



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

School voor Educatieve Studies

Educatieve master in de wetenschappen en technologie

Masterthesis

Ontwerpen van een didactisch chemisch experiment. Luchtvervuiling in de klas

Leandro Atella

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van Educatieve master in de wetenschappen en technologie, afstudeerrichting wetenschappen

PROMOTOR :

Prof. dr. Kristien BRASSINNE

BEGELEIDER :

Prof. dr. Sonja SCHREURS



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be
Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2020

2021



School voor Educatieve Studies

Educatieve master in de wetenschappen en technologie

Masterthesis

Ontwerpen van een didactisch chemisch experiment. Luchtvervuiling in de klas

Leandro Atella

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van Educatieve master in de wetenschappen en technologie, afstudeerrichting wetenschappen

PROMOTOR :

Prof. dr. Kristien BRASSINNE

BEGELEIDER :

Prof. dr. Sonja SCHREURS



Ontwerpen van een didactisch chemisch experiment

Luchtvervuiling in de klas

Masterproef

Auteurs

Leandro Atella
Maartje De Weyer
Valerie Geerits
Hubrecht Hermans
Stijn Janssens
Lore Ketelslegers

Promotoren

Prof. dr. Kristien Brassinne
Prof. dr. Sonja Schreurs

Academiejaar 2020-2021



Luchtvervuiling in de klas

Inhoud

Lijst van figuren	5
Lijst van tabellen	7
Abstract	9
1 Inleiding	11
1.1 Didactiek van chemie-experimenten	11
1.1.1 Open en gesloten onderwijs	11
1.1.2 Onderzoekend leren en de wetenschappelijke denkhouding.....	12
1.1.3 Onderzoekend leren in het practicum.....	12
1.1.4 Indeling onderzoeksgebaseerde practica.....	13
1.2 Toelichting onderwerp: luchtvervuiling	14
1.2.1 Ecologische problemen	14
1.2.2 Luchtvervuiling.....	14
1.3 Link didactiek en luchtvervuiling.....	18
1.4 Onderzoeksvraag	18
1.5 Overzicht.....	18
2 Materiaal en methode	19
2.1 Zoekplan	19
2.2 Fijnstof-experiment	20
2.2.1 Principe.....	20
2.2.2 Materialen en methoden	21
2.3 NO ₂ -experiment	22
2.3.1 Principe.....	22
2.3.2 Materialen	23
2.3.3 Methoden.....	23
2.4 CO ₂ -experiment	25
2.4.1 Principe.....	25
2.4.2 Materialen	26
2.4.3 Methoden.....	27

3	Resultaten	31
3.1	Fijnstof-experiment	31
3.2	NO ₂ -experiment	33
3.3	CO ₂ -experiment	38
3.4	Van kookboekpracticum naar onderzoekspracticum.....	44
4	Discussie	47
4.1	Fijnstof-experiment	47
4.2	NO ₂ -experiment	48
4.3	CO ₂ -experiment	50
5	Conclusie	51
	Referenties	53
	Appendices	59
	Appendix A: Extra gegevens NO ₂ -experiment.....	61
	Appendix B: Leerkrachtenbundel.....	63
	Appendix C: Risicoanalyses voor het fijnstof-experiment	79
	Appendix D: Risicoanalyses voor het NO ₂ -experiment.....	81
	Appendix E: Risicoanalyses voor het CO ₂ -experiment.....	85

Lijst van figuren

- Figuur 1: Bronnen van luchtvervuiling. (1) Landbouw produceert ongeveer 90% van de ammoniak en methaan uitstoot. Beiden ook voorbeelden van luchtvervuiling. (2) Energieproductie en energieverdeling staat in voor ongeveer 60% van de SO_x-uitstoot. (3) Verschillende natuurlijke fenomenen, zoals vulkaanuitbarstingen en zandstormen, produceren luchtvervuilende stoffen, zoals fijnstof. (4) Koolmijnen, gastransport en zelfs vuilnisbelten behoren ook tot producenten van luchtvervuiling. (5 + 6) Verbranding van fossiele brandstoffen is ook een sleutelfactor in de luchtvervuiling. Wegtransport, huishouden, verwarming, publieke gebouwen, en andere zorgen voor ongeveer 40% van NO_x-uitstoot en PM_{2.5}-uitstoot (European Environment Agency, 2020b). 15
- Figuur 2: Verschillende groottes van fijnstof. Vergelijkende analyse van fijnstof ten opzichte van haar en zandkorrels (United States Environmental Protection Agency, 2020). 16
- Figuur 3: Het piezo-elektrisch effect in kwarts (SiO₂). A. De molecuulstructuur van kwarts zonder mechanische stress. B. De molecuulstructuur van kwarts met mechanische stress voorgesteld door de pijlen zorgt voor een verplaatsing van de atomen met een elektrisch veld als gevolg; aangepast van: "Piezoelectric effect" 2009). 20
- Figuur 4: Aansluiting kristal aan Analog Discovery 2 – oscilloscoop (Digilent). 21
- Figuur 5: (A) NO₂ colorimetrische reactie. Reactie tussen het nitriet (rood omkaderd) met het sulfanilzuur gevolgd door een reactie met N-(1-naftyl)-ethyleendiamine (NEDA). Er wordt een azoverbinding gevormd dat een paarse kleur zal geven (zwart omkaderd). (B) Absorptie van NO₂ door triethanolamine (TEA) ter vorming van nitrietionen (rood omkaderd). Deze nitrietionen reageren dan met het GS-reagens zoals in figuur 5A. 22
- Figuur 6: Opstelling van het experiment om NO₂ te verzamelen, geproduceerd door een sigaret. De actieve kool (omcirkeld) werd tussen de sigaret en eerste wasfles geplaatst. In deze wasfles werd vervolgens 20 ml van GS-reagens geplaatst (zie pijl). 24
- Figuur 7: De gebruikte opstelling om de absorptie te bepalen met behulp van de app ColorMeter Free. 25
- Figuur 8: Foto (links) en schematische weergave (rechts) van de opstelling van het CO₂-experiment. 25
- Figuur 9: pH-curve van Titratie 3. 27
- Figuur 10: Curve van de eerstegraadsafgeleide van Titratie 3. 29
- Figuur 11: Curve van de tweedegraadsafgeleide van Titratie 3 rond het tweede equivalentiepunt. 29
- Figuur 12: Curvefitting van de beperkte dataset rond equivalentiepunt drie van Titratie 3. 29
- Figuur 13: Curvefitting van de beperkte dataset rond equivalentiepunt drie van Titratie 3, na y=x. 30
- Figuur 14: Waarnemingen optimalisaties fijnstof-experiment, waarvan (A) de gevormde kristallen volgens het standaardprotocol; (B) het viskeus mengsel bij Optimalisatie 1 (50 g KC₄H₅O₆ in 60 ml dH₂O); (C) het viskeus mengsel bij Optimalisatie 2 (50 g KC₄H₅O₆ in 50 ml dH₂O); (D) het viskeus mengsel bij Optimalisatie 3 (grotere hoeveelheid Na₂CO₃ per stap); (E) de kristalvorming in een plasticen bak; en (F) de kristalvorming in een glazen maatbeker. . 32
- Figuur 15: Metingen oscilloscoop met toegevoegde massa's: verschil in spanning (mV) over de tijd (ms). (A) geen massa, (B) papierklem (1,09 g), (C) dop van markeerstift (3,40 g), (D) gom (7,20 g), (E) pincet (17,60 g) en (F) schaar (65,70 g). 33

Figuur 16: (A) Kalibratielijn van NaNO_2 na 10 minuten (B) en na 30 minuten (550 nm).	34
Figuur 17: NO_2 geproduceerd door sigaretten. (A) Staal met TEA produceerde geen karakteristieke paarse kleur, (B) Staal zonder TEA produceerde een lichtpaarse kleur, (C) Staal zonder TEA produceerde een paarse kleur maar interfereert met de gele rook, (D) Staal zonder TEA produceerde de karakteristieke paarse kleur. Bij dit staal werd actieve kool gebruikt en geen gele rook of aanslag werd gedetecteerd. Deze gele aanslag is wel duidelijk zichtbaar in opstelling A, B en C.....	36
Figuur 18: Voorstel proefopstelling met drukvat.	39
Figuur 19: pH-curves van de eerste set titraties.	40
Figuur 20: Grafische vergelijking van de Titratie 6-reeks (0,149 g CO_2) met de bijbehorende simulatie.	42
Figuur 21: Grafische vergelijking van de Titratie 7-reeks (0,297 g CO_2) met de bijbehorende simulatie.	43
Figuur 22: Grafische vergelijking van de Titratie 8-reeks (0,446 g CO_2) met de bijbehorende simulatie.	44
Figuur S1: Drie mogelijke opstellingen om NO_2 te verzamelen. (A) De uitlaatgassen van een voertuig, (B) de verbrandingsrook na houtverbranding en (C) sigarettenrook.	61
Figuur S2: Actieve kool met de gele aanslag. De actieve kool heeft de gele dampen opgenomen waardoor er een duidelijke paarse kleur gedetecteerd kon worden.	62
Figuur S3: Mogelijk model voor een 3D-geprinte versie van de opstelling. Gecreëerd met Google SketchUp.....	62
Figuur S4: Flowchart werkwijze maken van piëzo-elektrisch kristal.....	64
Figuur S5: Curve van de eerstegraadsafgeleide van Titratie 3.	74
Figuur S6: Curve van de tweedegraadsafgeleide van Titratie 3 rond het tweede equivalentiepunt.	75
Figuur S7: Curvefitting van de beperkte dataset rond equivalentiepunt drie van Titratie 3.	75
Figuur S8: Curvefitting van de beperkte dataset rond equivalentiepunt drie van Titratie 3, na $y=x$	76

Lijst van tabellen

Tabel 1:	Limiet- en advieswaarden (Vlaamse Milieumaatschappij, n.d.-a, n.d.-b).	17
Tabel 2:	Validatie standaardprotocol en optimalisaties.	31
Tabel 3:	Overzicht van de verschillende NO ₂ -experimenten.	35
Tabel 4:	Concentratie aan NO ₂ bekomen tijdens de verschillende optimalisatie-experimenten.	36
Tabel 5:	G-waarden van de verdunningsreeks bekomen met behulp van de app ColorMeter Free.	37
Tabel 6:	G-waarden van de verdunningsreeks bekomen met behulp van de app ColorMeter Free.	38
Tabel 7:	Resultaten van de eerste set titraties.....	40
Tabel 8:	Verwerking van de resultaten van de eerste set titraties.	41
Tabel 9:	Numerieke vergelijking van de Titratie 6-reeks (0,149 g CO ₂).	42
Tabel 10:	Numerieke vergelijking van de Titratie 7-reeks (0,297 g CO ₂).	43
Tabel 11:	Numerieke vergelijking van de Titratie 8-reeks (0,446 g CO ₂).	44
Tabel 12:	Practica-analysetabel (Falk et al., 1974).	45
Tabel S1:	Absorptiewaarden, van de verdunningsreeks, na 10 en 30 minuten.....	62

Abstract

De *21st century skills* is een verzamelterm voor een aantal algemene competenties die belangrijk zijn voor de huidige maatschappij. ICT-basisvaardigheden, probleemoplossend werken en kritisch denken zijn een aantal van deze vaardigheden. In het onderwijs probeert men deze vaardigheden aan te leren aan lerenden. Het is belangrijk dat iedere persoon kritisch kan denken over data om zo zelf conclusies te kunnen nemen.

Om deze vaardigheden over te brengen, maken de wetenschapsvakken gebruik van practica. Daarbij worden vaak de traditionele practica toegepast: practica in een zogenaamde kookboek-opzet. Het practicum is stap voor stap, tot in de puntjes, beschreven. Het enige wat de leerlingen moeten doen zijn deze stapjes nauwgezet volgen. Hiervoor hoeft de leerling amper inzicht te hebben in het experiment aangezien alles minutieus uitgeschreven staat. De leerling wordt daarbij ook niet uitgedaagd om diepere verbanden te leggen, resultaten te analyseren of te bediscussiëren. Kortom, het kritisch denken wordt amper aangewakkerd.

Onderzoeksgebaseerde practica daarentegen zijn opgebouwd zoals de wetenschappelijke methode waarbij er data verzameld en vergeleken wordt met bestaande data. Dit zorgt ervoor dat leerlingen aangespoord worden om samen te werken en na te denken over een bepaald probleem. Hierbij stellen ze zelf een onderzoeksvraag en hypothese op en ontwikkelen ze zelf experimenten om deze hypothese te testen. Daarnaast wordt er ook gezorgd dat de leerlingen meer begrijpen, een betere wetenschappelijke houding aannemen en dat hun redeneervaardigheden groeien. Dergelijke onderzoeksgebaseerde practica, ook wel *project-based learning* genoemd, sporen leerlingen wel aan om kritisch te denken.

Analytische en milieuchemische experimenten bieden uitstekende kansen om probleemgestuurde practica op te bouwen. Door dergelijke practica te gebruiken, worden leerlingen geconfronteerd met relevante problemen en uitdagingen in de samenleving. Op deze manier kunnen verschillende wetenschapsvakken aangeleerd worden in een context die de leerlingen aanspreekt en hen motiveert. Luchtvervuiling is zo een maatschappelijk probleem met schadelijke gevolgen voor gezondheid en milieu. Hoewel de uitstoot van vele luchtverontreinigende stoffen de laatste decennia aanzienlijk is afgenomen, leeft een groot gedeelte van de Europese bevolking in gebieden, voornamelijk steden, waar de luchtkwaliteitsnormen nog steeds overschreden worden.

Deze masterproef heeft drie verschillende experimenten ontwikkeld en geoptimaliseerd om te kunnen gebruiken in een onderzoeksgebaseerd practicum rond luchtvervuiling. Een eerste experiment houdt zich bezig met de ontwikkeling van piëzo-elektrische kristallen. Dankzij dit fenomeen, kunnen deze kristallen gebruikt worden als methode om eventueel fijnstof te detecteren. Een tweede experiment spitst zich toe op de bepaling van de stikstofdioxideconcentratie (NO₂) door gebruik te maken van een kleurreactie. Het laatste experiment gaat in op de bepaling van de koolstofdioxideconcentratie (CO₂) door gebruik te maken van een zuur-basetitratie. De resultaten van de verschillende optimalisatiestappen zijn opgenomen in deze masterproef. De geoptimaliseerde experimenten zijn terug te vinden in de bijlagen als lerarenbundel.

Via dit maatschappelijk probleem, en deze experimenten, probeert deze masterproef een chemisch project op te stellen dat het kritisch denken en de motivatie van leerlingen van de 3de graad ASO/TSO probeert te verhogen. Daarbij tracht het inzichten te geven om practica meer onderzoeksgebaseerd te maken.

1 Inleiding

Onderwijs heeft als doel kennis, vaardigheden en attitudes over te brengen aan lerenden. Het aansporen van het kritisch denken is hier ook een onderdeel van. Dit is nu, in de huidige maatschappij, meer relevant dan ooit. Door de digitalisering is het vaak moeilijk om *fake-news* en *alternative facts*, veelvuldig gebruikt in de (populaire) media, te onderscheiden van de waarheid.

Dit kritisch denken is een vaardigheid van de zogenaamde *21st century skills*, waaronder ook samenwerking en probleemoplossend denken bij horen (Tanis et al., 2014). Deze vaardigheden zijn een centraal doel van de wetenschapsvakken. Het is belangrijk dat iedere persoon kritisch kan denken over data om zo zelf na te kunnen gaan of de conclusies kloppen (Holmes et al., 2015). Dit kritisch denken wordt vooral aangeleerd door middel van practica maar onderzoek toont aan dat dit zelden bereikt wordt (Holmes et al., 2015).

De meest gebruikte vorm van practica zijn de zogenaamde kookboekstijl practica: leerlingen volgen elke stap nauwkeurig en bereiken een verwacht resultaat. Een andere aanpak is via *inquiry-based learning* (onderzoekend leren): bij deze vorm staan de leerlingen centraal waarbij ze op een systematische manier data verzamelen (Tanis et al., 2014). Deze aanpak zet de leerlingen aan tot nadenken over de opzet van een practicum en tot het opstellen van onderzoeksvragen. Marion van Brederode (2020) had een dergelijk onderzoek uitgevoerd op een groep leerlingen. Om het kritisch denken te testen, hadden zij een 'verrassing' in het experiment geplaatst: een klein aantal leerlingen ontdekte deze 'verrassing' en discussieerde daarover in het verslag (van Brederode et al., 2020). Dankzij onderzoekend leren zijn de leerlingen doelgericht bezig met bepaalde projecten, waardoor ze kennis verwerven over echte onderwerpen. Tegelijkertijd zullen ze hoogstwaarschijnlijk op een 'verrassing' stuiten waardoor het kritisch denken wordt aangewakkerd.

Deze masterproef heeft een onderzoekend practicum uitgewerkt rond het thema '*luchtvervuiling*'. In het volgende hoofdstuk worden de concepten kookboekstijl versus inquiry-based learning verder toegelicht. Vervolgens wordt er ook dieper ingegaan op het topic 'luchtvervuiling' en waarom deze topic gekozen werd.

1.1 Didactiek van chemie-experimenten

In dit hoofdstuk wordt de didactiek van de chemie-experimenten verder uitgediept. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen open en gesloten onderwijs. Daarna volgt een verdere verheldering van onderzoekende practica die zich baseren op inquiry-based learning en wordt deze vergeleken met de meer standaard, kookboekstijl practica.

1.1.1 Open en gesloten onderwijs

Onderwijs kan ingedeeld worden in verschillende types, gaande van gesloten, leraar-gestuurd onderwijs tot open, leerling-gestuurd onderwijs (Schilperoord et al., 2006). In het eerste type onderwijs wordt alles bepaald door de leerkracht. De leerkracht beslist wat de inhoud van de les is en hoe dit overgebracht wordt aan de leerlingen. Als gevolg hiervan is het leerproces van de leerlingen volledig gecontroleerd door de leerkracht. In het open, leerling-gestuurde onderwijs daarentegen staat de input van de leerlingen centraal. Ze worden ondersteund in hun leerproces door het aanbieden van tussenstappen; maar hun eigen denkwijze en vragen staan centraal (Alfieri et al., 2011). De effecten van deze verschillende strategieën op het leerproces van de leerlingen werd veelvuldig onderzocht. De onderzoeken wezen allen uit dat de optimale strategie zich ergens tussen het gesloten en het open onderwijs bevindt. De ideale strategie zou de leerlingen vrijlaten, maar met een degelijke ondersteuning. Deze ondersteuning kan bereikt worden met taken waarin leerlingen hun eigen ideeën moeten toelichten, gecombineerd met regelmatige feedback (Alfieri et al., 2011; Lazonder & Harmsen, 2016).

1.1.2 Onderzoekend leren en de wetenschappelijke denkhouding

Een wetenschappelijke denkhouding houdt in dat de leerlingen bereid zijn om wetenschappelijke concepten te begrijpen, gegeven informatie in vraag te stellen, data te verzamelen en deze te gebruiken in onderzoek (Bekmezci et al., 2015). Bovendien is het ontwikkelen van een kritische houding en een wetenschappelijke geletterdheid, waarbij leerlingen een grondige wetenschappelijke woordenschat gebruiken, een onderdeel van deze wetenschappelijke denkhouding (Wilcox et al., 2015). Deze denkhouding wordt gestimuleerd door onderzoekend leren (Widowati et al., 2017). Onderzoekend leren is een methode waarbij de leerlingen worden aangespoord om te leren door middel van onderzoek, waarbij het stellen van onderzoeksvragen en het vormen van hypothesen van groot belang zijn. Bij deze methode staat de leerling centraal en wordt er gewerkt aan inzicht en kennis door onder andere zelf experimenten uit te voeren (Spronken-Smith & Walker, 2010).

De wetenschappelijke denkhouding en het 'hoger-denken' zijn vaardigheden die voor eenieder van belang zijn. Kennis en begrip van wetenschappelijke concepten en processen zijn noodzakelijk voor het maken van goede beslissingen en actieve deelname aan de maatschappij (burgerzaken, cultuur, economie, ...). Bovendien moet iedereen in staat zijn om zelf vragen te kunnen stellen en te beantwoorden over alledaagse curiositeiten die gebaseerd zijn op wetenschappelijke feiten. Bovendien kan een kritische kijk op de actualiteit tegenwoordig niet ontbreken. Men moet in staat zijn de validiteit van artikels te beargumenteren om op deze manier *fake news* te onderscheiden van feiten (Eilks & Hofstein, 2013).

De noodzaak voor het aanleren van een wetenschappelijke denkhouding is ook de Vlaamse Regering niet ontgaan. Een modernisering van het secundair onderwijs moet er onder meer voor zorgen dat de leerlingen leren kritisch denken. Vanaf het schooljaar 2019 - 2020 zijn de eindtermen en ontwikkelingsdoelen voor het secundair onderwijs vervangen door gemoderniseerde onderwijsdoelen. De onderwijsdoelen van de tweede graad zijn al geldig vanaf het schooljaar 2021 - 2022. De verschillende onderwijsinstellingen hebben, op basis van deze onderwijsdoelen, dan ook al de leerplannen uitgewerkt. De onderwijsdoelen van de derde graad zijn geldig vanaf het schooljaar 2022 - 2023, de leerplannen hiervoor zijn nog niet klaar. De nieuwe onderwijsdoelen bestaan enerzijds uit specifieke eindtermen per wetenschapsdomein en anderzijds uit sleutelcompetenties. Dit zijn clusters van inhoudelijk verwante competenties die de leerlingen moeten verwerven om te functioneren in de maatschappij en zich persoonlijk te ontplooiën. Een van deze sleutelcompetenties zijn de leercompetenties, deze zijn opgedeeld in verschillende onderdelen waaronder "*Een (onderzoeks-)probleem (v)erkennen en een antwoord of oplossing zoeken gebruikmakend van geschikte (leer-)activiteiten, strategieën en tools.*" Hiervoor zijn in meerdere specifieke onderwijsdoelen omschreven hoe leerlingen een wetenschappelijke denkhouding kunnen aannemen en wetenschappelijke methodes kunnen toepassen. Ook de specifieke eindtermen voor STEM omvatten onderwijsdoelen rond onderzoeksvaardigheden en labowerk. Bij het onderdeel van de generieke doorstroomcompetenties worden ook verschillende onderwijsdoelen rond een onderzoekende attitude en het doorlopen van een onderzoeksproces beschreven. Voor het volledige overzicht verwijzen we naar de website www.onderwijsdoelen.be (Agentschap voor Hoger Onderwijs Volwassenenonderwijs Kwalificaties en Studietoelagen, 2021).

1.1.3 Onderzoekend leren in het practicum

De wetenschapsvakken, zoals onder meer chemie, fysica en biologie, lenen zich ertoe om de leerlingen een wetenschappelijke denkhouding aan te leren aangezien ze practica bevatten. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen traditionele en onderzoeksgebaseerde practica. Traditionele practica hebben vaak een kookboek-opzet waarbij het practicum stap voor stap voorbereid is waarbij de leerlingen deze handleiding volledig moeten volgen. Dit is een veelgebruikte methode om practica te organiseren maar leert de leerlingen niet nadenken over het verband tussen het labowerk en de wetenschappelijke theorie. Bovendien geeft de beoordeling van een traditioneel labo enkel een indicatie over hoe goed een leerling de instructies kan volgen (Donaldson & Odom, 2001).

Onderzoeksgebaseerde practica daarentegen zijn opgebouwd zoals de wetenschappelijke methode waarbij er data verzameld en vergeleken wordt met bestaande data. Volgens Holmes et al. (2015) is het net deze methode van dataverzameling en vergelijken die wetenschappers aanzet tot kritisch denken. Dus door onderzoeksgebaseerde practica in te zetten, waarbij leerlingen een gelijkaardige methode kunnen hanteren, kan het kritisch denken aangespoord worden. Daarnaast wordt er ook voor gezorgd dat de leerlingen meer begrijpen, een betere wetenschappelijke houding aannemen en dat hun redeneervaardigheden groeien. De leerlingen kunnen deze nieuwe vaardigheden en theorie ook langer onthouden en beter toepassen op nieuwe situaties. Bovendien vinden de leerlingen dit ook uitdagender dan traditionele practica waardoor hun intrinsieke motivatie zal toenemen (Lord & Orkwiszewski, 2006; Shooter, 1993).

Voor de traditionele kookboekpractica hebben de leerlingen weinig inzicht nodig en worden ze ook niet uitgedaagd om diepere verbanden tussen verschillende concepten te leggen. Daarnaast moet de leerling ook weinig of geen resultaten analyseren, aangezien alles tot in de puntjes uitgelegd staat. Een discussie ontbreekt dan ook of deze blijft erg oppervlakkig. Als de leerlingen de handleiding juist volgen, zullen er geen fouten gebeuren of onverwachte resultaten zijn. De bespreking hiervan in de discussie is net een cruciaal onderdeel van wetenschappelijk onderzoek (Nagarajan & Overton, 2019). Het toevoegen van reflectievragen bij traditionele practica zou het ontbreken van de diepere verbanden, verkregen bij discussie en analyse, gedeeltelijk kunnen opvangen. Bij deze traditionele practica met geen of een erg kleine onderzoekscomponent, is de reflectie voornamelijk beperkt tot feitelijke kennis, terwijl bij meer onderzoeksgebaseerde practica de reflectie voor een groter deel zal bestaan uit onderdelen zoals evaluatie, verbeteringen en metacognitieve en procedurele kennis (Xu & Talanquer, 2013).

1.1.4 Indeling onderzoeksgebaseerde practica

Binnen de onderzoeksgebaseerde practica kan men een onderscheid maken tussen drie vormen. Ten eerste is er het gestructureerd onderzoek (*structured inquiry*) waarbij de leerkracht een groot deel van het onderzoek zelf aan de leerlingen aanbiedt: het probleem (onderzoeksvraag) en de processen die nodig zijn om het probleem op te lossen. Ten tweede is er het begeleid onderzoek (*guided inquiry*) waarbij de leerkracht de vraagstelling doet en leerlingen zelf op zoek gaan naar de oplossing en processen. Ten derde is er open onderzoek (*open inquiry*) waarbij de leerlingen zelf een oplossing proberen te vinden voor een probleemstelling binnen een context die relevant is voor hun leefwereld. Begeleid experimenteel onderzoek ontwikkelt positieve houdingen van leerlingen ten opzichte van wetenschappelijk onderzoek en vermindert hun angst om practica uit te voeren. Enige ondersteuning van de leerkracht blijkt toch wel een meerwaarde te hebben (Ural, 2016).

Een concrete toepassing van *guided inquiry* is *project-based learning*, erg gelijkend – en soms zelfs beschreven als synoniem – aan *problem-based learning*. Bij deze leerstrategie staat de leerling centraal. De doelstelling is het bereiken van dieper leren door enerzijds actief realistische en relevante problemen te ontdekken, anderzijds hiervoor een gepaste oplossing te bedenken. Beide leerstrategieën hebben de volgende eigenschappen (Nagarajan & Overton, 2019):

- a) de drijfveer is een uitdagende, open en realistische onderzoeksvraag met verschillende oplossingen en methodes om tot het gewenste resultaat te komen;
- b) er wordt gebruik gemaakt van wetenschappelijke vaardigheden zoals het opstellen van een hypothese, variabelen analyseren, experimenten bedenken, ...;
- c) er is een blijvende vraagstelling: bij onvoorziene problemen kan de hypothese en/of het experiment worden aangepast;
- d) er wordt gebruik gemaakt van wetenschappelijke technologie;
- e) er is een finaal product dat verschillende vormen kan aannemen zoals een verslag, presentatie, poster,

Hoewel de voordelen van onderzoekend leren gekend zijn, passen leerkrachten dit vaak niet toe. Een gebrek aan tijd, een tekort aan materiaal, te grote klassen, problemen met management en veiligheid zijn een aantal vaak voorkomende barrières tegen het inzetten van probleemgestuurde practica (Cheung, 2011).

1.2 Toelichting onderwerp: luchtvervuiling

In dit hoofdstuk wordt het centrale thema van dit onderzoeksgebaseerd practicum verder toegelicht. Er wordt uitgelegd waarom luchtvervuiling een ideaal onderwerp is voor een dergelijk practicum. Daarna volgt een analyse van luchtvervuiling: wat is luchtvervuiling, en wat is de impact van luchtvervuiling op de gezondheid?

1.2.1 Ecologische problemen

Volgens Nagarajan and Overton (2019) bieden analytische en milieuchemische experimenten uitstekende kansen om probleemgestuurde practica op te bouwen. Door dergelijke practica te gebruiken, worden leerlingen geconfronteerd met relevante problemen en uitdagingen in de samenleving. Op deze manier kan chemie aangeleerd worden in de context van deze uitdagingen en zullen de leerlingen als geïnformeerde burgers kunnen werken aan een duurzame toekomst (Nagarajan & Overton, 2019).

Luchtvervuiling is een maatschappelijk probleem met schadelijke gevolgen voor gezondheid en milieu (European Environment Agency, 2020a). Hoewel de uitstoot van vele luchtverontreinigende stoffen de laatste decennia aanzienlijk is afgenomen, leeft een groot gedeelte van de Europese bevolking in gebieden, voornamelijk steden, waar de luchtkwaliteitsnormen nog steeds overschreden worden (European Environment Agency, 2020a). Onderzoek toont aan dat de stedelijke luchtvervuiling voornamelijk veroorzaakt wordt door stikstofoxiden, fijnstof en ozon (Szyszkowicz et al., 2020) die kunnen leiden tot ernstige gezondheidsrisico's (European Environment Agency, 2020a). Eenmaal dat deze vervuilende stoffen het menselijk lichaam zijn binnengetrepen, kunnen ze verschillende ziektes veroorzaken, zoals cardiovasculaire ziektes (Almetwally et al., 2020; Bourdrel et al., 2017; Franklin et al., 2015), respiratoire ziektes (Almetwally et al., 2020) maar ook diabetes (Almetwally et al., 2020; Brook et al., 2008) en zelfs depressies, angsten (Power et al., 2015) en andere mentale aandoeningen (Szyszkowicz et al., 2020). Daarnaast heeft onderzoek ook aangetoond dat luchtvervuiling doorheen de placenta kan migreren en de foetus kan bereiken en dus reeds voor de geboorte een invloed kan hebben (Gruzjeva et al., 2019).

