

TNO-rapport**TNO 2020 R11703A****Onderzoek naar het vrijkomen van stof en
schadelijke componenten tijdens handelingen
met ballast****Circulair Economy &
Environment**Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nlT +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75

Datum 31 augustus 2021

Auteur(s)

Aantal pagina's	65 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	ProRail
Projectnaam	Stofonderzoek ballast
Projectnummer	060.39579

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

Samenvatting

Inleiding en doelstelling

Bij het vervaardigen, transporteren en verwerken van ballast in het spoor ontstaat (kwarts)stof. Door de spoorbranche zijn collectieve maatregelen genomen om blootstelling aan kwartsstof zoveel mogelijk te beperken. Via diverse maatregelen wordt getracht stofvorming tijdens handelingen te verminderen en de werknemers te beschermen. Er is echter onvoldoende beleid dat zich richt op het aanpakken dan wel wegnemen van de gevaarbron: het type gesteente en het productieproces in de groeve. De spoorbranche voldoet hiermee mogelijk niet aan de Arbeidsomstandighedenwet. ProRail heeft TNO gevraagd om een vergelijkend onderzoek uit te voeren naar de emissie van en blootstelling aan stof van verschillende typen gesteenten afkomstig van twaalf gecertificeerde steengroeven. Het algemene doel van dit onderzoek is om vast te stellen welke risico's verschillende gesteenten (groeves) hebben op de gezondheid van de verwerkers van ballast en de omgeving.

Uitvoering onderzoek

Om de betrouwbaarheid van de meetresultaten te kunnen garanderen zijn door TNO op de productielocaties en steengroeven zelf monsters van ballast type 1 (31,5 – 50mm) genomen, zodat de integriteit van het materiaal tijdens transport behouden bleef. Bij iedere locatie is tevens informatie opgevraagd betreffende petrografische eigenschappen (o.a. kwartspercentage) en hardheidskenmerken (o.a. Los Angeles en micro-Deval) van het ballastmateriaal om relaties te kunnen leggen met de gemeten stof- en kwartsconcentraties. Voor zover mogelijk is tevens een inspectie uitgevoerd van de wasinstallatie die het stof verwijdt.

Voor de vergelijkbaarheid van de meetresultaten zijn vervolgens onder geconditioneerde omstandigheden stofmetingen uitgevoerd tijdens het simuleren van activiteiten in een experimentele opstelling. Deze zogenoemde simulatietesten zijn in het laboratorium van TNO uitgevoerd, waarbij de impact van het storten (tijdens laden en lossen) is gesimuleerd. Om de meetresultaten van de simulatietesten van deze twaalf typen ballast te kunnen relateren aan de activiteiten en handelingen in de praktijk, zijn met het porfier (kwartsmicrodioriet) gesteente uit Quenast additionele praktijkmetingen uitgevoerd tijdens transporthandelingen, vanaf de steengroeve tot aan het spoor in Geldermalsen. De hierbij bepaalde correlatie tussen de praktijk- en simulatiemetingen is vervolgens gebruikt om de stofemissie en blootstelling bij beladen, overslag en lossen van de andere typen ballast af te leiden.

Tijdens de simulatietesten en transporthandelingen zijn metingen van inhaleerbaar stof en respirabel stof uitgevoerd. Ook is het stof verder onderzocht op schadelijke componenten, zoals respirabel kristallijn silica (kwarts, trydimiet, cristoballiet), vezelvormige bestanddelen (o.a. asbest en erioniet), nikkelhoudende mineralen (o.a. bunseniet en milleriet) en mica's.

Belangrijkste resultaten en conclusies

Stof (fines)

Het op locatie wassen van de ballast kan het percentage stof drastisch reduceren. Van alle typen ballast, bemonsterd op de steengroeve (productielocatie), is het percentage 'fines' (fractie <63 µm) kleiner dan 0,4% en ligt daarmee onder de gestelde eis in de SPC00033 V005 (<0,5%). Er zijn wel onderlinge verschillen, die voor een belangrijk deel te maken hebben met het ontwerp van de wasinstallatie (o.a. aantal sproeiers) en de hoeveelheid waswater. Meer sproeiers en een hoger volume aan waswater hebben een duidelijk gunstig effect op de wassing en daarmee op het verlagen van het percentage stof. Het verlagen van het percentage stof zorgt ervoor dat tijdens handelingen met ballast de emissie aan stof en respirabel kwarts (kristallijn silica) wordt gereduceerd. **Op basis van simulatiemetingen blijkt dat bij een halvering van het percentage 'fines' de emissie van inhaleerbaar en respirabel stof en respirabel kwarts met een factor 2 afneemt. Praktijkmetingen bevestigen dit beeld, met een reductiefactor van 1½ - 2.**

Type gesteente

Ook het type gesteente heeft een duidelijk effect op de stofemissie. In grote lijnen zijn de gesteenten in drie groepen in te delen: (1) zandsteen (2) kwarts(micro)dioriet, granietgneis, kwartsiet en basaniet en (3) granodioriet. Bij de simulatie experimenten met zandsteen wordt de laagste stofemissie gemeten en bij granodioriet de hoogste stofemissie. Als kanttekening moet worden vermeld dat granodioriet uit Jelsa is getest als type 2 (22 - 40mm) gesteente, wat een negatieve invloed zou kunnen hebben op de stofontwikkeling.

Alhoewel het type gesteente een effect heeft op de stofvorming is de invloed van de hardheid en slijtvastheid van het gesteente minimaal. Voor de inhaleerbare stoffractie is geen correlatie aangetoond met Los Angeles (LA) waarden en micro-Deval waarden van de gesteenten. **Alleen voor de respirabele stoffractie is er een matige correlatie met de micro-Deval waarden van het ballastmateriaal. Bij de slijtvastere gesteenten lijkt de vorming van respirabel stof juist toe te nemen, wat betekent dat de slijtvastheid van het gesteente een tegengesteld effect heeft op de mate van stofvorming.**

Voor de meeste typen gesteenten is de emissie van respirabel kwarts (kristallijn silica) vergelijkbaar. Bij twee typen gesteenten wordt duidelijk meer respirabel kwarts geëmitteerd: dit zijn het granodiorietgesteente uit Glensanda en het kwartsietgesteente uit Taben-Rodt. Uit de petrografische beschrijving van het kwartsiet gesteente blijkt dat daarin duidelijk meer kwarts aanwezig is (≥70%) dan in de overige typen gesteenten (<55%), wat de hoge emissie aan respirabel kwarts (deels) zou kunnen verklaren.

Schadelijke componenten

Bekend is dat de genoemde schadelijke componenten sporadisch als (micro)verontreiniging in de gesteenten kunnen voorkomen. Aangezien TNO per steengroeve op één moment één monster heeft geanalyseerd dient het resultaat als indicatief te worden beschouwd. **Uitgezonderd van kristallijn silica zijn in geen van de gesteenten schadelijke componenten (zoals vezels en nikkelhoudend mineralen) aangetroffen.**

Handelingen in de praktijk

De gemeten concentraties aan inhaleerbaar- en respirabel stof en respirabel kwarts (kristallijn silica) tijdens de diverse transport handelingen met het porfiergesteente uit Quenast blijven ruim onder de meest strenge grenswaarden binnen Europa (inhaleerbaar stof: 4 mg/m³, respirabel stof: 1,25 mg/m³ en respirabel kwartsstof: 75 µg/m³). Voorafgaand aan deze laad- en losactiviteiten is het materiaal steeds bevochtigd. Tijdens verdere handelingen met het ballast in het spoor (stopmachine en profileermachine) is wel een duidelijke verhoging te zien in de gemeten stof- en kwartsconcentraties, waarbij grenswaarden worden overschreden. Hierbij is de ballast niet meer bevochtigd en moet worden opgemerkt dat de metingen moeten worden beschouwd als 'worst case', omdat ze dicht op de kortdurende handelingen zijn uitgevoerd.

Verder blijkt uit de metingen dat iedere extra handeling (voornamelijk storten) ervoor zorgt dat er meer stof (fines) ontstaat. Voor het porfiergesteente uit Quenast blijkt dat per handeling het percentage 'fines' (fractie <63 µm), in absolute zin, met ca. 0,1%-punt toeneemt. Voorafgaand aan alle laad- en losactiviteiten van de ballast is het materiaal bevochtigd. Dit heeft een gunstig effect gehad op de emissie van stof en respirabel kwartsstof. **Door het bevochtigen van de ballast voorafgaand aan handelingen wordt de stofvorming met een factor 10 tot 100 gereduceerd.** Het is waarschijnlijk dat de hoge stofemissie tijdens de activiteiten met de stop- en profileermachine, mede is veroorzaakt door een lager vochtgehalte. Voorafgaand aan deze activiteiten is de ballast namelijk niet extra bevochtigd. Het is echter onduidelijk of het extra besproeien van de ballast zal resulteren in een dusdanige verlaging van de stofemissie dat grenswaarden niet meer worden overschreden.

Voor de gesteenten uit alle overige steengroeven zijn door middel van simulatie-praktijk-correlaties stof- en respirabel kwartsconcentraties afgeleid voor dezelfde transporthandelingen als voor het gesteente uit Quenast. **Op de groeves (productielocaties) zullen, tijdens het beladen van transportmiddelen, de gehalten aan stof en respirabel kwarts voor de meeste gesteenten onder de meest strenge grenswaarden binnen Europa blijven. Alleen voor de gesteenten uit Glensanda, Jelsa en Taben-Rodt is het mogelijk dat grenswaarden voor inhaleerbaar stof en/of respirabel kwarts worden overschreden.** Hier wel als opmerking dat de ballast uit Jelsa van het type 2 (22 – 40mm) was.

Bij handelingen met de gesteenten uit Jelsa en Glensanda komt relatief veel inhaleerbaar stof vrij en zal de grenswaarde, ook tijdens de transporthandelingen, waarschijnlijk worden overschreden. Bij het storten van de ballast in het spoor is het waarschijnlijk dat bij alle typen gesteente, met uitzondering van het zandsteen gesteente uit Seljestokken, de grenswaarde voor inhaleerbaar stof zal worden overschreden. Bij de meeste praktijkhandelingen met het gesteente uit Taben-Rodt is het waarschijnlijk dat de grenswaarde voor respirabel kwarts zal worden overschreden.

Bronmaatregelen

Bij werkzaamheden met ballast dient te worden gewaarborgd dat blootstelling aan inhaleerbaar en respirabel stof en respirabel kwartsstof tijdens handelingen (in de steengroeve) zoveel mogelijk wordt beperkt waarbij grenswaarden in géén geval mogen worden overschreden.

Volgens de arbeidshygiënische strategie in de Arbowet is het belangrijk om eerst de gevaarbron (het type gesteente en het productieproces in de groeve) aan te pakken. Als het nemen van deze bronmaatregelen niet leidt tot het volledig wegnemen van het gevaar ((kwarts)stof) dienen collectieve maatregelen te worden genomen. ProRail voldoet deels aan deze verplichting door strenge eisen te stellen aan het percentage stof (fines). Echter, om volledig te voldoen aan de verplichtingen in de Arbowet, is het selecteren van gesteenten op basis van de vorming van kwartsstof in de lucht gewenst. Hierbij dient ook rekening te worden gehouden met duurzaamheids- en veiligheidsaspecten conform de SPC00033 V005. Gezien het feit dat bij handelingen met de gesteenten uit Glensanda en Taben-Rodt vermoedelijk grenswaarden worden overschreden is uitsluiting van deze gesteenten voor toepassing als ballast in het spoor wenselijk. Voor het gesteente uit Jelsa is dit onduidelijk aangezien alleen het type 2 ballast (22 – 40mm) is getest.

Aanbevelingen

Om stofvorming te verminderen wordt aanbevolen om het percentage stof zo laag mogelijk te houden door middel van wassen op de productielocaties en het aantal handelingen tijdens transport te beperken. Daarnaast is het bevochtigen van het ballastmateriaal voorafgaand aan iedere handeling essentieel.

Op de meeste productielocaties zijn verbeteringen aan de wasinstallatie mogelijk om het percentage stof nog verder terug te brengen. TNO heeft hierbij alleen gekeken naar de technische haalbaarheid los van eventuele economische aspecten.

Voor granodioriet uit Glensanda en kwartsiet uit Taben-Rodt zullen grenswaarden voor respectievelijk inhaleerbaar stof en respirabel kwarts vermoedelijk worden overschreden bij handelingen met ballast. In overeenstemming met de arbeidshygiënische strategie in de Arbowet wordt aanbevolen om als bronmaatregel deze typen gesteenten niet meer als ballast in het spoor toe te passen.

Om de observaties en conclusies uit dit onderzoek te bevestiging wordt aanbevolen om voor minstens één ander type gesteente de stofvorming tijdens transport (beladen, overslag en lossen) in kaart te brengen.

Gezien de grote stofemissie tijdens de activiteiten met de stop- en profileermachine wordt aanbevolen om het ballastbed in het spoor en de reserveballast in de machine voorafgaand aan het stabiliseren en profileren te besproeien/bevochtigen. Geadviseerd wordt om het effect van deze maatregel te onderzoeken met aanvullende stof- en kwartsmetingen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding en doelstelling	7
2	Plan van aanpak.....	8
3	Uitvoering onderzoek	11
3.1	Inspectie steengroeven en monsterneming ballast	11
3.2	Simulatiemetingen	13
3.3	Praktijkmetingen	15
4	Methoden	18
4.1	Bepaling hoeveelheid stof	18
4.2	Continue stof metingen	18
4.3	Inhaleerbaar en respirabel stof.....	18
4.4	Respirabel kristallijn silica	19
4.5	Schadelijke bestanddelen met SEM/EDX	19
5	Beoordeling blootstelling en grenswaarden	20
5.1	Inhaleerbaar en respirabel stof.....	20
5.2	Schadelijke componenten	22
6	Resultaten	23
6.1	Inspectie steengroeven en karakterisatie ballast gesteenten	23
6.2	Simulatiemetingen	26
6.3	Praktijkmetingen tijdens handelingen met gesteente uit Quenast	41
6.4	Inzicht in stofemissie van andere typen gesteenten.....	48
7	Conclusies en aanbevelingen	52
7.1	Stof (fines)	52
7.2	Type gesteente	52
7.3	Schadelijke componenten	53
7.4	Handelingen in de praktijk	53
7.5	Bronmaatregelen	54
7.6	Aanbevelingen	55
8	Referenties	56
9	Ondertekening	57
	Bijlage A. Foto's van de geteste typen gesteente	57
	Bijlage B. Foto's wasinstallaties op de steengroeven	60
	Bijlage C. Afleiding concentraties bij handelingen	62

1 Inleiding en doelstelling

Bij het vervaardigen, transporteren en verwerken van ballast in het spoor ontstaat stof. Uit meerdere metingen is vastgesteld dat zonder beschermingsmaatregelen bij bepaalde werkmethoden de wettelijke grenswaarde voor kwartsstof ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) kan worden overschreden. Mitigerende maatregelen die de gezondheid van het personeel garanderen zijn meerdere malen vastgesteld (onderzoek ProRail 1993 en 1998, onderzoek SAS 2010 en onderzoek Swietelsky 2017-2018). Naar aanleiding van de hierboven genoemde problematiek inzake de stofvorming (kwartsstof) is er bij ProRail (AM Civiele Techniek) behoefte aan meer duidelijk over de stofvorming bij handelingen met ballast.

