*, *105*, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.021>
- Houghton, R. A. (1999). The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990*. *Tellus B*, *51*(2), 298–313. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1999.00013.x>
- Huyse, H., Bachus, K., Merlevede, T., Delanoëije, J., & Knipprath, H. (2019). *Societal Impact of the Citizen Science Project “CurieuzeNeuzen Vlaanderen”*: Final report. HIVA-KU Leuven.
- Idso, K. (1994). Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years’ research. *Agricultural and Forest Meteorology*, *69*(3–4), 153–203. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90025-6)
- Idso, C. D., Idso, S. B., & Balling Jr., R. C. (1998). The urban CO₂ dome of Phoenix, Arizona. *Physical Geography*, *19*(2), 95–108. <https://doi.org/10.1080/02723646.1998.10642642>
- Idso, C. D., Idso, S. B., & Balling, R. C. (2001). An intensive two-week study of an urban CO₂ dome in Phoenix, Arizona, USA. *Atmospheric Environment*, *35*(6), 995–1000.

- Idso, S. B., Idso, C. D., & Balling, R. C. (2002). Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO₂ concentration within a residential sector of the urban CO₂ dome of Phoenix, AZ, USA. *Atmospheric Environment*, 36(10), 1655–1660. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00159-0)
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, ... C. A. Johnson, Red.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (K. B. A. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis & M. T. and H. L. Miller, Red.).
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2019). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*, (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, ... T. Waterfield, Red.). In Press. Cambridge: Cambridge University Press.
- Irceline. (z.d.). Wanneer komen smogepisodes voor? Geraadpleegd 16 april 2020, van <https://www.irceline.be/nl/documentatie/faq/wanneer-vinden-er-smog-episodes-plaats>
- Jackson, R. B., Sala, O. E., Field, C. B., & Mooney, H. A. (1994). CO₂ alters water use, carbon gain, and yield for the dominant species in a natural grassland. *Oecologia*, 98(3–4), 257–262. <https://doi.org/10.1007/BF00324212>
- Kajtár, L., & Herczeg, L. (2012). Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 116(6), 145–169.
- Keeling, C. D. (1960). The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*, 12(2), 200–203. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v12i2.9366>
- Keeling, C. D., Bacastow, R. B., Bainbridge, A. E., Ekdahl, C. A., Guenther, P. R., Waterman, L. S., & Chin, J. F. S. (1976). Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*, 28(6), 538–551. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1976.tb00701.x>
- Keeling, R. (2020). Carbon Dioxide Measurements. Geraadpleegd 30 april 2020, van Scripps Institution of Oceanography website: scrippsco2.ucsd.edu/
- Key, R. M., Kozyr, A., Sabine, C. L., Lee, K., Wanninkhof, R., Bullister, J. L., ... Peng, T.-H. (2004). A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP). *Global Biogeochemical Cycles*, 18(4), GB4031. <https://doi.org/10.1029/2004GB002247>
- Kimball, B. A. (1983). Carbon Dioxide and Agricultural Yield: An Assemblage and Analysis of 430 Prior Observations 1. *Agronomy Journal*, 75(5), 779–788. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500050014x>
- Kimball, B. A., & Idso, S. B. (1983). Increasing atmospheric CO₂: effects on crop yield, water use and climate. *Agricultural Water Management*, 7(1–3), 55–72. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(83\)90075-6](https://doi.org/10.1016/0378-3774(83)90075-6)
- Kishore Kumar, M., & Shiva Nagendra, S. M. (2015). Characteristics of ground level CO₂ concentrations over contrasting land uses in a tropical urban environment. *Atmospheric Environment*, 115, 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.044>

- Kleypas, J. A. (1999). Geochemical Consequences of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Coral Reefs. *Science*, 284(5411), 118–120. <https://doi.org/10.1126/science.284.5411.118>
- Koerner, B., & Klopatek, J. (2002). Anthropogenic and natural CO₂ emission sources in an arid urban environment. *Environmental Pollution*, 116, S45–S51. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00246-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00246-9)
- Koninklijk Meteorologisch instituut van België (KMI). (z.d.). Inversie. Geraadpleegd 16 april 2020, van <https://www.meteo.be/nl/info/weerwoorden/inversie>
- Koninklijke Sterrenwacht van België. (z.d.). Zonsopgang, zonsondergang en schemering. Geraadpleegd 13 mei 2020, van <https://www.astro.oma.be/GENERAL/INFO/nli007.html>
- Le Quéré, C., & Metz, N. (2004). Natural processes regulating the ocean uptake of CO₂. *The Global Carbon Cycle : Integrating Humans, Climate, and the Natural World*, 62, 243–255.