1.2.2 Luchtvervuiling

Luchtvervuiling wordt gedefinieerd als *'alle bronnen die vernietigende effecten hebben en bijdragen tot de vervuiling van de atmosfeer en/of het ecosysteem'* (Ghorani-Azam et al., 2016). Luchtvervuiling wordt op verschillende manieren ingedeeld, onder meer op basis van oorsprong, chemische samenstelling en grootte (Bernstein et al., 2004).

Op basis van oorsprong kan men twee groepen onderscheiden: de natuurlijke en de antropogene luchtvervuiling. Bosbranden, vulkaanuitbarstingen, pollen en micro-organismen worden als natuurlijke luchtvervuiling gezien. Industrie, transport en verwarming daarentegen zijn voorbeelden van antropogene luchtvervuiling. Deze antropogene bronnen vormen de grootste bron van luchtvervuiling (Almetwally et al., 2020; WHO, 2018). Luchtvervuiling is ook niet alleen een probleem dat zich buiten voordoet. Ook binnenshuis zijn er allerhande vervuiliingsbronnen zoals kaarsen, schimmels, verf, koken en zelfs elektronische apparaten of bouwmaterialen (Cincinelli & Martellini, 2017). Dit zijn voorbeelden van de zogenaamde *indoor air pollution*.

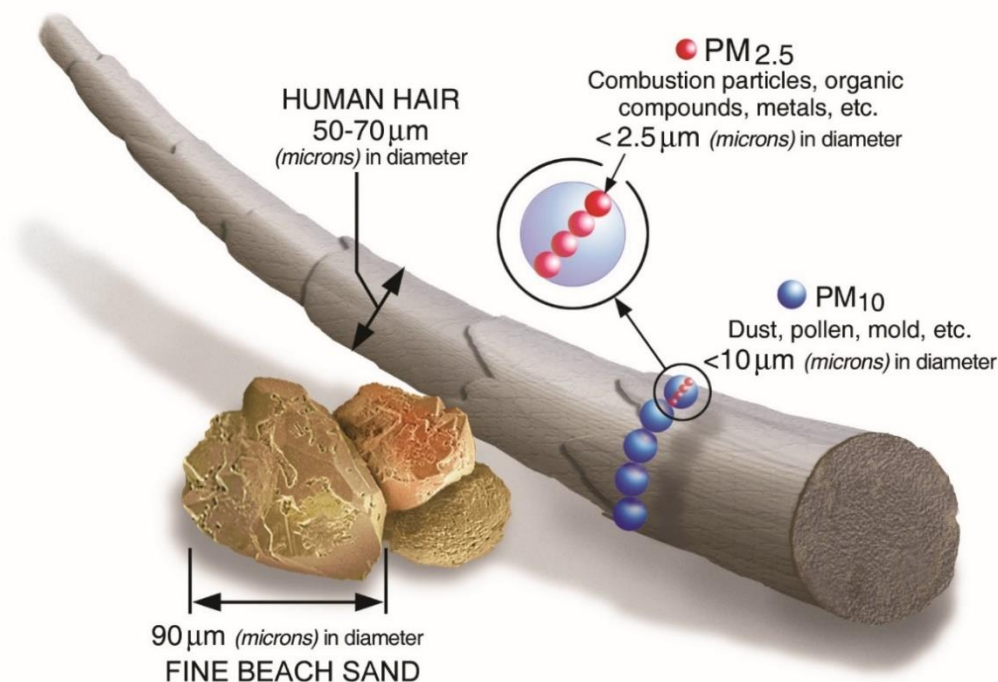
De belangrijkste polluenten, die het meeste bijdragen aan de luchtvervuiling, zijn fijnstof (*particulate matter*, PM), ozon (O₃), stikstofoxiden (NO_x), zwaveloxiden (SO_x), koolstofmonoxiden (CO) en VOC's (vluchtige organische componenten) (Almetwally et al., 2020; WHO, 2018). Figuur 1 geeft een overzicht van de voornaamste polluenten en de grootste bron van deze stoffen.



Figuur 1: Bronnen van luchtvervuiling. (1) Landbouw produceert ongeveer 90% van de ammoniak en methaan uitstoot. Beiden ook voorbeelden van luchtvervuiling. (2) Energieproductie en energieverdeling staat in voor ongeveer 60% van de SO_x-uitstoot. (3) Verschillende natuurlijke fenomenen, zoals vulkaanuitbarstingen en zandstormen, produceren luchtvervuilende stoffen, zoals fijnstof. (4) Koolmijnen, gastransport en zelfs vuilnisbelten behoren ook tot producenten van luchtvervuiling. (5 + 6) Verbranding van fossiele brandstoffen is ook een sleutelfactor in de luchtvervuiling. Wegtransport, huishouden, verwarming, publieke gebouwen, en andere zorgen voor ongeveer 40% van NO_x-uitstoot en PM_{2.5}-uitstoot (European Environment Agency, 2020b).

Fijnstof is een verzamelnaam voor kleine deeltjes (vast of vloeibaar) van uiteenlopende samenstelling en grootte (Almetwally et al., 2020; Vlaamse Overheid - Departement Omgeving, n.d.; WHO, 2018). Deze polluenten worden gevormd via natuurlijke processen, zoals vulkaanuitbarstingen, of via antropogene processen. Deze antropogene processen worden als primaire bron gezien. Verbrandingsprocessen in motoren, industrie en verwarmingsboilers zijn voorbeelden van deze antropogene processen (Almetwally et al., 2020; WHO, 2018). Maar ook bij de slijtage van banden, remmen en weginfrastructuur wordt fijnstof geproduceerd (Vlaamse Overheid - Departement Omgeving, n.d.). Daarnaast wordt fijnstof ook via chemische reacties tussen andere vervuilende stoffen gevormd zoals zwaveldioxyden en stikstofdioxyden. Dit vormt de secundaire bron voor fijnstof (Vlaamse Milieumaatschappij, 2020; Vlaamse Overheid - Departement Omgeving, n.d.).

Fijnstof zijn kleine deeltjes die ingedeeld worden op basis van de diameter van deze deeltjes (Figuur 2). Partikels met een diameter kleiner dan 10 micrometer (PM₁₀ of PM_{2.5}) worden gezien als het grootste gevaar voor de gezondheid aangezien deze tot diep in de longen getransporteerd kunnen worden (Almetwally et al., 2020; Vlaamse Overheid - Departement Omgeving, n.d.). De nog kleinere partikels (PM_{2.5}), kunnen zelfs de longblaasjes bereiken, waar ze in het bloed kunnen diffunderen. Eenmaal in het bloed kunnen deze partikels doorheen het volledige lichaam getransporteerd worden en verschillende problemen veroorzaken zoals cardiovasculaire, neuronale en immunologische ziektes.



Figuur 2: Verschillende groottes van fijnstof. Vergelijkende analyse van fijnstof ten opzichte van haar en zandkorrels (United States Environmental Protection Agency, 2020).

Stikstofoxiden (NO_x) is een verzamelnaam voor een andere, belangrijke groep van pollutanten. Deze groep bestaat uit zeven verschillende stoffen, waarvan stikstofmonoxide (NO) en stikstofdioxide (NO₂), de belangrijkste zijn. In de meeste gevallen wordt eerst het niet zo schadelijke NO uitgestoten, maar door oxidatie in de lucht ontstaat er NO₂ (Formule 1). Dit NO₂-gas is wel schadelijk voor de gezondheid (Vlaamse Milieumaatschappij, 2020). Een kwart van alle jaarlijkse astmagevallen bij kinderen zou te wijten zijn aan NO₂ (Almetwally et al., 2020).



Deze stoffen worden in kleine hoeveelheden geproduceerd bij, bijvoorbeeld, vulkaanuitbarstingen (Almetwally et al., 2020), maar opnieuw vormen antropogene processen de grootste bron. Zo worden stikstofoxiden ook geproduceerd bij verbrandingsprocessen, verwarming en energieopwekking, net zoals fijnstof (Almetwally et al., 2020; Vlaamse Milieumaatschappij, n.d.-a; Vlaamse Overheid - Departement Omgeving, n.d.). Vooral stikstofhoudende verbindingen, zoals steenkool of stookolie, produceren deze pollutanten. Daarnaast kunnen stikstofoxiden ook ontstaan in de verbrandingslucht zelf. Hier zal de hoge temperatuur voor dissociatie van stikstof en zuurstof zorgen waardoor NO_x gevormd wordt (Smet & Deboosere, 2007). Bovendien zijn stikstofoxiden voorlopers voor andere pollutanten. Zo kunnen ze onder invloed van UV-straling, omgevormd worden naar ozon (O₃) of, na reactie met ammoniak dat afkomstig is van de veeteelt, fijnstof vormen (Vlaamse Milieumaatschappij, 2020; WHO, 2018).

Een ander belangrijk gas dat bepalend is voor de luchtkwaliteit is CO₂. In tegenstelling tot NO₂ en fijnstof, wordt dit vaak niet gezien als een pollutant. CO₂ komt namelijk standaard voor in de lucht door de

uitademing van dieren (waaronder mensen), bosbranden en vulkanische activiteit. Antropogene bronnen van CO₂ zijn onder andere verbranding van fossiele brandstoffen, industrie en landbouw. Deze antropogene bronnen hebben de concentratie van CO₂ in de lucht verhoogd van 280 ppm pre-industrieel tot 416 ppm op 17 maart 2021 (NASA, 2021; Wigley, 1983). Deze verhoogde CO₂-concentratie in de lucht veroorzaakt een versterkt broeikaseffect (Anwar et al., 2019). CO₂ is voornamelijk gekend voor de bijdrage aan het broeikaseffect, maar verhoogde CO₂-concentraties kunnen ook een effect hebben op de menselijke gezondheid en productiviteit. Omdat mensen CO₂ uitademen is de concentratie hiervan hoger in de lucht binnenshuis dan buitenshuis. Een verhoogde CO₂-concentratie in de lucht veroorzaakt een daling van capaciteit om beslissingen te maken en concentratieproblemen, maar ook gezondheidsproblemen zoals hoofdpijn, vermoeidheid en ademhalingsproblemen (Erdmann & Apte, 2004; Norbäck & Nordström, 2008; Satish et al., 2012; Shendell, 2012). Ventilatie kan de concentratie van CO₂ binnenshuis verlagen (Mahyuddin & Awbi, 2012). De CO₂-concentratie wordt ook vaak gebruikt als indicator voor de aanwezigheid van andere pollutanten en de algemene luchtkwaliteit. Dit kan ook specifiek op scholen ingezet worden (Scheff et al., 2000). Zo kan de CO₂-concentratie ook gelinkt worden aan de verspreiding van COVID-19 doorheen de lucht, en kan er een slim ventilatiecontrolesysteem ingezet worden dat de CO₂-concentratie meet en zo het besmettingsrisico kan verlagen (Pang et al., 2021).

Onderzoek heeft meermaals aangetoond dat luchtvervuiling een grote impact heeft op de gezondheid. Hierdoor zijn er wetten en richtlijnen opgesteld om de luchtvervuiling in te perken. De Europese Unie stelt limietwaarden op voor de verschillende pollutanten. Deze limietwaarden zijn gebaseerd op de aanbevelingen van de Wereldgezondheidsorganisatie (WGO) die, op hun beurt, zich baseren op wetenschappelijk onderzoek (Vlaamse Milieumaatschappij, 2020). Echter, de limietwaarden van de Europese Unie zijn bindend, deze van de WGO zijn slechts aanbevelingen. De limiet- en advieswaarden worden voorgesteld in Tabel 1.

Tabel 1: Limiet- en advieswaarden (Vlaamse Milieumaatschappij, n.d.-a, n.d.-b).

	Limietwaarden ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ per jaar)	Overschrijding (EU-richtlijn)	Advieswaarden ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ per jaar)	Overschrijding (WGO)
PM ₁₀	40	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per dag; max. 35 dagen per jaar	20	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per dag; max. 3 dagen per jaar
PM _{2,5}	20	Geen data	10	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per dag; max. 3 dagen per jaar
NO ₂	40	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per uur; max. 18 dagen per jaar	40	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per uur; geen overschrijdingen

1.3 Link didactiek en luchtvervuiling

Omdat de leerlingen van nu de volwassenen van morgen zijn, vinden de auteurs het belangrijk om hen meer te laten nadenken over de luchtvervuiling en de luchtkwaliteit waarin zij leven en leren. Daarom is er besloten om een probleemgestuurd chemiepracticum op te stellen waarbij de leerlingen actief bezig zijn met het bepalen van luchtvervuiling.

Actuele informatie uit het (fake) nieuws zullen de leerlingen aanzetten om hun eigen onderzoek op te starten naar de luchtkwaliteit in hun omgeving. Ze worden uitgedaagd om zelf actie te ondernemen en zelf experimenten te bedenken. Enerzijds is het de bedoeling dat ze experimenten uitvoeren, anderzijds zullen ze dit kunnen vergelijken met real-time data en interactieve databanken over de luchtvervuiling.

1.4 Onderzoeksvraag

Deze masterproef zal proberen een antwoord te formuleren op de vraag:

“Hoe kunnen we, via een maatschappelijk probleem zoals luchtvervuiling, chemische practica opstellen die het kritisch denken (en de motivatie) van leerlingen van de 3^e graad ASO/TSO in de wetenschappelijke richtingen verhogen? Welke componenten van deze practica moeten aangepast worden om dit kritisch denken te verkrijgen?”

Hiervoor zijn er drie verschillende experimenten uitgewerkt die zich toespitsen op een van de vervuilende stoffen. Een eerste experiment concentreert zich op fijnstof en de detectie ervan. Een tweede experiment houdt zich bezig met stikstofdioxiden en het derde experiment met de analyse van koolstofdioxide.

1.5 Overzicht

Hoofdstuk 2 behandelt de gebruikte materialen – zoals glaswerk, apparatuur en chemische stoffen – en de toegepaste methodiek. In Resultaten (Hoofdstuk 3) wordt het gehele onderzoeksproces overlopen en worden de resultaten bediscussieerd in Discussie (Hoofdstuk 4). Hoofdstuk 2,3 en 4 zijn onderverdeeld per experiment. Ten slotte geeft de Conclusie (Hoofdstuk 5) een samenvatting van de bevindingen en een antwoord op de onderzoeksvraag. Bovendien is een leerkrachtenbundel (Appendix B:) voor elk experiment aanwezig in de bijlage.

2 Materiaal en methode

Dit hoofdstuk geeft de precieze opstellingen en materialen van de drie experimenten weer. Er wordt gestart met de toelichting van het fijnstof-experiment, gevolgd door het NO₂-experiment en het CO₂-experiment.

2.1 Zoekplan

Literatuur werd geraadpleegd om tot deze masterproef te komen. Daarbij is er gebruik gemaakt van de *Web of Science*-databank en *Pubmed*. Er is gezocht met de zoektermen 'air pollution' en 'air pollution AND health'. Dit resulteerde in een groot aantal papers. Op basis van titel en abstract werd er een eerste selectie gemaakt. Vervolgens werden de papers op basis van hun inleiding geselecteerd. Daarnaast zijn ook de website van de Belgische Overheid en Europa bezocht.

Om te achterhalen welke experimenten rond luchtvervuiling er al ontwikkeld zijn, is er gebruik gemaakt van de websites 'klascement.net' en 'chemieleerkacht'. Op deze laatste website is een STEM-project gevonden (Voets, n.d.) waarmee er verder nagedacht werd over mogelijke experimenten. Op basis van deze literatuurstudie werd ontdekt dat de meeste experimenten kwalitatief zijn. Deze masterproef probeert echter experimenten uit te werken om de luchtvervuiling te kunnen kwantificeren.

De algemene kennis voor de ontwikkeling van het fijnstof-experiment werd eerst verzameld op Google via de zoektermen 'fijnstof' en 'Particulate matter'. Vervolgens werd op Google ook gekeken naar detectiemethoden voor fijnstof aan de hand van 'Particulate matter detection methods'. De zoektocht over de gevonden inzichten werd verdergezet op PubMed en Google Scholar met behulp van de zoektermen 'TEOM', 'Quartz crystal microbalance', 'quartz crystal microbalance AND particulate matter' en 'Rochelle salt'. Deze artikels werden eerst geselecteerd op basis van titel en abstract en vervolgens op basis van de inleiding. Het uiteindelijke experiment werd gebaseerd op het principe van TEOM (Liu et al., 1980).

Met de zoekterm 'NO_x detection methods' werd er gezocht naar mogelijke experimenten om NO₂ te analyseren. Ook dit resulteerde in veel papers en opnieuw is er geselecteerd op basis van titel en abstract. Met behulp van de paper 'Electrochemical detection of NO_x gas ...' door Pungjunun et al. (2019), is men tot een spectrofotometrische methode gekomen (Passaretti Filho et al., 2015). Hierin werd het Griess-Saltzman reagens vermeld waarmee er verder werd gezocht om tot het uiteindelijke experiment te komen.

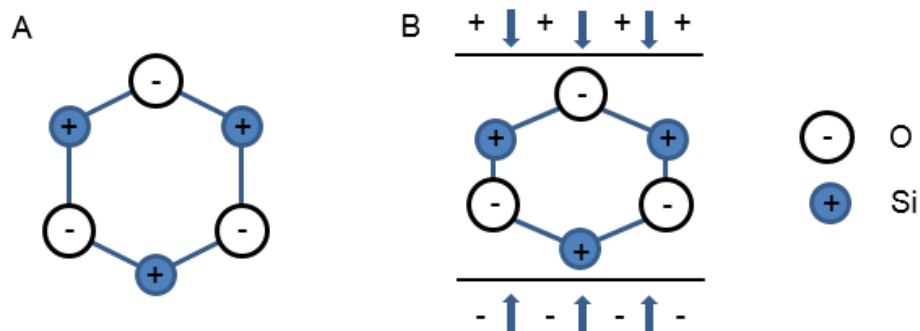
Voor het ontwerpen van het CO₂-experiment is er gezocht naar bestaande (leerlingen)experimenten rond CO₂. Hiervoor is er eerst gezocht op Google, om ook niet-wetenschappelijke bronnen te raadplegen, er werd een redelijk brede en algemene zoekterm gebruikt, namelijk 'experimenten CO₂'. Hierdoor kon er informatie opgedaan worden over de bestaande experimenten zodat er hierna gerichter gezocht kon worden. De leerlingenexperimenten die gevonden werden hadden als doel om de aanwezigheid van CO₂ aan te tonen, maar deze konden niet gebruikt worden om een kwantitatieve analyse te doen. Om een chemie-experiment te kunnen uitwerken waarbij CO₂ wel kwantitatief bepaald wordt, werd er gezocht op Google Scholar met de zoekterm 'quantifying CO₂ experiments'. Hier werd ten eerste een artikel gevonden over de kwantificatie van de 'vervuiling' van NaOH door CO₂ met behulp van een zuur-base titratie (Michalowski, 1988). Op dit principe werd het uitgewerkte leerlingenexperiment gebaseerd.

2.2 Fijnstof-experiment

2.2.1 Principe

Het fijnstof-experiment werd oorspronkelijk gebaseerd op de werking van een veelgebruikte fijnstofsensoren: de oscillerende balansmethode. Deze methode bestaat uit een glaselement waarop zich een filter bevindt. Het principe wordt ook wel *Tapered Element Oscillating Microbalance* (TEOM) genoemd en heeft detectielimiet van 5×10^{-8} g. Het glaselement oscilleert in een bepaalde frequentie. Wanneer een hoeveelheid stof op de filter belandt, treedt er een verandering in de trillingsfrequentie op. De grootte van de verandering van deze frequentie is een maat voor de hoeveelheid fijnstof op de filter en weerspiegelt de concentratie fijnstof in de lucht (Liu et al., 1980).

Naar het voorbeeld van de TEOM kunnen kristallen gemaakt worden die, op basis van het piëzo-elektrisch effect, een frequentie genereren. De mechanische stress op een piëzo-elektrisch kristal zorgt voor een verplaatsing van positieve en negatieve ladingen waardoor een elektrisch veld ontstaat (Figuur 3) evenredig met de mechanische stress. Deze stress wordt omgezet naar elektrische energie wat resulteert in een verandering in de frequentie van het oscillerende kristal (Dahiya & Valle, 2013).

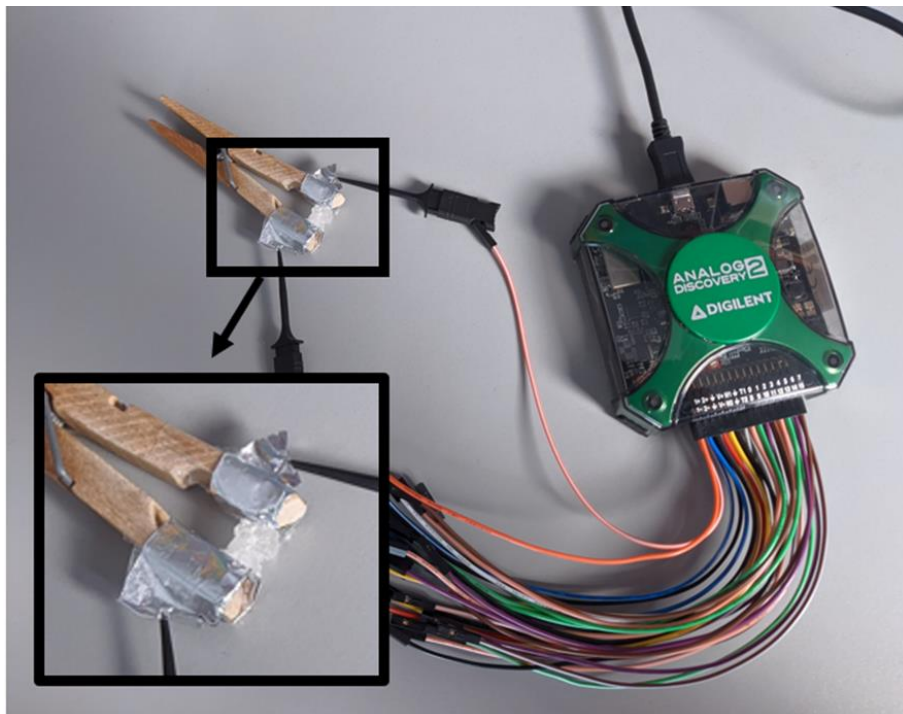


Figuur 3: Het piëzo-elektrisch effect in kwarts (SiO_2). A. De molecuulstructuur van kwarts zonder mechanische stress. B. De molecuulstructuur van kwarts met mechanische stress voorgesteld door de pijlen zorgt voor een verplaatsing van de atomen met een elektrisch veld als gevolg; (aangepast van: "Piezoelectric effect" 2009).

Dit piëzo-elektrisch effect is te wijten aan de specifieke molecuulstructuur (geen symmetriecentrum) die zich voordoet in bepaalde stoffen zoals kwarts (kristallijn siliciumdioxide) (Burke, 1989). Hoewel dit van nature aanwezig is in kwarts, kan het ook kunstmatig aangebracht worden in gefabriceerde kristallen zoals Rochellezout, ook wel Seignettezout of kaliumnatriumtartraat genoemd, en keramische materialen (Rathod, 2020). Het is eigen aan deze stoffen om te oscilleren bij een bepaalde frequentie wanneer deze met metaalelektroden onder spanning worden gezet. Als er iets op het kristal valt, deformeert dit kristal waardoor er een spanningsverschil ontstaat. Op die manier zou fijnstof gedetecteerd kunnen worden.

2.2.2 Materialen en methoden

De vorming van het Rochellezoutkristal is gebaseerd op het protocol ontwikkeld door Heeter et al. (2016). Het kristal werd gemaakt door een oplossing van kaliumbitartraat ($KC_4H_5O_6$, 200 g; Acros Organics, 99%) in gedestilleerd water (250 ml) met een bunsenbrander en driepikkel au bain-marie te verwarmen tot 80-82°C. Vervolgens werd 2 g natriumcarbonaat (Na_2CO_3 ; VWR BDH Chemicals) toegevoegd waardoor het mengsel bruiste. Nadat het mengsel stopte met bruisen, werd opnieuw 2 g natriumcarbonaat toegevoegd. Dit proces werd herhaald totdat het mengsel helder was en niet meer bruiste (ongeveer 66 g). Nadat de niet-opgeloste zouten uit het mengsel werden gefilterd, werd het filtraat overgebracht in een plastic bak voor overnachting op kamertemperatuur. De gevormde Rochellezoutkristallen werden geselecteerd op basis van helderheid, gladheid en rechthoekige vorm voor verder onderzoek. Er werd geen rekening gehouden met de grootte van de kristallen bij de selectie. Hierna werden de kristallen met behulp van een klem (bijvoorbeeld een wasknijper omwikkeld met aluminiumfolie) per afzonderlijke meting in verschillende oriëntaties verbonden met de Analog Discovery 2 – oscilloscoop (Digilent) (Figuur 4) De software die hierbij gebruikt werd is WaveForms (versie 3.14.3). De data werd uitgelezen met een computer. Het gedetailleerde protocol is terug te vinden in de leerkrachtenbundel (Appendix B:).



Figuur 4: Aansluiting kristal aan Analog Discovery 2 – oscilloscoop (Digilent).

2.3 NO₂-experiment

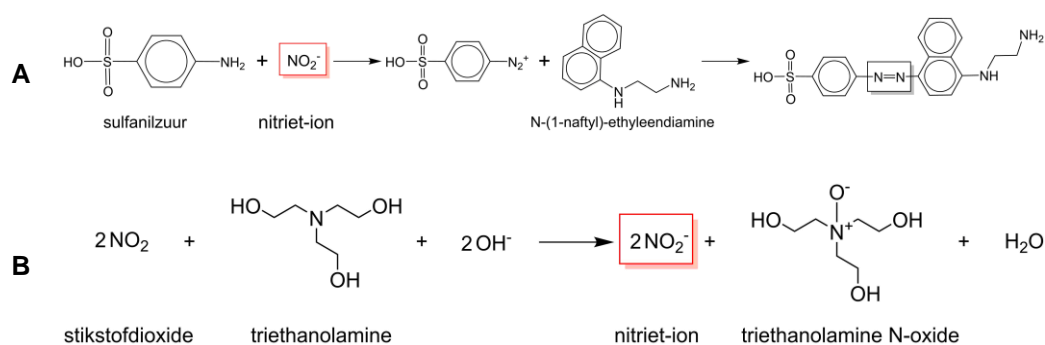
2.3.1 Principe

Er zijn al een aantal experimenten om stikstofoxiden te bepalen uitgewerkt voor het secundair onderwijs. Zo kan men ijzersulfaat gebruiken om stikstofmonoxide (NO) aan te tonen (Voets, n.d.). Maar dit experiment toont de aanwezigheid van stikstof kwalitatief aan: zodra er een stikstofverbinding (zoals NO) aanwezig is, zal dit door het ijzer gereduceerd worden en er ontstaat dan een bruine sulfaatverbinding (Voets, n.d.). Deze masterproef probeert echter een experiment uit te werken om de concentratie van stikstofoxiden, meer specifiek stikstofdioxiden (NO₂), kwantitatief te bepalen. Een mogelijkheid is het gebruik van een Griess-Saltzman (GS) reagens, voor het eerst ontwikkeld door J.P. Griess in 1879 (Moorcroft et al., 2001; Saltzman, 1954).

Het GS-reagens is een oplossing bestaande uit sulfanilzuur en N-(1-naftyl)-ethyleendiamine (NEDA). Wanneer NO₂ direct geabsorbeerd wordt in dit reagens, ondergaat het de volgende reactie (Huygen & Steerman, 1971):



De gevormde nitrietionen (NO₂⁻), reageren dan eerst met sulfanilzuur ter vorming van een diazoniumzout, gevolgd door een reactie met NEDA ter vorming van een azo-kleurstof (Figuur 5A). Door de lichtabsorptie te bepalen (bij 550 nm) en deze te vergelijken met een kalibratiecurve van natriumnitriet (NaNO₂), kan men de concentratie aan NO₂ colorimetrisch bepalen: hoe meer NO₂ aanwezig is, hoe meer paars de oplossing gekleurd zal zijn. Maar er kunnen moleculen in competitie treden met NO₂ om te reageren met OH⁻. Deze kunnen de conversiefactor NO₂:NO₂⁻ veranderen. Om dit te vermijden, kan triethanolamine (TEA) gebruikt worden als absorptievloeistof. Volgens de literatuur is dit een molecule dat specifiek bindt aan NO₂ en het omzet naar nitrieten in een 1:1-verhouding (Cape, 2009; Huygen & Steerman, 1971). De gevormde nitrietionen reageren dan zoals in Figuur 5A. De voorgestelde reactievergelijking is terug te vinden in Figuur 5B (Glasius et al., 1999).



Figuur 5: (A) NO₂ colorimetrische reactie. Reactie tussen het nitriet (rood omkaderd) met het sulfanilzuur gevolgd door een reactie met N-(1-naftyl)-ethyleendiamine (NEDA). Er wordt een azoverbinding gevormd dat een paarse kleur zal geven (zwart omkaderd). (B) Absorptie van NO₂ door triethanolamine (TEA) ter vorming van nitrietionen (rood omkaderd). Deze nitrietionen reageren dan met het GS-reagens zoals in figuur 5A.

Omdat de kans bestaat dat secundaire scholen niet over een spectrofotometer beschikken, is er ook onderzocht of een smartphone (met een app, zoals *ColorMeter Free*, Android) een goedkoop alternatief kan zijn. Volgens Kuntzleman and Jacobson (2016) kan een smartphone gebruikt worden als een kostenefficiënt alternatief. Men moet enkel rekening houden met twee zaken: een kleurenwiel en het staal zelf. Het 'zien van kleuren' is een interpretatie van de ogen: lichtgolven worden weerkaatst door voorwerpen en afhankelijk van de golflengte wordt er een andere kleur waargenomen. Aangezien de stalen paarsgekleurd zijn, betekent dit dat ze de 'groene' golven het beste absorberen (op basis van het kleurenwiel en complementariteit). Door een groene achtergrond wordt er een beter contrast gevormd zodat de app de optimale RGB-waarden (rood, groen, blauw) kan detecteren. Hoe meer paars het staal,

hoe meer groene golven geabsorbeerd worden en hoe lager de G-waarden zullen zijn. Door deze G-waarden te vergelijken met de G-waarden van een blanco-staal (water) en deze in te vullen in de wet van Lambert-Beer (Formule 3), kan men de absorptie bekomen.