Door de spoorbranche zijn collectieve maatregelen genomen om blootstelling aan kwartsstof zoveel mogelijk te beperken. Via diverse maatregelen wordt getracht stofvorming te verminderen en de werknemers te beschermen. Er is echter geen beleid dat zich richt op het aanpakken dan wel wegnemen van de gevaarbron: het type gesteente en het productieproces in de groeve. De spoorbranche voldoet hiermee niet aan de Arbeidsomstandighedenwet en het Arbeidsomstandighedenbesluit (conclusie uit rapport 4Infra 080118). ProRail heeft TNO gevraagd om een vergelijkend onderzoek uit te voeren naar de emissie van en blootstelling aan stof vanuit verschillende typen gesteenten, afkomstig van de twaalf gecertificeerde steengroeven. Het gaat om drie situaties: 1) het beladen van transportmiddelen op de steengroeve zelf, 2) het overladen op andere transportmiddelen en 3) het lossen van de ballast. Het project is vanuit AM Civiele Techniek begeleid door:

Het algemene doel van dit onderzoek is om vast te stellen welke risico's verschillende gesteenten (groeves) hebben op de gezondheid voor de verwerkers van ballast en de omgeving.

Voor dit onderzoek zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. Er wordt onderscheid gemaakt in het originele ballast materiaal op de groeve zelf en de ballast dat na laden, transport, lossen en opslag door ProRail wordt verwerkt in het spoor. De handelingen en activiteiten met de ballast kunnen namelijk tot gevolg hebben dat het te verwerken materiaal meer stoffig is dan het originele materiaal op de steengroeve.
2. De blootstelling aan respirabel en inhaleerbaar stof tijdens het beladen, overladen en lossen in/uit de transportmiddelen (boot, trein of vrachtwagen) moet aanvaardbaar zijn. Dit betekent dat grenswaarden niet mogen worden overschreden voor respirabel en inhaleerbaar stof inclusief de eventueel aanwezige schadelijke (carcinogene/mutagene) componenten in dit stof.
3. In het kader van vergelijkbaarheid van meetresultaten dienen de metingen tijdens deze activiteiten op dezelfde wijze en onder dezelfde omstandigheden te worden uitgevoerd als de (eventuele) toekomstige metingen tijdens het toepassen van het ballastmateriaal op het spoortraject in Nederland.

2 Plan van aanpak

Voor vergelijkbaarheid van de meetresultaten dienen de emissie- en blootstellingsmetingen op de 12 steengroeven op dezelfde wijze en onder dezelfde omstandigheden te worden uitgevoerd. De onderstaande factoren hebben invloed op de emissie- en blootstelling van stof:

1. weersomstandigheden (neerslag, windrichting en -snelheid, luchtvochtigheid en temperatuur),
2. vochtigheid van het materiaal en
3. de exacte uitvoering van de activiteiten (o.a. transportmiddelen, storthoogte, hoeveelheid materiaal)

Aangezien de uitvoering van de activiteiten op locatie lastig zijn te standaardiseren en de weersomstandigheden en luchtvochtigheid van het materiaal altijd anders zullen zijn, is het praktisch gezien niet goed mogelijk om op elke steengroeve de metingen onder identieke omstandigheden uit te voeren. Dit maakt de interpretatie van de metingen zeer lastig, zo niet onmogelijk.

Om de betrouwbaarheid en vergelijkbaarheid van meetresultaten te kunnen garanderen worden stofmetingen uitgevoerd tijdens het simuleren van activiteiten in een experimentele opstelling onder geconditioneerde omstandigheden. Deze zogenoemde simulatietesten worden in het laboratorium van TNO uitgevoerd, waarbij de impact van het storten (bij laden en lossen) wordt gesimuleerd. De testen worden voor alle typen ballast op dezelfde manier en onder dezelfde omstandigheden uitgevoerd.

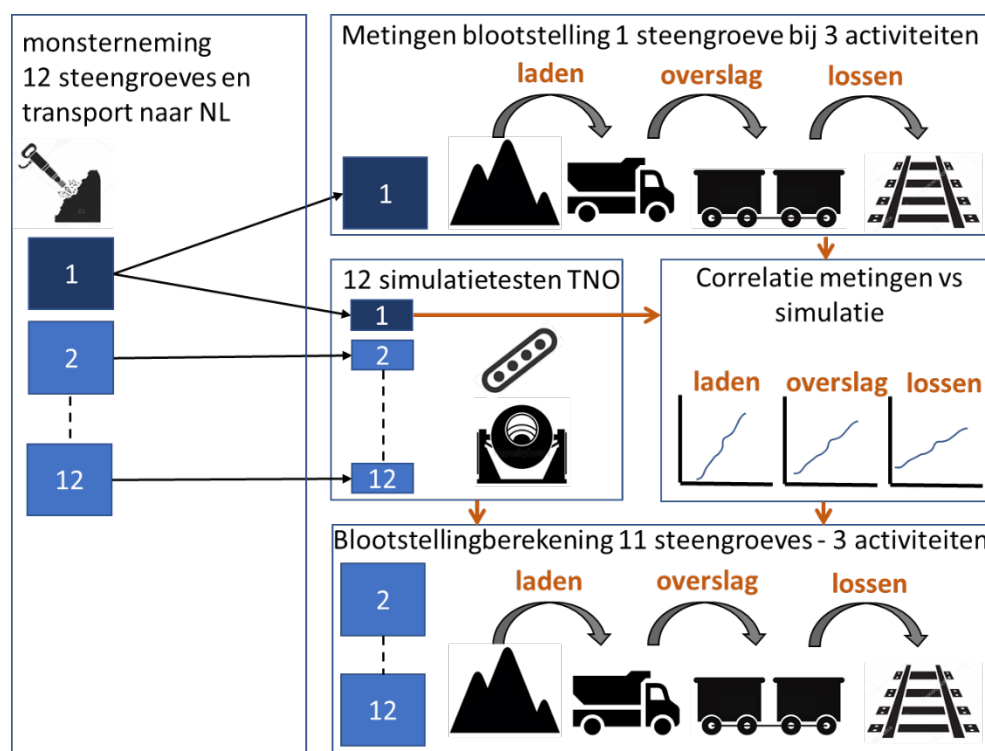
Voorafgaand aan de testen wordt het ballastmateriaal eerst door TNO gewassen en gedroogd, om het resterende stof te verwijderen. Daarnaast worden ook enkele testen uitgevoerd met het originele materiaal (met hetzelfde percentage stof als op de steengroeve). Dit geeft inzicht in enerzijds de stofvormende eigenschappen van het materiaal zelf tijdens diverse activiteiten, zoals storten en transport (1e test) en anderzijds in de stoffigheid van het materiaal inclusief stof op de steengroeve (2e test).

Gezien de gekozen aanpak dient de ballast, gebruikt voor de simulatiemetingen, van dezelfde kwaliteit te zijn als de ballast op de steengroeven. Om te zorgen dat tijdens de monsterneming en het verdere transport naar TNO er geen extra stof ontstaat door schokken en wrijving, wordt de monsterneming volgens eenzelfde standaardprocedure uitgevoerd en worden de monsters op een speciale manier verpakt. De monsternemingsprocedure is zo ontwikkeld dat een zo representatief mogelijk monster van het aanwezige ballastmateriaal op de steengroeve wordt verkregen. Het is echter niet mogelijk om een monster uit een steengroeve te nemen dat representatief is voor de gehele steengroeve omdat een steengroeve niet bestaat uit een éénduidige samenstelling van het gesteente op basis van exacte percentages. De mineralogische samenstelling verandert voortdurend tijdens het delven en het gesteente kan alleen in algemene (generieke) zin worden gekarakteriseerd op basis van bandbreedten in de mineralogische samenstelling op basis waarvan de steensoort wordt gedefinieerd.

Deze variabiliteit in mineralogische samenstelling kan ook invloed hebben op de hardheid en slijtvastheid van het gesteente en de hoeveelheid stof. Bij de evaluatie van de meetresultaten zal rekening worden gehouden met deze bandbreedte in mineralogische samenstelling.

Om de meetresultaten van de simulatietesten van deze 12 typen ballast te kunnen relateren aan de activiteiten en handelingen in de praktijk zullen met het ballastmateriaal afkomstig van één steengroeve additionele praktijkmetingen worden uitgevoerd tijdens het beladen van transportmiddelen op de steengroeve zelf, het overladen op andere transportmiddelen en het lossen van de ballast in Nederland.

De praktijkmetingen tijdens bovengenoemde activiteiten worden statisch uitgevoerd nabij het stortfront om een inzicht te krijgen in de maximale blootstelling (worst case). De omstandigheden tijdens de metingen zullen duidelijk worden vastgelegd zodat de meetresultaten in een later stadium kunnen worden vergeleken met de resultaten van eventuele toekomstige metingen tijdens het toepassen van het ballastmateriaal op het spoortraject in Nederland. De correlatie tussen de praktijkresultaten en simulatieresultaten bepaald met één type ballastmateriaal zal worden gebruikt om de stofemissie en blootstelling bij beladen, overslag en lossen voor de andere typen ballast te bepalen (zie Figuur 1).



Afbeelding 1. Schematische voorstelling plan van aanpak.

Gesteenten kunnen uit diverse mineralen bestaan met ieder hun eigen kristalvorm. Enkele van deze mineralen kunnen schadelijk zijn (o.a. carcinogeen/mutageen). Een belangrijk mineraal in gesteente is silica, oftewel siliciumdioxide (SiO_2). Silica kan voorkomen in amorfe vorm (onschadelijk) en kristallijne vorm (schadelijk). Kristallijn silica kent 3 vormen: cristoballiet, trydimiet en kwarts. In de volksmond wordt kristallijn silica vaak aangeduid als “kwarts” ¹.

Het inhaleerbaar- en respirabel stof afkomstig van de simulatie- en praktijkmetingen wordt onderzocht op deze schadelijke componenten:

- respirabel kristallijn silica (kwarts, trydimiet, cristoballiet),
- vezelvormige bestanddelen zoals:
 - asbestiform serpentijn (chrysotiel),
 - asbestiform amfibool (crocidoliet, amosiet, tremoliet, anthofylliet, actinoliet),
 - erioniet (= vezelvormig zeoliet),
 - overige minerale vezelvormige bestanddelen
- nikkelhoudende mineralen zoals o.a. bunseniet (nikkeloxide) en milleriet (nikkelsulfide),
- mica's ²

Uitgezonderd van kristallijn silica komen de bovengenoemde schadelijke componenten sporadisch als (micro)verontreiniging in de gesteenten voor. Dat betekent dat het resultaat als indicatief moet worden beschouwd voor het ballastmateriaal op de steengroeven.

In het onderzoek zal specifiek rekening worden gehouden met microverontreinigingen waarvan bekend is dat ze in bepaalde typen gesteente kunnen voorkomen. Zo is bekend dat in graniet en granodioriet naast kristallijn silica (vooral kwarts) ook mica aanwezig kan zijn. In de omgeving van Nickenich in Duitsland is bekend dat naast kwarts ook trydimiet en cristoballiet kan voorkomen. In principe kunnen in alle steengroeven asbestiforme mineralen voorkomen. Het gaat dan vaak om sporadische kleine serpentijn/amfibool aders in het gesteente. Dit betekent dat er dus ook sporadisch asbest in het gesteente kan voorkomen. In bepaalde gebieden in Noorwegen (ook de gebieden waar de gecertificeerde steengroeven aanwezig zijn) kan actinoliet en anthofylliet voorkomen. In België kunnen sporen actinoliet voorkomen in het porfier gesteente.

¹ Wanneer in het rapport gesproken wordt over kwarts en respirabel kwarts wordt altijd de kristallijne (schadelijke) vorm bedoeld.

² Mica's zijn niet bewezen carcinogeen/mutageen, maar worden wel als meer schadelijk gezien dan algemeen hinderlijk respirabel/inhaleerbaar stof en kennen daarom vaak ook lagere grenswaarden.

3 Uitvoering onderzoek

3.1 Inspectie steengroeven en monsterneming ballast

Voorafgaand aan de monsterneming is contact gezocht met de steengroeven, waarbij door TNO een korte toelichting is gegeven van het onderzoek, toestemming is gevraagd om monsters te nemen van het ballastmateriaal en een datum is afgesproken van het bezoek. Ook is informatie gevraagd over de geometrische, fysische, chemische en duurzaamheidskernmerken van het materiaal conform NEN-EN 13450, waarbij is aangegeven dat vooral informatie over de hardheid van het materiaal (Los Angeles: LA, micro-Deval, etc.) essentieel kan zijn voor het onderzoek.

Bij ieder bezoek is specifiek gevraagd om het ballastmateriaal type 1 (31.5 - 50 mm) dat aan ProRail wordt geleverd volgens SPC00033 V005 (product specificatie steenslag ten behoeve van ballast). Om inzicht te krijgen in het breekproces op de steengroeven is tevens om een korte rondleiding gevraagd. Hierbij is, voor zover mogelijk, de plek bezocht waar het gesteente wordt gewonnen en is een inspectie uitgevoerd van de breek-, sorteer-, sproei- en wasinstallaties. Deze laatste installaties worden gebruikt om stofvorming in het productieproces tegen te gaan en het percentage stof in de ballast te verminderen.

De monsterneming is uitgevoerd door medewerkers van de steengroeve onder begeleiding van TNO volgens de basisprincipes in de NEN 5897 (Inspectie en monsterneming van asbest in bouw- en sloopafval en recyclinggranulaat), waardoor een zo representatief mogelijk monster wordt verkregen van het ballastmateriaal aanwezig op locatie. In totaal is per steengroeve minimaal 100 kg aan ballastmateriaal verzameld, bestaande uit 3 deelmonsters van ca. 30 - 40 kg. Deze deelmonsters zijn uit verschillende delen van het opslagdepot of op verschillende momenten vanaf de transportband genomen. Bij depotbemonstering is telkens met behulp van shovels eerst de buitenste schil weggenomen om een monster dieper in de kern te kunnen nemen. Hierdoor wordt voorkomen dat externe factoren (o.a. weersinvloeden, stofoverlast van andere activiteiten op het terrein) tijdens opslag invloed hebben gehad op de kwaliteit van het monster. Om ervoor te zorgen dat de integriteit van de monsters tijdens het transport naar Nederland niet werd aangetast, is de ballast verzameld in plastic bakken aan de binnenzijde voorzien van schuimrubber matten. De bakken zijn volledig opgevuld zodat de stenen niet konden bewegen. Daarnaast waren de bakken in de transport bus op schuimrubber matten geplaatst om trillingen en schokken tijdens transport zoveel mogelijk te voorkomen.

De door TNO bezochte steengroeven en verwerkingsbedrijven staan weergegeven in Tabel 1. Van de in totaal 12 gecertificeerde steengroeven bleek van één steengroeve (Natursteinwerke Weiland GmbH, Schwarzkolmm) het certificaat reeds te zijn ingetrokken. Deze steengroeve maakt daarom geen onderdeel meer uit van het onderzoek. De steengroeve Jelsa in Noorwegen produceert geen type 1 ballast meer, waardoor, in overleg met ProRail, type 2 ballast (22 – 40mm) is bemonsterd.