- Lloyd, J., & Farquhar, G. D. (1996). The CO₂ Dependence of Photosynthesis, Plant Growth Responses to Elevated Atmospheric CO₂ Concentrations and Their Interaction with Soil Nutrient Status. I. General Principles and Forest Ecosystems. *Functional Ecology*, 10(1), 4. <https://doi.org/10.2307/2390258>
- Lu, C.-Y., Lin, J.-M., Chen, Y.-Y., & Chen, Y.-C. (2015). Building-Related Symptoms among Office Employees Associated with Indoor Carbon Dioxide and Total Volatile Organic Compounds. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 5833–5845. <https://doi.org/10.3390/ijerph120605833>
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., ... Stocker, T. F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453(7193), 379–382. <https://doi.org/10.1038/nature06949>
- MacNaughton, P., Spengler, J., Vallarino, J., Santanam, S., Satish, U., & Allen, J. (2016). Environmental perceptions and health before and after relocation to a green building. *Building and Environment*, 104, 138–144. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.011>
- Mahesh, P., Sharma, N., Dadhwal, V. K., Rao, P. V. N., Apparao, B. V., Ghosh, A. K., ... Ali, M. M. (2014). Impact of Land-Sea Breeze and Rainfall on CO₂ Variations at a Coastal Station. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 5(6). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000201>
- Mandavilli, S., Russel, E. R., & Rys, M. J. (2008). Impact of modern roundabouts on vehicular emissions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38, 135–142.
- Mckee, I. F., Bullmore, J. F., & Long, S. P. (1997). Will elevated CO₂ concentrations protect the yield of wheat from O₃ damage? *Plant, Cell and Environment*, 20(1), 77–84. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-1.x>
- Mills, G. (2007). Cities as agents of global change. *International Journal of Climatology*, 27(14), 1849–1857. <https://doi.org/10.1002/joc.1604>
- Monroe, R. (2013). The History of the Keeling Curve. Geraadpleegd 2 april 2020, van Scripps Institution of Oceanography website: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/2013/04/03/the-history-of-the-keeling-curve/>
- Monroe, R. (2019). Carbon Dioxide Levels Hit Record Peak in May. Geraadpleegd 1 april 2020, van Scripps Institution of Oceanography website: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/2019/06/04/carbon-dioxide-levels-hit-record-peak-in-may/>
- Murnane, R. J., Sarmiento, J. L., & Le Quéré, C. (1999). Spatial distribution of air-sea CO₂ fluxes and the interhemispheric transport of carbon by the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(2), 287–305.