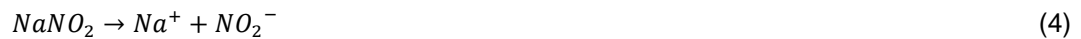
$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3)$$

Met: A de absorptie;
 I de G-waarde van het te analyseren staal;
 I_0 de G-waarde van het blanco staal.

2.3.2 Materialen

Natriumnitriet (NaNO₂) oplossing

Een NaNO₂-stockoplossing (3 g/l) werd gemaakt door 0,3 g NaNO₂ (VWR, ≥ 99%) af te wegen en aan te lengen met 100 ml demi-water. Nadien werd deze stockoplossing verder verdund tot een standaardoplossing (0,03 g/l) door 0,1 ml stockoplossing aan te lengen met 9,9 ml demi-water. Het natriumnitriet dissocieert in demi-water volgens de volgende reactievergelijking:



Het Griess-Saltzman (GS) reagens

Een 1 g/l NEDA-oplossing werd bereid door 0,1 g NEDA (Acros, +98%) af te wegen en aan te lengen met 100 ml demi-water. Een tweede oplossing werd bereid door 0,5 g sulfanilzuur (Merck, ≥ 99%) toe te voegen aan 14,1 ml azijnzuur (VWR Chemicals, ≥ 99%), en 75,4 ml demi-water. Vervolgens werd 2,04 ml van de NEDA-oplossing aan deze oplossing toegevoegd. Als laatste werd het volume met demi-water aangelengd tot 100 ml. Dit GS-reagens werd gewikkeld in aluminiumfolie om te beschermen tegen het licht. Het reagens werd verder gebruikt in de verdunningsreeks en het experiment.

De triethanolamine (TEA) oplossing

Een TEA-oplossing werd gemaakt met een 3,6 molratio (eindvolume van 20 ml): 13,5 ml TEA aanlengen met 6,5 ml water.

2.3.3 Methoden

Vorming van NO₂

De NO₂-concentratie rechtstreeks uit de lucht bepalen is moeilijk omdat dit gas, in normale omstandigheden, slechts in lage concentraties aanwezig is (Almetwally et al., 2020). Om dit probleem te vermijden kan een gekende NO₂-bron gebruikt worden en op die manier kan de emissie van deze bron bepaald worden. Aangezien NO₂ gevormd wordt uit de reactie tussen NO en O₂, moet men een verbranding van stikstofhoudende bronnen uitvoeren.

Een eerste optie is om de uitlaatgassen van een wagen te gebruiken. Hierbij zou een wagen direct verbonden worden met de opstelling (Figuur S1A). Dit is echter een omslachtige opstelling om te gebruiken op scholen. Deze opstelling zou men wel kunnen verkleinen door de uitlaatgassen te verzamelen met een ballon en de inhoud nadien in de klas te analyseren.

Een tweede optie is het gebruik van onbehandeld hout aangezien bij houtverbranding ook NO wordt vrijgezet dat dan verder oxideert tot NO₂ (Schmidl et al., 2011). Hierbij is het type hout dat gebruikt wordt bepalend voor de uitstoot (Schmidl et al., 2011). De opstelling voor houtverbranding is minder omslachtig om op te bouwen in scholen (Figuur S1B).

Een derde optie is het gebruik van een sigaret. Bij het roken van een sigaret komen er veel dampen vrij die onder andere ook NO bevat. Bovendien is de opstelling met een sigaret de meest eenvoudige opstelling van de drie (Figuur S1C). Daarom is er ook gekozen om een experiment uit te werken met een sigaret als NO₂-bron.

Opstellen van een kalibratiecurve

De NaNO₂-standaardoplossing (0,03 g/l) werd gebruikt om een verdunningsreeks van NaNO₂ op te stellen. Het GS-reagens werd gebruikt als oplosmiddel. De verdunningsreeks bestond uit zeven stalen met de volgende concentraties (eindvolume 10 ml): 0,000; 0,075; 0,150; 0,300; 0,600; 1,20 en 2,40 mg/l NO₂⁻. De kleur werd gevormd door de zeven stalen gedurende 10 min. te laten staan, beschermd van het licht met aluminiumfolie.

Opname van NO₂ geproduceerd door de sigaret

Austin Red-sigaretten werden gebruikt om NO₂ te produceren. Hiervoor werd de sigaret verbonden met een vacuüm-systeem om de gasen richting wasflessen aan te zuigen. Aan de eerste wasfles werd 20 ml van GS-reagens (samenstelling zoals beschreven) toegevoegd. Tussen deze wasfles en de sigaret werd er een extra tussenstuk gezet (Figuur 6). Dit tussenstuk werd voor ongeveer de helft gevuld met actieve kool (Alfa Aesar, Norit GSX), op positie gehouden met watjes. Op die manier werden andere, grotere pollutanten verzameld en interferentie vermeden. Het vacuüm werd zo geregeld dat er een rustige gasstroom was en de sigaretten werden opgebrand tot aan de filter. Nadien werd er een staal genomen van de eerste wasfles en overgezet in een cuvet. Het staal werd steeds genomen wanneer de sigaret volledig opgebrand was. Deze werd zowel met een spectrofotometer als met de app geanalyseerd. In totaal werd het experiment tweemaal uitgevoerd met één sigaret en tweemaal uitgevoerd met drie sigaretten. Bij het gebruiken van drie sigaretten werden deze opeenvolgend maar beurtelings opgebrand, waarna de metingen gedaan werden.



Figuur 6: Opstelling van het experiment om NO₂ te verzamelen, geproduceerd door een sigaret. De actieve kool (omcirkeld) werd tussen de sigaret en eerste wasfles geplaatst. In deze wasfles werd vervolgens 20 ml van GS-reagens geplaatst (zie pijl).

Colorimetrische analyse met behulp van spectrofotometrie en de app ColorMeter Free

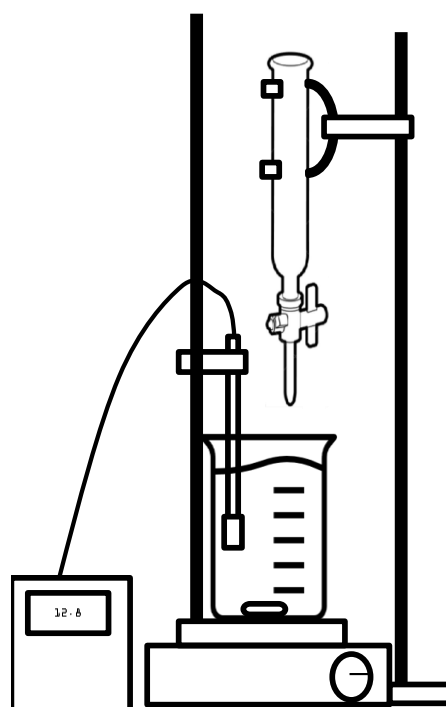
De absorptie van de stalen werd gemeten bij een golflengte van 550 nm met een spectrofotometer (Genesys 10S Vis Spectrofotometer) en met een app (*ColorMeter Free*, Android). Demi-water werd gebruikt als blanco-staal. Om de absorptie met de app te kunnen meten, werd een opstelling gebouwd zoals in Figuur 7. De smartphone (Samsung Galaxy S9, rear camera, 12 megapixels) werd een centimeter van de opstelling gehouden en de RGB-waarden van zowel het blanco-staal, verdunningsreeks als sigaretstaal werden genoteerd. De G-waarden (van de RGB-waarden) werden ingevuld in de formule van Lambert-Beer en vergeleken met het blanco-staal.



Figuur 7: De gebruikte opstelling om de absorptie te bepalen met behulp van de app ColorMeter Free.

2.4 CO₂-experiment

2.4.1 Principe



Figuur 8: Foto (links) en schematische weergave (rechts) van de opstelling van het CO₂-experiment.

Het principe van het CO₂-experiment begon met een zoektocht naar manieren om op een kwantitatieve manier de hoeveelheid CO₂ in de lucht te bepalen. Een leerlingenexperiment voor het aantonen van de aanwezigheid van CO₂ kan snel teruggevonden worden op het internet (UCLL, n.d.). De kwantificering van deze CO₂-hoeveelheid komt echter niet voor in de leerlingenexperimenten. Omwille van de complexiteit en de uitdaging in de dataverwerking vormt dit toch een mooie toevoeging, zeker voor leerlingen in een wetenschappelijke studierichting in de derde graad.

In de literatuur werd er gevonden dat de kwantificering van CO₂ in de lucht mogelijk is met behulp van een reactie met NaOH. CO₂ kan reageren met NaOH (Formule 5) waarbij er uiteindelijk natriumcarbonaat gevormd wordt (Na₂CO₃).



In oplossing, dissocieert dit natriumcarbonaat in natriumionen (Na^+) en carbonaationen (CO_3^{2-}), zoals in Formule 6. Dus de hoeveelheid CO_2 in de lucht is omgezet naar CO_3^{2-} .

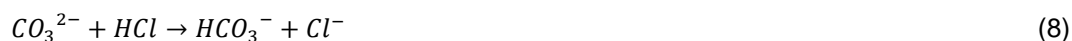


Maar er worden ook waterstofcarbonaten (HCO_3^-) gevormd. Er ontstaat dus een mengsel van NaOH , Na_2CO_3 en NaHCO_3 . In oplossing zijn dit Na^+ , OH^- , waterstofcarbonaten (HCO_3^-) en carbonaten (CO_3^{2-}). Dit mengsel kan getitreerd worden met een sterk zuur, zoals HCl , om zo de concentratie van CO_2 te berekenen (Crossno et al., 1996; Michalowski, 1988). Deze hoeveelheid kan vervolgens gekoppeld worden aan de CO_2 -concentratie in de lucht.

Tijdens de titratie zijn er drie equivalentiepunten, waarbij het tweede en derde equivalentiepunt de belangrijkste zijn. Bij het eerste equivalentiepunt zal de sterkste base, OH^- in dit geval, reageren ter vorming van water en zout (Formule 7). Het NaOH dat niet gereageerd heeft met CO_2 , zal nu geneutraliseerd zijn en zal niet meer aanwezig zijn in het mengsel. Dit zou bij een pH van 11 moeten gebeuren.



Bij verdere titratie zal het CO_3^{2-} geprotoneerd worden tot HCO_3^- (Formule 8). Dit zou rond een pH van 8 moeten gebeuren. Bij deze pH-waarde zouden alle carbonaten geprotoneerd moeten zijn tot waterstofcarbonaat. Dit kan gevolgd worden met behulp van een indicator zoals fenolftaleïne. Hiervoor wordt een bepaalde hoeveelheid ($V_{\text{EP}2}$) zuur (HCl) gebruikt.



Als er nog verder getitreerd wordt, dan zullen de waterstofcarbonaten nogmaals geprotoneerd worden ter vorming van diwaterstofcarbonaten (H_2CO_3 , Formule 9). Dit zou rond een pH van 4 moeten gebeuren. Bij deze pH zouden alle waterstofcarbonaten geprotoneerd moeten zijn tot diwaterstofcarbonaten. Dit kan ook gevolgd worden met een indicator zoals methyloranje. Hiervoor wordt opnieuw een bepaald volume zuur gebruikt ($V_{\text{EP}3}$).

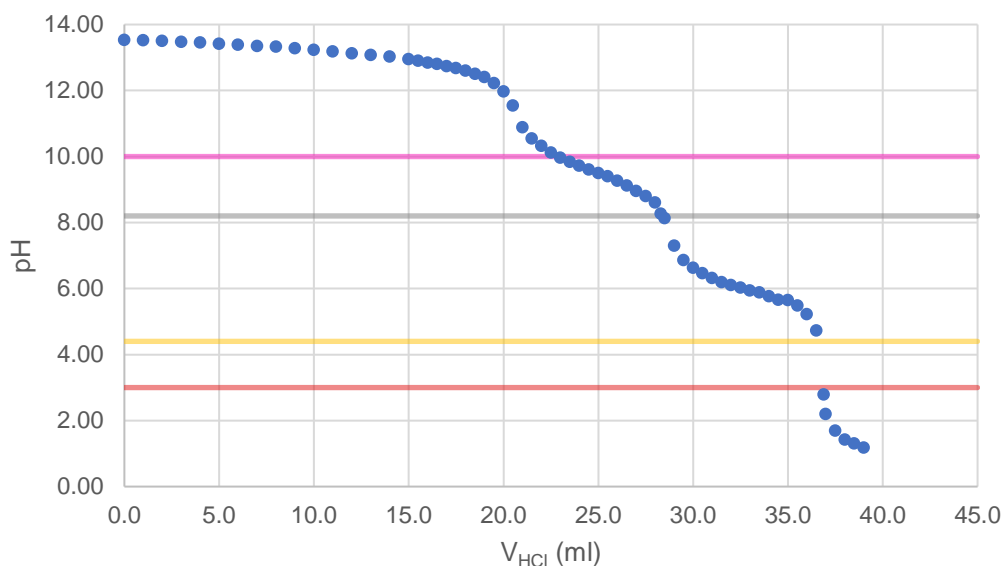


Samenvattend zal dus eerst NaOH geneutraliseerd worden, gevolgd door protonatie van alle carbonaten (CO_3^{2-}) bij een bepaald volume HCl . Uiteindelijk zullen deze geprotoneerde carbonaten (waterstofcarbonaten, HCO_3^-) verder geprotoneerd worden tot diwaterstofcarbonaten (H_2CO_3) bij een ander volume HCl . Door het volumeverschil ($V_{\text{EP}3} - V_{\text{EP}2}$) te nemen, kan men dan de hoeveelheid CO_2 bepalen en koppelen aan de CO_2 -concentratie in de lucht.

2.4.2 Materialen

Uit theoretische berekeningen is gebleken dat er 416 l lucht zou moeten reageren met 25 ml NaOH om de titratie uit te voeren. Een experimentele opstelling waarbij een hoeveelheid lucht van deze grootte zou kunnen reageren met de NaOH -oplossing is te complex om uit te werken op een secundaire school. Daarom is er besloten om CO_2 in de vorm van droogijs te gebruiken.

Per titratie werd 25 ml van een 1,6 M NaOH -oplossing (VWR Chemicals, $\geq 99\%$) gebruikt waaraan 0,367 g CO_2 werd toegevoegd in de vorm van droogijs. De titrant was een 1 M HCl -oplossing (Fisher Scientific, 99%). Deze concentraties en hoeveelheden werden gekozen op basis van simulaties: bij deze waarden zou de pH-curve namelijk duidelijke equivalentiepunten vertonen. Om onderlinge variaties te vermijden, kan er gekozen worden om een grotere hoeveelheid voor te bereiden en deze daarna te doseren met behulp van een 25 ml volumepipet.



Figuur 9: pH-curve van Titratie 3.

De bepaling van de twee relevante equivalentiepunten (eerder besproken) kan gebeuren aan de hand van indicatoren of door analyse van de pH-curve. Als indicatoren werden fenolftaleïne en methyloranje gebruikt. Fenolftaleïne heeft een omslaggebied tussen pH-waarden van 8,2 en 10, en staat toe om het tweede equivalentiepunt te observeren. Voor het derde equivalentiepunt zijn er twee indicatoren mogelijk met een gelijkaardig omslaggebied, namelijk broomcresolgroen (pH 3,0-4,6) en methyloranje (pH 3,0-4,4). Tijdens deze experimenten werd methyloranje gebruikt, omdat dit beschikbaar was. Figuur 9 geeft een voorbeeld van zo een pH-curve, inclusief aanduiding van de grenzen van het omslaggebied van de gebruikte indicatoren.

2.4.3 Methoden

In eerste instantie werd via simulaties de haalbaarheid van het experiment theoretisch bepaald, uitgaande van concentraties gevonden in de literatuur (Crossno et al., 1996). Deze simulaties gebeurden met CurTiPot (versie 4.3.1), een *macro-enabled* werkblad dat door dr. Ivano Gebhardt Rolf Gutz aan de Instituto de Química – Universidade de São Paulo is ontwikkeld (Gutz, 2021). Vervolgens werd de haalbaarheid in de praktijk getest, alvorens de reproductiviteit te bestuderen. Ten slotte werd er gevarieerd met CO₂-concentraties om de invloed hiervan op de pH-curve te kunnen bepalen.

Titratie

De titratie zelf werd uitgevoerd door gebruik te maken van een standaard titratie-opstelling: een buret van 50 ml met daaronder een maatbeker. Bij iedere titratie werd de maatbeker gevuld met een NaOH-oplossing en CO₂ in de vorm van droogijs. Vervolgens werden enkele druppels fenolftaleïne toegevoegd. De kleur van fenolftaleïne zal omslaan van roze, in een basische omgeving, naar kleurloos in een zure omgeving, dit gebeurt bij het tweede equivalentiepunt (rond 8,5 - 10). Bij zeer hoge pH-waarden, in een sterk basische omgeving, is fenolftaleïne echter ook zeer lichtroze, tot zelfs kleurloos waardoor de oplossing aan het begin van de titratie eerst van (bijna) kleurloos naar roze gaat veranderen (McBain, 1912). Na het bereiken van dit tweede equivalentiepunt is de oplossing kleurloos. Hierdoor werd er een andere kleurindicator toegevoegd om het volgende equivalentiepunt te kunnen observeren. Voor de detectie van dit laatste equivalentiepunt werd methyloranje toegevoegd dat verkleurt van geeloranje naar rood bij een pH van 3 - 4,4. Een pH-meter werd gebruikt om een pH-curve te kunnen opstellen. Bij iedere titratie werd een HCl-oplossing gebruikt als titrant.

Het spreekt voor zich dat meer meetpunten gebruiken, om de pH-curve op te stellen, de nauwkeurigheid van de analyse zal verhogen. Voor de eerste 15 ml van titrant werd er om de 1 ml een meetpunt genoteerd. Nadien werd er in stappen van 0,5 ml gewerkt om de equivalentiepunten nauwkeuriger te kunnen observeren. Het uitzetten van de pH-curve en de wiskundige analyse gebeurde met behulp van een spreadsheetprogramma, zoals Microsoft Excel. Deze wiskundige analyse is terug te vinden in de sectie 'Berekeningen'.

In totaal werden twee sets van titraties uitgevoerd met steeds drie herhalingen om een gemiddelde te kunnen nemen. Een eerste set bestond uit vijf titraties om de theoretische waarden, gevonden met de simulatie, te testen. Daarnaast werd deze set ook gebruikt om het experiment zelf te optimaliseren. Een tweede set bestond uit drie titraties om de reproduceerbaarheid van het experiment te bepalen. Hierbij werden er andere hoeveelheden CO₂ gebruikt: 0,149 g, 0,297g en 0,446 g.

Berekeningen

Om de CO₂-concentratie te kunnen bepalen, moet eerst het volume toegevoegd zuur bepaald worden. Dit kan door de volumes bij de kleuromslag te gebruiken (indicatormethode), of via een wiskundige analyse van de bekomen pH-curve. Deze wiskundige analyse kan op twee manieren: enerzijds via een numerieke afleiding, anderzijds via een curvefitting. Beide wiskundige methodes worden hier verder toegelicht. Vervolgens wordt de bepaling van de CO₂-massa besproken alsook de relatieve fout van de titratie.

Numerieke afleiding

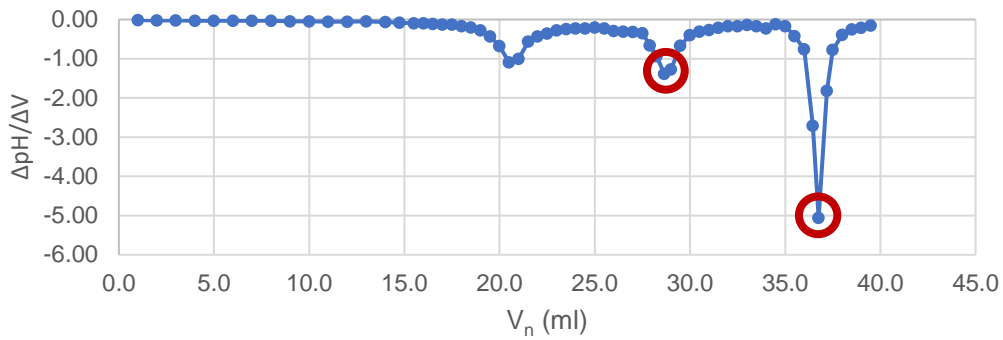
De numerieke afleiding gebeurt via een centrale of tweezijdige differentie, aangegeven met Formule 11. Dit wordt een eerste maal toegepast op de pH-curve om de eerste afgeleide te verkrijgen. Vervolgens wordt de tweede afgeleide bepaald door Formule 12 te gebruiken.

$$V_{gem,n} = \frac{V_{n+1} + V_{n-1}}{2} \quad (10)$$

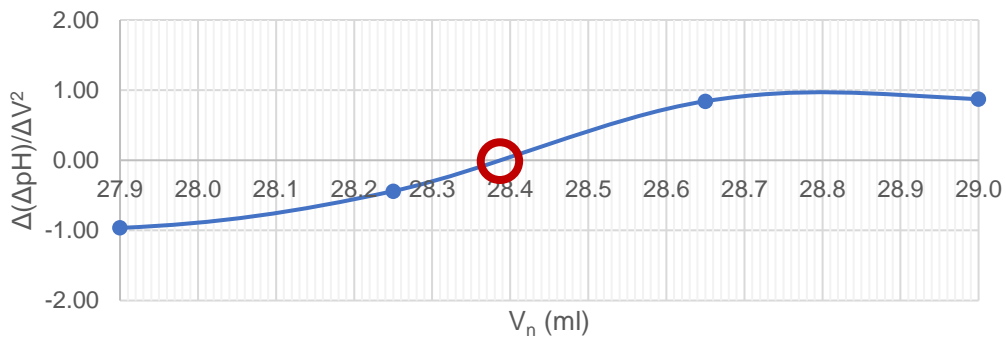
$$\left(\frac{\Delta pH}{\Delta V}\right)_n = \frac{pH_{n+1} - pH_{n-1}}{V_{n+1} - V_{n-1}} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\Delta(\Delta pH)}{\Delta V^2}\right)_n = \frac{\Delta pH_{n+1} - \Delta pH_{n-1}}{V_{gem,n+1} - V_{gem,n-1}} \quad (12)$$

Deze eerste en tweede afgeleiden worden vervolgens uitgezet in functie van het gemiddelde volume, berekend volgens Formule 10. Figuur 10 geeft de curve voor de eerstegraadsafgeleide weer. De rood omcirkelde uitschieters geven aan waar het tweede en het derde equivalentiepunt zich bevinden. Vervolgens toont Figuur 11 de tweedegraadsafgeleide, uitvergroot rond het tweede equivalentiepunt. Op grafische wijze kan nu het toegevoegd volume zuur bepaald worden door het snijpunt met de y-as te vinden. Op een analoge wijze kan het volume voor het derde equivalentiepunt bepaald worden.



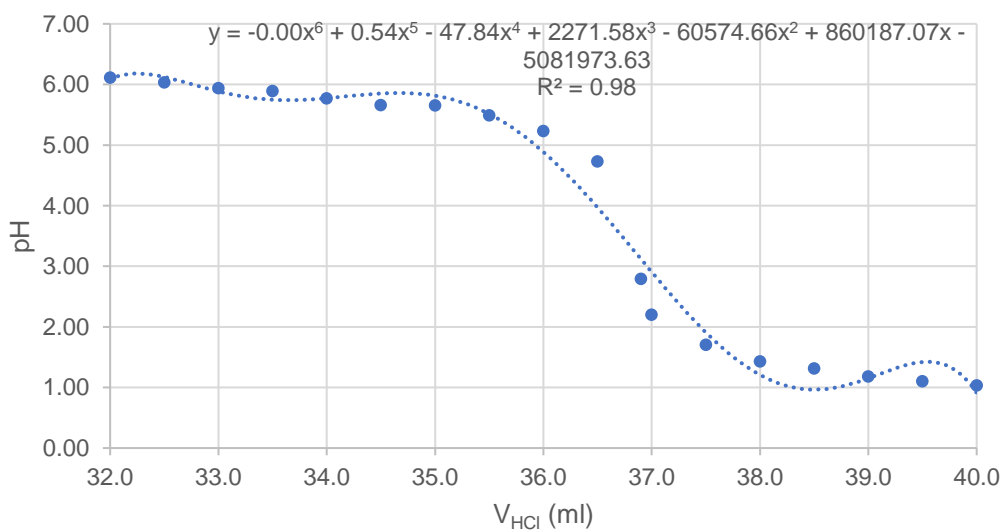
Figuur 10: Curve van de eerstegraadsafgeleide van Titratie 3.



Figuur 11: Curve van de tweedegraadsafgeleide van Titratie 3 rond het tweede equivalentiepoint.

Curvefitting

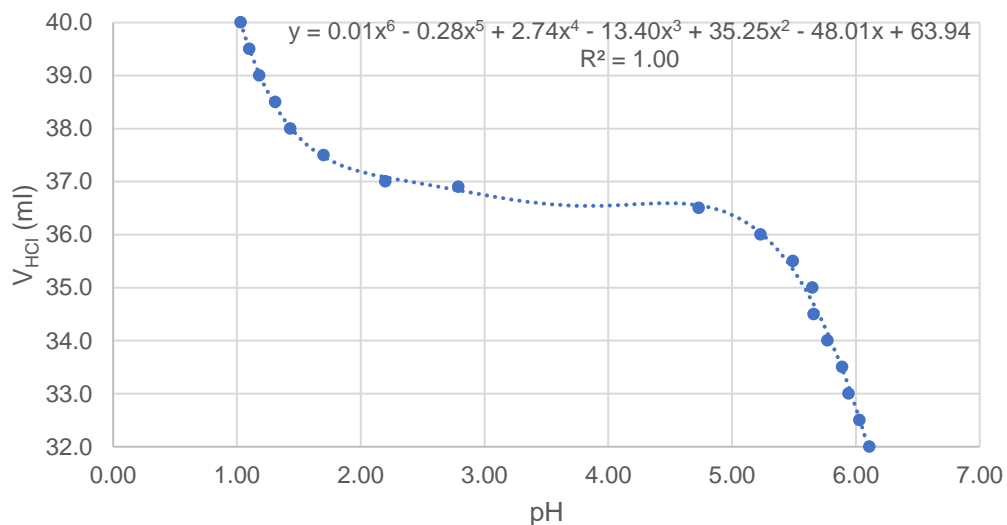
Deze methode vereist een functievoorschrift. Om deze methode eenvoudiger te laten verlopen, worden enkele meetpunten rond het te onderzoeken equivalentiepoint gebruikt. Hierdoor wordt de dataset beperkter. Met behulp van de automatische trendlijn in Microsoft Excel kan nu het functievoorschrift bepaald worden. Hiervan wordt de graad aangepast totdat de hoogste R^2 -waarde bereikt is.



Figuur 12: Curvefitting van de beperkte dataset rond equivalentiepoint drie van Titratie 3.

Op Figuur 12 wordt de curvefitting-methode, ter illustratie, toegepast op het derde equivalentiepunt. Het is visueel zichtbaar dat de trendlijn de datapunten niet optimaal volgt, hoewel de R^2 -waarde dit niet kan bevestigen. De R^2 -waarde, of determinatiecoëfficiënt, geeft aan hoe sterk de variantie in de afhankelijke variabele verklaard kan worden door de onafhankelijke variabele. Dit is een getal tussen 0 en 1: hoe dichter bij 1, hoe beter deze verklaring is.

Door de x- en y-as om te wisselen, worden deze datapunten wel beter gevolgd. Dit is ook zichtbaar aan de R^2 -waarde: deze is nu nagenoeg 1,00 (Figuur 13). Het functievoorschrift wordt nu tweemaal afgeleid naar x, om dan gelijkgesteld en opgelost te worden naar x. Deze x-waarde komt overeen met de pH-waarde en kan ingevuld worden in het functievoorschrift om het bijbehorende volume te bepalen.



Figuur 13: Curvefitting van de beperkte dataset rond equivalentiepunt drie van Titratie 3, na $y=x$.