Tabel 1. Gegevens ballast en monsterneming van de gecertificeerde steengroeven

TNO code	Naam certificaathouder	Wingebied	Ballast Materiaal ¹²⁾	Datum bezoek	Monster-neming	Behandeling ballast
1 ¹⁾	Oster Pukk og Sand AS ⁹⁾	Eikefet, Noorwegen	Granietgneis	16-9-2019	Type 1 uit depot in steengroeve	Ongewassen
2 ¹⁾	Norwegian Sandstone Export AS ¹⁰⁾	Seljestokken Svelgen, Noorwegen	Zandsteen (Meta-Zandsteen)	17-9-2019	Type 1 uit depot in steengroeve	Ongewassen
3 ¹⁾	Mibau Nederland	Tau, Noorwegen	Kwartsdioriet	19-9-2019	Type 1 uit depot	Ongewassen
13 ⁷⁾	B.V.			4-11-2019	In Amsterdam	Gewassen
4 ^{1,2)}	Mibau Nederland B.V.	Jelsa, Noorwegen	Granodioriet (Meta-granodioriet)	20-9-2019	Type 2 uit depot in steengroeve	Ongewassen
5 ³⁾	Graniet Import Benelux B.V.	Bremanger, Noorwegen	Bestone (Meta-zandsteen)	23-9-2019	Type 1 uit depot In Amsterdam	Gewassen
6 ^{3,4)}	Graniet Import Benelux B.V.	Glensanda, Schotland	Graniet (Granodioriet)	23-9-2019	Type 1 uit depot in Amsterdam	Ongewassen
7 ⁵⁾	Johann Düro GmbH & Co.KG	Taben-Rodt, Duitsland	Kwartsiet	7-10-2019	Type 1 uit depot in steengroeve	Gewassen
8 ^{6,8)}	Rheinische Provinzial Basalt- und Lavawerke GmbH & Co.oHG	Werk Nickenich, Duitsland	Basaniet (Tefrietische foïdriet)	7-10-2109	Type 1 vanaf transportband in steengroeve	Ongewassen
9	Carrières Unies de Porphyre ¹⁰⁾	Lessines, België	Porfier (Kwarts-microdioriet)	31-10-2019	Type 1 vanaf transportband in steengroeve	Gewassen
10	Sagrex - Aggregates Activity of CBR	Quenast, België	Porfier (Kwarts-microdioriet)	31-10-2019	Type 1 vanaf transportband in steengroeve	Gewassen
12 ¹³⁾						Ongewassen
11 ^{5,8)}	Société d'Exploitation des Carrières d'Yvoir	Yvoir, België	Zandsteen (Arkose)	31-10-2019	Type 1 uit depot in steengroeve	Gewassen

Opmerkingen bij Tabel 1:

1. Geen gewassen ballast beschikbaar, dit gesteente wordt wel altijd gewassen geleverd. Het wordt pas gewassen bij het inladen op het schip
2. Type 2 gesteente (22-40mm)
3. De ballast komt als grof gesteente uit het wingebied en wordt in Amsterdam gebroken, gezeefd en gewassen
4. Dit gesteente wordt niet gebruikt als ballastmateriaal voor ProRail (alleen als reserve), er was geen gewassen voorraad voorhanden.
5. Deze groeven leveren nauwelijks aan ProRail, dit waren oude voorraden uit depot.
6. Dit ballastmateriaal is bemonsterd direct na breken en de eerste zeving.
7. Dit ballastmateriaal is bemonsterd vanuit een tussentijds depot in Amsterdam, na transport met schip vanuit Tau.
8. Deze groeven waren tijdelijk gesloten waardoor een inspectie van de procesinstallatie niet mogelijk was
9. De naam is in 2020 verandert in DC Eikefet Aggregates AS
10. De naam is in 2020 verandert in DC Resources Seljestokken AS
11. De steengroeve in Lessines heeft het certificaat sinds augustus 2020 niet meer verlengd
12. Zowel de product-/handelsnaam en petrografische benaming (tussen haakjes) zijn hierbij benoemd.
13. De ballast wordt altijd gewassen geleverd, expliciet voor dit onderzoek is een extra monster ongewassen ballast van de lopende band genomen.

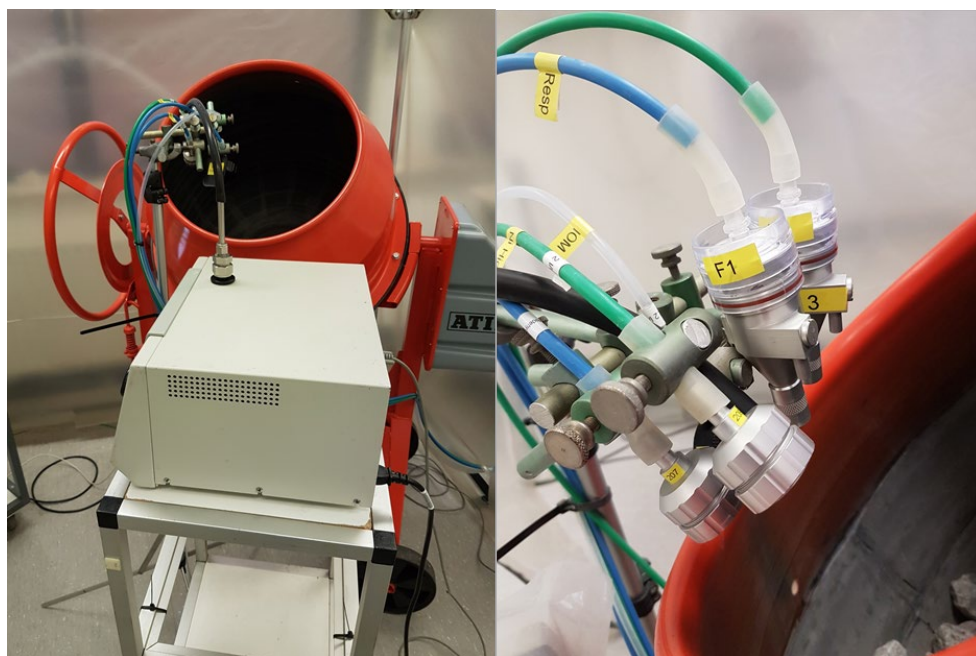
3.2 Simulatiemetingen

Aangezien niet op alle steengroeven gewassen ballast kon worden bemonsterd, zijn de simulatietesten in eerste instantie alleen uitgevoerd op het door TNO gewassen ballastmateriaal. Voorafgaand aan de simulatietesten zijn de gewassen en gedroogde deelmonsters gedurende minimaal 1 week geconditioneerd in de testruimte bij dezelfde temperatuur tot constant eindgewicht.

Voor het simuleren van de handelingen met ballastmateriaal is gebruik gemaakt van een betonmolen die aan de binnenkant volledig bekleed is met een rubber mat (Afbeelding 2). Dit is gedaan om te voorkomen dat het contact tussen het gesteente en de metalen binnenkant van de molen een rol gaat spelen in de testuitkomst. Dit betekent dat met de door TNO ontwikkelde test alleen de stofvorming wordt beoordeeld veroorzaakt door het contact tussen de stenen onderling. Om de simulatie zo dicht mogelijk aan te laten sluiten op de praktijk, is de hoek van de betonmolen zo ingesteld dat de stenen eerst een valbeweging maken waarna ze over elkaar rollen. De testen zijn uitgevoerd met 20,0 kg aan ballastmateriaal gedurende 10 minuten. In de test is een stabilisatieperiode ingebouwd van 5 minuten, waarna de metingen zijn gestart.

Gedurende de simulatietesten zijn de onderstaande metingen verricht:

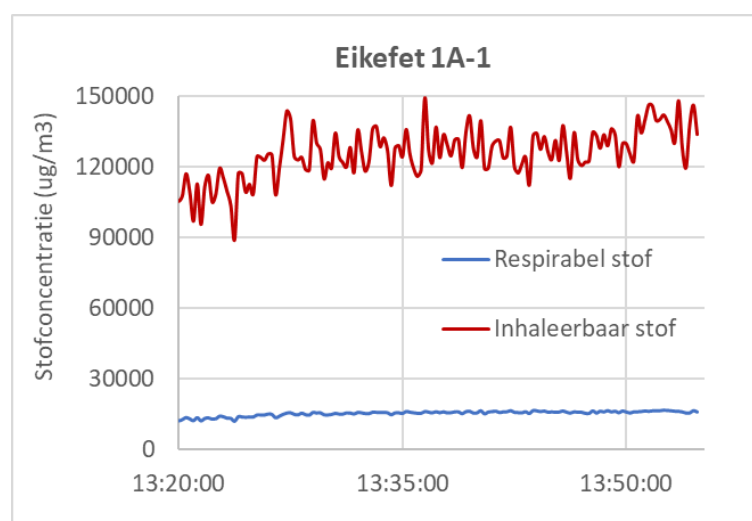
1. Monsterneming inhaleerbaar stof voor gravimetrische bepaling
2. Monsterneming respirabel stof, voor gravimetrische bepaling en analyse respirabel kristallijn silica
3. Monsterneming totaal stof, voor elektronenmicroscopische analyse
4. Continue deeltjesmetingen (0,5 – 20 µm) met een optische deeltjesteller



Afbeelding 2. Testopstelling voor de simulatie experimenten met de monsters ballast; de metingen bestaan uit inhaleerbaar stof, respirabel stof, respirabel kwarts, totaal stof voor elektronenmicroscopische analyse en continue deeltjesmetingen (0,5 – 20µm) met een optische deeltjesteller.

Na iedere test is de binnenkant van de betonmolen volledig schoon gezogen met een stofzuiger. Ook is de ruimte waarin de simulatieopstelling staat na ieder test maximaal geventileerd. Voordat een nieuwe partij wordt getest, wordt eerst een test uitgevoerd met de lege schoongemaakte opstelling. Hierbij wordt met de optische deeltjesteller gecontroleerd of er nog stofresten uit de opstelling komen.

Voorafgaand aan de metingen is de experimentele opstelling getest door gedurende een langere periode de betonmolen te laten draaien en het verloop van de stofemissie in de tijd te meten met behulp van een optische deeltjesteller. In Afbeelding 3 is het resultaat van deze zogenaamde robuustheidstest gegeven voor deelmonster 1A afkomstig van Eikefet. Hieruit blijkt dat de variantie in de inhaleerbaar en respirabel stofconcentratie over de gehele testduur ca. 10% is.



Afbeelding 3. Voorbeeld van het verloop van de concentratie aan inhaleerbaar en respirabel stof gedurende de simulatietest met behulp van de betonmolen.

Om te kunnen beoordelen in hoeverre de verschillen in testresultaten tussen de diverse steengroeven significant zijn, zijn van een viertal steengroeven (Eikefet, Bremanger, Quenast en Yvoir) meerdere deelmonsters getest. De berekende variantie van deze duplo en triplo monsters (8 – 13%) is gebruikt bij de evaluatie van de testresultaten. Om inzicht te krijgen in het effect van het wassen van het ballastmateriaal is van een tweetal steengroeven (Quenast en Tau) het ongewassen ballastmateriaal, zonder een extra wassing door TNO, ook getest. De resultaten van de ongewassen ballast zijn vergeleken met de resultaten van het door TNO gewassen ballastmateriaal. In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de uitgevoerde simulatiemetingen.

De simulatiemetingen zijn ook uitgevoerd met het type 2 ballast (22 – 40 mm) afkomstig uit Jelsa. Dit gesteente heeft een kleinere korrelgrootte dan type 1 ballast (31,5 – 50 mm) en er kan vanwege het grotere specifieke oppervlak meer aanhangend stof aanwezig zijn. Ook is het waarschijnlijk dat tijdens de simulatietesten meer stof ontstaat door het grotere aantal deeltjes met meer contactoppervlakken.

Tabel 2. Overzicht van het aantal uitgevoerde simulatietesten

TNO code	Wingebied	Type gesteente	Gewassen door TNO?	Aantal testen
1	Eikefet	Granietgneis	Ja	3
2	Seljestokken	Zandsteen	Ja	1
3	Tau	Kwartsdioriet	Ja	1
13	Tau	Kwartsdioriet	Ja	1
13	Tau	Kwartsdioriet	Nee	1
4	Jelsa	Granodioriet	Ja	1
5	Bremanger	Zandsteen	Ja	2
6	Glensanda	Granodioriet	Ja	1
7	Taben-Rodt,	Kwartsiet	Ja	1
8	Werk Nickenich	Basaniet	Ja	1
9	Lessines	Kwartsmicrodioriet	Ja	1
10	Quenast	Kwartsmicrodioriet	Ja	2
12	Quenast	Kwartsmicrodioriet	Nee	1
11	Yvoir	Zandsteen	Ja	2

3.3 Praktijkmetingen

De praktijkmetingen zijn uitgevoerd in de periode 10 - 14 juli 2020, tijdens diverse activiteiten met het porfier (kwartsmicrodioriet) gesteente afkomstig van de steengroeve Quenast. In Tabel 3 is een overzicht gegeven van de activiteiten, de metingen en meetcondities. Alle handelingen met het ballastmateriaal vanaf de steengroeve in Quenast tot en met het spoortraject in Geldermalsen zijn in duplo bemeten. Om inzicht te krijgen in de maximale blootstelling (worst case) is steeds benedenwinds en zo dicht mogelijk op het stortfront gemeten. Hierbij is wel steeds het geldende veiligheidsregime in acht genomen. In afbeelding 4 is per meet sessie een foto weergegeven als illustratie van de activiteiten en meetomstandigheden.

Tabel 3. Overzicht praktijkmetingen en condities tijdens diverse activiteiten met het ballastmateriaal afkomstig uit Quenast

Activiteit / handeling	Locatie	Beschrijving meting	Datum en tijdstip	Duur meting (min)	Weer	Temp, RH wind
Beladen vrachtwagens vanuit depot	Quenast	Weerszijden achter laadbak vrachtwagen	10 juli 2020 12:51-14:53	122	Droog en zonnig	20°C, 60%, 2 m/s
Lossen vrachtwagens op lopende band	Tubeke	Weerszijden van stortfront vrachtwagens	10 juli 2020 07:03-10:43	220	Half bewolkt (ca. 30 min motregen)	15°C, 80%, 2m/s
Beladen schip vanuit lopende band	Tubeke	Boven stortfront schip	10 juli 2020 07:01-10:32	211	Half bewolkt (ca. 30 min motregen)	15°C, 80%, 2m/s
Lossen schip in vrachtwagen	Tiel	Weerszijden achter laadbak vrachtwagens	13 juli 2020 11:58-13:54	116	Droog en zonnig	21°C, 60%, 2 m/s
Lossen vrachtwagens op depot	Tiel	Weerszijden van stortfront vrachtwagens	13 juli 2020 08:09-10:17	68	Droog en zonnig	18°C, 60%, 2 m/s
Beladen wagons vanuit depot met lopende band	Geldermalsen	Weerszijden achter ballastwagons	12 juli 2020 18:03-20:39	156	Droog en zonnig	20°C, 60%, 2 m/s
Storten ballast vanuit wagons in het spoor	Geldermalsen	Lopend naast ballastwagons	13 juli 2020 01:12-01:57	45	Droog ('s nachts)	15°C, 70%, 2 m/s
Stopmachine	Geldermalsen	Lopend naast machine	14 juli 2020 09:34-10:04	30	Droog en bewolkt	13°C, 80%, 2 m/s
Profileermachine	Geldermalsen	Lopend naast machine	14 juli 2020 10:11-10:29	18	Droog en bewolkt	13°C, 80%, 2 m/s



Afbeelding 4. Overzicht van de 9 praktijkmetingen uitgevoerd in de periode 10 – 14 juli 2020: op de steengroeve in Quenast (A), lossen vrachtwagen en beladen schip in Tubeke (B), lossen schip in Tiel (C), lossen vrachtwagens op depot in Tiel (D), beladen ballastwagons in Geldermalsen (E), storten vanuit wagons in het spoor in Geldermalsen (F), bij de stopmachine (G) en profileermachine (H) in Geldermalsen.