- Nasrallah, H. A., Balling Jr, R. C., Mohammed Madi, S., & Al-Ansari, L. (2003). Temporal variations in atmospheric CO₂ concentrations in Kuwait City, Kuwait with comparisons to Phoenix, Arizona, USA. *Environmental Pollution*, 121(2), 301–305. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00221-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00221-X)
- Norbäck, D., & Nordström, K. (2008). Sick building syndrome in relation to air exchange rate, CO₂, room temperature and relative air humidity in university computer classrooms: an experimental study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 82(1), 21–30. <https://doi.org/10.1007/s00420-008-0301-9>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Pataki, D. E., Bowling, D. R., & Ehleringer, J. R. (2003). Seasonal cycle of carbon dioxide and its isotopic composition in an urban atmosphere: Anthropogenic and biogenic effects. *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 4735. <https://doi.org/10.1029/2003JD003865>
- Petersen, S., Jensen, K. L., Pedersen, A. L. S., & Rasmussen, H. S. (2016). The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO₂ concentration on the performance of schoolwork by children. *Indoor Air*, 26(3), 366–379. <https://doi.org/10.1111/ina.12210>
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J.-M., Basile, I., ... Stievenard, M. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399(6735), 429–436. <https://doi.org/10.1038/20859>
- Post, W. M., Peng, T.-H., Emanuel, W. R., King, A. W., Dale, V. H., & DeAngelis, D. L. (1990). The global carbon cycle. *American Scientist*, 74(4), 310–323.
- Pruppacher, H. R., & Klett, J. D. (2010). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O., Liss, P., Riebesell, U., ... Watson, A. (2005). *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. The Royal Society.
- Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R. (1997). Sick-building syndrome. *The Lancet*, 349(9057), 1013–1016. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(96\)07220-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(96)07220-0)
- Rice, A., & Bostrom, G. (2011). Measurements of carbon dioxide in an Oregon metropolitan region. *Atmospheric Environment*, 45(5), 1138–1144. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.026>
- Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P. D., Zeebe, R. E., & Morel, F. M. M. (2000). Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature*, 407(6802), 364–367. <https://doi.org/10.1038/35030078>
- Rigby, M., Toumi, R., Fisher, R., Lowry, D., & Nisbet, E. G. (2008). First continuous measurements of CO₂ mixing ratio in central London using a compact diffusion probe. *Atmospheric Environment*, 42(39), 8943–8953. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.06.040>
- Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., ... Rios, A. F. (2004). The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682), 367–371. <https://doi.org/10.1126/science.1097403>
- Sajuni, N. R. B. (2015). Air Pollution. Geraadpleegd 16 april 2020, van <https://vdocuments.mx/air-pollution-55849a5cc5369.html>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671–1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>

- Schlesinger, W. H. (1999). Carbon Sequestration in Soils. *Science*, 284(5423), 2095–2095. <https://doi.org/10.1126/science.284.5423.2095>
- Scripps Institution of Oceanography. (2020). The Keeling Curve. Geraadpleegd 1 april 2020, van <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (1998). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New York: Wiley.
- Seppanen, O. A., Fisk, W. J., & Mendell, M. J. (1999). Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings. *Indoor Air*, 9(4), 226–252. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x>
- Soegaard, H., & Møller-Jensen, L. (2003). Towards a spatial CO₂ budget of a metropolitan region based on textural image classification and flux measurements. *Remote Sensing of Environment*, 87(2–3), 283–294. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00185-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00185-8)
- Stad Gent. (z.d.). Vergunningen en toegang autovrij gebied. Geraadpleegd 18 mei 2020, van <https://stad.gent/nl/mobiliteit-openbare-werken/mobiliteit/vergunningen-en-toegang-autovrij-gebied>
- Stad Gent. (2014). Een kaart van de vegetaties in Gent. Geraadpleegd 20 april 2020, van <https://stad.gent/nl/over-gent-en-het-stadsbestuur/parken/grote-parken-en-natuurgebieden/een-kaart-van-de-vegetaties-gent>
- Stad Gent. (2018). Resultaten van CurieuzeNeuzen Vlaanderen voor Gent. Geraadpleegd 19 mei 2020, van <https://stad.gent/nl/over-gent-en-het-stadsbestuur/nieuws-evenementen/resultaten-van-curieuzeneuzen-vlaanderen-voor-gent>
- Stad Gent. (2020a). Gent in cijfers. Geraadpleegd 24 april 2020, van <https://gent.buurtmonitor.be/>
- Stad Gent. (2020b). Lage-emissiezone Gent. Geraadpleegd 20 april 2020, van <https://stad.gent/nl/mobiliteit-openbare-werken/lage-emissiezone>
- Stull, R. B. (Red.). (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Sybesma, C., & Mortensen, L. M. (1984). Effect of CO₂ on Photosynthesis and Growth of Chrysanthemum. In *Advances in Photosynthesis Research* (pp. 137–140). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Tans, P. (2020). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Geraadpleegd 30 april 2020, van NOAA/ESRL website: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/
- Tsai, D.-H., Lin, J.-S., & Chan, C.-C. (2012). Office Workers' Sick Building Syndrome and Indoor Carbon Dioxide Concentrations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9(5), 345–351. <https://doi.org/10.1080/15459624.2012.675291>
- Vaisala. (2018). *User Guide Vaisala CARBOCAP® Carbon Dioxide Probe GMP252*. p. 122.