Bepaling CO_2 -massa

Via de indicatormethode of de wiskundige analyse, worden de volumes toegevoegd zuur (HCl) bekomen. Aangezien er twee belangrijke equivalentiepunten zijn (het tweede en derde), moet het volumeverschil tussen beide punten gebruikt worden. Door de formule van chemische hoeveelheid (Formule 13) en molaire concentratie (Formule 14) te combineren, wordt Formule 15 bekomen. Door nu het volumeverschil ΔV van HCl (tussen beide equivalentiepunten) in deze formule in te vullen, kan de CO_2 -massa bepaald worden. Eventuele foutpercentages kunnen bepaald worden door een verhouding te nemen tussen het verschil van de gevonden en de origineel toegevoegde CO_2 -massa's en de toegevoegde massa's, of kortweg de relatieve fout. Dit wordt toegepast om na te gaan of het experiment wel degelijk geschikt is om CO_2 -massa te bepalen. Hoe kleiner het foutpercentage, hoe beter het experiment werkt.

$$n_B = \frac{m_B}{M_B} \quad (13)$$

$$c_B = \frac{n_B}{V_{\text{opt.}}} \quad (14)$$

$$m_{\text{CO}_2} = c_{\text{HCl}} \cdot \Delta V \cdot M_{\text{CO}_2} \quad (15)$$

3 Resultaten

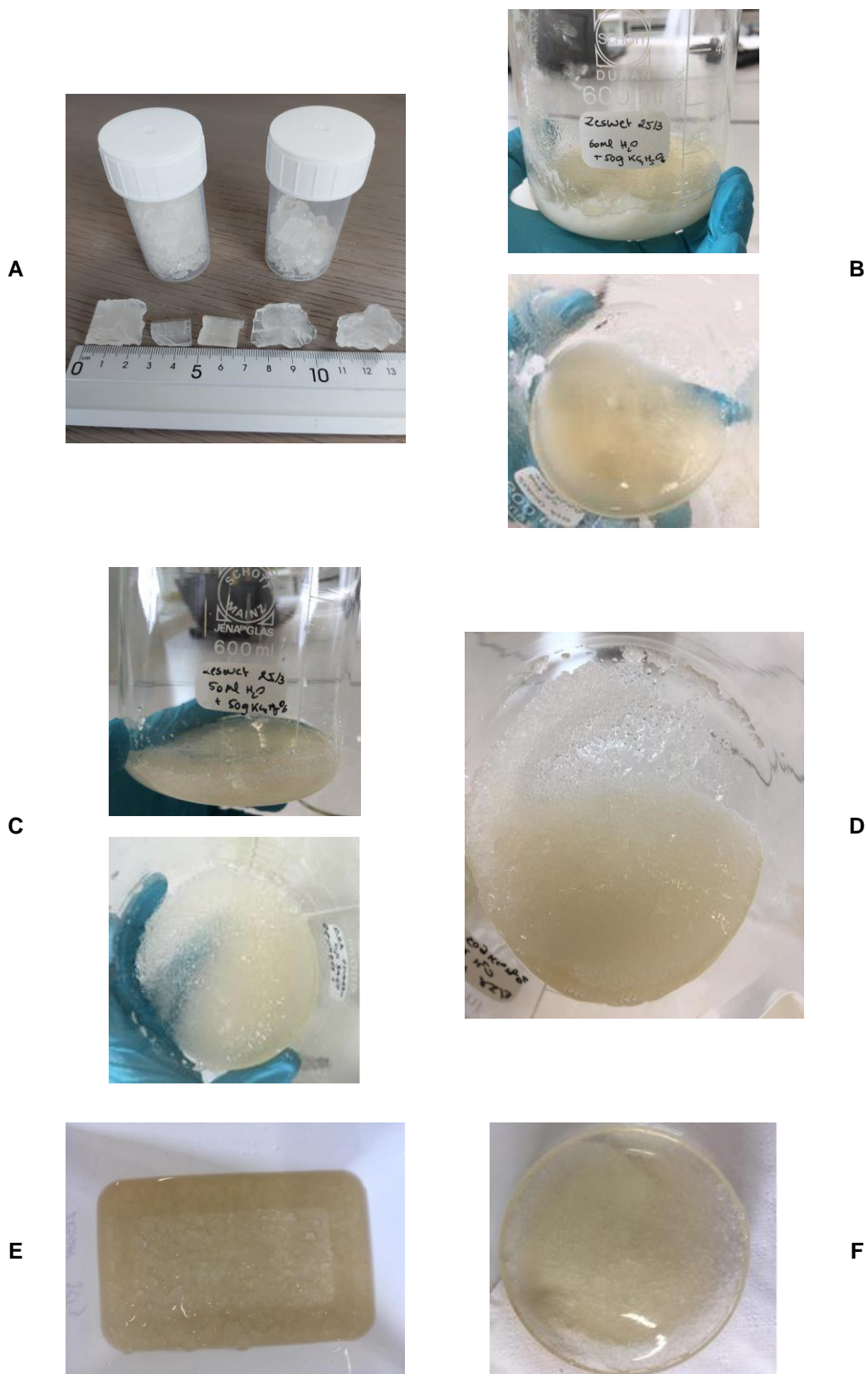
Dit hoofdstuk bestaat uit het volledige optimalisatieproces voor de experimenten over fijnstof, NO₂ en CO₂. De gedetailleerde protocollen zijn in de bijlage opgenomen. Het is echter niet de bedoeling dat dit op deze manier aangeboden wordt aan de leerlingen aangezien een onderzoeksgebaseerd practicum voorkeur heeft, zoals besproken in de inleiding. In Hoofdstuk 3.4 wordt besproken hoe een kookboekpracticum omgezet kan worden naar een onderzoekspracticum.

3.1 Fijnstof-experiment

Het bestaande protocol van Heeter et al. (2016) werd geoptimaliseerd. Allereerst werden de hoeveelheden van de gebruikte stoffen in het protocol ('een kopje gedestilleerd water' en 'een halve theelepel natriumcarbonaat') gekwantificeerd. Gebaseerd op een tweede protocol (Greelane, 2016), werd 200 g kaliumbitartraat toegevoegd aan 250 ml gedemineraliseerd water (dH₂O) en werd 'een halve theelepel natriumcarbonaat' gelijkgesteld aan 2 g (Tabel 2). Er zijn bovendien verschillende optimalisaties uitgevoerd opdat de perfecte kristallen verkregen werden. De optimalisaties en bijhorende waarnemingen zijn ook terug te vinden in Tabel 2. Foto's van de waarnemingen worden eveneens weergegeven in Figuur 14.

Tabel 2: Validatie standaardprotocol en optimalisaties.

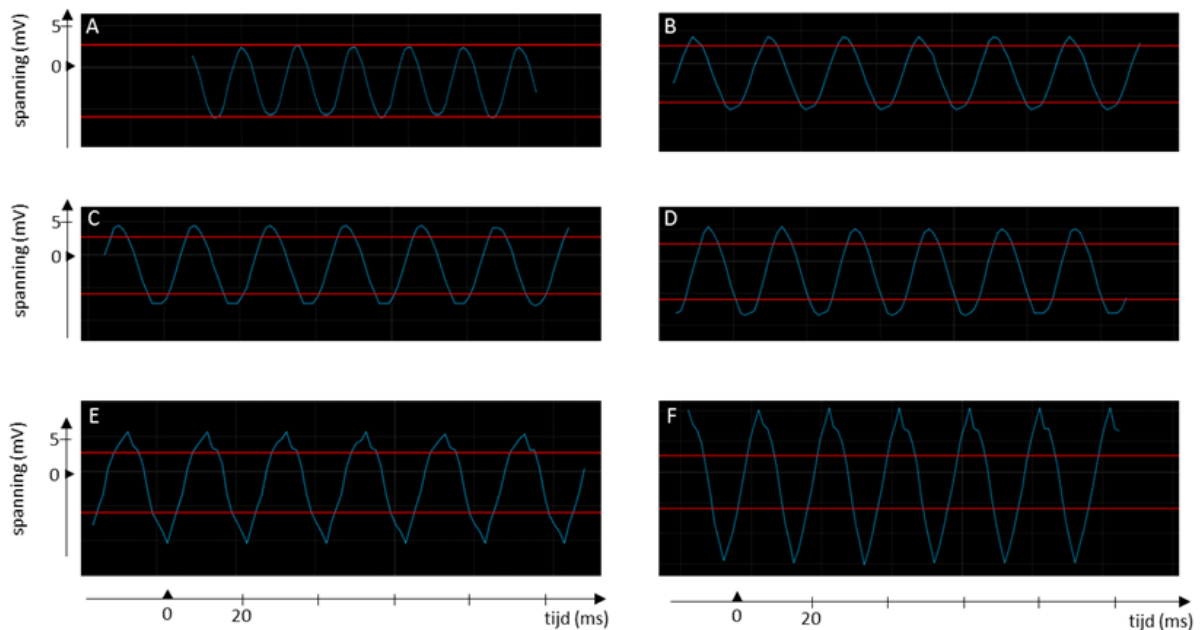
Protocol of optimalisatie	Werkwijze	Waarnemingen
Validatie standaardprotocol volgens Heeter et al. (2016)	200 g KC ₄ H ₅ O ₆ 250 ml dH ₂ O 66 g Na ₂ CO ₃ ; 2 g/stap	Relatief grote, mooi gevormde kristallen Figuur 14A
Optimalisatie 1: Kleinere hoeveelheden	50 g KC ₄ H ₅ O ₆ 60 ml dH ₂ O 18 g Na ₂ CO ₃ ; 0,5 g/stap	Slechte kristalvorming: zeer breekbare kristallen, of zelfs viskeus mengsel Figuur 14B
Optimalisatie 2: Kleinere verhouding KC ₄ H ₅ O ₆ / dH ₂ O	50 g KC ₄ H ₅ O ₆ 50 ml dH ₂ O 18 g Na ₂ CO ₃ ; 0,5 g/stap	Viskeus mengsel Figuur 14C
Optimalisatie 3: Grotere stappen toevoeging Na ₂ CO ₃	200 g KC ₄ H ₅ O ₆ 250 ml dH ₂ O 66 g Na ₂ CO ₃ ; 5 g/stap	Viskeus mengsel Figuur 14D
Optimalisatie 4: Materiaal recipiënt	2x standaardprotocol 1. Plastic bak 2. Glazen maatbeker	Kristallen in plastic bak groter en minder breekbaar Figuur 14E en F
Optimalisatie 5: Temperatuur kristalvorming	2x standaardprotocol 1. Direct na uitgieten in koelkast plaatsen 2. Kristalvorming op kamertemperatuur	Enkel kristalvorming op kamertemperatuur



Figuur 14: Waarnemingen optimalisaties fijnstof-experiment, waarvan (A) de gevormde kristallen volgens het standaardprotocol; (B) het viskeus mengsel bij Optimalisatie 1 (50 g $KC_4H_5O_6$ in 60 ml dH_2O); (C) het viskeus mengsel bij Optimalisatie 2 (50 g $KC_4H_5O_6$ in 50 ml dH_2O); (D) het viskeus mengsel bij Optimalisatie 3 (grotere hoeveelheid Na_2CO_3 per stap); (E) de kristalvorming in een plasticen bak; en (F) de kristalvorming in een glazen maatbeker.

Al de kristallen, klein en groot, die aan de kwaliteitseisen (gladheid, helderheid en rechthoekige vorm) voldeden werden geselecteerd. Ze werden zowel in de lengte als in de breedte van het kristal gemonteerd aan de oscilloscoop (Figuur 4). De oscilloscoop bevat een Waveform generator die een wisselspanning produceert (Digilent, 2014). Hierdoor wordt er een sinusfunctie afgelezen waarvan de amplitude (rode rechten) van de grafiek het potentiaalverschil aangeeft (Figuur 15A). Na het toevoegen van een massa op het kristal, vergrootte het potentiaalverschil (Figuur 15B, C, D, E en F) terwijl de frequentie nagenoeg hetzelfde bleef. De grootte van het potentiaalverschil werd verondersteld als een maat voor de verandering in massa. Al de metingen werden in de flowkast uitgevoerd om interferentie van de omgeving zo klein mogelijk te houden. Er werden geen verschillen waargenomen tussen de grote en kleine kristallen.

Na het toevoegen van extra massa op het kristal in de vorm van een papierklem (1,09 g), dop van markeerstift (3,40 g), gom (7,20 g), pincet (17,60 g) en schaar (65,70 g) op het kristal werd een toename in spanning (mV) gedetecteerd ten opzichte van de rode rechten (Figuur 15B, C, D, E en F).

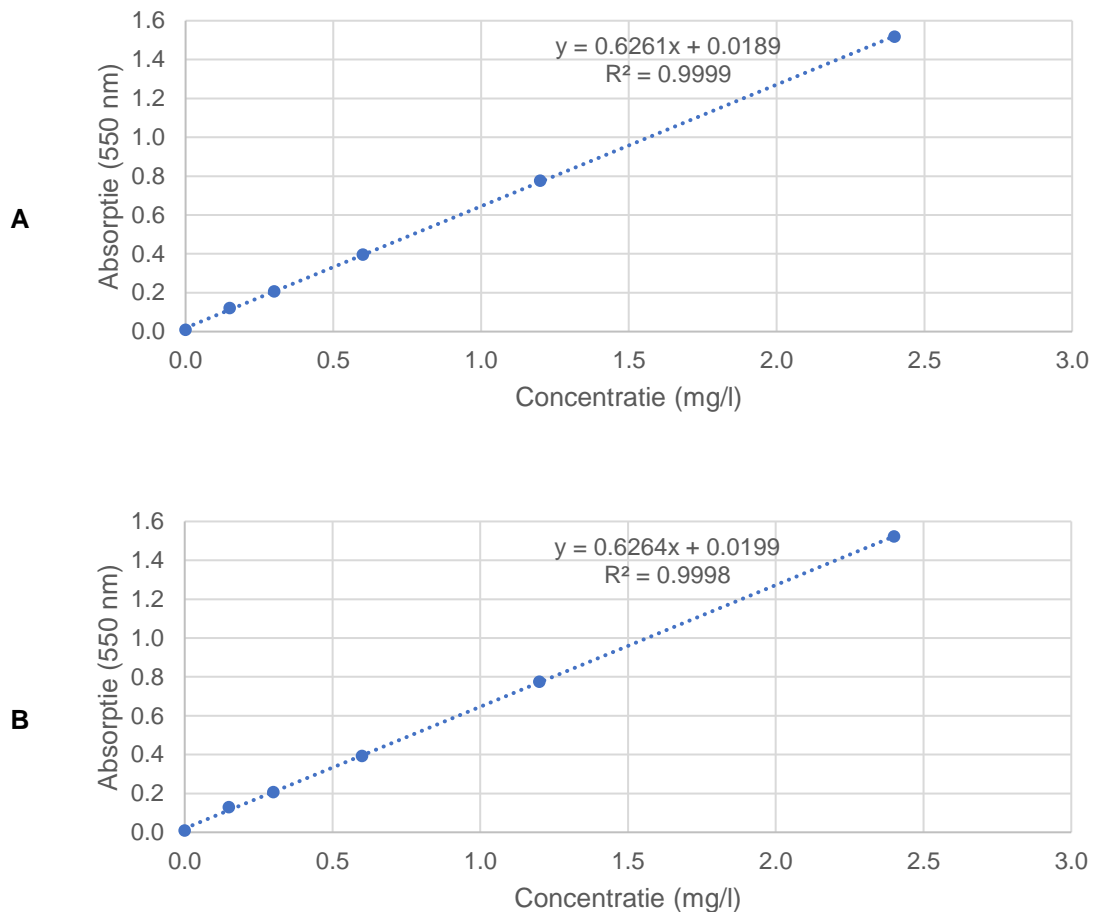


Figuur 15: Metingen oscilloscoop met toegevoegde massa's: verschil in spanning (mV) over de tijd (ms). (A) geen massa, (B) papierklem (1,09 g), (C) dop van markeerstift (3,40 g), (D) gom (7,20 g), (E) pincet (17,60 g) en (F) schaar (65,70 g).

3.2 NO₂-experiment

Tijdens elk experiment werd er een nieuwe kalibratielijin opgesteld met behulp van natriumnitriet (NaNO₂). De literatuur vermeldt verschillende tijden die nodig zijn voor kleurontwikkeling, gaande van 10 minuten (Blacker, 1973), 15 minuten (Saltzman, 1954) tot 30 minuten (Palmes et al., 1976). Op basis hiervan is er gekozen om beide uitersten te testen: het staal 10 en 30 minuten te laten staan. Onmiddellijk na het toevoegen van NaNO₂ werd er reeds een paarse kleur geobserveerd. Bovendien gaven beide kalibratiecurves gelijkaardige resultaten (Figuur 16A en B, Tabel S1). Daarnaast waren de R²-waarden voor beide kalibratiecurves respectievelijk 0,999 en 0,998. Hieruit werd besloten dat de kleurreactie na 10 minuten al reeds afgelopen was.

Om na te gaan of het Griess-Saltzman (GS) reagens werkelijk werkt om NO₂ te detecteren in sigaretten, werd het experiment in totaal viermaal uitgevoerd (samengevat in Tabel 3).



Figuur 16: (A) Kalibratielij van NaNO₂ na 10 minuten (B) en na 30 minuten (550 nm).

In een eerste poging werd triethanolamine (TEA) gebruikt als absorptievloeistof en werd er één sigaret volledig opgebrand. Tijdens het opbranden ontwikkelde er zich een geelachtige rook. Deze rook werd ook mee aangezogen door het vacuümsysteem en zorgde voor een gele aanslag (Figuur 17A). Nadat de sigaret volledig opgebrand was, werd er GS-reagens toegevoegd. Op basis van eerdere observaties, werd dit staal ook 10 minuten beschermd van het licht (met aluminiumfolie) voor kleurontwikkeling. Er werd echter geen paarse kleur gedetecteerd. Vervolgens werd het staal nog 20 minuten in het donker geplaatst (met aluminiumfolie), om zo 30 minuten kleurontwikkeling te bekomen. Ook na 30 minuten werd er geen paarse kleur geobserveerd waardoor absorptiemetingen niet werden uitgevoerd.

Tabel 3: Overzicht van de verschillende NO₂-experimenten.

Experiment	Omschrijving	Resultaat
Poging 1	TEA als absorptievloeistof	Geen kleur
Poging 2	GS-reagens als absorptievloeistof; hoge aanzuiging	Lichtpaarse kleur; interferentie van gele rook
Poging 3	GS-reagens als absorptievloeistof; lage aanzuiging	Lichtpaarse kleur; minder interferentie van gele rook
Poging 4	GS-reagens als absorptievloeistof; actieve kool	Duidelijk paarse kleur; geen interferentie van gele rook

In een tweede poging werd de TEA-oplossing achterwege gelaten en vervangen door het GS-reagens. Uit eerdere observaties (tijdens het opstellen van de verdunningsreeksen) was gebleken dat dit reagens onmiddellijk verkleurde wanneer deze blootgesteld werd aan NO₂. Opnieuw werd er een sigaret volledig opgebrand en opnieuw werd de gele rook geobserveerd. Dit keer werd er wel een paarse kleur gedetecteerd, maar naarmate de sigaret verder brandde, kreeg het staal een meer geelachtige kleur (Figuur 17B). Nadien werd een staal genomen en geanalyseerd bij 550 nm en een absorptie van 0,062 werd gemeten. Op basis van de kalibratielijne kwam deze waarde overeen met een concentratie van 0,069 mg/l of 69 ppb (*parts per billion*) aan NO₂ (Tabel 4).

In een derde poging werd het vacuüm zo geregeld dat er een lage aanzuiging was. Op die manier werd er gehoopt om minder gele rook aan te zuigen die eventueel kon interfereren met de kleurreactie. Door deze lage aanzuiging kleurde het staal niet paars na het opbranden van een sigaret. Hieruit werd besloten dat er niet voldoende NO₂ aanwezig was en werd er gekozen om een tweede sigaret op te branden. Pas na drie sigaretten werd er een lichtpaarse kleur geobserveerd. Dit staal werd geanalyseerd bij 550 nm en een absorptie van 0,044 werd gemeten. Op basis van de kalibratielijne kwam deze waarde overeen met een concentratie van 0,032 mg/l of 32 ppb aan NO₂ (Tabel 4). Om na te gaan of de aanzuigkracht inderdaad een invloed had op de kleurreactie, werden er vervolgens nog twee sigaretten volledig opgebrand. Maar dit keer werd het vacuüm hoger gezet. Het staal kleurde initieel meer paars, maar ook meer gele rook werd aangezogen. Hierdoor kleurde het uiteindelijke staal meer geel dan paars (Figuur 17C). Na een meting bij 550 nm werd er een absorptie gemeten van 0,11, wat overeenkomt met een concentratie van 0,123 mg/l of 123 ppb aan NO₂. Dit is een zeer plotse stijging en zou te wijten kunnen zijn aan interferentie van de gele rook (Tabel 4).

In een vierde poging werd er actieve kool geplaatst tussen de sigaret en het GS-reagens. De actieve kool werd gebruikt om de gele rook te absorberen om zo interferentie te verlagen. Opnieuw werd er een sigaret volledig opgebrand en dit keer werd er geen gele rook geobserveerd. Bovendien begon het staal paars te kleuren. Opnieuw werden er drie sigaretten opgebrand en het staal was sterk paars gekleurd (Figuur 17D). Na analyse bij 550 nm werd er een absorptie van 0,398 gemeten. Op basis van de kalibratielijne, komt deze absorptiewaarde overeen met een concentratie van 0,135 mg/l of 135 ppb aan NO₂ (Tabel 4). De actieve kool bleek de gele rook geabsorbeerd te hebben waardoor er geen interferentie was met het staal (Figuur S2). Dit keer was het staal ook echt paars gekleurd, in plaats van geelachtig. Deze poging werd nog driemaal herhaald: eenmaal met het opbranden van drie sigaretten en nog tweemaal met het opbranden van één sigaret. De resultaten van deze herhalingen zijn terug te vinden in Tabel 4.

Tabel 4: Concentratie aan NO₂ bekomen tijdens de verschillende optimalisatie-experimenten.

Experiment	Aantal sigaretten	NO ₂ (mg/l)	NO ₂ (ppb)	Gemiddelde (ppb)
Poging 1	1	/	/	/
Poging 2	1	0,069	69	/
Poging 3	3	0,032	32	/
	5	0,123	123	/
Poging 4	3	0,135	135	113
	3	0,091	91	
	1	-0,005	-5	-6
	1	-0,007	-7	



Figuur 17: NO₂ geproduceerd door sigaretten. (A) Staal met TEA produceerde geen karakteristieke paarse kleur, (B) Staal zonder TEA produceerde een lichtpaarse kleur, (C) Staal zonder TEA produceerde een paarse kleur maar interfereert met de gele rook, (D) Staal zonder TEA produceerde de karakteristieke paarse kleur. Bij dit staal werd actieve kool gebruikt en geen gele rook of aanslag werd gedetecteerd. Deze gele aanslag is wel duidelijk zichtbaar in opstelling A, B en C.

Tabel 5: G-waarden van de verdunningsreeks bekomen met behulp van de app ColorMeter Free.

Concentratie NaNO ₂ (mg/l)	G-waarde	Absorptie (-log(I/I ₀))
Blanco (water)	144	0,000
0,00	183	-0,104
0,15	185	-0,109
0,30	184	-0,106
0,60	180	-0,097
1,20	176	-0,087
2,40	168	-0,067

Tijdens de vier experimenten werden de verdunningsreeks en sigaretstalen ook geanalyseerd met de app *ColorMeter Free*. Op deze manier konden de resultaten, bekomen met de app, vergeleken worden met de spectrofotometer en geverifieerd worden als goedkoop alternatief. Ook hier zijn er verschillende optimalisatiestappen uitgevoerd.

In een eerste poging werd het staal in de open lucht gehouden en de smartphone in een afgesloten doos geplaatst. Dit resulteerde in gelijkaardige RGB-waarden over alle stalen heen (Tabel 5). Hierdoor werden er negatieve absorptiewaarden bekomen waardoor het opstellen van een kalibratielijn nutteloos was.

In een tweede poging werd het staal in het donker geplaatst en de smartphone werd er vervolgens tegen geplaatst. Dit keer werden er wel verschillende waarden verkregen voor de verschillende stalen: naarmate de concentratie aan NO₂ steeg, verhoogde de paarse kleur en daalde de G-waarde die de app detecteerde (Tabel 6). Hierdoor werden er positieve absorptiewaarde bekomen en kon een kalibratielijn opgesteld worden (R²-waarde = 0,9796). Maar de RGB-waarden van het sigaretstaal waren gelijkaardig aan de RGB-waarden van het blanco-staal. Volgens de app zou er geen NO₂ aanwezig zijn, terwijl de spectrofotometer wel NO₂ kon aantonen.

In een poging om de RGB-waarden verder te optimaliseren werd in een derde poging het staal opnieuw in een afgesloten doos geplaatst en de smartphone ertegen geplaatst. Ditmaal werd de smartphone zo gepositioneerd dat er amper licht van andere bronnen kon invallen op het staal. Dit resulteerde in lagere RGB-waarden, in vergelijking met de vorige poging, maar deze waren zeer gelijkaardig voor de verschillende stalen (Tabel 6). Hoewel de R²-waarden van beide kalibratiecurves (Poging 2 en Poging 3) acceptabel waren, respectievelijk 0,9127 en 0,9612, werden er toch verschillende negatieve absorptiewaarden verkregen. Ook bij de analyse van drie sigaretten werd er een negatieve waarde berekend, terwijl er bij de vijf sigaretten wel een positieve absorptie werd berekend. Op basis van de data van de app zou dit opnieuw betekenen dat er bij drie sigaretten geen NO₂ aanwezig was, terwijl de spectrofotometer bij deze poging wel NO₂ kon aantonen.

In een vierde poging werd het staal opnieuw in een afgesloten doos geplaatst maar werd het niet volledig donker gemaakt. Dit keer waren de resultaten beter en een kalibratielijn werd geconstrueerd. Dit lijkt aan te tonen dat het staal niet volledig in het donker geplaatst moet worden. Ook hier had de app moeilijkheden om de paarse kleur te detecteren voor de sigaretstalen. Een negatieve waarde werd berekend: -0,02 voor drie sigaretten, en -0,16 voor één sigaret.

Tabel 6: G-waarden van de verdunningsreeks bekomen met behulp van de app ColorMeter Free.

Concentratie NaNO ₂ (mg/l)	Poging 2		Poging 3	
	G-waarde	Absorptie (-log(I/I ₀))	G-waarde	Absorptie (-log(I/I ₀))
Blanco (water)	139	0,000	66	0,000
0,00	134	0,016	70	-0,020
0,15	129	0,032	74	-0,050
0,30	95	0,165	56	0,070
0,60	80	0,240	56	0,070
1,20	45	0,490	75	-0,060
2,40	23	0,780	29	0,350
1 sigaret	139	0	/	/
3 sigaretten	/	/	112	-0,230

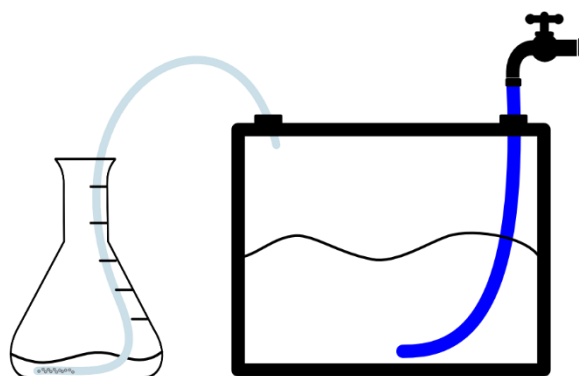
Deze vier pogingen resulteerde in uiteenlopende data. Hieruit is gebleken dat de app moeilijkheden heeft om zeer lage concentraties (< 0,15 mg/l) te detecteren. Dit was geen probleem bij de spectrofotometer.

3.3 CO₂-experiment

Er werd eerst een inschatting gemaakt van de gevoeligheid van het CO₂-experiment. Om de CO₂-concentratie te kunnen bepalen, moeten de equivalentiepunten goed te onderscheiden zijn in de titratiecurve. Daarom werd er eerst een titratiesimulatie gebruikt. Met deze simulaties konden verschillende concentraties van HCl, NaOH en CO₂ ingegeven worden om de titratiecurve te bepalen (Gutz, 2021). Op basis van deze simulaties en analoge experimenten in de literatuur werden de concentraties van HCl en NaOH vastgelegd op respectievelijk 1 M en 1,6 M (Crossno et al., 1996). Bij deze concentraties werd er een schatting gemaakt voor de CO₂-concentratie waarbij de verschillende equivalentiepunten voldoende duidelijk zichtbaar zijn, namelijk 0,3 M.

Dit betekent dat er 0,3 M aan CO₂ aanwezig moet zijn in een NaOH-oplossing van 25 ml om duidelijke equivalentiepunten te zien. Volgens NASA was de CO₂-concentratie, op 17 maart 2021, gelijk aan 416 ppm (NASA, 2021). Dit komt overeen met ongeveer 0,018 mmol CO₂. Dit zou betekenen dat een NaOH-oplossing van 25 ml met een CO₂-concentratie van 0,3 M, 7,5 mmol CO₂ zal bevatten. Bovendien moet er rekening gehouden worden met een 90% efficiëntie voor de opname van CO₂ door NaOH (Zeman & Lackner, 2004). Dit betekent dat er 8,3 mmol CO₂ nodig zou zijn, oftewel ongeveer 416 l lucht om de titratie te kunnen uitvoeren. Dit is te complex om uit te proberen op een secundaire school.

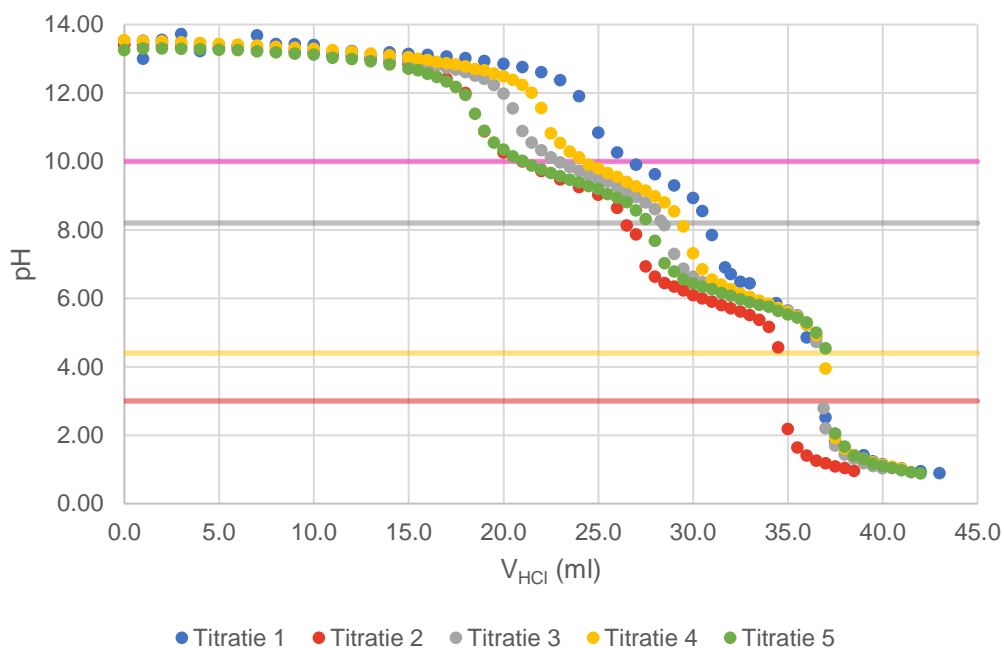
Er werden twee mogelijke experimentele opstellingen bedacht, beide leken niet haalbaar in de context van deze masterproef, maar ze worden alsnog hier meegedeeld voor eventueel verder onderzoek. Voor beide opstellingen was het belangrijk om het volume lucht dat kan reageren met de NaOH-oplossing te bepalen. Ten eerste zou een drukvat gebruikt kunnen worden, zoals weergegeven in Figuur 18. Deze zou enerzijds aangesloten zijn op de oplossing, anderzijds op een kraan. Wanneer het drukvat gevuld wordt met water, zal het luchtvolume in het drukvat in de oplossing gestuurd worden. Louter het benodigde volume van 416 l zorgt ervoor dat het drukvat van opmerkelijke afmetingen zou zijn. Ten tweede zou er gewerkt kunnen worden met een beluchtungs- of vijverpomp die lucht aanzuigt en door de NaOH-oplossing stuurt. Een dergelijke pomp heeft een bepaald debiet in liter lucht per uur. De bepaling van het volume lucht zou daarom gebaseerd moeten worden op het debiet. Het nadeel is dat deze pompen niet voldoende accuraat zijn voor labotoepassingen.