4 Methoden

4.1 Bepaling hoeveelheid stof

De hoeveelheid stof in het gesteente is bepaald met behulp van een natte wassing conform NEN-EN 933-1 [Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 1: Bepaling van de korrelgrootteverdeling – Zeefmethode]. Hierbij zijn de fracties <63 µm, 63 – 1000 µm, 1 – 10 mm en > 10 mm bepaald.

4.2 Continue stof metingen

Continue stof metingen zijn uitgevoerd met de ECM190 Environmental Dust Monitor van de firma GRIMM. Met deze geavanceerde monitor worden deeltjes vanaf ca. 0,25 µm gemeten door middel van een orthogonale (90°) lichtverstrooiingstechniek, waarbij de deeltjestellingen worden omgezet in een massa-grootteverdeling waaruit de inhaleerbare en respirabele fractie kan worden afgeleid in µg/m³. De tijdsresolutie is ingesteld op 10 seconde met een meetbereik van 0,25 - 32 µm in 31 deeltjesgrootte fracties.

4.3 Inhaleerbaar en respirabel stof

Inhaleerbaar stof is bemonsterd op teflon filters met behulp van “IOM” samplers en respirabel stof is bemonsterd op PVC filters met behulp van “Higgins-Dewell” cyclonen. De concentratie aan inhaleerbaar stof en respirabel stof is bepaald met behulp van gravimetrische analyse volgens NEN-EN 12341 [Luchtkwaliteit - Algemene gravimetrische referentiemethode voor de bepaling van de PM10 of PM2,5-massafractie van zwevende stof in de buitenlucht]. De PVC filters en teflonfilters werden gewogen voor en na bemonstering met een microbalans (± 1µg) tot constant gewicht in een geconditioneerde kamer (50% relatieve vochtigheid, 20° C).

De “IOM” samplers en “Higgins-Dewell” cyclonen voldoen aan de definities voor inhaleerbaar en respirabel stof conform NEN-EN 481 [Werkplekatmosfeer - Definitie van de deeltjesgrootteverdeling voor het meten van de in de lucht zwevende deeltjes]:

- de respirabele fractie van de in de lucht zwevende deeltjes is gedefinieerd als de massafractie van ingeademde deeltjes die doordringen tot de niet-gevulde luchtwegen (longblaasjes). Bij het meten van respirabel stof bevindt 50% van de opgevangen deeltjes met een diameter van ca. 4 µm zich in de respirabele fractie (Definitie respirabel stof conform NEN-EN 481).
- de inhaleerbare fractie van de in de lucht zwevende deeltjes is gedefinieerd als de massafractie van de totale in de lucht zwevende deeltjes die via de neus of mond kunnen worden ingeademd. Bij het meten van inhaleerbaar stof bevindt 50% van de opgevangen deeltjes met een diameter van ca. 100 µm zich in de inhaleerbare fractie (Definitie inhaleerbaar stof conform NEN-EN 481).

4.4 Respirabel kristallijn silica

Kristallijn silica (SiO_2) is bepaald met behulp van infrarood spectrometrie (FTIR) conform NIOSH 7602 [NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Silica, Crystalline by IR: Method 7602, Issue 2, 1994]. Met deze methode wordt specifiek kristallijn silica bepaald en wordt onderscheid gemaakt in de kristallijne vormen kwarts en cristoballiet.

4.5 Schadelijke bestanddelen met SEM/EDX

Ten behoeve van het onderzoek met behulp van elektronenmicroscopie in combinatie met Röntgen microanalyse (SEM-EDX) is totaal stof bemonsterd op nikkel gecoate Nuclepore filters (poriegrootte $0,4\ \mu\text{m}$). De analyses zijn uitgevoerd met een Tescan MAIA 3 GMH FEG-SEM hoge resolutie scanning-elektronenmicroscopie in combinatie met Bruker AXS spectrometer met een Quantax 800 werkstation en een XFlash 6130 detector.

Met behulp van Röntgen microanalyse is de gemiddelde elementsamenstelling bepaald van het inhaleerbaar stof. Hierbij is de concentratie aan elementen, uitgedrukt in de oxidevorm, weergegeven als massapercentages³. Voor het element silicium, uitgedrukt als SiO_2 , betekent dit niet dat alle silicium aanwezig is als kristallijn silica; silicium is ook aanwezig in vele andere mineralen, zoals veldspaten. De concentratie aan vezelvormige minerale bestanddelen (waaronder asbestiforme mineralen en erioniet) is bepaald met behulp van SEM-EDX conform NEN-ISO 14966 [Buitenlucht - Bepaling van de numerieke concentratie van anorganische vezelachtige deeltjes - Scanning elektronenmicroscopie methode]. Tijdens deze analyse is het filter ook gescreend op de aanwezigheid van mica's aan de hand van morfologische kenmerken, o.a. plaatvormige structuur. Daarnaast is het filter in de backscattered mode (BSE) onderzocht op nikkelhoudende mineralen en andere metaal bevattende mineralen. Met de BSE detector is het mogelijk om onderscheid te maken in verschillende typen deeltjes op grond van het gemiddeld atoomnummer; zo zijn metaaldeeltjes goed te onderscheiden van silicaatdeeltjes.

³ De genoemde oxiden moeten niet worden beschouwd als afzonderlijke componenten en minerale vormen in de gesteenten. Het betreft hier het totale massapercentage aan silicium, ongeacht de minerale vorm.

5 Beoordeling blootstelling en grenswaarden

Met betrekking tot de praktijkmetingen op locatie is bij de beoordeling van de stofemissies en blootstelling gebruik gemaakt van de principes in de NEN-EN 689 [Werkplekatmosfeer - Leidraad voor de beoordeling van de blootstelling bij inademing van chemische stoffen voor de vergelijking met de grenswaarden en de meetstrategie]. Twee verschillende meetstrategieën kunnen hierbij worden toegepast:

1. Een representatieve (realistische) inschatting op basis van meerdere meetcampagnes uitgevoerd in verschillende tijdsperioden rekening houdend met de belangrijkste factoren die de blootstelling beïnvloeden.
2. Een worst case-beoordeling op basis van één meetcampagne die is uitgevoerd onder de slechtste omstandigheden met betrekking tot alle factoren die de werkelijke blootstelling beïnvloeden.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een worst case benadering op basis van één duplo meting zo dicht mogelijk bij de diverse handelingen bij droog en veelal zonnig weer. Overige omstandigheden, zoals de uitvoering van de laad- en losactiviteiten en het bevochtigen van het materiaal zijn realistisch gekozen en representatief voor een normale projectuitvoering.

Bij een representatieve beoordeling wordt op basis van een statistische interpretatie van de resultaten de kans op overschrijding ingeschat. In die gevallen wordt een "veiligheidsfactor" van 0,1 gebruikt, wat betekent dat getoetst wordt aan 10% van de grenswaarde. Bij een worst case benadering kunnen concentraties direct worden vergeleken met grenswaarden (zonder veiligheidsfactor) omdat alle factoren die van invloed zijn op de blootstelling als worst case zijn gekozen. De gepresenteerde resultaten zijn echter alleen toepasbaar op een normale uitvoering van de activiteiten waarbij het ballastmateriaal voorafgaand aan de handelingen wordt bevochtigd. Bij toetsing worden de onderstaande grenswaarden gehanteerd.

5.1 Inhaleerbaar en respirabel stof

Voor beroepsmatige blootstelling aan inhaleerbaar en respirabel stof worden door de individuele lidstaten van de EU verschillende grenswaarden gehanteerd. Voor inhaleerbaar stof varieert de grenswaarde tussen 4 - 10 mg/m³ en voor respirabel stof varieert deze tussen 0,3 - 5 mg/m³. Deze waarden zijn gedefinieerd als 8 uur tijdgewogen gemiddelde waarden (8 uur TGG). De in Nederland opgestelde MAC-waarden van 10 mg/m³ voor inhaleerbaar stof en 5 mg/m³ voor respirabel stof hebben geen wettelijke status meer; sinds januari 2007 zijn deze waarden vervallen. Dit betekent dat in het kader van de RI&E (risico-inventarisatie en -evaluatie) door de werkgever (branche) zelf bedrijfs- of private grenswaarden moeten worden opgesteld. Om toch aan grenswaarden te kunnen toetsen heeft TNO in dit onderzoek gebruik gemaakt van de in Duitsland geldende grenswaarden voor inhaleerbaar en respirabel stof. In Duitsland zijn twee standaarden opgesteld: de 'Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) van Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS)' en de Maximum Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) van de Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Deze waarden zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4. Grenswaarden voor inhaleerbaar en respirabel stof in Duitsland

Stof (mg/m ³)	AGS ¹⁾		DFG ²⁾	
	8 uur TGG ⁶⁾	15 min TGG ⁶⁾	8 uur TGG ⁶⁾	15 min TGG ⁶⁾
Inhaleerbaar stof	10	20	4 ⁴⁾	
Respirabel stof	1,25 ⁵⁾	10	0,3 ³⁾	2,4 ³⁾

Opmerkingen bij Tabel 4:

- 1) Van toepassing op onoplosbare deeltjes, niet van toepassing op ultrafijn stof en stof met specifieke toxiciteit. De grenswaarden zijn algemene bovengrenzen voor technische maatregelen, zolang er geen specifieke regelgeving voor giftige of kankerverwekkende stoffen beschikbaar is
- 2) Deze waarden zijn algemene grenswaarden voor onoplosbare deeltjes
- 3) Toepasbaar voor biopersistent korrelig stof; de grenswaarde van 0,3 mg/m³ is afgeleid voor stof met een dichtheid van 1 g/cm³
- 4) De grenswaarde is afgeleid als een gemiddelde waarde over een jaar. Voor de inhaleerbare fractie zijn overschrijdingen boven de grenswaarde toegestaan. De overschrijdingen mogen de grenswaarde niet met een factor twee overschrijden (zie Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten, 25e uitgave, 1997)
- 5) De grenswaarde is afgeleid voor stof met een gemiddelde dichtheid van 2,5 g/cm³
- 6) TGG = tijd gewogen gemiddelde waarde (gedurende 8 uur of 15 minuten)

De door DFG gedefinieerde grenswaarde voor respirabel stof (0,3 mg/m³) geldt voor biopersistent korrelig stof. Deze grenswaarde gaat uit van een dichtheid van 1 g/cm³ en is van toepassing op langdurige blootstelling. Bij omrekening naar een dichtheid van de ballast (ca. 2,8 g/cm³) zal de grenswaarde uitkomen op ca. 0,8 g/cm³; het is echter niet duidelijk of deze grenswaarde toepasbaar is voor stof afkomstig van ballast gesteente. Deze waarde heeft geen wettelijke status maar is wel aanleiding geweest om de grenswaarde van AGS voor respirabel stof te verlagen naar 1,25 mg/cm³. Door het Duitse Ministerie van SZW is deze verlaagde waarde vervolgens opgenomen in de TRGS900 grenswaardelijst en als zodanig opgenomen in de Duitse wet- en regelgeving. De grenswaarden van AGS zijn momenteel ook de meest gebruikte waarden binnen de EU.

In 2013 werden de geldende grenswaarden in Groot Brittannië, van 10 mg/m³ voor inhaleerbaar stof en 4 mg/m³ voor respirabel stof, flink ter discussie gesteld (Cherrie et. al, 2013). Op basis van epidemiologisch en toxicologisch onderzoek komt het IOM (Institute of Occupational Medicine) tot een advies van 5 mg/m³ voor inhaleerbaar stof en 1 mg/m³ voor respirabel stof. Deze waarden zijn echter niet opgenomen in de wet- en regelgeving.

Voor onderhavige studie zal worden getoetst aan 4 mg/m³ voor inhaleerbaar stof en 1,25 mg/m³ voor respirabel stof.

5.2 Schadelijke componenten

Voor toetsing van de concentraties aan schadelijke componenten in het stof worden de volgende grenswaarden gebruikt:

- kristallijn silica (waaronder kwarts, trydimiet en cristoballiet): 0,075 mg/m³ respirabele fractie (als 8-uurs TGG) ⁴
- chrysotiel asbestvezels en amfibool asbestvezels: 2000 vezels/m³ (als 8-uurs TGG) ⁵
- mica's: in Nederland is geen grenswaarde gedefinieerd, in meerdere Europese landen wordt een waarde van ca. 3 mg/m³ (respirabele fractie) gehanteerd ⁶

De grenswaarden voor kristallijn silica en asbestvezels zijn wettelijke grenswaarden die zijn verankerd in het Arbeidsomstandighedenbesluit. Respirabel kristallijn silica staat momenteel op het werkprogramma van de Gezondheidsraad. Dit betekent dat de grenswaarde opnieuw wordt beoordeeld.

⁴ Staatscourant 2019, 65293: Regeling van de Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid van 22 november 2019, nr. 2019-0000165896, tot wijziging van de Arbeidsomstandighedenregeling in verband met de implementatie van Richtlijn 2017/164 in Bijlage XII

⁵ Staatscourant 2016, 340 (Asbest): Besluit van 19 september 2016 tot wijziging van het Arbeidsomstandighedenbesluit in verband met de herziening van een grenswaarde voor asbest, wijziging van het besluit van 5 juni 2014 tot wijziging van het Arbeidsomstandighedenbesluit in verband met de herziening van de grenswaarden voor asbest alsmede enkele technische wijzigingen (Stb. 2014, 217), in verband met het vervallen en aanpassen van enige onderdelen alsmede enkele technische wijzigingen van het Asbestverwijderingsbesluit 2005

⁶ In de Europese landen met een grenswaarde voor mica is deze vaak hetzelfde als voor respirabel stof.

6 Resultaten

6.1 Inspectie steengroeven en karakterisatie ballast gesteenten

6.1.1 Wasinstallaties

In Tabel 5 is per steengroeve (productielocatie) een beschrijving gegeven van de wasinstallatie. Op iedere locatie bestaat de wasinstallatie uit een zeef/tril-bak met daarboven een stelsel van meerdere buizen waarop sproeiers (spuitmonden) zijn gemonteerd. De grootte van de bak en het aantal buizen en sproeiers is per locatie anders (zie Bijlage B). Op drie locaties (Eikefet, Werk Nickenich en Yvoir) was geen nadere inspectie van de wasinstallatie mogelijk en op twee locaties (Seljestokken, Taben-Rodt) was de wasinstallatie niet operationeel. Op de locaties Amsterdam, Tau, Jelsa, Quenast en Lessines was de wasinstallatie wel operationeel. Hierbij is geconstateerd dat op de locatie Amsterdam, Tau en Jelsa één of meerdere sproeiers niet functioneerden waardoor de effectiviteit van de wassing minder wordt. Voor de effectiviteit van de wasinstallatie is naast een goed werkend systeem (aantal buizen en sproeiers) ook de doorvoer aan ballast (kg/uur) en hoeveelheid water (liter/uur) belangrijk; daarover is geen informatie beschikbaar.