- Vehviläinen, T., Lindholm, H., Rintamäki, H., Pääkkönen, R., Hirvonen, A., Niemi, O., & Vinha, J. (2016). High indoor CO₂ concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO₂ level and sleepiness during cognitive work. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(1), 19–29. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1076160>
- Velasco, E., & Roth, M. (2010). Cities as Net Sources of CO₂: Review of Atmospheric CO₂ Exchange in Urban Environments Measured by Eddy Covariance Technique. *Geography Compass*, 4(9), 1238–1259. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00384.x>
- Vlaams Verkeerscentrum. (2020). Impact maatregelen coronacrisis. Geraadpleegd 13 mei 2020, van <https://www.verkeerscentrum.be/studies/impact-maatregelen-coronacrisis>

- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). (z.d.). Street canyon. Geraadpleegd 18 mei 2020, van <https://www.vmm.be/woordenboek/street-canyon>
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). (2017). *Meetcampagne stikstofdioxide op 50 locaties in Gent (2016) - Eindrapport*.
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). (2019a). CO₂-emissie van nieuwe voertuigen. Geraadpleegd 14 mei 2020, van <https://www.milieurapport.be/sectoren/transport/emissies-afval/co2-emissie-van-nieuwe-voertuigen>
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). (2019b). Hitte-eilanden in steden. Geraadpleegd 11 april 2020, van <https://www.milieurapport.be/milieuthemas/klimaatverandering/temperatuur/hitte-eilanden-in-steden>
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). (2019c). *Luchtkwaliteit in de Gentse agglomeratie en Gentse kanaalzone - jaarrapport 2018*.
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). (2020a). Betere luchtkwaliteit door coronacrisis? Geraadpleegd 14 mei 2020, van <https://www.vmm.be/nieuwsbrief/april-2020/betere-luchtkwaliteit-door-coronacrisis>
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). (2020b). Informatiedrempel fijn stof overschreden. Geraadpleegd 14 mei 2020, van <https://www.vmm.be/nieuws/archief/informatiedrempel-fijn-stof-overschreden>
- Vogt, R., Christen, A., Rotach, M. W., Roth, M., & Satyanarayana, A. N. V. (2006). Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1–3), 117–126. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0149-9>
- Waring, R. H., Landsberg, J. J., & Williams, M. (1998). Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiology*, 18(2), 129–134. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.2.129>
- Whitmarsh, J., & Govindjee. (1999). Chapter 2: The Basic Photosynthetic Process. In *Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis* (pp. 11–51). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Wisconsin Department of Health Services (DHS). (2019). Carbon Dioxide. Geraadpleegd 1 februari 2020, van <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm>
- World Health Organization (WHO). (1990). *Indoor air quality: biological contaminants: report on a WHO meeting, Rautavaara, 29 August-2 September 1988*. Copenhagen.
- World Health Organization (WHO). (2006). International Chemical Safety Cards 0021. Geraadpleegd 14 september 2019, van https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=en&p_card_id=0021&p_version=2