Figuur 18: Voorstel proefopstelling met drukvat.

Om dit volumeprobleem te omzeilen, kan CO_2 toegevoegd worden in de vorm van droogijs. Droogijs is echter vluchtig dat snel sublimeert tot gasvormig CO_2 , waardoor een deel van de massa verloren gaat. Dit werd geobserveerd tijdens het afwegen van het droogijs: een massadaling werd geobserveerd zodra het droogijs op de balans werd gewogen. Een mogelijke oplossing is om een iets grotere massa droogijs op de balans te plaatsen en te wachten totdat deze gedaald is tot vlak voor de gewenste massa. Vervolgens wordt het droogijs onmiddellijk overgebracht in de NaOH-oplossing in een afgesloten maatkolf. Het vast droogijs zal op de oplossing drijven en gaan sublimeren tot gas die dan langzaam opgenomen wordt door de oplossing.

In totaal werden twee sets van titraties uitgevoerd. De eerste set titraties gebeurden als praktische test voor de gevonden theoretische verwachtingen van de simulaties. De bekomen pH-waarden werden in functie van het toegevoegde volume in een titratiecurve weergegeven (zie Figuur 19 en Tabel 7). De berekening van de CO_2 -concentratie werden uitgevoerd op basis van de kleurindicatoren en op basis van de titratiecurve, zoals besproken in Hoofdstuk 2.



Figuur 19: pH-curves van de eerste set titraties.

Tabel 7: Resultaten van de eerste set titraties.

Titratie	V_{EP2} (ml)	V_{EP3} (ml)	ΔV (ml)	m_{CO_2} (g) toegevoegd	m_{CO_2} (g) gevonden	Relatieve fout (%)
Titratie 1	31,00	37,00	6,00	0,330	0,264	-20,00
Titratie 2	26,50	35,00	8,50	0,330	0,374	13,33
Titratie 3	28,30	36,90	8,60	0,330	0,378	14,55
Titratie 4	29,50	37,50	8,00	0,330	0,352	6,67
Titratie 5	27,50	37,50	10,00	0,408	0,440	7,84

Binnen deze set van titraties werden er vijf titraties in totaal uitgevoerd. Titratie 1 was uitgevoerd door de sondes van de pH-meter vast te houden en tegelijkertijd manueel te roeren en titreren. De relatieve fout en de pH-curve zelf geven aan dat er niet voldoende nauwkeurig getitreerd was. Zo liggen de meetpunten ter hoogte van de belangrijke equivalentiepunten relatief ver uit elkaar. Titratie 2 vormt hier een verbetering op, en Titraties 3 tot en met 5 optimaliseren dit. De opstelling bij Titraties 2 tot en met 5 werden geoptimaliseerd waarbij de sondes van de pH-meter gemonteerd waren in een maatbeker die origineel bedoeld is voor potentiometrie, deze heeft namelijk twee openingen waar de sondes in passen. Om de oplossing te roeren werd een magneetroeder gebruikt. Door deze optimalisatie konden de titraties nauwkeuriger en accurater uitgevoerd worden en is daarom de geprefereerde opstelling. Figuur 19 toont echter dat de pH-curves onderling verschillen hoewel dezelfde stoffen en concentraties zijn gebruikt. Daar er effectief 0,367 g CO₂ was toegevoegd (met uitzondering van Titratie 5: 0,453 g CO₂), werd er door de opname-efficiëntie van 90% verwacht om 0,330 g CO₂ (Titratie 5: 0,408 g CO₂) terug te vinden (Zeman & Lackner, 2004).

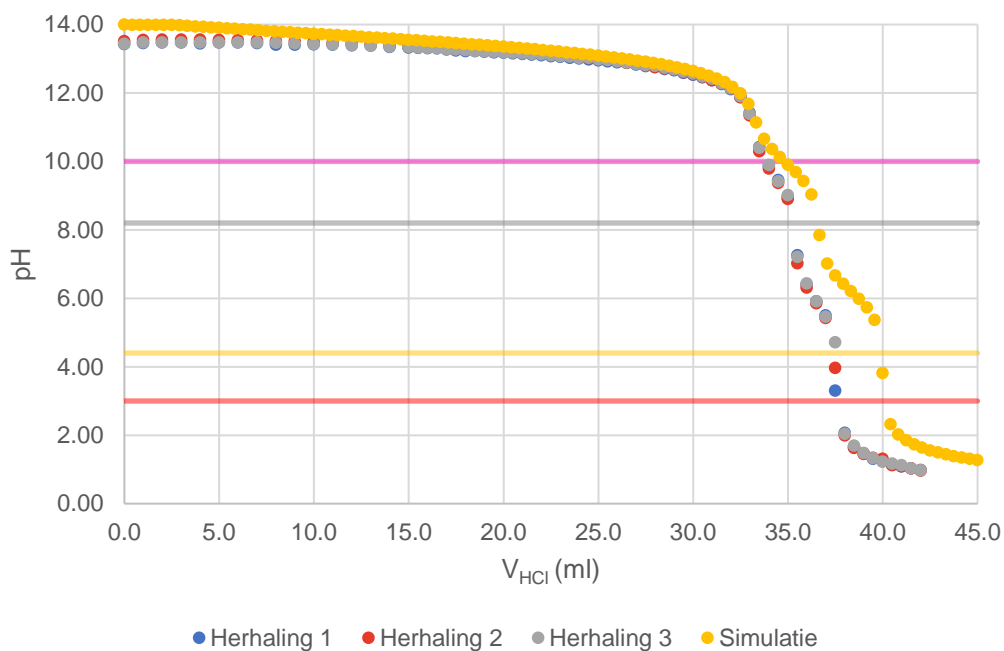
De gebruikte methodiek is reeds beschreven in Hoofdstuk 2. Op Titratie 3 zijn beide analysemethodes toegepast, aangeduid door de suffixen “-Ind.” voor de indicatoren, “-Num.” voor de numerieke afleidingen, en “-Cur.” voor de curvefitting. Op Titratie 4 en 5 zijn enkel de numerieke afleiding en de curvefitting toegepast. Uit deze berekeningen bleek dat het foutpercentage het hoogst was bij de methode op basis van de indicatoren: 14,55% (Tabel 8). Via deze methode werd er 0,378 g aan CO₂ bepaald, terwijl er origineel 0,330 g toegevoegd was. De numerieke afleiding en de curvefitting daarentegen resulteerden in kleinere foutpercentages: 10,61% en 4,85% respectievelijk (Tabel 8). Titratie 4 en 5 tonen echter dat de numerieke methode voldoende werkzaam is. De numerieke methode is daarnaast eenvoudiger en sneller toegepast waardoor de voorkeur aan deze methode werd gegeven bij de uitwerking van de volgende experimenten.

Tabel 8: Verwerking van de resultaten van de eerste set titraties.

Titratie	V_{EP2} (ml)	V_{EP3} (ml)	ΔV (ml)	m_{CO_2} (g) toegevoegd	m_{CO_2} (g) gevonden	Relatieve fout (%)
T3-Ind.	28,30	36,90	8,60	0,330	0,378	14,55
T3-Num.	28,40	36,69	8,29	0,330	0,365	10,61
T3-Cur.	28,94	36,81	7,87	0,330	0,346	4,85
T4-Ind.	29,50	37,50	8,00	0,330	0,352	6,67
T4-Num.	29,26	37,15	7,89	0,330	0,347	5,15
T5-Ind.	27,50	37,50	10,00	0,408	0,440	7,84
T5-Num.	28,00	37,24	9,24	0,408	0,407	-0,25

Om de reproduceerbaarheid te verifiëren, werd er besloten om drie nieuwe titraties uit te voeren, ditmaal met andere hoeveelheden aan CO₂: 0,149 g, 0,297g en 0,446 g.

Bij Titratie 6 was de verkregen pH-curve een stukje naar links verschoven in vergelijking met de pH-curve die verkregen werd met de simulaties (Figuur 20). De gevonden CO₂-massa's bleken ook steeds lager te zijn dan dat er origineel toegevoegd was (Tabel 9) bij zowel de methode met de indicatoren als bij de numerieke bepaling. Met beide methoden werd er een negatief gemiddeld foutpercentage verkregen: -26,17% en -29,31% respectievelijk (Tabel 9).

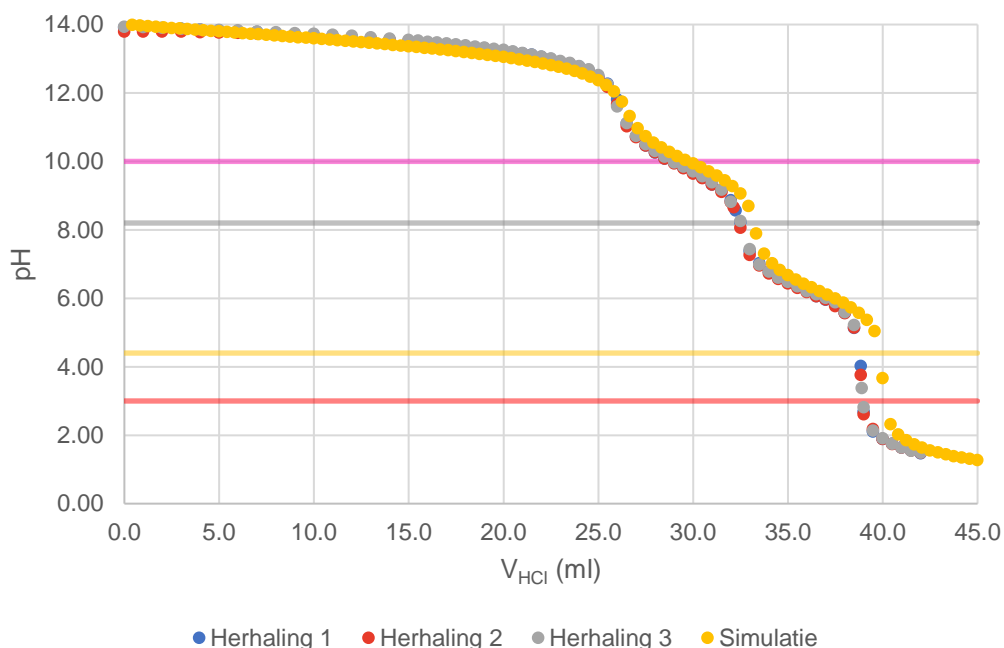


Figuur 20: Grafische vergelijking van de Titratie 6-reeks (0,149 g CO₂) met de bijbehorende simulatie.

Tabel 9: Numerieke vergelijking van de Titratie 6-reeks (0,149 g CO₂).

Titratie	V _{EP2} (ml)	V _{EP3} (ml)	ΔV (ml)	m _{CO2} (g) toegevoegd	m _{CO2} (g) gevonden	Gem. rel. fout (%)
H1-Ind.	35,50	37,50	2,00	0,149	0,088	
H2-Ind.	35,00	38,00	3,00	0,149	0,132	-26,17
H3-Ind.	35,50	38,00	2,50	0,149	0,110	
H1-Num.	34,83	37,36	2,53	0,149	0,111	
H2-Num.	35,29	37,57	2,28	0,149	0,100	-29,31
H3-Num.	35,32	37,70	2,38	0,149	0,105	

Bij Titratie 7 was de verkregen pH-curve sterk gelijkend op de pH-curve die verkregen werd met de simulaties. Er is een kleine verschuiving naar links, vooral rond het derde equivalentiepunt (Figuur 21). Ook de gevonden CO₂-massa's bleken gelijk te zijn aan de massa's die origineel toegevoegd waren (Tabel 10). Bij zowel de methode met de indicatoren als bij de numerieke bepaling werden negatieve foutpercentages bepaald: een gemiddeld foutpercentage van -0,22% en -8,08% (Tabel 10).

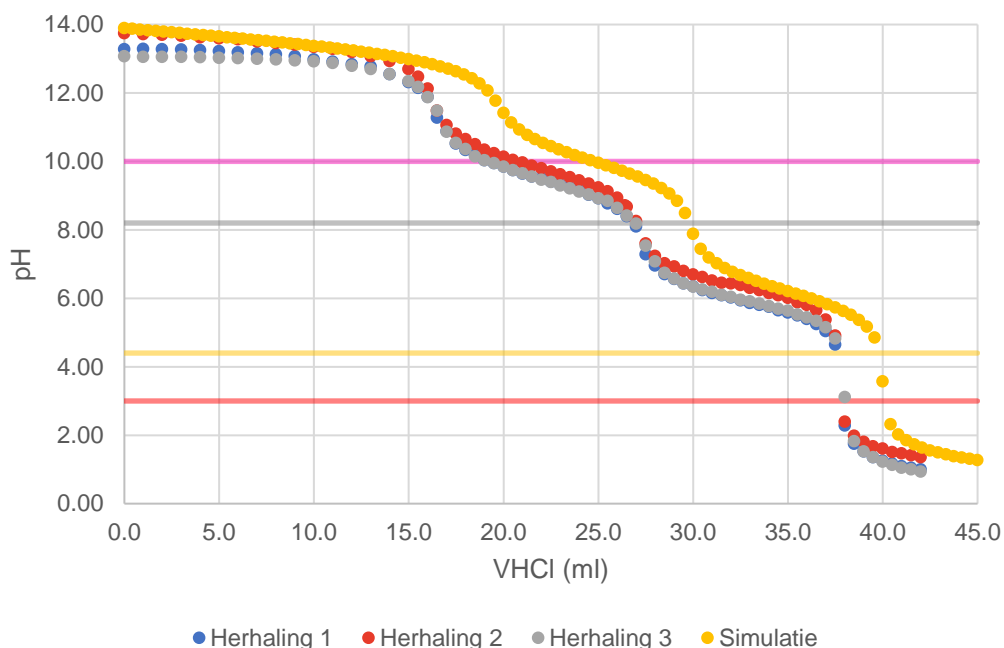


Figuur 21: Grafische vergelijking van de Titratie 7-reeks (0,297 g CO₂) met de bijbehorende simulatie.

Tabel 10: Numerieke vergelijking van de Titratie 7-reeks (0,297 g CO₂).

Titratie	V _{EP2} (ml)	V _{EP3} (ml)	ΔV (ml)	m _{CO2} (g) toegevoegd	m _{CO2} (g) gevonden	Gem. rel. fout (%)
H1-Ind.	32,25	38,85	6,60	0,297	0,290	
H2-Ind.	32,15	38,85	6,70	0,297	0,295	-0,22
H3-Ind.	32,00	38,90	6,90	0,297	0,304	
H1-Num.	32,58	38,83	6,25	0,297	0,275	
H2-Num.	32,47	38,78	6,31	0,297	0,278	-8,08
H3-Num.	32,67	38,72	6,05	0,297	0,266	

Bij Titratie 8 waren de verkregen pH-curves opnieuw naar links verschoven in vergelijking met de simulaties. Deze verschuiving was groter dan de twee voorgaande titraties (Figuur 22). Er bleek nu een overschatting te zijn van de gevonden CO₂-massa's in vergelijking met de massa's die origineel toegevoegd waren (Tabel 11). Bij zowel de methode met de indicatoren als bij de numerieke bepaling werden nu positieve foutpercentages bepaald: een gemiddeld foutpercentage van 12,11% en 3,74% (Tabel 11).



Figuur 22: Grafische vergelijking van de Titratie 8-reeks (0,446 g CO₂) met de bijbehorende simulatie.

Tabel 11: Numerieke vergelijking van de Titratie 8-reeks (0,446 g CO₂).

Titratie	V _{EP2} (ml)	V _{EP3} (ml)	ΔV (ml)	m _{CO2} (g) toegevoegd	m _{CO2} (g) gevonden	Gem. rel. fout (%)
H1-Ind.	26,50	38,00	11,50	0,446	0,506	
H2-Ind.	26,40	37,50	11,10	0,446	0,488	12,11
H3-Ind.	26,50	38,00	11,50	0,446	0,506	
H1-Num.	27,26	37,77	10,51	0,446	0,463	
H2-Num.	27,19	37,74	10,55	0,446	0,464	3,74
H3-Num.	27,44	37,92	10,48	0,446	0,461	

3.4 Van kookboekpracticum naar onderzoekspracticum

Een kookboekpracticum kan in enkele stappen omgezet worden tot een onderzoekspracticum. De leerkracht moet hierbij wel de afweging maken of de leerlingen voldoende voorkennis hebben, wat hun leerstijl is en wat de moeilijkheidsgraad van het practicum is (Stokking & van der Schaaf, 1999). Op basis van Tabel 12, opgesteld door Falk et al. (1974), kunnen bestaande practica geanalyseerd worden. Een practicum bestaat uit vijf onderzoeksfases: (1) Probleemstelling, (2) Hypothese, (3) Proefopzet, (4) Experiment uitvoeren en (5) Reflectie. Daarnaast kunnen er in een practicum vrijheidsgraden aan de leerlingen toegekend worden, gaande van I (illustratief) tot VI (experimenteel). Deze vrijheidsgraden bepalen het karakter van het practicum.

Tabel 12: Practica-analysetabel (Falk et al., 1974).

		Onderzoeksfase				
		1	2	3	4	5
		<i>Probleem onderkennen en probleemstelling formuleren</i>	<i>Hypothese(n) opstellen en voorspellen: als ..., dan ...</i>	<i>Proefopzet bedenken en uitwerken in proefopstelling</i>	<i>Experiment opzetten en uitvoeren; waarnemingen doen en resultaten vastleggen</i>	<i>Interpreteren van de gegevens en het trekken van conclusies</i>
Vrijheidsgraad	I	Het probleem is niet expliciet gemaakt voor de leerlingen	Er is dus ook geen hypothese	Werkwijze staat stap voor stap in de handleiding	Dit is de eerste activiteit die de leerlingen zelf invullen	Er wordt bevestigd wat de leerlingen al wisten
	II	Het probleem wordt de leerlingen aangeboden	Hypothese is soms impliciet aanwezig	Werkwijze staat stap voor stap in de handleiding	Eerste activiteit van de leerlingen	Leerlingen interpreteren voor een deel zelf, de rest was bekend
	III	Probleemstelling wordt expliciet gemaakt, eventueel in gesprek met leerlingen	Hypothesen worden ook expliciet gemaakt	Materiaal wordt aangeboden, maar de leerlingen maken zelf hun proefopstelling	Activiteiten van leerlingen kunnen verschillen vertonen	Resultaten van alle leerlingen in principe gelijk; zie verder II
	IV	Probleem gegeven, probleemstelling wordt door leerlingen geformuleerd	Leerlingen bedenken zelf hypothesen in klasgesprek	Werkwijze sterk gestructureerd aangeboden	Activiteiten van alle leerlingen gelijk	Interpretatie en conclusies zoveel mogelijk door leerlingen zelf
	V	Probleem wordt aangeduid, leerlingen bedenken hun eigen formulering	Leerlingen bedenken ook hun eigen hypothesen	Leerlingen maken eigen experiment met aangeboden basismateriaal	Activiteiten van de leerlingen kunnen sterk verschillen	Interpretatie en conclusies zoals in IV
	VI	Groepjes leerlingen kiezen verschillende problemen	Groepjes leerlingen formuleren hun eigen hypothesen	Leerlingen vragen zelf om materiaal dat ze nodig hebben	Groepjes leerlingen zijn met verschillende dingen bezig	Interpretaties en conclusies per groepje; verslaggeving

Volgens voorgaande tabel, sluit dit project het best aan bij vrijheidsgraad IV. Zo kunnen leerlingen het probleem 'luchtvervuiling' geïntroduceerd worden aan de hand van enkele actuele voorbeelden. Leerlingen kunnen zich hierover informeren, om daarna een probleemstelling te formuleren. Een voorbeeld hiervan is de volgende: 'Welke stoffen vervuilen onze lucht? Wat is de oorzaak hiervan?'. Met aanwijzingen van de leerkracht, kunnen zij zich toespitsen op fijnstof, CO₂ en NO₂ waarbij ze zelf een hypothese formuleren. De uitvoering kan gestructureerd aangeboden worden (bijvoorbeeld via enkele artikels), maar het is aan de leerlingen om eigen conclusies en interpretaties te doen hierover. Op deze manier kunnen de algemene eindtermen (zie 1.1.2) behaald worden.

4 Discussie

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de verschillende experimenten besproken en vergeleken worden met de literatuur.

4.1 Fijnstof-experiment

In deze masterproef werd geprobeerd een chemisch experiment te ontwikkelen voor de detectie van fijnstof. Hiervoor werd eerst vertrokken vanuit het TEOM-concept waarbij de aanwezigheid van een hoeveelheid stof op het glaselement zorgt voor een verandering in frequentie van het oscillerend glaselement. De grootte van de wijziging in frequentie geeft de hoeveelheid stof aan (Liu et al., 1980)

De synthese van kristallen was gebaseerd op een bestaand protocol van Heeter et al. (2016) en werd in deze masterproef verder geoptimaliseerd. Zo toonden de experimenten aan dat de temperatuur een belangrijke rol speelt bij de kristallisering. Wanneer de oplossing in de koelkast werd bewaard en dus sneller afkoelde, werden er geen of slechts enkele kristallen gevormd. Bewaring van de oplossing op kamertemperatuur leidde tot de beste kristallen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er op koude temperatuur te weinig verdamping van het water plaatsvindt, waardoor de kristallen niet goed gevormd worden. Ook is het belangrijk dat er voldoende verdamping van het water kan plaatsvinden aangezien verdamping aan de basis van de kristalvorming ligt (Helmenstine, 2021; Van Meervelt, 2002). De oplossingen mogen dus niet volledig zijn afgedekt, zodat het verdampte water kan ontsnappen en tegelijk toch geen stofdeeltjes in de oplossing terechtkomen om de zuiverheid te bewaren. Hieruit volgt het definitieve protocol waarin de oplossingen gedeeltelijk afgedekt, op kamertemperatuur bewaard moeten worden tot de volgende dag. Een verdere optimalisatie van het protocol is eventueel mogelijk door de oplossing langer te laten uitkristalliseren (bijvoorbeeld gedurende een week), herkristalliseren of digeren in een warme oplossing voor een langere tijd.

Zodra de kristallen geselecteerd waren, kon er geëxperimenteerd worden met de oscilloscoop. In de literatuur wordt gebruik gemaakt van de formule van Sauerbrey (Formule 16) die de correlatie weergeeft tussen de frequentie van een piëzo-elektrisch kristal en de aanwezige massa (Sauerbrey, 1959). Echter, het bepalen van de massasensitiviteitsconstante van de verkregen kristallen is moeilijk en verschilt per kristal. Zoals eerder aangehaald, werd dus van dit idee afgestapt. Piëzo-elektriciteit wordt eveneens omschreven als de opwekking van een potentiaalverschil in sommige harde materialen wanneer deze een mechanische stress ondervinden (Dickert & Latif, 2017). Daarom werd geopteerd voor een andere aanpak, waarin het potentiaalverschil, weergegeven door de amplitude van de sinusfunctie, wordt uitgezet in functie van de massa op het kristal.

$$\Delta m = -C \cdot \frac{1}{n} \cdot \Delta f \quad (16)$$

Met: Δm massaverschil;
 C massasensitiviteitsconstante, afhankelijk van het materiaal van het kristal;
 n boventoon;
 Δf verschil in frequentie, in Hz.

De gevoeligheid van de kristallen was teleurstellend: de kleinste mogelijke massa waarbij een groter potentiaalverschil ten opzichte van de referentie gemeten kon worden, was 1 g. Dit kan te wijten zijn aan verschillende factoren zoals de zuiverheid en gladheid van de kristallen. Deze kristallen worden initieel gemaakt om bijvoorbeeld, met behulp van een transformator, een lampje te laten branden, een speaker te laten werken of een inbrekersalarm te bouwen (RimstarOrg, 2012; Saini et al., 2016). Hierdoor is er weinig literatuur te vinden over de gevoeligheid wat betreft massa's op deze kristallen.

De beperkte gevoeligheid van de kristallen maakt de link met luchtvervuiling, zoals aangehaald in 1.2, waar de kristallen een potentiële sensor voor fijnstof zijn, niet voor de hand liggend. Het kristal wordt in schoolverband best gemaakt zoals beschreven in B.2 Fijnstof-experiment met de focus op de chemie achter deze kristalproductie. Eventueel kan dit experiment dan gekaderd worden in een STEM- of interdisciplinair project waarbij er ook fysica of engineering komt kijken om concrete toepassingen te realiseren. Mogelijke concrete toepassingen zijn zoals hierboven beschreven: een lampje laten branden, een speaker laten werken of een inbrekersalarm bouwen (RimstarOrg, 2012; Saini et al., 2016)

4.2 NO₂-experiment

Een volgend experiment was het bepalen van NO₂ door middel van een kleurreactie: hoe meer paars het staal, hoe meer NO₂ aanwezig was. Dit experiment baseert zich op het Griess-Saltzman (GS) reagens, ontwikkeld door J.P. Gries in 1879.

Tijdens alle vier de pogingen werden er verdunningsreeksen en kalibratiecurves opgesteld. De literatuur geeft uiteenlopende tijden aan die nodig zijn voor de kleurontwikkeling. Op basis daarvan werd er besloten om de twee uitersten te testen namelijk 10 minuten en 30 minuten. De R²-waarden van alle kalibratiecurves waren >0,99 waaruit besloten kon worden dat deze in orde waren. Verder kan men besluiten dat de kleurreactie ook al na 10 minuten afgelopen is. Bovendien kan het GS-reagens gebruikt worden om nitrieten (NO₂⁻) te detecteren. Dankzij de kortere ontwikkelingstijd kan dit experiment ook beter gebruikt worden in secundaire scholen waar een lesuur meestal 50 minuten duurt.

Volgens de literatuur zou triethanolamine (TEA) voor een hogere absorptie-efficiëntie moeten zorgen (Blacker, 1973; Huygen & Steerman, 1971). Echter, geen kleurontwikkeling werd geobserveerd: zowel na 10 minuten als na 30 minuten. Een eerste mogelijke verklaring zou de hydratatie kunnen zijn. Volgens de literatuur moet TEA voldoende gehydrateerd zijn. Deze ideale hydratatie kan bereikt worden door een molratio (TEA/water) van 3.6 te gebruiken (Cape, 2009; Poddubny & Yushketova, 2013). Tijdens de experimenten werd echter deze ideale molratio gebruikt, en zou bijgevolg geen verklaring kunnen zijn. Bovendien is de hydratatie nodig om een 1:1 conversie te bekomen van NO₂ naar NO₂⁻. Dit betekent dat er nog steeds een bepaalde fractie NO₂⁻ aanwezig moet zijn, indien er geen degelijke hydratatie is. Dit zou dan nog steeds tot een paarse kleur moeten leiden, of alleszins een lichtpaarse kleur. In dit experiment werd er helemaal geen kleur gedetecteerd. Een tweede mogelijke verklaring is dat de reactie tussen TEA en NO₂ te traag is. Cape (2009) vermeldt dat TEA bijna met 100% efficiëntie NO₂ uit de lucht kan verzamelen tenzij de bemonsteringssnelheid te hoog is (Cape, 2009). Als deze te hoog zou zijn, dan heeft de absorberende vloeistof (TEA) te weinig tijd om te reageren met NO₂. De meeste papers gebruiken TEA om een *personal sampler* te construeren die dan buiten geplaatst wordt voor een aantal weken (Palmes et al., 1976; Shooter, 1993). Dit kan een plausibele verklaring kunnen zijn aangezien de bemonstering bij ons experiment slechts 15-20 minuten duurde (totdat de sigaret volledig opgebrand was). Deze mogelijke verklaring zou getest kunnen worden door ook een *personal sampler* te construeren. Volgens de literatuur is het relatief eenvoudig en goedkoop om dit te construeren (Shooter, 1993). Bovendien zou dit experiment ook op een secundaire school uitgevoerd kunnen worden met TEA. Wanneer de leerlingen geen kleur observeren, kunnen zij ook verder nadenken over de verschillende mogelijke verklaringen zoals hier. Dergelijke onderzoeken stimuleren het kritisch denken en onderzoekscompetenties, die het onderwijs en dit project proberen na te streven. De leerkracht kan al dan niet beslissen om in de klas een *personal sampler* te construeren.

Tijdens de experimenten met het GS-reagens werd er wel een paarse kleur geobserveerd. Dit was te verwachten aangezien de verdunningsreeks met NaNO₂ ook een paars mengsel produceerde. Een gele rook werd echter in alle experimenten met de sigaret geobserveerd. Deze gele kleur, en aanslag, ontstaat door de nicotine en andere pollutanten die aanwezig zijn in sigarettenrook. Tijdens de experimenten werd er geprobeerd om deze rook niet te laten interfereren met de kleurreactie, aangezien er uiteenlopende data bekomen werd. Zo was de concentratie aan NO₂ bij één sigaret 69 ppb (Poging 2) terwijl deze concentratie daalde bij drie sigaretten: 32 ppb (Poging 3). Het is onlogisch dat meer sigaretten, minder NO₂ zouden produceren. Een mogelijke verklaring is de aanzuigsterkte. Bij Poging 2 was het vacuüm redelijk sterk geregeld waardoor er veel gele rook aangezogen werd, terwijl dit bij

Poging 3 lager was. Dit lager vacuüm zorgde voor minder aanzuiging van de gele rook en met minder interferentie tot gevolg. Deze verklaring wordt versterkt door de resultaten nadat het vacuüm hoger werd gezet. Dit resulteerde in een meer gele kleur gecombineerd met een hogere NO₂-concentratie. Pas na de modificatie met actieve kool werd deze interferentie vermeden, zelfs bij het veranderen van de aanzuigkracht. Een gemiddelde concentratie van 113 ppb NO₂ werd bekomen (Poging 4).