Tabel 5. Beschrijving wasinstallatie per steengroeve (verwerkingslocatie)

Steengroeve	Wasinstallatie(s)	Sproeiers
Eikefet	2 wassers, nadere inspectie niet mogelijk	-
Seljestokken	1 water met 3 buizen x ca 4 sproeiers	12
Tau	1 water met 5 buizen x 11 sproeiers	55
Jelsa	1 water met 5 buizen x 4 sproeiers	20
Bremanger	Productie ballast in Amsterdam: 1 water met 5 buizen x 5 sproeiers (4 sproeiers waren kapot)	25 (21)
Glensanda		
Taben-Rodt,	1 water met 6 buizen x 5 sproeiers	30
Werk Nickenich	Onbekend, nadere inspectie niet mogelijk ¹⁾	-
Lessines	1 water met 10 buizen x 6 sproeiers	60
Quenast	2 wassers met respectievelijk 8 en 9 buizen x 8 sproeiers	64 / 72
Yvoir	1 water, nadere inspectie niet mogelijk	-

Opmerkingen bij Tabel 6:

- Volgens de Nederlandse vertegenwoordiger van Basaniet (Werk Nickenich) is geen wasinstallatie aanwezig

6.1.2 Kenmerken en eigenschappen ballast gesteente

Bij alle steengroeven is informatie opgevraagd betreffende de petrografische samenstelling van de gesteenten en de prestatiekenmerken van het geproduceerde ballastmateriaal 31,5 – 50mm zoals omschreven in de ProRail SPC00033.

Specifiek ging het hierbij om de volgende informatie:

- De hardheidskenmerken (Los Angeles en Micro Deval)
- Het percentage fines (<63 µm)
- De dichtheid van het materiaal
- Het percentage kwarts

In Tabel 6 is de informatie over de gesteenten en het ballastmateriaal samengevat. Tenzij anders aangegeven is de onderstaande informatie gebaseerd op certificaten en rapporten geleverd door de steengroeven.

Tabel 6. Eigenschappen en prestatiekenmerken van de gesteenten en het ballastmateriaal (31,5 – 50 mm)

Wingebied	Petrografische beschrijving	Kwarts (%)	LA	Micro-Deval	Dichtheid (g/cm ³)	Fines (%)
Eikefet, Noorwegen	Granietgneis	20 - 60 ^{1,2)} 24 ³⁾	- ²⁾	- ²⁾	- ²⁾	<0,5 ²⁾
Seljestokken Noorwegen	Metazandsteen	50	13	7	2,7	0,25
Tau, Noorwegen	Kwartsdioriet	15	11	5	2,8	0,3
Jelsa, Noorwegen	Metagranodioriet	25	11 ⁴⁾	5 ⁴⁾	2,8	0,5 ⁴⁾
Bremanger, Noorwegen	Metazandsteen	40	11 (7 - 14)	8 (6 - 9)	2,7	0,2
Glensanda, Schotland	Granodioriet ⁷⁾ (Graniet)	31 (30 - 32)	11 (10 - 13)	6 (5 - 6)	2,6	<0,5 ²⁾
Taben-Rodt, Duitsland	Kwartsiet	67 - 89 ⁵⁾	12 - 14 ⁵⁾	5 - 7 ⁵⁾	2,8 ⁵⁾	<0,5 ⁵⁾
Werk Nickenich, Duitsland	Tefrietische foïdiet ⁷⁾ (Basaniet)	< 0,1 ⁸⁾	8	6	2,9	0,15
Lessines, België	Kwartsmicrodioriet	5 - 20 ^{1,2)}	9 - 11 ⁶⁾	4 - 8 ⁶⁾	2,7 ⁶⁾	<0,5 ²⁾
Quenast, België	Kwartsmicrodioriet	27	7	4	2,7	0,1
Yvoir, België	Zandsteen	39	16	9	2,7	0,25

Opmerkingen bij Tabel 6:

1. Bandbreedte kwartsgehalte op basis van de QAFP diagrammen conform NEN-EN 12670 Natuursteen – Terminologie.
2. Geen informatie ontvangen van de betreffende steengroeve cq Nederlandse vertegenwoordiger
3. Kwartspercentage van granietgneis uit Førde, ca. 100km van Eikefet, bron: I. Bryhni, Fitch F.J., J.A. Miller, ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dates from recycled Precambrian rocks in the gneiss region of the Norwegian caledonides, Norsk Geologisk Tidsskrift, Vol. 51, 391-406, 1971.
4. Prestatiekenmerken behoren bij ballast type 2 (22 – 40mm)
5. Informatie gebaseerd op email van de leverancier
6. Informatie afkomstig van de website van de producent
7. Deze gesteenten dienen op basis van de QAFP diagrammen (conform NEN-EN 12670) anders genoemd te worden dan de productnaam; het graniet gesteente is een granodioriet en het basaniet gesteente is een tefrietische foïdiet.
8. Detectielimiet van de meetmethode (kwantitatieve röntgendiffractie (QXRD))

6.1.3 Percentage stof

In Tabel 7 zijn de percentages stof weergegeven in de 13 monsters ballastgesteente, bepaald met behulp van de natte wassing conform NEN-EN 933-1. Van de op de steengroeven gewassen stenen is het percentage van de fractie <63 µm (fines) kleiner dan 0,4%. In de ongewassen stenen ligt dit percentage tussen de 0,4 – 1,3 %. Op basis van deze getallen blijkt dat het wassen van de ballast op de steengroeve cq. verwerkingslocatie een grote invloed heeft op het percentage stof. Ter illustratie is in Afbeelding 5 het percentage stof (fines) uitgezet tegen het aantal sproeiers van de wasinstallatie.

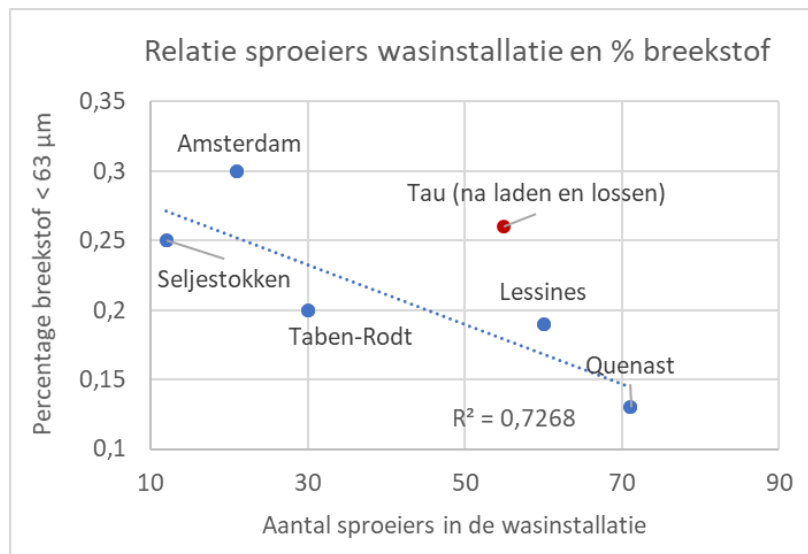
De ballast uit Tau is niet direct bemonsterd, maar pas na het beladen in Tau en lossen in Amsterdam. Hierdoor zal het percentage stof hoger zijn dan wanneer de ballast direct na het wassen zou zijn bemonsterd. Dit meetpunt is niet meegenomen in de correlatie. Uit het correlatiediagram blijkt dat (in grote lijnen) het aantal sproeiers van invloed is op de effectiviteit van de wassing. Tevens spelen andere factoren een rol, zoals de doorvoer van de ballast (kg/uur) en de hoeveelheid water (m³/uur) (zie Afbeelding 15). Echter, de correlatiediagram geeft wel aan dat een goede effectieve wasinstallatie met voldoende sproeiers het percentage stof naar beneden kan brengen.

Tabel 7. Percentage < 63 µm (fines) en de zee fractie verdeling, na het natzeven van de bemonsterde typen gesteenten

TNO code	Groeve	Type gesteente	Conditie van het materiaal	Percentage v/d zee fracties			
				<63 µm	<63 µm – 1 mm	1 – 10 mm	>10 mm
8	Werk Nickenich	Basaniet	Ongewassen	0,52%	0,30%	0,02%	99,2%
3	Tau	Kwartsdioriet	Ongewassen	0,48%	0,31%	0,07%	99,1%
13	Tau ²⁾	Kwartsdioriet	Gewassen	0,26%	0,21%	0,02%	99,5%
9	Lessines	Kwartsmicrodioriet	Gewassen	0,19%	0,10%	0,14%	99,6%
12	Quenast	Kwartsmicrodioriet	Ongewassen	1,28%	0,19%	0,24%	98,3%
10	Quenast	Kwartsmicrodioriet	Gewassen	0,13%	0,02%	0,01%	99,8%
1	Eikefet	Granietgneis	Ongewassen	0,43%	0,30%	0,02%	99,3%
4	Jelsa (type 2)	Granodioriet	Ongewassen	0,77%	0,87%	0,18%	98,2%
6	Glensanda	Granodioriet	Ongewassen	0,82%	2,61%	0,13%	96,4%
2	Seljestokken	Zandsteen	Ongewassen	0,85%	0,64%	0,04%	98,5%
5	Bremanger	Zandsteen	Gewassen	0,30%	0,16%	0,03%	99,5%
11	Yvoir ¹⁾	Zandsteen	Gewassen	0,38%	0,06%	0,00%	99,6%
7	Taben-Rodt	Kwartsiet	Gewassen	0,20%	0,11%	0,01%	99,7%

Opmerkingen bij Tabel 7:

- 1) De ballast afkomstig uit Yvoir heeft lange tijd in depot gestaan, hierdoor kan het percentage stof (fines) hoger zijn dan vers geproduceerd ballast
- 2) Het ballast uit Tau is bemonsterd uit depot in Amsterdam, dit betekent dat dit materiaal al twee transporthandelingen heeft ondergaan: laden in Tau en lossen in Amsterdam



Afbeelding 5. Correlatiediagram van het percentage stof <63µm uitgezet tegen het aantal sproeiers van de wasinstallatie op de steengroeve en verwerkingslocatie.

6.2 Simulatiemetingen

6.2.1 Inhaleerbaar en respirabel stof en respirabel kwarts

In Tabel 8 staan de resultaten weergegeven van de gravimetrische bepalingen van inhaleerbaar en respirabel stof en de chemische bepalingen van respirabel kristallijn silica. Hierbij is onderscheid gemaakt in de kristallijne vormen kwarts en cristoballiet. In géén van de monsters is respirabel cristoballiet aangetroffen, wat betekent dat de concentratie lager is dan 0,02 mg/m³ (de detectiegrens). In Afbeelding 6 tot en met 8 zijn de resultaten van inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts tevens schematisch weergegeven. Deze gemeten concentraties, weergegeven in mg/m³, kunnen niet direct worden vergeleken met grenswaarden. De stof- en kwartsemmissies zijn namelijk het resultaat van gesimuleerde “worst case” activiteiten met gedroogd ballast in een laboratoriumopstelling, waarbij de stenen continu vallen en schuren.

Met een aantal typen gesteenten zijn meerdere (duplo/triplo) simulatiemetingen uitgevoerd om de variantie in het testresultaat te kunnen bepalen en zodoende de nauwkeurigheid en robuustheid van de methode te kunnen beoordelen. Van deze metingen is de gemiddelde concentratie en de standaarddeviatie (±SD) bepaald.. Ook is de variantie (spreiding) bepaald van het verloop in de continue (real-time) gemeten stofconcentraties over de gehele meetperiode. De gemiddelde variantie is 10% [min-max: 4-16%]. De berekende standaarddeviatie in de duplo- en triplometingen is ca. 13% voor inhaleerbaar stof en ca. 8% voor respirabel stof. Deze standaarddeviaties zijn relatief laag en komen goed overeen met de variantie in de continue metingen, wat betekent dat de methode nauwkeurig en robuust is.

In Tabel 8 is te zien dat bij het basaniet gesteente, waar geen kwarts in hoort te zitten toch respirabel kwarts is gemeten. Het betreft hier sporen kwarts waarvan de herkomst onduidelijk is. Het kan afkomstig zijn uit het gesteente zelf (concentratie kwarts kan namelijk lager zijn dan de detectiegrens van de meetmethode: < 0,1%), uit een verontreiniging tussen het gesteente (ondanks het wassen kunnen er nog steeds sporen aanhangend zand aanwezig zijn), uit de testopstelling zelf (ondanks

de schoonmaakprocedure zou er nog een restbesmetting van de vorige test aanwezig kunnen zijn) of uit de lucht (ondanks de afzuiging en ventilatie in het laboratorium kan een verhoogde concentratie aan kwarts in de omgevingslucht niet worden uitgesloten). Het kan ook een combinatie zijn van bovengenoemde factoren. De in Tabel 8 weergegeven concentratie aan respirabel kwarts moet daarom worden opgevat als een bovengrens, de werkelijke concentratie ligt lager dan deze waarde.

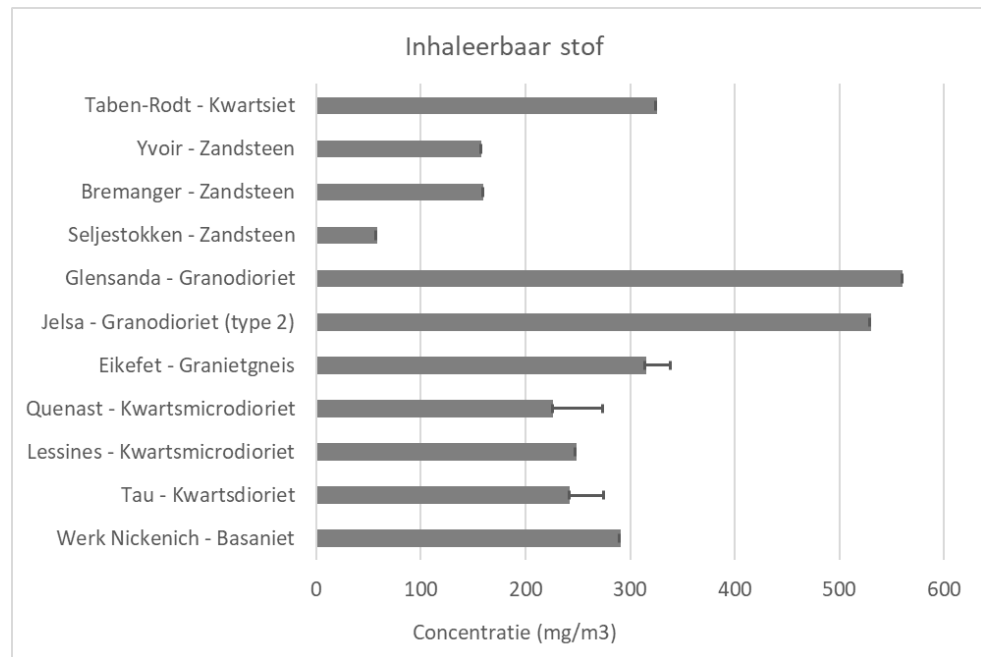
Tabel 8. Concentratie inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts, in mg/m³, gemeten tijdens de simulatie experimenten met de verschillende typen gesteenten na wassen door TNO (met uitzondering van monster 12 en 13)