Hoewel al deze waarden in dezelfde grootteorde (200 µg/sigaret) liggen die de literatuur vermeldt (Adam et al., 2006; Shorter et al., 2006), toch is de concentratie bij Poging 4 de meest betrouwbare. Enkel in deze opstelling, met de actieve kool, was er geen interferentie van rook. Maar de literatuur, die zich enkel toespitst op NO₂, is eerder beperkt. Andere literatuur vermeldt de hoeveelheid NO waardoor het moeilijk is om deze waarden door te trekken naar NO₂. Bovendien bestaat sigarettenrook uit een mengsel van verschillende pollutanten en radicalen en is de samenstelling afhankelijk van de tijd, temperatuur en verdunning van de rook (Adam et al., 2006; Davis & Nielsen, 1999). Al deze variabelen kunnen aan de basis liggen voor de uiteenlopende resultaten die in de literatuur en dit experiment beschreven staan.

De data, verkregen met de app *ColorMeter Free*, gaf sterke verschillen tussen de verschillende pogingen. Zo werd ontdekt dat het staal in het donker geplaatst moet worden om degelijke resultaten te krijgen (poging 1 versus poging 2). Bovendien bleek de hoeveelheid lichtinval ook een groot effect te hebben op de RGB-waarden: werd het staal volledig in het donker geplaatst, dan detecteerde de app amper verschillen in kleur. Dit is ook logisch aangezien de app RGB-waarden detecteert: als elk staal in het donker wordt geplaatst, zullen de kleuren eerder 'grijs' of 'zwart' zijn voor de app waardoor deze ook gelijkaardige RGB-waarden detecteert. Wanneer er enkel licht van de voorkant kan binnentreden (poging 2 en 4), kon de app wel verschillen meten. Tijdens die pogingen kwam het licht van één kant, waardoor de app 'kleur' kon zien. Dit zorgde ervoor dat de app ook verschillen in de kleur kon detecteren wat tot verschillende RGB-waarden resulteerden.

Uit deze resultaten is gebleken dat de app gebruikt kan worden, maar onnauwkeurig is bij lage concentraties (< 0,15 mg/l). Bovendien is de opstelling een grote variabele en is gebleken dat de smartphone best op een afstand van ongeveer één centimeter geplaatst wordt. De gebruikte opstelling bestond uit een simpel stukje karton om het staal vast te houden, gebaseerd naar de opstelling van Kuntzleman (Kuntzleman & Jacobson, 2016). De hoeveelheid licht die er nog kan binnenkomen langs andere richtingen (spleetjes in het karton) kan de resultaten sterk beïnvloeden. Een 3D-geprinte opstelling, waarbij de omgevingsvariabelen geminimaliseerd worden, kan een oplossing bieden. Een mogelijk model, gebaseerd op de gebruikte opstelling, kan men terugvinden in bijlage (Figuur S3). Daarnaast kunnen ook andere apps getest worden, zoals deze voor *Apple*-smartphones, om deze variabele (de app op zich) te testen. Maar deze zijn binnen deze masterproef niet getest geweest.

De link met luchtvervuiling is hier nog steeds bruikbaar aangezien NO₂ een pollutant is dat een groot deel uitmaakt van luchtvervuiling. Bovendien is het ook een precursor voor andere pollutanten, zoals besproken in de inleiding. Aangezien scholen drukbezochte plaatsen zijn, zal er ook meer verkeer zijn: onder meer leerlingen die met de bus pendelen, leerlingen die gebracht of afgehaald worden. NO₂ wordt ook geproduceerd bij slijtage van remmen, banden en weginfrastructuur. Dit kan de leerkracht als startpunt gebruiken om dit pollutant te introduceren en een klasdiscussie op te starten. Via deze discussie kunnen mogelijke bronnen, zoals voertuigen, aangehaald worden om het experiment vorm te geven. De leerkracht kan dan ook sigaretten aanhalen als een andere mogelijke bron. Door het gebruik van een sigaret wordt er ook een ander thema aangehaald, namelijk dat roken ongezond is. Op die manier worden de leerlingen geconfronteerd met de schadelijke stoffen in sigaretten en kunnen er bijkomende vragen gesteld worden, zoals: 'Wat zijn de effecten van sigaretten op onze gezondheid?' en 'Welke andere pollutanten zijn er nog aanwezig in sigarettenrook?'. Hierdoor kan het project multidisciplinair gemaakt worden door ook het vak 'Biologie' erbij te betrekken.

4.3 CO₂-experiment

Uit de verschillende titraties werden verschillende afwijkingen geobserveerd in vergelijking met de simulaties. Aangezien deze verschuivingen een verschil in V_{EP2} en V_{EP3} veroorzaken, is dit ook de reden voor het foutpercentage in de berekende CO₂-massa. Bij Titratie 6 en 7 is er een verschuiving van het tweede en derde equivalentiepunt naar links; het eerste equivalentiepunt valt samen met deze van de simulatie. Bij Titratie 8 is er een volledige verschuiving van de gehele titratiecurve (de drie equivalentiepunten) naar links. Met behulp van de simulatie kunnen mogelijke verklaringen voor deze verschuiving onderzocht worden.

Ten eerste zou een verschuiving naar links van enkel het tweede en derde equivalentiepunt, zoals geobserveerd in Titraties 6 en 7, verklaard kunnen worden door een lagere reële concentratie carbonaat-ionen. Dit zou het resultaat kunnen zijn van een verlies van CO₂ tijdens het toevoegen van CO₂ in de vorm van droogijs aan de NaOH-oplossing. Droogijs is vluchtig en sublimeert van een vaste toestand naar een gas, waardoor een deel van het gasvormige CO₂ al reeds verloren gaat. Dit kon geobserveerd worden wanneer het droogijs op de weegschaal gelegd werd: er was duidelijk te zien dat de massa afnam in de tijd. Om dit te voorkomen werd er zo vlot en efficiënt mogelijk gewerkt om het droogijs van de weegschaal naar de maatkolf te brengen en werd het droogijs in een afgesloten maatkolf bij de NaOH-oplossing gevoegd. Toch zou er tijdens dit proces nog CO₂ verloren kunnen gaan. Ook tijdens de titratie zelf zouden er carbonaat-ionen verloren kunnen gaan: bij elke toevoeging van HCl ontstaat er namelijk een plaatselijk sterk zure regio waar H₂CO₃ gevormd wordt. In deze zure omstandigheden reageert het verder tot CO₂ en H₂O. Dit CO₂ ontsnapt de oplossing in de vorm van luchtbellen (Benedetti-Pichler & Cefola, 1939). Doorheen de titratie wordt de gehele oplossing steeds zuurder waardoor deze reactie er rond het derde equivalentiepunt wordt waargenomen en dat CO₂ dus uit de oplossing borrelt. Een andere reden voor het tekort aan carbonaat-ionen zou een lagere opname van CO₂ door NaOH kunnen zijn. De gebruikte inschatting van het efficiëntiepercentage (90%) is gebaseerd op onderzoek van Zeman and Lackner (2004). Het reële percentage zou lager kunnen liggen. Een verschuiving van de gehele curve naar links, zoals geobserveerd bij Titratie 8, zou verklaard kunnen worden door een lagere concentratie van de NaOH oplossing. Dit zou eventueel veroorzaakt kunnen zijn door een onnauwkeurigheid tijdens het maken van de oplossing.

Wellicht zal een combinatie van verschillende oorzaken invloed gehad hebben op de verschuiving van de titratie en bijgevolg de afwijking in berekende CO₂-massa. Het is belangrijk dat de leerlingen die dit experiment zouden uitvoeren dezelfde observaties en reflectie maken over eventuele afwijkingen, aangezien dit een cruciaal onderdeel van het leerproces is en bijdraagt aan de onderzoekscompetenties en het kritisch denken.

Ook een verschil in methoden, om de volumes te bepalen, was geobserveerd. Bij de eerste set van titraties leek de numerieke bepaling nauwkeuriger te zijn dan deze met de indicatoren. Bij de tweede set van titraties werd dit niet meer geobserveerd: zowel de indicatormethode als de numerieke bepaling gaven gelijkaardige foutmarges. Deze foutmarges daalden wel naarmate dat er meer droogijs toegevoegd werd. Dit kan opnieuw verklaard worden door het verlies van CO₂ door sublimatie.

De context waarbinnen dit experiment uitgevoerd zou worden is deze van luchtvervuiling, zoals uitgebreid toegelicht in de inleiding. Voor de haalbaarheid is er uiteindelijk gebruik gemaakt van droogijs als CO₂-bron en niet de CO₂ uit de lucht. Ondanks deze beperking, kan het experiment toch nog gebruikt worden in de context van luchtvervuiling, alleen wordt er gebruik gemaakt van droogijs om duidelijke sprongen in de titratiecurve te kunnen waarnemen. De leerlingen zouden ook kunnen brainstormen over eventuele ideeën om toch genoeg CO₂ uit de lucht te kunnen halen; nadenken over mogelijke opstellingen is ook een onderdeel van de onderzoeksvaardigheden. Een samenwerking met meer technische richtingen biedt de mogelijkheden om te sleutelen aan de proefopstelling.

5 Conclusie

In conclusie zijn er drie verschillende experimenten opgesteld en geoptimaliseerd. Omwille van de problematiek en actuele belangstelling (Corona-crisis en klimaatbetogingen) zijn deze experimenten ontwikkeld in het kader van luchtvervuiling. Het doel was om de luchtvervuiling te kunnen kwantificeren, wat niet altijd bereikt werd. Zo was het wel mogelijk om kristallen te maken die, dankzij het piëzo-elektrisch effect, objecten konden detecteren. Maar dit effect was niet gevoelig genoeg om fijnstof te detecteren. Het NO₂-experiment daarentegen was wel succesvol om de NO₂-concentratie te kunnen bepalen. Er is echter wel een spectrofotometer nodig om dit nauwkeurig te doen. Aangezien dit moeilijk beschikbaar kan zijn op een secundaire school, werd er een app getest. Hoewel het mogelijk is om een app te gebruiken, kan de gevoeligheid in vraag gesteld worden bij lage concentraties (< 0,15 mg/l). Ten slotte was het ook mogelijk om de CO₂-concentratie te kunnen bepalen met een zuur-basetitratie, een welgekende techniek. Voor de haalbaarheid is er uiteindelijk gebruik gemaakt van droogijs als CO₂-bron en niet de CO₂ uit de lucht. De leerlingen zouden kunnen brainstormen over eventuele ideeën om toch genoeg CO₂ uit de lucht te kunnen halen.

Deze experimenten kunnen omgevormd worden tot een meer onderzoekend practicum door een aantal componenten te veranderen. Zo kan het probleem aangehaald worden door middel van de actualiteit. Op die manier kan er een klasdiscussie opgestart worden waarbij de probleemstelling geformuleerd kan worden. De leerkracht kan daarbij als moderator werken en de discussie leiden door eventueel volgende vragen te stellen: *'Wat is luchtvervuiling?', 'Welke stoffen behoren tot luchtvervuiling?' en 'Wat zijn de eigenschappen van deze stoffen en hoe worden ze gedetecteerd?'*. Dit zou ook gecombineerd kunnen worden met een ICT-opdracht waarbij de leerlingen in groepen werken en een antwoord proberen te formuleren op deze vragen. Deze fase doet dan dienst als de literatuurstudie waarbij leerlingen meer informatie verwerven over luchtvervuiling en een mogelijke onderzoeksvraag en hypothese kunnen formuleren. Vervolgens kan de leerkracht enkele startartikels aanbieden waarin de experimenten beschreven staan. Op deze manier kunnen de leerlingen zelf een idee gaan vormen over mogelijke manieren waarop luchtvervuiling gekwantificeerd kan worden. De bedachte experimenten kunnen gepresenteerd worden door de leerlingengroepjes waardoor er gediscussieerd kan worden over de haalbaarheid van elk experiment. Door de complexiteit van bepaalde experimenten kan de werkwijze gestructureerd aangeboden worden waardoor iedere leerling toch een werkend experiment kan uitvoeren. Bij elk van de beschreven experimenten zijn er toch nog wat onzekerheden. Op die manier wordt de *'verbogen val'*, waar Marion van Brederode over spreekt (van Brederode et al., 2020), ook gesimuleerd. Hierdoor wordt de interpretatie van de resultaten uniek: iedere groep kan andere verklaringen bedenken voor vreemde resultaten.

Dankzij deze aanpassingen kan het practicum gesitueerd worden bij vrijheidsgraad IV en zouden een aantal van de sleutelcompetenties behaald worden. Zo zouden de specifieke eindtermen *'29 De leerlingen kunnen zich oriënteren op een onderzoeksprobleem door gericht informatie te verzamelen, te ordenen en te bewerken'*, *'30 De leerlingen kunnen een onderzoeksopdracht met een wetenschappelijke component voorbereiden, uitvoeren en evalueren'* en *'31 De leerlingen kunnen de onderzoeksresultaten en conclusies rapporteren en ze confronteren met andere standpunten.'* Van de wetenschappelijke richtingen behaald kunnen worden. Maar ook de vakoverschrijdende eindtermen zoals *'3 De leerlingen kunnen diverse informatiebronnen en -kanalen kritisch kiezen en raadplegen met het oog op te bereiken doelen.'*, *'6 De leerlingen kunnen op basis van hypothesen en verwachtingen mogelijke oplossingswijzen realistisch inschatten en uitvoeren'* en *'7 De leerlingen evalueren de gekozen oplossingswijze en de oplossing en gaan eventueel op zoek naar een alternatief'* zouden behaald kunnen worden.

De volgende stap is het uittesten van deze experimenten in een secundaire school. De leerlingen kunnen door zelf onderzoek te doen, de experimenten verder finaliseren zoals meerdere apps uittesten, de opstelling te 3D-printen of andere manieren bedenken om CO₂ uit de lucht te detecteren. De basis is er, verdere verfijning is aangeraden.

Referenties

- Adam, T., Mitschke, S., Streibel, T., Baker, R. R., & Zimmermann, R. (2006). Quantitative puff-by-puff-resolved characterization of selected toxic compounds in cigarette mainstream smoke. *Chem Res Toxicol*, 19(4), 511-520. <https://doi.org/10.1021/tx050220w>
- Agentschap voor Hoger Onderwijs Volwassenenonderwijs Kwalificaties en Studietoelagen. (2021). *Uitgangspunten eindtermen Wiskunde, Wetenschappen en Technologie*. Retrieved from <https://onderwijsdoelen.be/uitgangspunten/5293>
- Alfieri, L., Brooks, P. J., Aldrich, N. J., & Tenenbaum, H. R. (2011). Does discovery-based instruction enhance learning? *Journal of Educational Psychology*, 103(1), 1-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1037/a0021017>
- Almetwally, A. A., Bin-Jumah, M., & Allam, A. A. (2020). Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: an overview. *Environ Sci Pollut Res Int*, 27(20), 24815-24830. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09042-2>
- Anwar, M. N., Iftikhar, M., Khush Bakhat, B., Sohail, N. F., Baqar, M., Yasir, A., & Nizami, A. S. (2019). Sources of Carbon Dioxide and Environmental Issues. In A. Inamuddin, M. Abdullah, & E. Lichtouse (Eds.), *Sustainable Agriculture Reviews 37: Carbon Sequestration Vol. 1 Introduction and Biochemical Methods* (pp. 13-36). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29298-0_2
- Bekmezci, M., Celik, I., Sahin, I., Kiray, A., & Akturk, A. O. (2015). Analysis of Scientific Attitude, Computer Anxiety, Educational Internet Use, Problematic Internet Use, and Academic Achievement of Middle School Students According to Demographic Variables. *Online Submission*, 9(12), 4006-4014.
- Benedetti-Pichler, A., & Cefola, M. (1939). Warder's method for the titration of carbonates. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 11(6), 327-332.
- Bernstein, J. A., Alexis, N., Barnes, C., Bernstein, I. L., Nel, A., Peden, D., Diaz-Sanchez, D., Tarlo, S. M., Williams, P. B., & Bernstein, J. A. (2004). Health effects of air pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 114(5), 1116-1123. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2004.08.030>
- Blacker, J. H. (1973). Triethanolamine for collecting nitrogen dioxide in the TLV range. *Am Ind Hyg Assoc J*, 34(9), 390-395. <https://doi.org/10.1080/0002889738506868>
- Bourdrel, T., Bind, M. A., Béjot, Y., Morel, O., & Argacha, J. F. (2017). Cardiovascular effects of air pollution. *Arch Cardiovasc Dis*, 110(11), 634-642. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2017.05.003>
- Brook, R. D., Jerrett, M., Brook, J. R., Bard, R. L., & Finkelstein, M. M. (2008). The relationship between diabetes mellitus and traffic-related air pollution. *J Occup Environ Med*, 50(1), 32-38. <https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e31815dba70>
- Burke, E. A. J. (1989). Piëzo-elektrische kwarts: een swingend mineraal. *GEA*, 22(4), 94-97.
- Cape, J. N. (2009). The Use of Passive Diffusion Tubes for Measuring Concentrations of Nitrogen Dioxide in Air. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 39(4), 289-310. <https://doi.org/10.1080/10408340903001375>
- Cheung, D. (2011). Teacher beliefs about implementing guided-inquiry laboratory experiments for secondary school chemistry. *Journal of Chemical Education*, 88(11), 1462-1468.
- Cincinelli, A., & Martellini, T. (2017). Indoor Air Quality and Health. *Int J Environ Res Public Health*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>
- Crossno, S. K., Kalbus, L. H., & Kalbus, G. E. (1996). Determinations of Carbon Dioxide by Titration: New Experiments for General, Physical, and Quantitative Analysis Courses. *Journal of Chemical Education*, 73(2), 175. <https://doi.org/10.1021/ed073p175>

- Dahiya, R. S., & Valle, M. (2013). Fundamentals of Piezoelectricity. In *Robotic Tactile Sensing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0579-1>
- Davis, D. L., & Nielsen, M. T. (1999). Tobacco: production, chemistry, and technology. In (pp. 398 - 439). Blackwell Science.
- Dickert, F. L., & Latif, U. (2017). Experimental and Computational Methods in Supramolecular Chemistry. In J. Atwood, G. W. Gokel, & L. Barbour (Eds.), *Comprehensive Supramolecular Chemistry II* (Vol. 2). Elsevier.
- Digilent. (2014). *Analog Discovery 2: 100MS/s USB Oscilloscope, Logic Analyzer and Variable Power Supply*. <https://store.digilentinc.com/analog-discovery-2-100msps-usb-oscilloscope-logic-analyzer-and-variable-power-supply/>
- Donaldson, N. L., & Odom, A. L. (2001). What Makes Swing Time? A Directed Inquiry-Based Lab Assessment. *Science Activities*, 38(2), 29-33. <https://doi.org/10.1080/00368120109603607>
- Eilks, I., & Hofstein, A. (2013). *Teaching Chemistry – A Studybook, A Practical Guide and Textbook for Student Teachers, Teacher Trainees and Teachers*. Sense Publishers.
- Erdmann, C. A., & Apte, M. G. (2004). Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset.
- European Environment Agency. (2020a, 23-11-2020). *Air pollution*. European Environment Agency. Retrieved 27-02-2021 from <https://www.eea.europa.eu/themes/air/intro>
- European Environment Agency. (2020b, 23-11-2020). *Air pollution sources*. European Environment Agency. Retrieved 06-05-2021 from <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1>
- Falk, D., Keuchenius, F., & Saaltink, H. (1974). *De bioloog als leraar*. Wolters-Noordhoff.
- Franklin, B. A., Brook, R., & Arden Pope, C., 3rd. (2015). Air pollution and cardiovascular disease. *Curr Probl Cardiol*, 40(5), 207-238. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2015.01.003>
- Ghorani-Azam, A., Riahi-Zanjani, B., & Balali-Mood, M. (2016). Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. *J Res Med Sci*, 21, 65. <https://doi.org/10.4103/1735-1995.189646>
- Glasius, M., Funch Carlsen, M., Stroyer Hansen, T., & Lohse, C. (1999). Measurements of nitrogen dioxide on Funen using diffusion tubes. *Atmos Environ*, 33(8), 1177-1185. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00285-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00285-4)
- Greelane. (2016). *Hoe Rochelle-zout te maken*. Greelane. Retrieved 09-05-2021 from <https://www.greelane.com/nl/science-tech-math/wetenschap/how-to-make-rochelle-salt-3976006>
- Gruziova, O., Xu, C. J., Yousefi, P., Relton, C., Merid, S. K., Breton, C. V., Gao, L., Volk, H. E., Feinberg, J. I., Ladd-Acosta, C., Bakulski, K., Auffray, C., Lemonnier, N., Plusquin, M., Ghantous, A., Hecceg, Z., Nawrot, T. S., Pizzi, C., Richiardi, L., Rusconi, F., Vineis, P., Kogevinas, M., Felix, J. F., Duijts, L., den Dekker, H. T., Jaddoe, V. W. V., Ruiz, J. L., Bustamante, M., Antó, J. M., Sunyer, J., Vrijheid, M., Gutzkow, K. B., Grazuleviciene, R., Hernandez-Ferrer, C., Annesi-Maesano, I., Lepeule, J., Bousquet, J., Bergström, A., Kull, I., Söderhäll, C., Kere, J., Gehring, U., Brunekreef, B., Just, A. C., Wright, R. J., Peng, C., Gold, D. R., Kloog, I., DeMeo, D. L., Pershagen, G., Koppelman, G. H., London, S. J., Baccarelli, A. A., & Melén, E. (2019). Prenatal Particulate Air Pollution and DNA Methylation in Newborns: An Epigenome-Wide Meta-Analysis. *Environ Health Perspect*, 127(5), 57012. <https://doi.org/10.1289/ehp4522>
- Gutz, I. G. R. (2021). *CurTiPot - pH and Acid-Base Titration Curves: Analysis and Simulation freeware*. In (Version 4.3.1) <http://www.iq.usp.br/gutz/Curtipot.html>
- Heeter, W. H., Sheng-Jen, T., & Zou, J. (2016). *MAKER: Piezoelectric Crystal Experiments for High School Science and Engineering Students* American Society for Engineering Education,

- Helmenstine, A. (2021). *How to Grow Rochelle Salt Crystals*. Science Notes. Retrieved 30-05-2021 from <https://sciencenotes.org/how-to-grow-rochelle-salt-crystals/>
- Holmes, N. G., Wieman, C. E., & Bonn, D. A. (2015). Teaching critical thinking. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 112(36), 11199-11204. <https://doi.org/10.1073/pnas.1505329112>
- Huygen, C., & Steerman, P. H. (1971). The determination of nitrogen dioxide in air after absorption in a modified alkaline solution. *Atmos Environ*, 5(10), 887-889. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(71\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0004-6981(71)90018-7)
- Kuntzleman, T. S., & Jacobson, E. C. (2016). Teaching Beer's Law and Absorption Spectrophotometry with a Smart Phone: A Substantially Simplified Protocol. *Journal of Chemical Education*, 93(7), 1249-1252. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00844>
- Lazonder, A. W., & Harmsen, R. (2016). Meta-Analysis of Inquiry-Based Learning: Effects of Guidance. *Review of educational research*, 86(3), 681-718. <https://doi.org/10.3102/0034654315627366>
- Liu, B. Y., Rabbe, O. G., Smith, W. B., Spencer, H. W., & Kuykendal, W. B. (1980). Advances in particle sampling and measurement. *Environ Sci Technol*, 14(4), 392-397. <https://doi.org/10.1021/es60164a607>
- Lord, T., & Orkwiszewski, T. (2006). Moving from Didactic to Inquiry-Based Instruction in a Science Laboratory. *The American Biology Teacher*, 68(6), 342-345. <https://doi.org/10.2307/4452009>
- Mahyuddin, N., & Awbi, H. (2012). A review of CO₂ measurement procedures in ventilation research. *International Journal of Ventilation*, 10(4), 353-370.
- McBain, J. W. (1912). LXXXV.—The use of phenolphthalein as an indicator. The slow rate of neutralisation of carbonic acid. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 101, 814-820.
- Michalowski, T. (1988). Titration of monoprotic acids with sodium hydroxide contaminated by sodium carbonate. *Journal of Chemical Education*, 65(2), 181.
- Moorcroft, M. J., Davis, J., & Compton, R. G. (2001). Detection and determination of nitrate and nitrite: a review. *Talanta*, 54(5), 785-803. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(01\)00323-x](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(01)00323-x)
- Nagarajan, S., & Overton, T. (2019). Promoting Systems Thinking Using Project- and Problem-Based Learning. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2901-2909. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00358>
- NASA. (2021, 29-04-2021). *Carbon Dioxide | Vital Signs - Climate Change: Vital Signs of the Planet*. NASA. Retrieved 05-05-2021 from <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- 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.
- Palmes, E. D., Gunnison, A. F., DiMaggio, J., & Tomczyk, C. (1976). Personal sampler for nitrogen dioxide. *Am Ind Hyg Assoc J*, 37(10), 570-577. <https://doi.org/10.1080/0002889768507522>
- Pang, Z., Hu, P., Lu, X., Wang, Q., & O'Neill, Z. (2021). A Smart CO₂-Based Ventilation Control Framework to Minimize the Infection Risk of COVID-19 In Public Buildings 2.
- Passaretti Filho, J., da Silveira Petrucí, J. F., & Cardoso, A. A. (2015). Development of a simple method for determination of NO₂ in air using digital scanner images. *Talanta*, 140, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.03.009>
- Piezoelectric effect. (2009). In M. Manutchehr-Danai (Ed.), *Dictionary of Gems and Gemology* (pp. 667-667). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72816-0_16866
- Poddubny, V. A., & Yushketova, N. A. (2013). A physicochemical model of sorption processes in NO₂ passive sampling with air humidity effects. *Environ Monit Assess*, 185(5), 3819-3829. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2830-7>

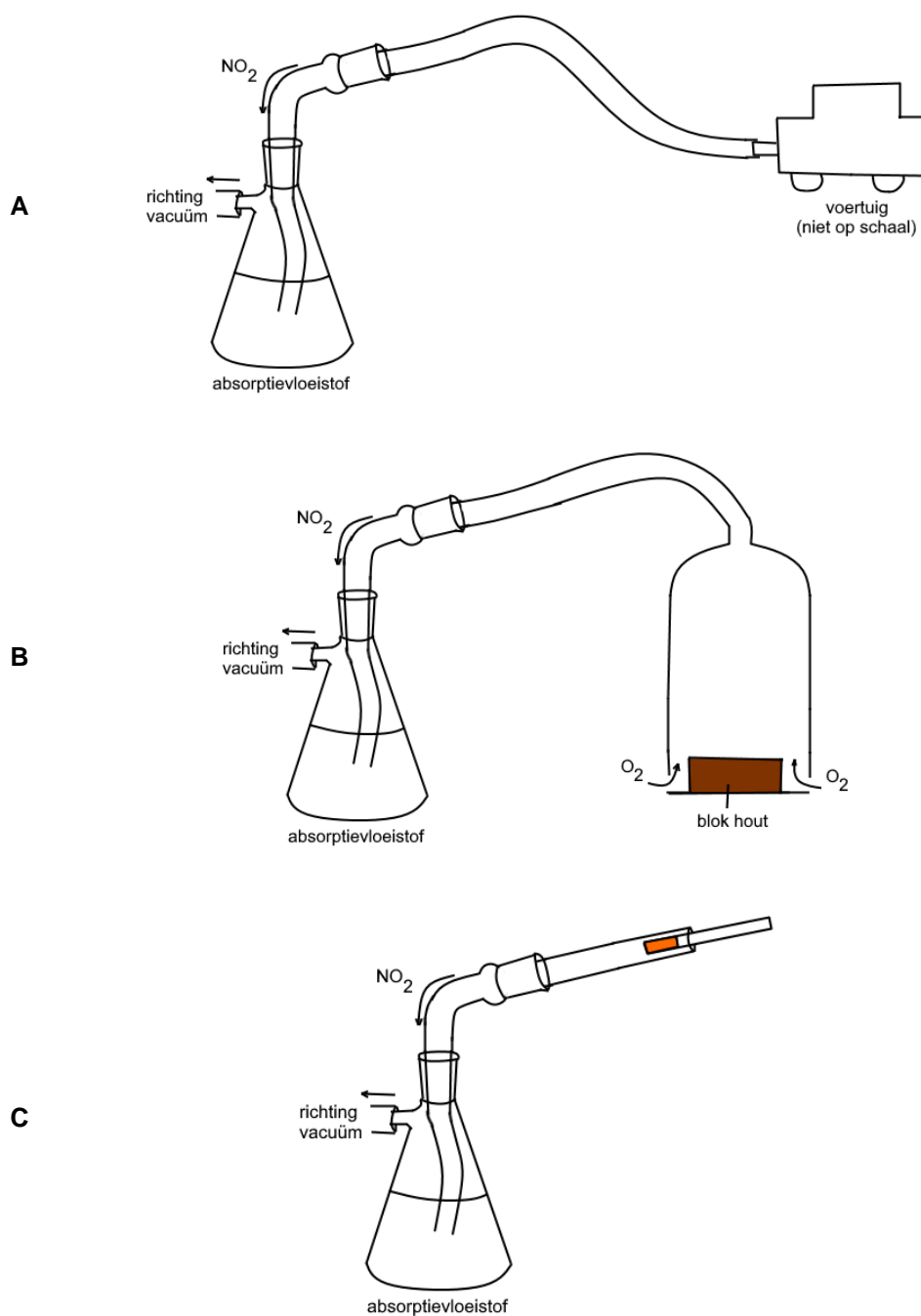
- Power, M. C., Kioumourtzoglou, M. A., Hart, J. E., Okereke, O. I., Laden, F., & Weisskopf, M. G. (2015). The relation between past exposure to fine particulate air pollution and prevalent anxiety: observational cohort study. *Bmj*, 350, h1111. <https://doi.org/10.1136/bmj.h1111>
- Pungjunun, K., Chaiyo, S., Praphairaksit, N., Siangproh, W., Ortnet, A., Kalcher, K., Chailapakul, O., & Mehmeti, E. (2019). Electrochemical detection of NO_x gas based on disposable paper-based analytical device using a copper nanoparticles-modified screen-printed graphene electrode. *Biosensors and Bioelectronics*, 143, 111606. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111606>
- Rathod, V. T. (2020). A Review of Acoustic Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors and Transducers. *Sensors (Basel)*, 20(14). <https://doi.org/10.3390/s20144051>
- RimstarOrg. (2012). *How to Make Piezoelectric Crystal Speaker* [Youtube]. <https://www.youtube.com/watch?v=R7zjfaPKMSE&t=173s>
- Saini, S., Bhatia, H., Singh, V., & Sidhu, E. (2016). Rochelle salt integrated PIR sensor arduino based intruder detection system (ABIDS). *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, 1-5.
- Saltzman, B. E. (1954). Colorimetric Microdetermination of Nitrogen Dioxide in Atmosphere. *Analytical Chemistry*, 26(12), 1949-1955. <https://doi.org/10.1021/ac60096a025>
- 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. *Environ Health Perspect*, 120(12), 1671-1677.
- Sauerbrey, G. (1959). Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung. *Z. Physik*, 206-222. <https://doi.org/10.1007/BF01337937>
- Scheff, P. A., Paulius, V. K., Huang, S. W., & Conroy, L. M. (2000). Indoor air quality in a middle school, Part I: Use of CO₂ as a tracer for effective ventilation. *Applied occupational and environmental hygiene*, 15(11), 824-834.
- Schilperoord, A., Jansen, P., & van Graft, M. (2006). *Natuur en techniek op de pabo: Didactiekontwikkeling in fasen – Stapsgewijze beschrijvingen van didactieken voor natuur en techniek voor de lerarenopleiding primair onderwijs*. Enschede: SLO.
- Schmidl, C., Luisser, M., Padouvas, E., Lasselsberger, L., Rzaca, M., Ramirez-Santa Cruz, C., Handler, M., Peng, G., Bauer, H., & Puxbaum, H. (2011). Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems. *Atmos Environ*, 45(39), 7443-7454. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.006>
- Shendell, D. G. (2012). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho.
- Shooter, D. (1993). Nitrogen dioxide and its determination in the atmosphere: A simple method for surveying ambient pollution concentrations. *Journal of Chemical Education*, 70(5), A133. <https://doi.org/10.1021/ed070pA133>
- Shorter, J. H., Nelson, D. D., Zahniser, M. S., Parrish, M. E., Crawford, D. R., & Gee, D. L. (2006). Measurement of nitrogen dioxide in cigarette smoke using quantum cascade tunable infrared laser differential absorption spectroscopy (TILDAS). *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 63(5), 994-1001. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2005.11.005>
- Smet, E., & Deboosere, S. (2007). Nieuwsbrief MilieuTechnologie. <https://www.trevi-env.com/files/pub/315.pdf>
- Spronken-Smith, R., & Walker, R. (2010). Can inquiry-based learning strengthen the links between teaching and disciplinary research? *Studies in Higher Education*, 35(6), 723-740. <https://doi.org/10.1080/03075070903315502>
- Stokking, K. M., & van der Schaaf, M. F. (1999). *Beoordelen van onderzoeksvaardigheden van leerlingen: Richtlijnen, alternatieven en achtergronden*. MesoConsult.

- Szyszkowicz, M., Zemek, R., Colman, I., Gardner, W., Kousha, T., & Smith-Doiron, M. (2020). Air Pollution and Emergency Department Visits for Mental Disorders among Youth. *Int J Environ Res Public Health*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph17124190>
- Tanis, M., Dobber, M., Zwart, R., & Oers, B. (2014). *Beter leren door onderzoek. Hoe begeleid je onderzoekend leren van leerlingen.*
- UCLL, Chemieleerkracht. (n.d.). *Kalkwater Als CO2 – Indicator*. Retrieved 6/05/2021 from <http://chemieleerkracht.blackbox.website/index.php/kalkwater-als-co2-indicator/>
- United States Environmental Protection Agency. (2020, 01-10-2020). *Particulate Matter (PM) Basics*. Retrieved 06-05-2021 from <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- Ural, E. (2016). The Effect of Guided-Inquiry Laboratory Experiments on Science Education Students' Chemistry Laboratory Attitudes, Anxiety and Achievement. *Journal of Education and Training Studies*, 4, 217-227. <https://doi.org/10.11114/jets.v4i4.1395>
- van Brederode, M. E., Zoon, S. A., & Meeter, M. (2020). Examining the effect of lab instructions on students' critical thinking during a chemical inquiry practical [10.1039/D0RP00020E]. *Chemistry Education Research and Practice*, 21(4), 1173-1182. <https://doi.org/10.1039/D0RP00020E>
- Van Meervelt, L. (2002). Kristallen - Een handleiding voor leerkrachten. <https://www.chem.kuleuven.be/bcc/kristallen.pdf>
- Vlaamse Milieumaatschappij. (2020). *Uitstoot en luchtkwaliteit in Vlaanderen - evaluatie 2020*. Retrieved 09-05-2021 from <https://www.vmm.be/publicaties/lucht-2020/uitstoot-en-luchtkwaliteit-in-vlaanderen-evaluatie-2020>
- Vlaamse Milieumaatschappij. (n.d.-a). *Grens- en advieswaarden fijnstof*. Retrieved 02-05-2021 from <https://www.vmm.be/lucht/fijn-stof/grens-en-advieswaarden-fijn-stof>
- Vlaamse Milieumaatschappij. (n.d.-b). *Grens- en advieswaarden stikstofoxiden*. Retrieved 09-05-2021 from <https://www.vmm.be/lucht/stikstofoxiden/grens-en-advieswaarden-stikstofoxiden>
- Vlaamse Overheid - Departement Omgeving. (n.d.). Achtergrondinformatie over luchtverontreiniging en geluidshinder afkomstig van gemotoriseerd verkeer. <https://omgeving.vlaanderen.be/problematiek-milieu-en-mobiliteit>
- Voets, M. (n.d.). Luchtverontreiniging - Handleiding voor leerkrachten. In U. L. Limburg (Ed.).
- WHO. (2018). *Ambient air pollution: Pollutants*. Retrieved 27-12-2020 from <https://www.who.int/airpollution/ambient/pollutants/en/>
- Widowati, A., Nurohman, S., & Anjarsari, P. (2017). Developing science learning material with authentic inquiry learning approach to improve problem solving and scientific attitude. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 6(1).
- Wigley, T. (1983). The pre-industrial carbon dioxide level. *Climatic Change*, 5(4), 315-320.
- Wilcox, J., Kruse, J., & Clough, M. (2015). Teaching Science Through Inquiry. *The Science Teacher*, 082(06). https://doi.org/10.2505/4/tst15_082_06_62
- Xu, H., & Talanquer, V. (2013). Effect of the level of inquiry of lab experiments on general chemistry students' written reflections. *Journal of Chemical Education*, 90(1), 21-28.
- Zeman, F. S., & Lackner, K. S. (2004). Capturing carbon dioxide directly from the atmosphere. *World Resource Review*, 16(2), 157-172.

Appendices

Appendix A:	Extra gegevens NO₂-experiment	61
Appendix B:	Leerkrachtenbundel	63
B.1	Omkadering	63
B.2	Fijnstof-experiment	64
B.3	NO ₂ -experiment	67
B.4	CO ₂ -experiment	72
Appendix C:	Risicoanalyses voor het fijnstof-experiment	79
Appendix D:	Risicoanalyses voor het NO₂-experiment	81
Appendix E:	Risicoanalyses voor het CO₂-experiment	85

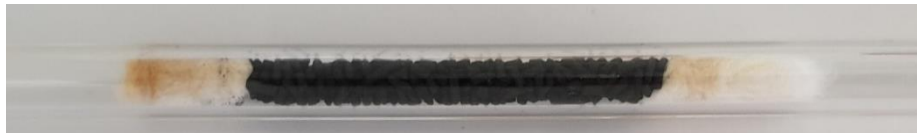
Appendix A: Extra gegevens NO₂-experiment



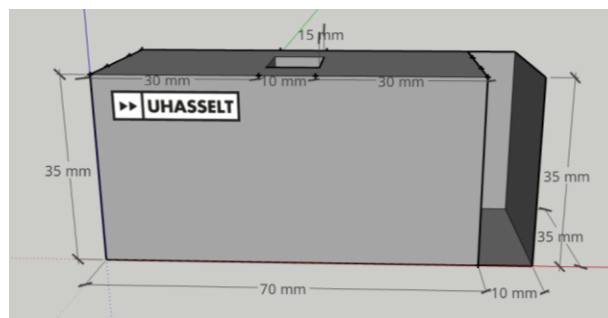
Figuur S1: Drie mogelijke opstellingen om NO₂ te verzamelen. (A) De uitlaatgassen van een voertuig, (B) de verbrandingsrook na houtverbranding en (C) sigarettenuitlaatgassen.

Tabel S1: Absorptiewaarden, van de verdunningsreeks, na 10 en 30 minuten.

Staal	Concentratie NO ₂ ⁻ (mg/l)	Absorptie na 10 minuten (550 nm)	Absorptie na 30 minuten (550 nm)
Blanco	0	0	0
1	0	0,008	0,009
2	0,15	0,121	0,128
3	0,30	0,206	0,206
4	0,60	0,396	0,393
5	1,20	0,776	0,774
6	2,40	1,518	1,522



Figuur S2: Actieve kool met de gele aanslag. De actieve kool heeft de gele dampen opgenomen waardoor er een duidelijke paarse kleur gedetecteerd kon worden.



Figuur S3: Mogelijk model voor een 3D-geprinte versie van de opstelling. Gecreëerd met Google SketchUp.

Appendix B: Leerkrachtenbundel

B.1 Omkadering

Naast de chemische experimenten, werd ook een leerkrachtenbundel ontwikkeld. Hier kan de leerkracht in de vorm van een kookboekstijl alle experimenten terugvinden. Op deze manier wordt het duidelijk voor de leerkracht in welke richting hij de leerlingen moet sturen. Het is namelijk niet de bedoeling dat deze bundel de leerlingen wordt aangereikt, maar dat de leerlingen via onderzoekend leren zelf aan de slag gaan.

De experimenten kunnen binnen het thema 'luchtvervuiling' geplaatst worden. De interesse van de leerlingen omtrent dit onderwerp kan op verschillende manieren gewekt worden gezien luchtvervuiling een *hot topic* is. Het volstaat om de actualiteit te volgen en van hieruit te vertrekken met krantenartikelen, korte filmfragmenten of zelfs een volledige documentaire over de luchtvervuiling (bijvoorbeeld: *Smog journeys: A short film about air pollution in China*). Ongetwijfeld zal dit heel wat vragen oproepen bij de leerlingen waarop dan ingespeeld kan worden door de leerkracht. Deze kan de leerlingen aansporen te brainstormen over het onderwerp en om een antwoord te zoeken op onderstaande vragen:

- Wat is luchtvervuiling?
- Welke stoffen vervuilen onze lucht?
- Wat is de oorzaak van luchtvervuiling?
- Hoe is het met de luchtkwaliteit in België gesteld?
- Hoe wordt de luchtkwaliteit gemeten? Kunnen wij dit zelf ook doen?

Uiteraard is de kans vrij klein dat de leerlingen zelf op de experimenten gaan komen die hier zijn uitgewerkt. Wij zijn er echter van overtuigd dat wanneer de leerlingen de juiste ondersteuning krijgen in hun oriënteringsproces, ze tot mooie en goede ideeën zullen komen gelijkend aan de uitgewerkte experimenten. Zo kunnen de leerlingen, eens ze weten dat fijnstof, stikstofoxiden en koolstofdioxide belangrijke pollutanten zijn, gestimuleerd worden om zelf een onderzoek te bedenken. Het uitwerkingsproces van de NO₂- en CO₂-experimenten kan gestimuleerd worden door het gestructureerd aanbieden van de nodige literatuur. Zo kunnen de leerlingen hun plan van aanpak vervolgens afstemmen op onderstaande uitgewerkte experimenten.

Zoals reeds eerder aangehaald, is de link tussen het experiment van fijnstof en luchtvervuiling minder voor de hand liggend. De uitwerking van dit experiment is wel begonnen vanuit de werking van een sensor (TEOM), maar in de praktijk is dit té onnauwkeurig om toe te passen in de context van fijnstof. Hoe dan ook, dit experiment blijft interessant om uit te voeren op een secundaire school wanneer de nadruk op de chemie achter de kristalvorming ligt. Het experiment kan in een andere context geplaatst worden opdat het relevanter wordt. Voorbeelden van andere contexten zijn: werking van een microfoon, oortjes/headset en een inbrekersalarm.

In de volgende secties kan het uitgewerkte protocol voor alle drie de experimenten teruggevonden worden. De stapsgewijze uitwerking wordt ondersteund met flowcharts, figuren en mogelijke proefopstellingen. Bovendien wordt de aanpak van elk experiment ook visueel voorgesteld met een infographic.

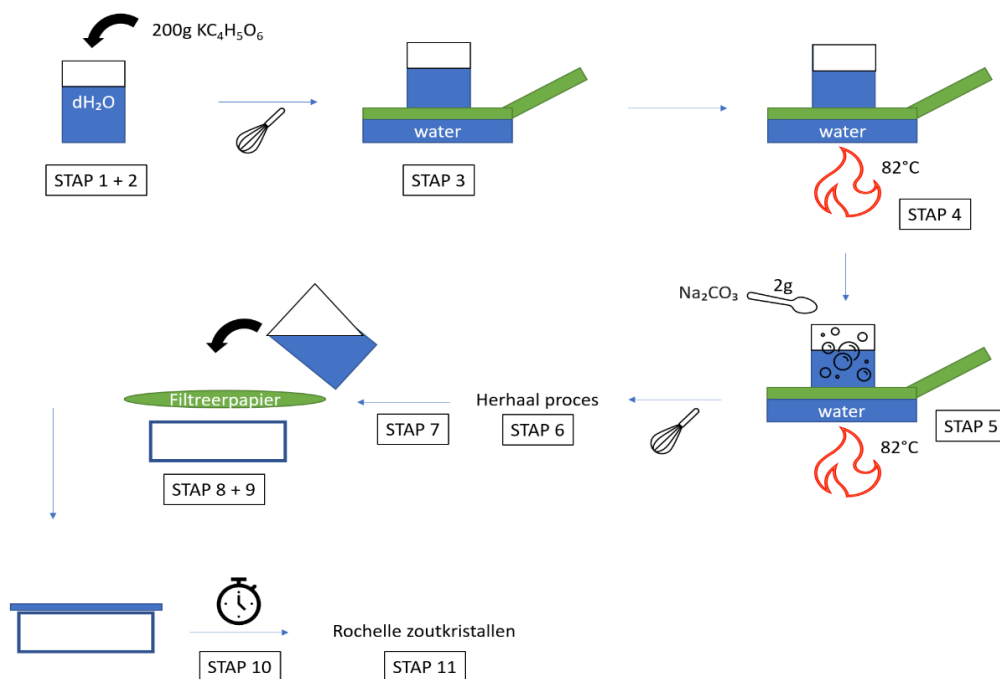
B.2 Fijnstof-experiment

In dit experiment is het de bedoeling dat de leerlingen in groepjes van vier leerlingen Rochellezoutkristallen maken. Deze kristallen kunnen vervolgens aan een oscilloscoop gemonteerd worden. Hiermee kan aangetoond worden dat wanneer er een massa op het kristal komt te liggen, er een verschil in spanning zal optreden.

B.2.1 Benodigheden per portie kristallen

- Lepel/roerstaaf
- Thermometer
- Bekerglas (800ml)
- Maatcilinder (500ml)
- Bunsenbrander + aansteker
- Vierpikkel met houder
- Trechter
- Filtreerpapier
- Weegschaal + weegschuitjes
- Middelgrote sauspan of inox kommetje gevuld met water
- 250 ml gedestilleerd water
- 200 g Kaliumbitartraat ($\text{KC}_4\text{H}_5\text{O}_6$)
- 75 g Natriumcarbonaat (Na_2CO_3)

B.2.2 Werkwijze maken van piëzo-elektrisch kristal



Figuur S4: Flowchart werkwijze maken van piëzo-elektrisch kristal.

B.2.3 Stappenplan

1. Meet 250 ml gedestilleerd water af in de maatcilinder.
2. Giet dit in een 800 ml bekeerglas en voeg 200 g $\text{KC}_4\text{H}_5\text{O}_6$ toe.
3. Verwarm de inox kom, gevuld met kraanwater, boven de bunsenbrander. Het kraanwater in deze kom dient als dubbele boiler.
4. Zet het bekeerglas in de inox kom en verwarm de oplossing tot 80-82°C. Houd de temperatuur bij met de thermometer.
5. Wanneer de oplossing 80-82°C heeft, voeg je 2 g Na_2CO_3 toe. Dit zal gaan bruisen en opborrelen. Pas wanneer het bruisen stopt, roer je de oplossing goed door. Hierdoor zal de oplossing opnieuw een beetje bruisen.
6. Herhaal het proces van het toevoegen van 2 g Na_2CO_3 en het roeren van de oplossing totdat de oplossing niet meer bruist en helder wordt. Er kunnen kleine deeltjes Na_2CO_3 op de bodem van het bekeerglas liggen, dit is niet erg.
7. Zodra de oplossing bij toevoeging van Na_2CO_3 niet meer bruist en helder is geworden, haal je het van het vuur.
8. Giet de oplossing, terwijl deze nog heet is, door een filtreerpapier om eventuele onopgeloste Na_2CO_3 -deeltjes uit de oplossing te verwijderen.
9. Giet de gefilterde oplossing in een plastic bak en dek deze licht af om te voorkomen dat stofdeeltjes in de oplossing kunnen vallen.
10. Bewaar de oplossing op kamertemperatuur voor overnachting. De volgende ochtend zullen er verschillende goede Rochellezoutkristallen zijn om uit te kiezen.
11. Selectie van Rochellezoutkristallen:
 - a. Giet de overgebleven oplossing af in een andere bak. Droog elk kristal af om ze voor te bereiden op de selectie.
 - b. Selecteer alle kristallen die glad zijn aan hun zijden en rechthoekig van vorm.
 - c. Kies het helderste kristal.

B.2.4 Werkwijze metingen

1. Verbind het kristal met een oscilloscoop, bijvoorbeeld de Analog Discovery 2 – oscilloscoop (Digilent) met software Waveforms (3.14.3). Let op: zorg voor een goed contact tussen het kristal en de oscilloscoop. Dit kan verbeterd worden door gebruik van aluminiumfolie.
2. Stel de parameters van de oscilloscoop zo gevoelig mogelijk in: millivolt over milliseconde.
3. Bepaal een referentiewaarde voor de spanning van het kristal (zonder massa toe te voegen) door de amplitude van de sinusfunctie aan te duiden met een rechte lijn.
4. Breng verschillende massa's aan op het kristal en bepaal de amplitude van de verkregen sinusfuncties.
5. Bekijk en vergelijk de verschillende bekomen grafieken.

PIEZOELEKTRISCH KRISTAL DE WERKWIJZE

VOORBEREIDING



PROEF- OPSTELLING



TOEVOEGEN NATRIUM- CARBONAAT



HELDERE OPLOSSING



OPLOSSING FILTEREN



OPLOSSING UITGIETEN



KRISTALLEN



METINGEN



B.3 NO₂-experiment

In dit experiment is het de bedoeling dat de leerlingen per vier samenwerken. Per groepje kunnen ze dan zelf bespreken wie welke oplossing maakt. Omwille van veiligheidsoverwegingen is het best dat de leerkracht het Griess-Saltzman (GS) reagens voorbereidt. Dit zou ook door de leerlingen zelf voorbereid kunnen worden, mits er een risicoanalyse uitgevoerd wordt voor de volgende stoffen:

- Sulfanilzuur (CAS: 121-57-3)
- N-(1-naftyl)-ethyleendiaminedihydrochloride (CAS: 1465-25-4)
- Azijnzuur (CAS: 64-19-7)

Dankzij het GS-reagens zal er een paarse kleur ontstaan na de reactie tussen NO₂ en het GS-reagens. Door de intensiteit van deze paarse kleur te vergelijken met een kalibratiecurve, kunnen de leerlingen de hoeveelheid NO₂, geproduceerd door een sigaret, bepalen.

Door het gebruik van een sigaret wordt er een link gelegd met luchtvervuiling: NO₂ is een van de vervuilende stoffen die een negatieve impact heeft op de gezondheid. Tegelijkertijd kan er, door het gebruik van de sigaret, een maatschappelijk thema aangehaald worden nl. roken en de gezondheid. Op die manier kan het multidisciplinair worden door biologie erbij te betrekken.

B.3.1 Benodigheden

Chemische stoffen

- Natriumnitriet, NaNO₂ (CAS nummer: 7632-00-0)
- Sulfanilzuur (CAS nummer: 121-57-3)
- Azijnzuur (CAS nummer: 64-19-7)
- N-(1-naftyl)-ethyleendiamine dihydrochloride, NEDA (CAS nummer: 1465-25-4)
- Sigaretten
- Actieve kool

Materialen

- Weegschaal
- Volumetrisch glaswerk (maatkolf, 100 ml of groter, maatbekers)
- Proefbuizen (minstens 10 ml)
- Micropipetten (indien dit niet aanwezig is, kan men ook grotere volumes bereiden waardoor volumetrische pipetten gebruikt kunnen worden)
- UV-vis spectrofotometer (550 nm) of smartphone met app (*ColorMeter Free*, Android)
- Eventueel kleurenwiel om zelf het groene achtergrondblad te bepalen (voor metingen met de app)
- Vacuümpomp / vacuümkraantje met bevestigingslagen

B.3.2 Bereiding

Natriumnitriet-stockoplossing (NaNO_2 , 3 g/l)

- Weeg 0,3 g NaNO_2
- Leg aan met 0,1 l demi-water
→ **3 g/l stockoplossing**

Natriumnitriet-werkoplossing (NaNO_2 , 0,03 g/l)

- Neem 0,1 ml NaNO_2 -stockoplossing
- Voeg 9,9 ml demi-water toe
→ **0,03 g/l werkoplossing**

N-(1-naftyl)-ethylenediamine dihydrochloride (NEDA, 1 g/l)

- Weeg 0,1 g NEDA
- Leng aan tot 100 ml met demi-water
→ **1 g/l NEDA-oplossing**

Griess-Saltzman reagens

- Weeg 0,5 g sulfanilzuur
- Voeg 14,1 ml azijnzuur toe (100%)
- Voeg 75,4 ml demi-water
- Voeg 2,04 ml NEDA (1 g/l) toe
- Aanlengen tot 100 ml
→ **beschermen van licht m.b.v. aluminiumfolie**

Natriumnitriet (NaNO_2) kalibratiecurve (begin met het grote volume eerst)

- *Maak de volgende 7 stalen met stijgende concentratie aan NaNO_2 .*

<i>NaNO₂ -werkoplossing (0,03 g/l)</i>	<i>Griess-Saltzman reagens</i>	<i>Totaal volume</i>	<i>Concentratie NO₂⁻</i>
<i>0,00 ml</i>	<i>10 ml</i>	<i>10 ml</i>	<i>0 mg/l</i>
<i>0,025 ml</i>	<i>9,975 ml</i>	<i>10 ml</i>	<i>0,075 mg/l</i>
<i>0,05 ml</i>	<i>9,95 ml</i>	<i>10 ml</i>	<i>0,15 mg/l</i>
<i>0,10 ml</i>	<i>9,90 ml</i>	<i>10 ml</i>	<i>0,30 mg/l</i>
<i>0,20 ml</i>	<i>9,80 ml</i>	<i>10 ml</i>	<i>0,60 mg/l</i>
<i>0,40 ml</i>	<i>9,60 ml</i>	<i>10 ml</i>	<i>1,2 mg/l</i>
<i>0,80 ml</i>	<i>9,20 ml</i>	<i>10 ml</i>	<i>2,4 mg/l</i>

- Meng goed!
- Laat de stalen 10 minuten staan (bescherm tegen het licht met aluminiumfolie)
- Analyseer de kleur bij 550 nm (met spectrofotometer) of via de app (zie 'opstelling')

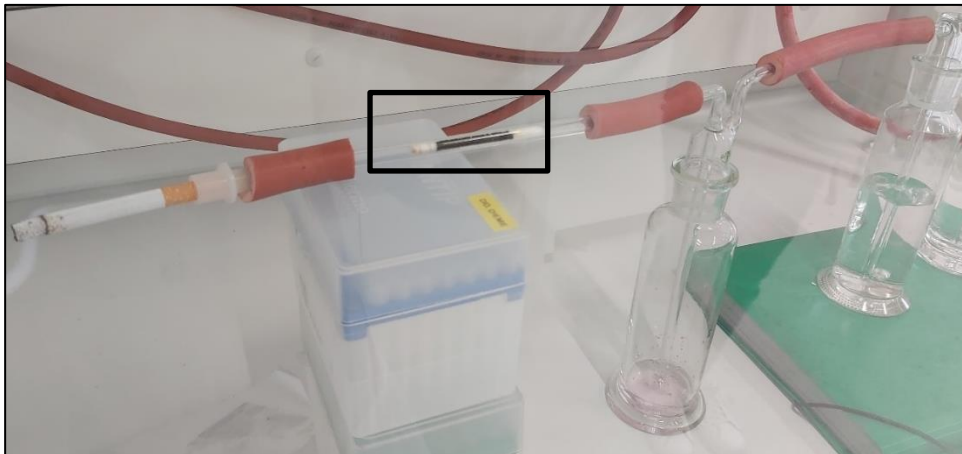
B.3.3 Opstelling

NO₂-uitstoot van de sigaret aanzuigen via vacuüm

- Maak gelijkaardige opstelling:



- Plaats in de eerste wasfles de Griess-Saltzman reagens (20 ml, of tot de gassen in de vloeistof worden getransporteerd en er bubbelvorming geobserveerd kan worden)
- Plaats in de twee volgende wasflessen kraantjeswater ter bescherming voor de vacuümleiding zodat er geen sigarettenrook in de leidingen kan geraken. Enkel de eerste wasfles is essentieel voor het experiment, de twee volgende wasflessen kunnen achterwege gelaten worden.
- Plaats tussen de eerste wasfles een beetje actieve kool zoals in onderstaande figuur en bevestig de sigaret.

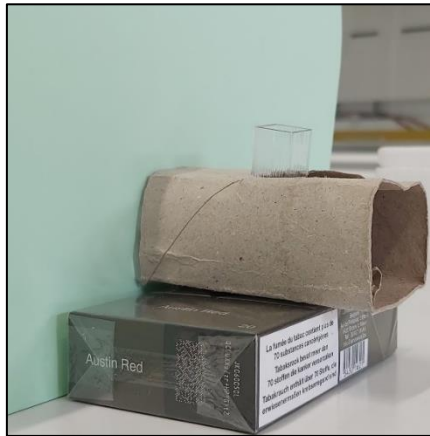


- Steek de sigaret aan en regel het vacuüm zodat er aanzuiging is.
- Laat de sigaret volledig opbranden tot aan de filter.
- Als alles verloopt zoals gepland, dan zou u in de eerste wasfles een lichtpaarse kleur kunnen observeren. Verbrand nog twee sigaretten voor betere kleuring.

Kleurintensiteit bepalen door gebruik te maken van de app ColorMeter Free (Android)

!! Dit kan zowel voor de verdunningsreeks als voor het sigarettenstaal gebruikt worden!!

- Bepaal de complementaire kleur van paars m.b.v. kleurenwiel (groen)
- Maak de volgende opstelling:



- Plaats de smartphone (met de app geopend) tegen de voorkant van de opstelling en plaats het staal (cuvetje of proefbuis) in de houder
- Noteer de G-waarde (van de RGB-waarden die de app detecteert)
- Als alles goed verloopt zou de G-waarde dalen, naarmate het staal paarser gekleurd is.

B.3.4 Resultaten

Zeven meetpunten van de verdunningsreeks om een kalibratiecurve te kunnen opstellen (absorptie in functie van de concentratie).

Indien de app gebruikt is: zeven RGB-waarden waarvan u eerst de G-waarden moet invullen in de volgende formule: $A = -\log(I/I_0)$ met I = G-waarde van het staal, I_0 = G-waarde van blanco-staal (demi-water) en A = absorptie. Vervolgens opnieuw een kalibratiecurve opstellen waarbij absorptie in functie van de concentratie wordt geplaatst.

Absorptiewaarden van het sigarettenstaal vergelijken met deze kalibratiecurve.

STIKSTOFDIOXIDE DE WERKWIJZE

VOORBEREIDING



OPLOSSINGEN VOORBEREIDEN

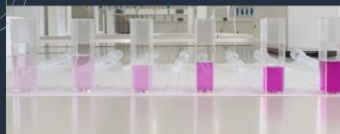


VERDUNNINGS- REEKS MAKEN

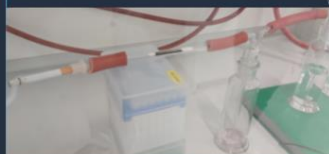


+ 10 MIN.