TNO code	Steengroeve	Type gesteente	Concentratie (mg/m ³) ⁷⁾			Variantie continue meting ³⁾
			Inhaleerbaar stof	Respirabel stof	Respirabel Kwarts ⁶⁾	
8	Werk Nickenich	Basaniet	291	15,7	0,04 (0,2%) ⁸⁾	8%
3	Tau	Kwartsdioriet	243 ±32 ¹⁾	15,4 ±0,8 ¹⁾	0,63 (4,1%)	16%
13	Tau ⁵⁾ (ongewassen)	Kwartsdioriet	320	18,4	1,06 (5,7%)	8%
9	Lessines	Kwarts-microdioriet	249	16,0	0,70 (4,4%)	10%
10	Quenast	Kwarts-microdioriet	226 ±47 ¹⁾	16,6 ±0,2 ¹⁾	0,62 (3,7%)	9%
12	Quenast ⁵⁾ (ongewassen)	Kwarts-microdioriet	287	23,0	1,57 (6,8%)	6%
1	Eikefet	Granietgneis	315 ±23 ²⁾	17,6 ±2,4 ²⁾	0,51 (2,9%)	16%
4	Jelsa (type 2) ⁴⁾	Granodioriet	530	21,2	0,99 (4,7%)	4%
6	Glensanda	Granodioriet	560	20,1	2,18 (11%)	10%
2	Seljestokken	Zandsteen	58	10,0	0,27 (2,7%)	14%
5	Bremanger	Zandsteen	160	10,8 ±1,6 ¹⁾	0,42 (3,9%)	12%
11	Yvoir	Zandsteen	158	8,5 ±0,3 ¹⁾	0,30 (3,5%)	8%
7	Taben-Rodt	Kwartsiet	326	16,4	3,83 (23%)	10%

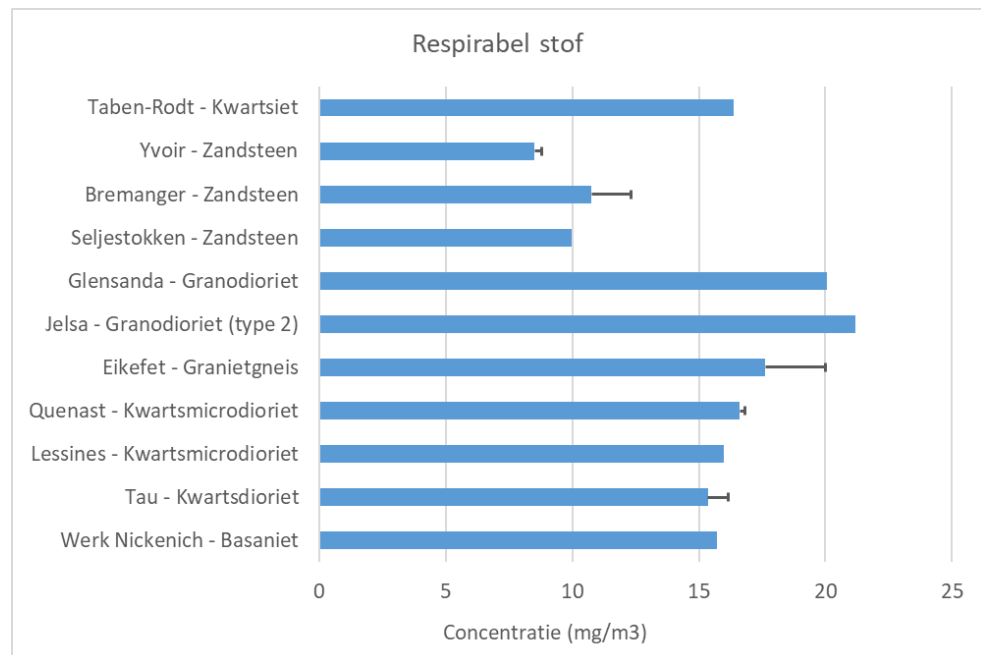
Opmerkingen bij Tabel 8:

- 1) duplometing, gemiddelde resultaat inclusief standaarddeviatie (±)
- 2) triplometing, gemiddelde resultaat inclusief standaarddeviatie (±)
- 3) variantie (spreiding) in gemeten stofconcentraties over de totale meettijd, op basis van de continue stof metingen
- 4) In de steengroeve Jelsa wordt geen type 1 (31,5-50mm) gesteente geproduceerd, de testen zijn daarom uitgevoerd met type 2 (22-40mm) gesteente, de testresultaten gelden dus niet voor type 1 ballast afkomstig van jelsa
- 5) Monsters 13 (Tau) en 12 (Quenast) zijn voorafgaand aan de simulatietesten niet door TNO gewassen
- 6) De getallen tussen haakjes geven het percentage respirabel kwarts in respirabel stof
- 7) De gemeten concentraties kunnen niet direct worden vergeleken met geldende grenswaarden. Het betreft hier nagebootste "worst case" activiteiten, waarbij het ballast continu wordt bewerkt (vallen en schuren).
- 8) Wegens mogelijke verontreiniging van het gesteente moet de gemeten concentratie respirabel kwarts worden opgevat als bovengrens.

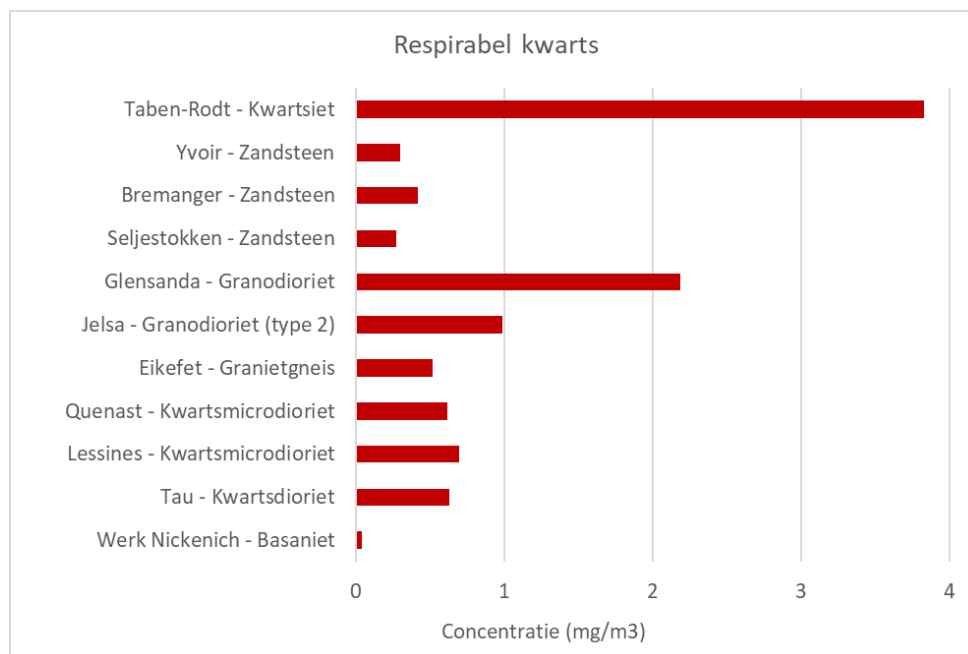
Voor de steengroeve Jelsa zijn de testen uitgevoerd met type 2 gesteente. Dit gesteente heeft een kleinere korrelgrootte waardoor er meer stenen aanwezig zijn binnen een te testen partij met dezelfde omvang. Dit betekent dat er meer contactoppervlak aanwezig is. Het is waarschijnlijk dat hierdoor tijdens de simulatietesten meer stof ontstaat dan het type 1 gesteente uit dezelfde steengroeve.



Afbeelding 6. Concentratie inhaleerbaar stof, in mg/m³, gemeten tijdens de simulatie experimenten met de verschillende typen gesteenten.



Afbeelding 7. Concentratie respirabel stof in mg/m³, gemeten tijdens de laboratorium experimenten met de verschillende typen gesteenten.

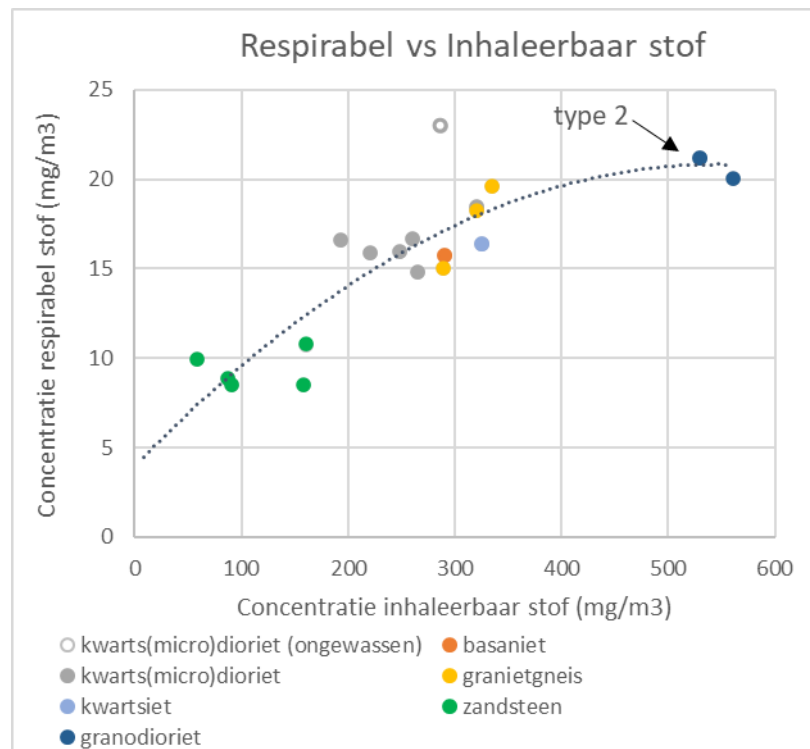


Afbeelding 8. Concentratie respirabel kwarts in mg/m^3 , gemeten tijdens de simulatie experimenten met de verschillende typen gesteenten.

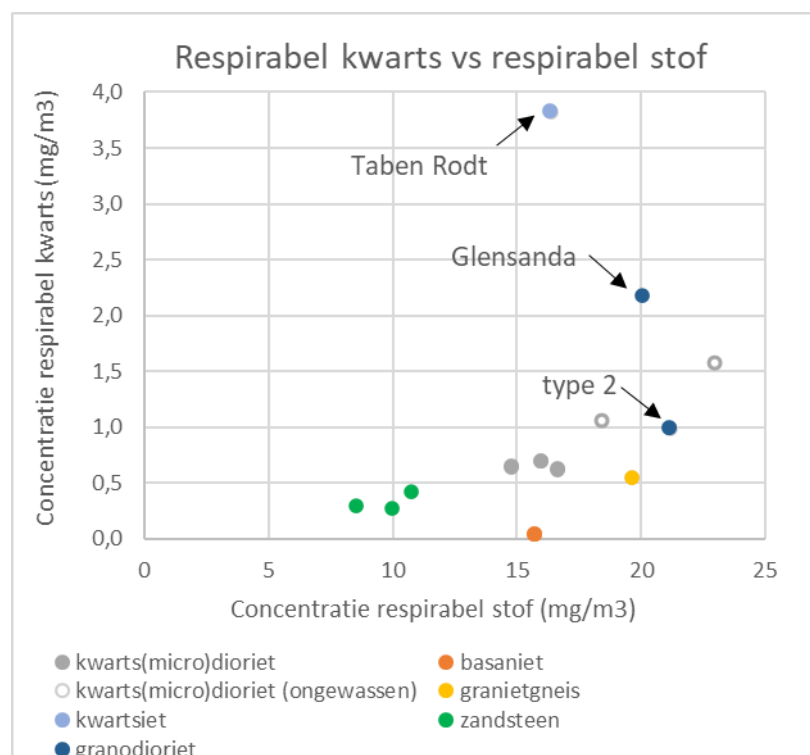
Om de resultaten aan inhaleerbaar en respirabel stof en respirabel kwarts te kunnen interpreteren en te kunnen duiden zijn hieronder vier correlatiediagrammen weergegeven. De volgende diagrammen zijn gemaakt:

- 1) de gemeten concentratie aan respirabel stof uitgezet tegen de gemeten concentratie aan inhaleerbaar stof (Afbeelding 9),
- 2) de gemeten concentratie een respirabel kwarts uitgezet tegen de gemeten concentratie aan respirabel stof (Afbeelding 10) en
- 3) de gemeten concentratie aan respirabel (kristallijn) kwarts uitgezet tegen het door TNO gemeten percentage totaal silicium in inhaleerbaar stof (zie tevens Tabel 9), uitgedrukt als oxide oftewel SiO_2 (Afbeelding 11). Het silicium in inhaleerbaar stof kan aanwezig zijn als silica (zowel kristallijn als amorf) en als silicaat (samen met aluminium en eventueel andere elementen).
- 4) de gemeten concentratie aan respirabel (kristallijn) kwarts uitgezet tegen het door de steengroeven opgegeven percentage kwarts in de gesteenten (Afbeelding 12).

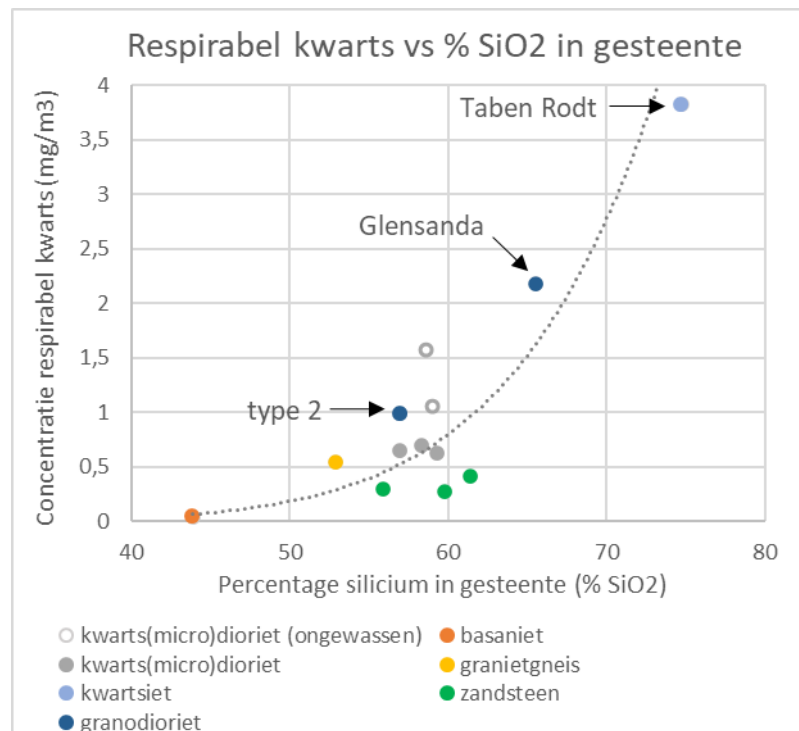
In de diagrammen zijn alle individuele meetresultaten gegeven; dit betekent dat van de duplo en triplo metingen niet het gemiddelde resultaat maar de afzonderlijke resultaten zijn gegeven. In de diagrammen zijn de verschillende typen gesteenten weergegeven in verschillende kleuren. Hierbij is kwartsmicrodioriet (porfier) in dezelfde categorie gezet als kwartsdioriet. Beide zijn namelijk stollingsgesteenten met eenzelfde bandbreedte in het kwartspercentage. Van dit type gesteente zijn ook twee meetresultaten meegenomen van de originele ongewassen ballast (Quenast en Tau). Deze resultaten zijn aangegeven als witte cirkels met grijze buitenrand.



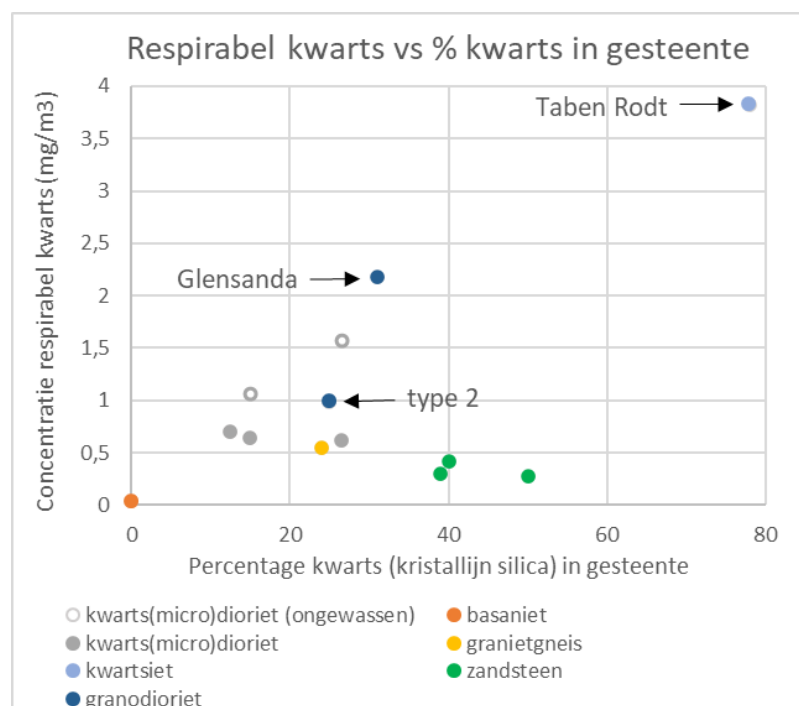
Afbeelding 9. Correlatiediagram van de gemeten concentraties aan respirabel en inhaleerbaar stof tijdens de simulatie experimenten met onderscheid in typen gesteenten.



Afbeelding 10. Correlatiediagram van de gemeten concentraties aan respirabel kwarts en respirabel stof tijdens de simulatie experimenten met onderscheid in typen gesteenten.



Afbeelding 11. Correlatiediagram van de gemeten concentraties aan respirabel (kristallijn) kwarts tijdens de simulatie experimenten en het totaalpercentage silicium bepaald met SEM-EDX, uitgedrukt als oxide (SiO₂) in de typen gesteenten.



Afbeelding 12. Correlatiediagram van de gemeten concentraties aan respirabel (kristallijn) kwarts tijdens de simulatie experimenten en het kwartspercentage in de gesteenten zoals opgegeven door de steengroeven.

In de correlatiediagrammen valt te zien dat binnen een bepaald type gesteente de stof- en kwartsconcentraties redelijk dicht bij elkaar liggen. Dit betekent dat de

stofemissie verband houdt met de eigenschappen van het type gesteente. Deze constatering kent echter één uitzondering. Binnen het granodioriet gesteente zijn de steengroeven in Glensanda en Jelsa duidelijk afwijkend; bij de simulatie-experimenten is met het gesteente uit Glensanda veel meer respirabel kwarts gemeten dan bij het gesteente uit Jelsa.

Bij het kwartsiet gesteente uit Taben Rodt wordt tijdens de simulatie-experimenten de hoogste emissie aan respirabel kwarts gemeten. Bij het granodioriet gesteente wordt de hoogste stofemissie gemeten en ook het respirabel kwartsgehalte is bij dit steentype relatief hoog. Dit geldt vooral voor het gesteente uit Glensanda. De korrelgrootte van het granodioriet gesteente afkomstig van de steengroeve in Jelsa is kleiner (22-40mm in plaats van 31,5-50mm), wat invloed kan hebben gehad op het testresultaat. Namelijk, kleinere stenen hebben minder massa, wat betekent dat een 20 kg monster uit meer stenen bestaat met meer contactoppervlak. Echter, als de stofemissie resultaten van de granodioriet gesteenten met elkaar worden vergeleken blijkt dat het gesteente uit Jelsa met kleinere korrelgrootte niet meer stof genereert dan het gesteente uit Glensanda.

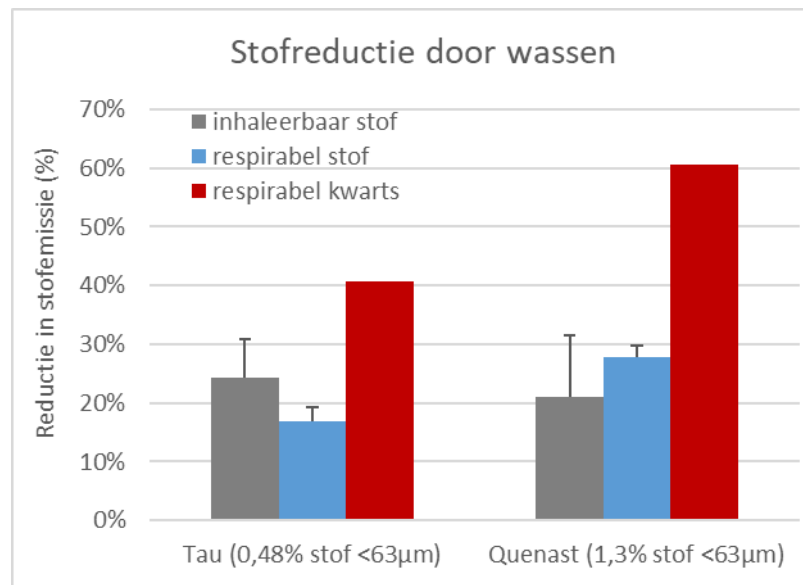
Wat betreft stofontwikkeling is het gesteente basaniet vergelijkbaar met het gesteente kwartsmicrodioriet (porfier), echter, doordat basaniet geen kwarts bevat is de emissie van respirabel kwarts tijdens de simulatie-experimenten nagenoeg nul. Van het porfier gesteente zijn ook twee ongewassen monsters meegenomen. Duidelijk is te zien dat er meer stof en respirabel kwarts vrijkomt.

6.2.2 Stofreductie door wassen

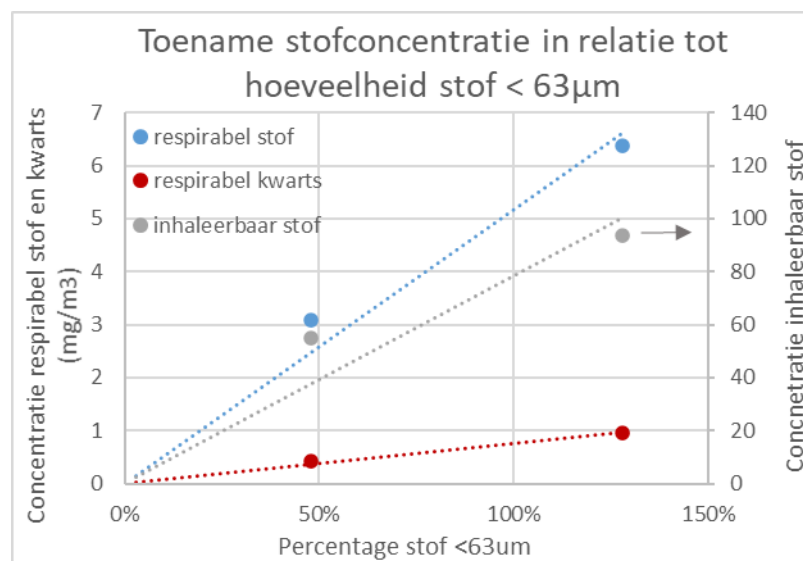
Van twee steengroeven is ook het ongewassen gesteente getest, het betreft Tau en Quenast met een percentage stof (fractie $<63\mu\text{m}$) van respectievelijk 0,48% en 1,3%. In Afbeelding 13 is voor beide gesteenten de stofreductie door wassen schematisch weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt in inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts. De stofreductie is berekend door de stof- en kwartsemmissie van het door TNO gewassen materiaal (Tabel 8, monsters 3 en 10) te vergelijken met de emissies van het originele ongewassen materiaal (Tabel 8, monsters 13 en 12). Voor inhaleerbaar en respirabel stof wordt een reductie van 20-25% bereikt en voor respirabel kwarts is dit 40-60%. Het verwijderen van stof door een extra wassing van TNO heeft, zoals verwacht, veel effect op de stofemissie en vooral op de respirabel kwartsemmissie.

In Afbeelding 14 is de absolute toename in stof- en kwartsconcentratie (verschil tussen gewassen en ongewassen gesteente) uitgezet tegen het percentage stof kleiner dan $63\mu\text{m}$ (fines). Er is een positieve correlatie te zien tussen het percentage stof (fines) en de stof- en kwartsemmissie. Voor inhaleerbaar stof is deze correlatie iets minder aanwezig, dit kan te maken hebben de korrelgrootteverdeling van het stof dat voor Tau relatief iets grover is dan voor Quenast.

De gesteenten in Tau en Quenast zijn allebei van het type kwarts(micro)dioriet met een vergelijkbaar kwartspercentage in het gesteente. Bij extrapolatie van de resultaten naar de andere typen gesteenten moet hiermee worden rekening gehouden.



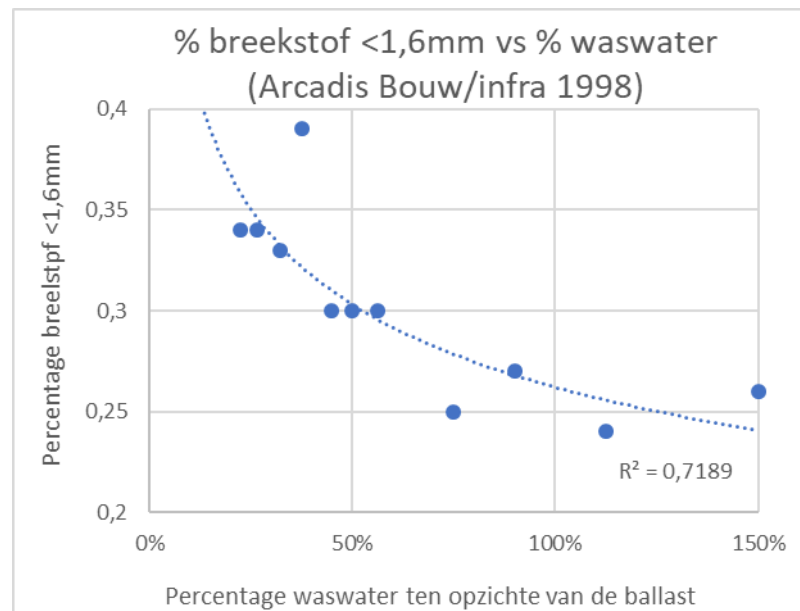
Afbeelding 13. Reductie van de concentratie inhaleerbaar en respirabel stof en respirabel kwarts door het wassen van het gesteente door TNO voorafgaand aan de simulatie experimenten.



Afbeelding 14. Correlatiediagram van de toename in de stof- en kwartsconcentratie als gevolg van het percentage stof < 63 μm.

In december 1998 zijn op de steengroeve in Quenast wasproeven uitgevoerd waarbij de gevarieerde hoeveelheden waswater (Arcadis Bouw/Infra, 1998). Standaard werd in Quenast 900 ton ballast per uur geproduceerd, waarbij 450 m³ waswater per uur werd gebruikt. Hiermee werd het percentage stof <1,6 mm teruggebracht van 2,3% tot 0,3%. Na iedere wasproef is toen het percentage stof <1,6 mm bepaald conform de Technische bepaling L-11 van de NMBS. In Afbeelding 15 zijn de resultaten van deze wasproeven weergegeven in de vorm van een correlatiediagram waarbij het percentage stof <1,6 mm is uitgezet tegen de relatieve hoeveelheid waswater (in procenten) ten opzichte van de doorvoer aan ballast. Hieruit blijkt dat door het gebruik van meer waswater het percentage

stof omlaag kan worden gebracht. Dit effect is vooral zichtbaar tussen de 20 en 100% waswater; bij het toevoegen van nog meer waswater (>100%) is het effect nauwelijks zichtbaar. De percentages kunnen niet direct worden vergeleken met de door TNO bepaalde percentages stof, aangezien toen de fractie <1,6 mm is onderzocht en in dit onderzoek het percentage 'fines' (<0,063 mm).



Afbeelding 15. Correlatiediagram van de afname van het percentage stof (<1,6 mm) als gevolg van het toevoegen van meer waswater, in relatieve massapercentages ten opzichte van de ballast.

6.2.3 Elementsamenstelling inhaleerbaar stof

In Tabel 9 is de elementsamenstelling van het inhaleerbaar stof van de verschillende typen gesteenten gegeven, geanalyseerd met SEM-EDX en uitgedrukt in oxiden (zoals gebruikelijk is). De gegeven elementsamenstelling is het gemiddelde resultaat van drie afzonderlijke analyses, waarbij tevens de standaarddeviatie (SD) is gegeven. Als detectielimiet is hierbij 0,2 massa % aangehouden. De in de tabel genoemde oxiden moeten niet worden beschouwd als afzonderlijke componenten in het gesteente. Bijvoorbeeld, silicium, uitgedrukt als SiO_2 , kan aanwezig zijn als silica (zowel kristallijn als amorf) en als silicaat (samen met aluminium en andere elementen).

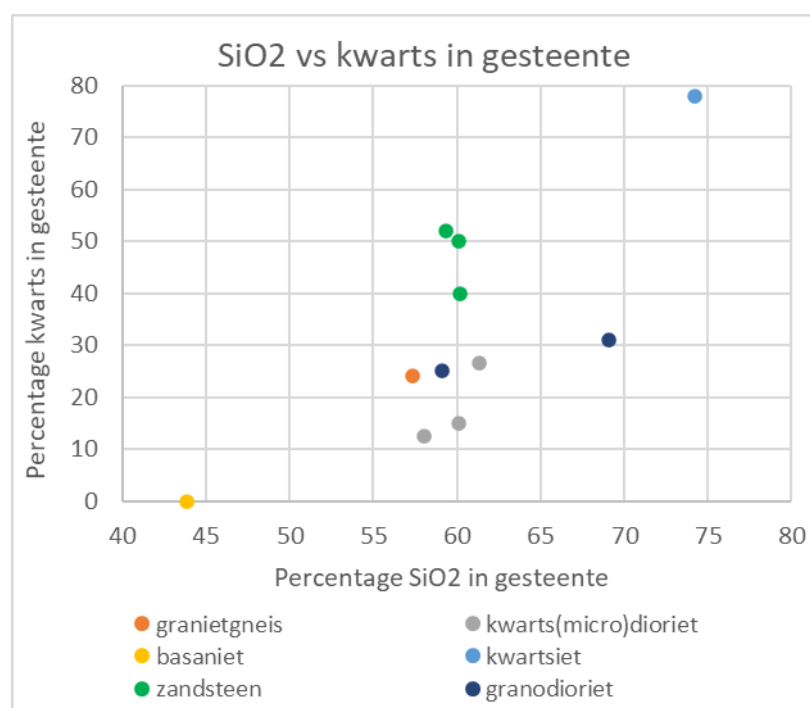
Tabel 9. Elementsamenstelling van inhaleerbaar stof, verzameld tijdens de simulatie experimenten met de diverse typen gesteenten. De elementsamenstelling is weergegeven in gewichtspercentages aan oxiden ¹.