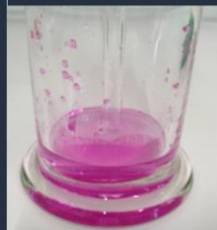
VERDUNNINGSREEKS



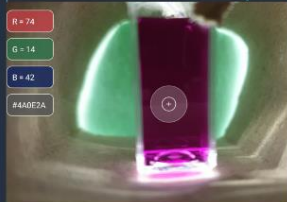
PROEF- OPSTELLING



RESULTAAT



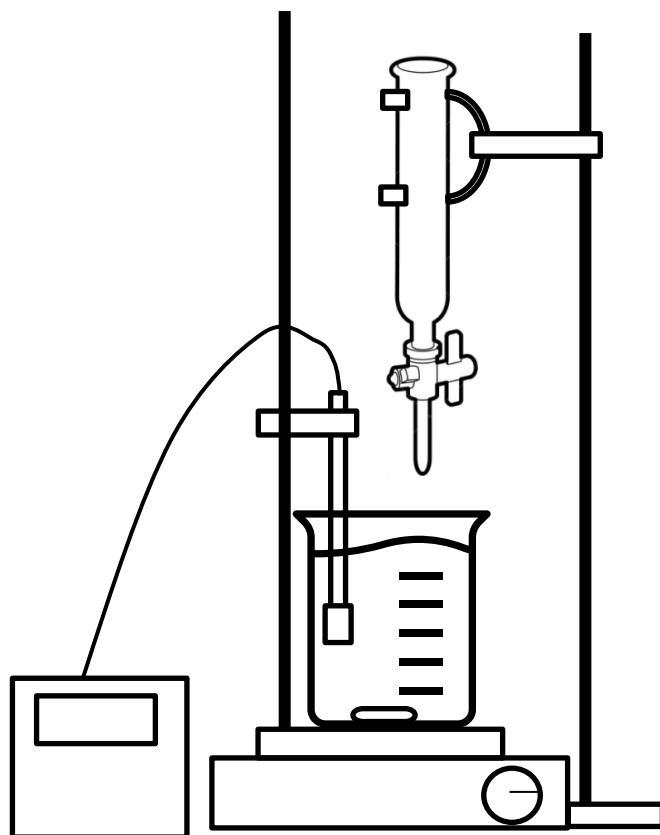
ANALYSE



B.4 CO₂-experiment

B.4.1 Benodigheden en opstelling

- Buret (50 ml)
- Klem + statief voor buret
- Statief voor pH-elektrode(n)
- Maatbeker, eventueel met aparte openingen voor pH-elektrode(n)
- pH-meter met elektrode(n)
- Volumetrisch pipet 25 ml
- Maatkolf 25 ml
- Trechter
- Indicatoren
- Fenolftaleïne (pH 8,2-10)
- Methyloranje (pH 3,0-4,4) (of Broomcresolgroen (pH 3,0-4,6))
- Standaardoplossing HCl: 50 ml per titratie aan 1 M
- Standaardoplossing NaOH: 25 ml per titratie aan 1,6 M
- Droogijs (CO₂)



Opstelling

De opstelling bestaat uit een buret, met een klem vastgemaakt aan een statief. Deze buret bevat de HCl standaardoplossing met gekende concentratie. Onder de buret staat een maatbeker, deze bevat het NaOH-Na₂CO₃ mengsel waarvan de concentratie wordt bepaald. De elektrode(n) van de pH-meter is met een statief vastgemaakt en zit in de oplossing. De maatbeker staat op een roerplaat met witte ondergrond.

De hoeveelheden in onderstaande handleiding zijn genoeg voor drie herhalingen.

B.4.2 Handelingen

Vorbereidingen

1. Maak 150 ml van de NaOH-oplossing (1,6 M) in een maatkolf.
2. Spoel de buret driemaal met leidingwater, driemaal met gedestilleerd water en eenmaal met de HCl-oplossing.
3. Zet de proefopstelling op zoals in bovenstaande tekening.
4. Kalibreer de pH-meter
5. Vul de buret met de HCl-oplossing tot boven de streep "0 ml", gebruik hiervoor een trechter. Laat wat van de oplossing uit de buret lopen tot aan de streep "0 ml". Let erop dat er geen luchtbelletjes in de buret en in de tip van het kraantje zit, dit kan verholpen worden door wat extra HCl-oplossing door de buret te laten lopen.

Uitvoeren experiment

6. Weeg ... g droogijst af. Doe dit door een grotere massa droogijst op een weegschuitje op de weegschaal te plaatsen. Het droogijst is namelijk erg vluchtig en de massa zal dus snel afnemen. Door een grotere massa op de weegschaal te plaatsen kan er even gewacht worden tot de massa is afgenomen tot de gewenste massa, waarna deze snel aan de NaOH-oplossing toegevoegd moet worden.
7. Voeg het droogijst toe aan de NaOH-oplossing, sluit de fles af en roer rustig totdat al het droogijst opgenomen is door de NaOH-oplossing.
8. Gebruik de volumetrische pipet om 25 ml van de NaOH-Na₂CO₃ oplossing in de maatbeker te pipeteren.
9. Voeg de magneet van de magnetische roerder toe aan de maatbeker.
10. Voeg 5 druppels fenolftaleïne toe aan de maatbeker. Opgelet: de kleur van de oplossing zal langzaam verkleuren van roze naar heel licht roze, bijna doorzichtig, dit is normaal bij heel hoge pH-waarde. Tijdens de titratie zal de roze kleur eerst terug sterker worden voordat het equivalentiepunt bereikt wordt en het verkleurt naar volledig doorzichtig.
11. Zet de maatbeker op de magnetische roerder, onder de buret.
12. Plaats de pH-elektrode(n) in de NaOH-Na₂CO₃-oplossing. Wacht tot de pH stabiliseert en noteer deze.
13. Start met titreren, voeg 1 ml HCl toe door aan het kraantje te draaien, en noteer hierna de pH-waarde.
Voor de eerste 15 ml: noteer de pH telkens na toevoegen 1 ml HCl. Na 15 ml: noteer de pH telkens na toevoegen 0,5 ml HCl.
14. Titreer tot kleuromslag (roze naar volledig doorzichtig). Noteer het toegevoegde volume HCl bij kleuromslag.
15. Voeg 5 druppels methyloranje toe.
16. Titreer tot kleuromslag (oranje naar rood). Noteer het toegevoegde volume HCl bij kleuromslag.
17. Titreer nog even door, zodat deze pH-waarden ook nog toegevoegd kunnen worden aan de titratiecurve.

Deze titratie kan driemaal herhaald worden, waarna het gemiddelde van equivalentie-volumes berekend kan worden.

Resultaten

- Volume bij tweede en derde equivalentiepunt: bepaald met behulp van kleurindicator;
- Volume bij tweede en derde equivalentiepunt: bepaald met behulp van titratiecurve.

B.4.3 Methode voor berekeningen

Om de CO₂-concentratie te kunnen bepalen, moet eerst het volume toegevoegd zuur bepaald worden. Dit kan door de volumes bij de kleuromslag te gebruiken (indicatormethode), of via een wiskundige analyse van de bekomen pH-curve. Deze wiskundige analyse kan op twee manieren: enerzijds via een numerieke afleiding, anderzijds via een curvefitting. Beide wiskundige methodes worden hier verder toegelicht. Vervolgens wordt de bepaling van de CO₂-massa besproken alsook de relatieve fout van de titratie.

Numerieke afleiding

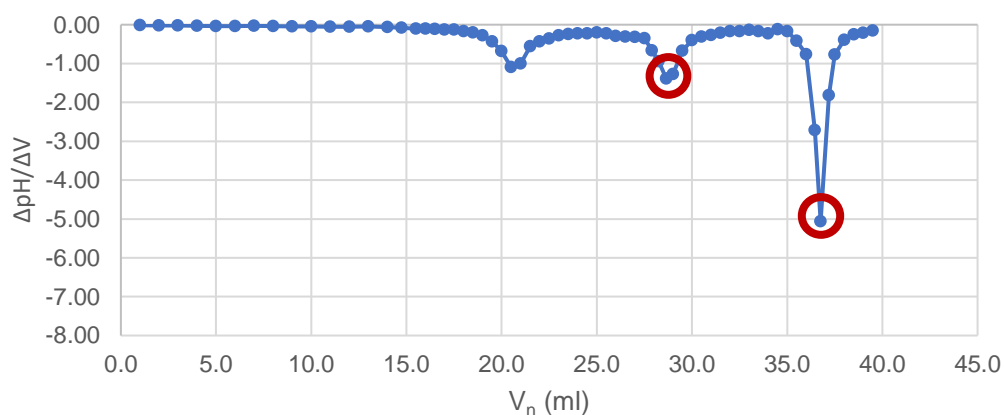
De numerieke afleiding gebeurt via een centrale of tweezijdige differentie, aangegeven met Formule 18. Dit wordt een eerste maal toegepast op de pH-curve om de eerste afgeleide te verkrijgen. Vervolgens wordt de tweede afgeleide bepaald door Formule 19 te gebruiken.

$$V_{gem,n} = \frac{V_{n+1} + V_{n-1}}{2} \quad (17)$$

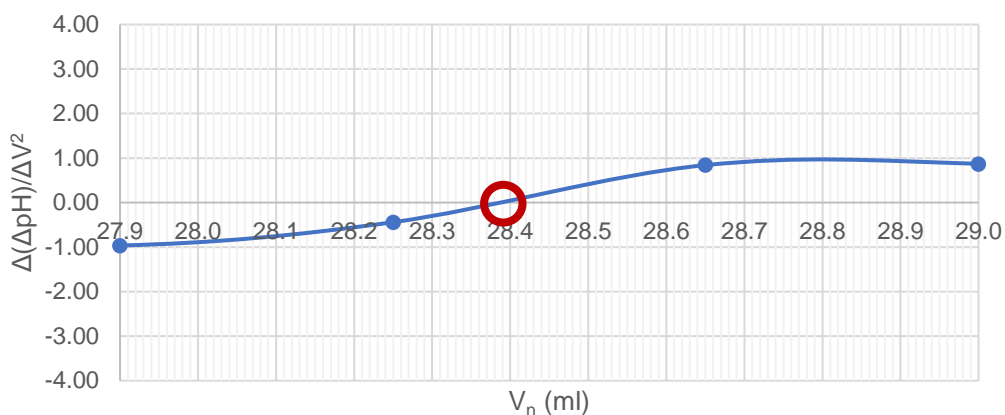
$$\left(\frac{\Delta pH}{\Delta V}\right)_n = \frac{pH_{n+1} - pH_{n-1}}{V_{n+1} - V_{n-1}} \quad (18)$$

$$\left(\frac{\Delta(\Delta pH)}{\Delta V^2}\right)_n = \frac{\Delta pH_{n+1} - \Delta pH_{n-1}}{V_{gem,n+1} - V_{gem,n-1}} \quad (19)$$

Deze eerste en tweede afgeleiden worden vervolgens uitgezet in functie van het gemiddelde volume, berekend volgens Formule 17. Figuur S5 geeft de curve voor de eerstegraadsafgeleide weer. De rood omcirkelde uitschieters geven aan waar het tweede en het derde equivalentiepunt zich bevinden. Vervolgens toont Figuur S6 de tweedegraadsafgeleide, uitvergroot rond het tweede equivalentiepunt. Op grafische wijze kan nu het toegevoegd volume zuur bepaald worden door het snijpunt met de y-as te vinden. Op een analoge wijze kan het volume voor het derde equivalentiepunt bepaald worden.



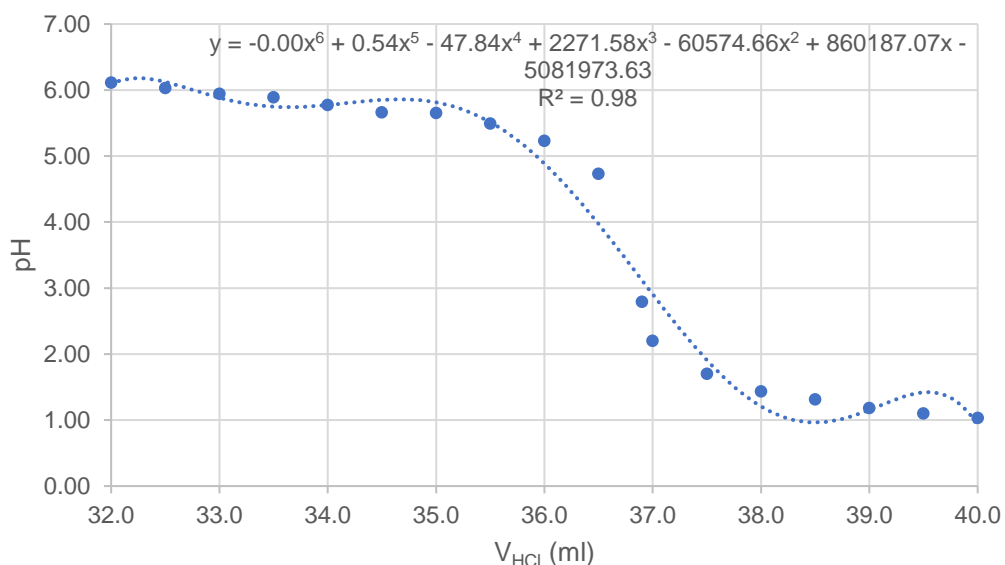
Figuur S5: Curve van de eerstegraadsafgeleide van Titratie 3.



Figuur S6: Curve van de tweedegraadsafgeleide van Titratie 3 rond het tweede equivalentiepoint.

Curvefitting

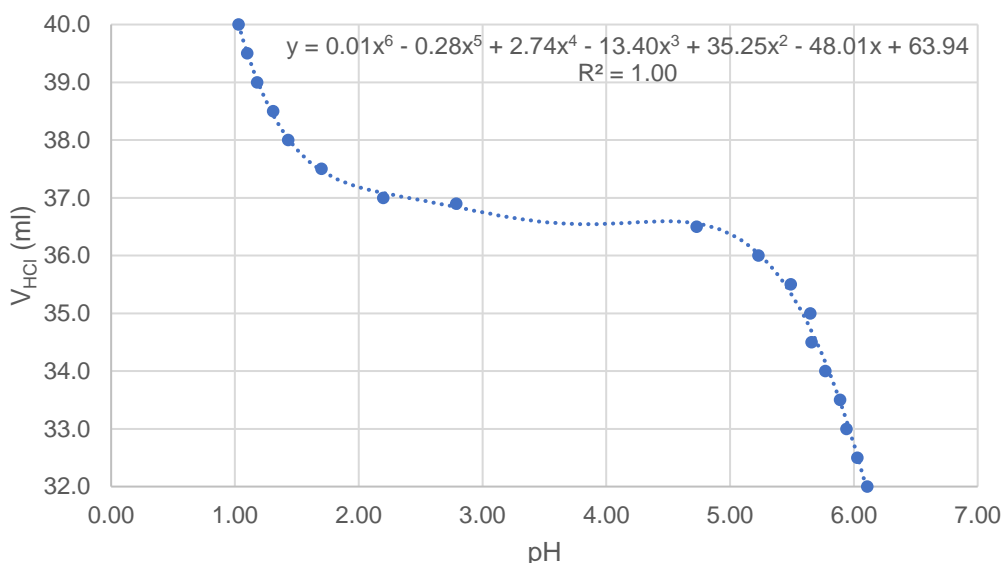
Deze methode vereist een functievoorschrift. Om deze methode eenvoudiger te laten verlopen, worden enkele meetpunten rond het te onderzoeken equivalentiepoint gebruikt. Hierdoor wordt de dataset beperkter. Met behulp van de automatische trendlijn in Microsoft Excel kan nu het functievoorschrift bepaald worden. Hiervan wordt de graad aangepast totdat de hoogste R^2 -waarde bereikt is.



Figuur S7: Curvefitting van de beperkte dataset rond equivalentiepoint drie van Titratie 3.

Op Figuur S7 wordt de curvefitting-methode, ter illustratie, toegepast op het derde equivalentiepoint. Het is visueel zichtbaar dat de trendlijn de datapunten niet optimaal volgt, hoewel de R^2 -waarde dit niet kan bevestigen. De R^2 -waarde, of determinatiecoëfficiënt, geeft aan hoe sterk de variantie in de afhankelijke variabele verklaard kan worden door de onafhankelijke variabele. Dit is een getal tussen 0 en 1: hoe dichter bij 1, hoe beter deze verklaring is.

Door de x- en y-as om te wisselen, worden deze datapunten wel beter gevolgd. Dit is ook zichtbaar aan de R^2 -waarde: deze is nu nagenoeg 1,00 (Figuur S8). Het functievoorschrift wordt nu tweemaal afgeleid naar x, om dan gelijkgesteld en opgelost te worden naar x. Deze x-waarde komt overeen met de pH-waarde en kan ingevuld worden in het functievoorschrift om het bijbehorende volume te bepalen.



Figuur S8: Curvfitting van de beperkte dataset rond equivalentiepunt drie van Titratie 3, na $y=x$.

Bepaling CO₂-massa

Via de indicatormethode of de wiskundige analyse, worden de volumes toegevoegd zuur (HCl) bekomen. Aangezien er twee belangrijke equivalentiepunten zijn (het tweede en derde), moet het volumeverschil tussen beide punten gebruikt worden. Door de formule van chemische hoeveelheid (Formule 20) en molaire concentratie (Formule 21) te combineren, wordt Formule 22 bekomen. Door nu het volumeverschil ΔV van HCl (tussen beide equivalentiepunten) in deze formule in te vullen, kan de CO₂-massa bepaald worden. Eventuele foutpercentages kunnen bepaald worden door een verhouding te nemen tussen het verschil van de gevonden en de origineel toegevoegde CO₂-massa's en de toegevoegde massa's, of kortweg de relatieve fout. Dit wordt toegepast om na te gaan of het experiment wel degelijk geschikt is om CO₂-massa te bepalen. Hoe kleiner het foutpercentage, hoe beter het experiment werkt.

$$n_B = \frac{m_B}{M_B} \quad (20)$$

$$c_B = \frac{n_B}{V_{opl.}} \quad (21)$$

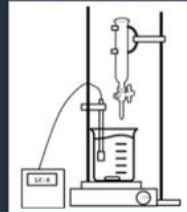
$$m_{CO_2} = c_{HCl} \cdot \Delta V \cdot M_{CO_2} \quad (22)$$

ZUUR-BASETITRATIE CO₂ BEPALING DE WERKWIJZE

VOORBEREIDING



PROEF- OPSTELLING



PH METING



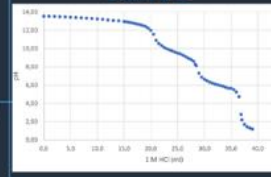
TITRATIE TOT 2E EQUIVALENTIEPUNT



TITRATIE TOT 3E EQUIVALENTIEPUNT



ANALYSEREN PH CURVE



CO₂ BEPALEN

$$n(B) = \frac{m(B)}{M(B)}$$

$$c(B) = \frac{n(B)}{V_{\text{ept}}}$$

$$m(\text{CO}_2) = c(\text{HCl}) \cdot V(\text{HCl}) \cdot M_{\text{CO}_2}$$

Appendix C: Risicoanalyses voor het fijnstof-experiment

Risicoanalyse chemicaliën secundair onderwijs

Mijn instelling

Kaliumwaterstof L(+)-tartraat

4,25 mol/l

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Niet ingedeeld als een gevaarlijke stof

H

P

Adviezen en wetgeving

COS-advies: geen advies

Jongeren op het werk

geen verbodsbepalingen

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- o Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Van deze stof in de opgegeven concentratie moet geen risicoanalyse gemaakt worden.

Let op!

Dit sluit niet uit dat de proef waarin deze stof gebruikt wordt risico's kan inhouden. Het is dan ook belangrijk een risicoanalyse van de proef en de proefopstelling te maken.

7-5-2021

Natriumcarbonaat (0 aq)

0,075 mol/l

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Niet ingedeeld als een gevaarlijke stof

H

P

Adviezen en wetgevingCOS-advies: **positief**

Jongeren op het werk

geen verbodsbepalingen

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- o Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Van deze stof in de opgegeven concentratie moet geen risicoanalyse gemaakt worden.

Let op!

Dit sluit niet uit dat de proef waarin deze stof gebruikt wordt risico's kan inhouden. Het is dan ook belangrijk een risicoanalyse van de proef en de proefopstelling te maken.

7-5-2021

Appendix D: Risicoanalyses voor het NO₂-experiment

Risicoanalyse chemicaliën secundair onderwijs

Mijn instelling

Azijnzuur (oplossing)

99%

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Ontvlambare vloeistof - categorie 3

Huidcorrosie/-irritatie - subcategorie 1A



Gevaar

H 226-314

Ontvlambare vloeistof en damp. Veroorzaakt ernstige brandwonden en oogletsel.

P 280.1+3+7-301+330+331-305+351+338

Beschermende handschoenen en oogbescherming dragen en in afzuigkast werken. NA INSLIKKEN: de mond spoelen. GEEN braken opwekken. BIJ CONTACT MET DE OGEN: voorzichtig afspoelen met water gedurende een aantal minuten; contactlenzen verwijderen, indien mogelijk; blijven spoelen.

Adviezen en wetgeving

COS-advies: positief

Jongeren op het werk

Jongeren op het werk: art. X.3-8, 1ste lid, 2° en 2de lid, 1° en bijlage X.3-1 van de codex over welzijn op het werk (boek X, titel 3) (verbod tot blootstelling - uitgezonderd werkzaamheden die noodzakelijk zijn voor de beroepsopleiding onder voorwaarden vermeld in art. X.3-10, §2) (enkel van toepassing als leerlingen in het kader van hun vorming een vorm van arbeid verrichten, i.e. in een practicum zelf proeven uitvoeren)

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Verantwoording

Kan voor deze stof een alternatieve stof gebruikt worden die didactisch gelijkwaardig is en die minder gevaarlijk is? Ja Neen

Kan een andere proef uitgevoerd worden met gelijkaardige didactische waarde met gebruik van minder gevaarlijke stoffen? Ja Neen

Kan een concentratie onder de ondergrens voor verbodsbepaling 'Jongeren op het werk' gebruikt worden? Ja Neen

Kan de leerlingenproef vervangen worden door een demoproef zonder verlies van didactische waarde? Ja Neen

Is deze proef te verantwoorden met het leerplan of de eindtermen? Ja Neen

Dit experiment streeft naar het behalen van de eindtermen AD1-AD5.

Preventie

- De leerlingen werken onder toezicht van de leraar
- Aan de leerlingen worden de nodige instructies gegeven (leerlingen kennen risico's en te nemen preventiemaatregelen)
- Er is een MSDS-fiche van de stof beschikbaar (elektronisch of afgedrukt)
- Het lokaal is voldoende geschikt voor de proef
- Er wordt met minimale hoeveelheden gewerkt
- Verwijderd houden van ontstekingsbronnen
- Aangepaste blusmiddelen zijn aanwezig en hun gebruik is gekend
- Beschermende kledij, handschoenen en oogbescherming dragen

Datum: 7-5-2021

Naam en handtekening leerkracht

Het is belangrijk ook een risicoanalyse van de proef en de proefopstelling te maken.

Natriumnitriet

0,04 mol/l

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Oxiderende vaste stof - categorie 3



Waarschuwing

H 272

P

Kan brand bevorderen; oxiderend.

Adviezen en wetgevingCOS-advies: **positief**

Jongeren op het werk

geen verbodsbepalingen

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- o Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Preventie

- De leerlingen werken onder toezicht van de leraar
- Aan de leerlingen worden de nodige instructies gegeven (leerlingen kennen risico's en te nemen preventiemaatregelen)
- Er is een MSDS-fiche van de stof beschikbaar (elektronisch of afgedrukt)
- Het lokaal is voldoende geschikt voor de proef
- Er wordt met minimale hoeveelheden gewerkt
- Ongewenst contact met brandbare materialen vermijden

Datum: 7-5-2021

Naam en handtekening leerkracht

N-(1-naftyl)-1-ethyleendiammoniumdichloride

0,0038 mol/l

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Doelorgaan toxiciteit bij eenmalige blootstelling - categorie 3 (H335)



Waarschuwing

H 335

Kan irritatie van de luchtwegen veroorzaken.

P 261

Inademing van stof/rook/gas/nevel/dampen/spuitnevel vermijden.

Adviezen en wetgeving

COS-advies: geen advies

Jongeren op het werk

geen verbodsbepalingen

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- Moederschapsbescherming: art. X.5-4 en bijlage X.5-1 van de codex over welzijn op het werk (boek X, titel 5) (risico-evaluatie vereist, onmiddellijke maatregelen indien hieruit blijkt dat er gezondheidsrisico is voor zwangere werknemers en/of het ongeboren kind)
- Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Verantwoording

Kan voor deze stof een alternatieve stof gebruikt worden die didactisch gelijkwaardig is en die minder gevaarlijk is?

 Ja Neen

Kan een andere proef uitgevoerd worden met gelijkaardige didactische waarde met gebruik van minder gevaarlijke stoffen?

 Ja Neen

Kan de leerlingenproef vervangen worden door een demoproef zonder verlies van didactische waarde?

 Ja Neen

Is deze proef te verantwoorden met het leerplan of de eindtermen?

 Ja Neen*Dit experiment streeft naar het behalen van de eindtermen AD1-AD5.*Preventie

- De leerlingen werken onder toezicht van de leraar
- Aan de leerlingen worden de nodige instructies gegeven (leerlingen kennen risico's en te nemen preventiemaatregelen)
- Er is een MSDS-fiche van de stof beschikbaar (elektronisch of afgedrukt)
- Het lokaal is voldoende geschikt voor de proef
- Er wordt met minimale hoeveelheden gewerkt
- Indien vluchtig of stofvorming: voldoende ventilatie/verluchting voorzien

Datum: 7-5-2021

Naam en handtekening leerkracht

Het is belangrijk ook een risicoanalyse van de proef en de proefopstelling te maken.

Sulfanilzuur

0,028 mol/l

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Niet ingedeeld als een gevaarlijke stof

H EUH208.27

P

Bevat sulfanilzuur. Kan een allergische reactie veroorzaken.

Adviezen en wetgeving

COS-advies: **positief**

Jongeren op het werk

geen verbodsbepalingen

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Van deze stof in de opgegeven concentratie moet geen risicoanalyse gemaakt worden.

Let op!

Dit sluit niet uit dat de proef waarin deze stof gebruikt wordt risico's kan inhouden. Het is dan ook belangrijk een risicoanalyse van de proef en de proefopstelling te maken.

7-5-2021

Appendix E: Risicoanalyses voor het CO₂-experiment

Risicoanalyse chemicaliën secundair onderwijs

Mijn instelling

Natriumcarbonaat (0 aq)

0,075 mol/l

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Niet ingedeeld als een gevaarlijke stof

H

P

Adviezen en wetgeving

COS-advies: **positief**

Jongeren op het werk

geen verbodsbepalingen

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- o Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Van deze stof in de opgegeven concentratie moet geen risicoanalyse gemaakt worden.

Let op!

Dit sluit niet uit dat de proef waarin deze stof gebruikt wordt risico's kan inhouden. Het is dan ook belangrijk een risicoanalyse van de proef en de proefopstelling te maken.

7-5-2021

Natriumhydroxide

1,6M

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Huidcorrosie/-irritatie - subcategorie 1A



Gevaar

H 314

Veroorzaakt ernstige brandwonden en oogletsel.

P 280.1+3-301+330+331-305+351+338

Beschermende handschoenen en oogbescherming dragen. NA INSLIKKEN: de mond spoelen. GEEN braken opwekken. BIJ CONTACT MET DE OGEN: voorzichtig afspoelen met water gedurende een aantal minuten; contactlenzen verwijderen, indien mogelijk; blijven spoelen.

Adviezen en wetgeving

COS-advies: positief

Jongeren op het werk

Jongeren op het werk: art. X.3-8, 1ste lid, 2° en 2de lid, 1° en bijlage X.3-1 van de codex over welzijn op het werk (boek X, titel 3) (verbod tot blootstelling - uitgezonderd werkzaamheden die noodzakelijk zijn voor de beroepsopleiding onder voorwaarden vermeld in art. X.3-10, §2) (enkel van toepassing als leerlingen in het kader van hun vorming een vorm van arbeid verrichten, i.e. in een practicum zelf proeven uitvoeren)

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- o Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Verantwoording

- Kan voor deze stof een alternatieve stof gebruikt worden die didactisch gelijkwaardig is en die minder gevaarlijk is? Ja Neen
- Kan een andere proef uitgevoerd worden met gelijkaardige didactische waarde met gebruik van minder gevaarlijke stoffen? Ja Neen
- Kan een concentratie onder de ondergrens voor verbodsbepaling 'Jongeren op het werk' gebruikt worden? Ja Neen
- Kan de leerlingenproef vervangen worden door een demoproef zonder verlies van didactische waarde? Ja Neen
- Is deze proef te verantwoorden met het leerplan of de eindtermen? Ja Neen
- Dit experiment streeft naar het behalen van de eindtermen AD1-AD5.*

Preventie

- De leerlingen werken onder toezicht van de leraar
- Aan de leerlingen worden de nodige instructies gegeven (leerlingen kennen risico's en te nemen preventie maatregelen)
- Er is een MSDS-fiche van de stof beschikbaar (elektronisch of afgedrukt)
- Het lokaal is voldoende geschikt voor de proef
- Er wordt met minimale hoeveelheden gewerkt
- Beschermende kledij, handschoenen en oogbescherming dragen

Datum: 7-5-2021

Naam en handtekening leerkracht

Het is belangrijk ook een risicoanalyse van de proef en de proefopstelling te maken.

Zoutzuur

1 M

leerlingenproef, graad 3, studierichting met klemtoon op chemie

Indeling en etikettering

Niet ingedeeld als een gevaarlijke stof

H EUH210

P

Veiligheidsinformatieblad op verzoek verkrijgbaar.

Adviezen en wetgeving

COS-advies: **positief**

Jongeren op het werk

geen verbodsbepalingen

Overige wetgeving van toepassing op deze stof in de vermelde concentratie

- o Chemische agentia: titel 1 van boek VI van de codex over welzijn op het werk (diverse bepalingen)

Van deze stof in de opgegeven concentratie moet geen risicoanalyse gemaakt worden.

Let op!

Dit sluit niet uit dat de proef waarin deze stof gebruikt wordt risico's kan inhouden. Het is dan ook belangrijk een risicoanalyse van de proef en de proefopstelling te maken.

7-5-2021