Code	Groeve	Gesteente	Kwarts %	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	P ₂ O ₅	SO ₃
8	Werk Nickenich	Basaniet	0	5,2 ±0,4	6,5 ±0,5	19 ±1	44 ±2	3,9 ±0,1	9,5 ±0,6	2,3 ±0,1	8,4 ±0,2	0,9 ±0,1	<0,2
3	Tau	Kwartsdioriet	15	4,7 ±0,4	2,3 ±0,2	20 ±1	57 ±1	1,4 ±0,1	6,9 ±0,7	0,6 ±0,1	6,5 ±0,2	<0,2	<0,2
13	Tau (bemonstering Amsterdam)	Kwartsdioriet	15	4,4 ±0,3	2,9 ±0,1	19 ±1	59 ±2	1,4 ±0,2	5,7 ±0,9	0,5 ±0,1	6,4 ±0,2	<0,2	<0,2
9	Lessines	Kwartsmicro-dioriet	5-20 ²⁾	3,6 ±0,3	4,5 ±0,1	18 ±1	58 ±2	2,9 ±0,3	3,1 ±0,7	0,8 ±0,1	8,1 ±0,7	<0,2	<0,2
10	Quenast	Kwartsmicro-dioriet	27	4,4 ±0,3	3,8 ±0,1	17 ±1	59 ±2	2,8 ±0,1	3,2 ±0,4	1,0 ±0,1	7,6 ±0,6	<0,2	<0,2
12	Quenast (ongewassen)	Kwartsmicro-dioriet	27	4,1 ±0,3	4,0 ±0,1	17 ±1	59 ±2	2,6 ±0,1	3,6 ±0,5	0,8 ±0,1	8,6 ±0,7	<0,2	<0,2
1	Eikefet	Granietgneis	24 (20-60) ²⁾	4,3 ±0,4	4,4 ±0,4	17 ±1	53 ±2	2,7 ±0,2	7,2 ±0,6	1,6 ±0,1	9,3 ±0,8	<0,2	<0,2
4	Jelsa	Granodioriet	50	3,6 ±0,4	2,3 ±0,1	16 ±1	57 ±2	4,8 ±0,3	4,1 ±0,4	1,4 ±0,1	9,5 ±0,5	<0,2	<0,2
6	Glensanda	Granodioriet	31	4,9 ±0,4	1,5 ±0,1	17 ±1	66 ±2	3,8 ±0,4	3,3 ±0,5	0,7 ±0,1	2,8 ±0,1	<0,2	<0,2
2	Seljestokken	Zandsteen	25	2,7 ±0,3	4,1 ±0,1	15 ±1	60 ±1	3,3 ±0,1	5,8 ±0,6	1,1 ±0,1	7,5 ±0,3	<0,2	<0,2
5	Bremanger	Zandsteen	40	2,7 ±0,2	3,4 ±0,3	15 ±1	61 ±3	3,6 ±0,3	7,4 ±0,8	0,8 ±0,1	5,0 ±0,5	<0,2	<0,2
11	Yvoir	Zandsteen	39	1,7 ±0,2	5,0 ±0,2	16 ±1	56 ±2	4,3 ±0,4	9,4 ±1,6	0,8 ±0,1	6,3 ±0,4	<0,2	0,6 ±0,1
7	Taben-Rodt	Kwartsiet	67 - 89	0,9 ±0,1	0,9 ±0,1	13 ±1	75 ±2	3,3 ±0,4	0,9 ±0,1	0,6 ±0,2	5,3 ±0,4	<0,2	<0,2

Opmerkingen Tabel 7:

- 1) De genoemde oxiden moeten niet worden beschouwd als afzonderlijke componenten en minerale vormen in het gesteente. Bijvoorbeeld, silicium, uitgedrukt als SiO₂, kan aanwezig zijn als silica (o.a. kwarts) en als silicaat (o.a. veldspaten).
- 2) Bandbreedte kwartsgehalte op basis van de QAFP diagrammen conform NEN-EN 12670 Natuursteen – Terminologie.

Naast de elementsamenstelling van het inhaleerbaar stof is op dezelfde manier ook de elementsamenstelling van het originele gesteente bepaald. In algemene zin kan worden gesteld dat de elementsamenstelling van het inhaleerbaar stof vrijwel identiek is aan de samenstelling van het originele gesteente. In Afbeelding 16 is het kwartsgehalte zoals opgegeven door de steengroeven vergeleken met het door TNO bepaalde totale percentage silicium (als oxide, SiO_2) in de verschillende gesteenten. Hieruit blijkt dat er een matige correlatie is tussen het kwarts- en siliciumgehalte in de gesteenten (R^2 0,5 – 0,7). Dit is logisch aangezien silicium niet alleen aanwezig is als kwarts (kristallijn silica) maar ook in vele andere minerale vormen kan voorkomen (o.a. veldspaten). De uitzondering hierop is kwartsiet uit Taben-Rodt; in dit gesteente is vrijwel al het silicium aanwezig als kwarts. Voor het kwartsgehalte in dit gesteente is in Figuur 16 het gemiddelde genomen van de door de steengroeve gemelde range van 67 – 89 massa%.



Afbeelding 16. Percentage kwarts in de gesteenten, zoals opgegeven door de steengroeven, vergeleken met het percentage silicium (weergegeven als oxide) in de gesteenten.

6.2.4 Schadelijke componenten

Het vrijgekomen stof tijdens de simulatie-experimenten is onderzocht op vezelvormige bestanddelen en metallische minerale deeltjes. In Tabel 10 zijn de resultaten van de aangetroffen minerale vezels weergegeven. Naast vezelvormige aluminiumsilicaat deeltjes en vezelvormige silica (SiO_2) deeltjes zijn géén andere minerale vezels aangetroffen in het stof. Dit betekent dat er géén asbestvezels en géén erioniet vezels zijn aangetroffen. Naast de concentratie vezelvormige deeltjes is tussen haakjes ook het 95% betrouwbaarheidsinterval (95% BI) weergegeven.

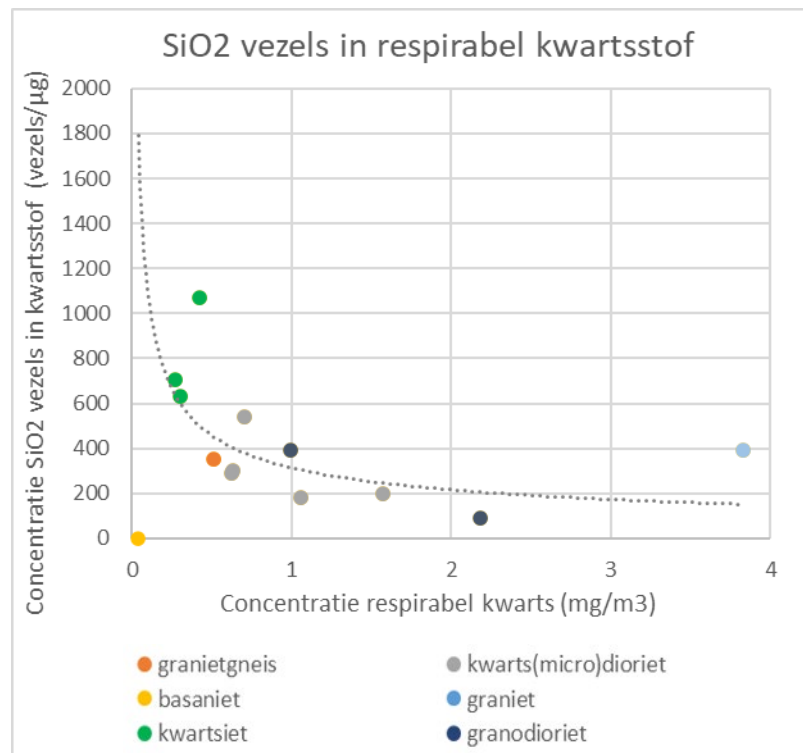
De vezelvormige minerale deeltjes die zijn aangetroffen voldoen weliswaar aan de WHO-definitie van vezels (lengte $>5\mu\text{m}$, diameter $<3\mu\text{m}$ en lengte-diameter verhouding >3) echter, het zijn vrijwel allemaal vezelvormige splijtfragmenten met beperkte lengte-diameter verhouding en niet te vergelijken met 'echte' vezels.

Respirabele asbestiforme vezels hebben bijvoorbeeld vrijwel allemaal een lengte-diameter verhouding van meer dan 10.

Tabel 10. Concentratie silicaatvezels en siliciumoxide vezels, gemeten tijdens de simulatie experimenten met de verschillende typen gesteenten

TNO Code	Steengroeve	Type gesteente	Vezeldimensie (µm)			Vezelconcentratie (vezels/m ³ x 10 ⁶)	
			L	D	L:D	Silicaten Gem (96%BI)	SiO ₂
8	Werk Nickenich	Basaniet	8,9	1,4	6,4	2,8 (2,1 – 3,8)	< 0,19
3	Tau	Kwartsdioriet	8,6	1,0	9,4	6,5 (5,3 – 7,9)	<0,19
13	Tau (ongewassen)	Kwartsdioriet	8,5	1,1	8,0	6,9 (5,7 – 8,3)	<0,19
9	Lessines	Kwarts-microdioriet	7,3	1,1	7,1	3,5 (2,6 – 4,6)	0,38 (0,14 – 0,84)
10	Quenast	Kwarts-microdioriet	7,3	1,1	7,5	3,6 (2,8 – 4,7)	< 0,18
12	Quenast (ongewassen)	Kwarts-microdioriet	8,1	1,1	7,5	2,1 (1,4 – 2,9)	0,31 (0,10 – 0,72)
1	Eikefet	Granietgneis	9,8	1,2	8,9	17 (15 – 20)	< 0,54
4	Jelsa (type 2)	Granodioriet	7,5	1,0	8,5	5,6 (4,4 – 6,9)	0,39 (0,14 – 0,84)
6	Glensanda	Granodioriet	7,4	1,1	6,9	3,5 (2,6 – 4,6)	0,20 (0,04 – 0,60)
2	Seljestokken	Zandsteen	8,5	1,1	8,8	1,7 (1,1 – 2,5)	0,19 (0,04 – 0,56)
5	Bremanger	Zandsteen	9,4	1,2	10,1	2,5 (1,8 – 3,4)	0,45 (0,18 – 0,93)
11	Yvoir	Zandsteen	8,2	1,2	7,6	1,2 (0,7 – 1,9)	0,19 (0,04 – 0,56)
7	Taben-Rodt	Kwartsiet	7,2	1,0	8,4	6,5 (5,3 – 7,9)	1,5 (0,95 – 2,3)

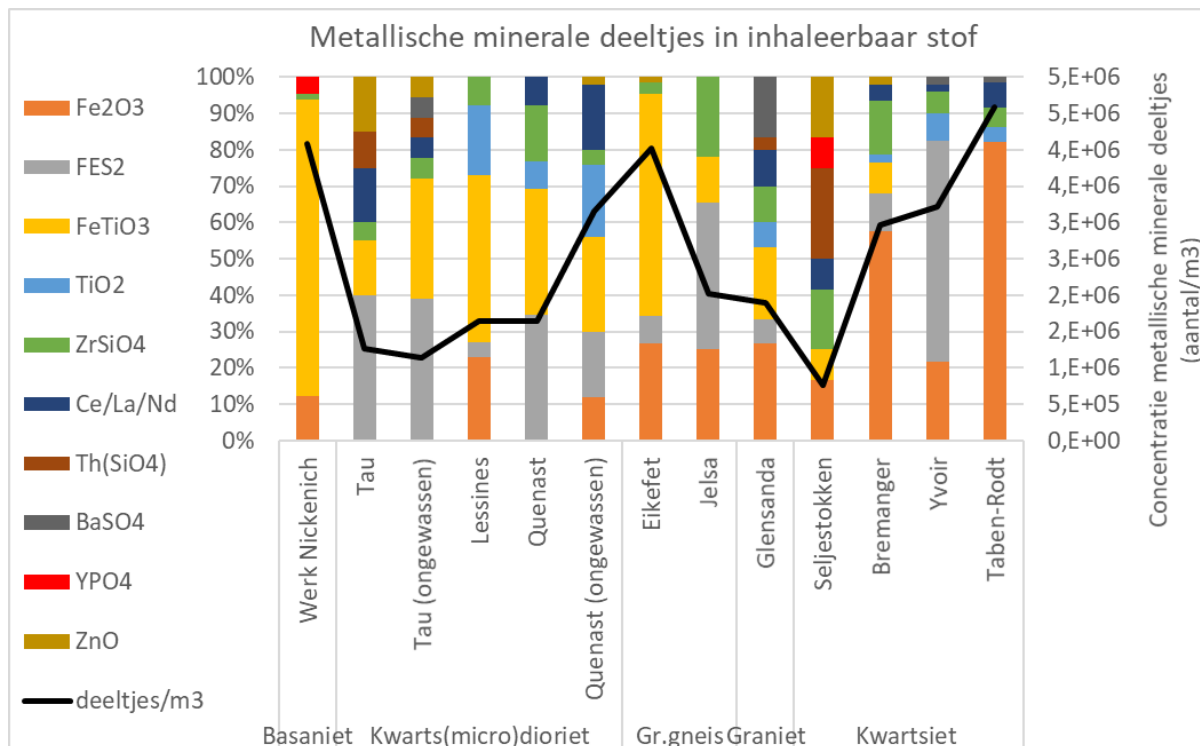
Vooraf in het stof afkomstig van het kwartsiet gesteente uit de steengroeve Taben-Rodt is de concentratie aan silicavezels relatief hoog. Ditzelfde geldt voor de concentratie vezelvormige aluminiumsilicaten in het granietgneis gesteente uit de steengroeve Eikefet. Er zijn geen specifieke schadelijke effecten bekend van de aangetroffen vezelvormige minerale deeltjes. De vezelvormige silicadeeltjes maken wel onderdeel uit van respirabel kwarts en worden in die hoedanigheid getoetst aan de grenswaarde voor kristallijn silica. Over de extra nadelige effecten in relatie tot de vezelvorm zijn geen gegevens bekend. In afbeelding 17 is als illustratie een correlatiediagram gegeven van het aantal silica (siliciumdioxide) vezels in respirabel kwartsstof (vezels/µg) en de gemeten concentratie aan respirabel kwarts. Hieruit blijkt dat vooral in het respirabel kwartsstof afkomstig van zandsteen een relatief hoog aandeel aan vezelvormige silicadeeltjes aanwezig is.



Afbeelding 17. Correlatiediagram van het aantal siliciumdioxide vezels in kwartsstof (vezels/μg) en de gemeten concentraties aan respirabel kwarts tijdens de simulatie experimenten met de verschillende typen gesteenten.

In afbeelding 18 zijn de aangetroffen typen metallische minerale deeltjes schematisch weergegeven. De gekleurde balken geven de relatieve verdeling van de verschillende typen deeltjes, genormeerd naar 100%. Daarnaast is in hetzelfde diagram de totale concentratie aan metallische minerale deeltjes weergegeven in aantal deeltjes per m³ (zwarte lijn). De onderstaande typen metallische minerale deeltjes zijn aangetroffen: pyriet (FeS₂), illmeniet (FeTiO₃), hematiet (Fe₂O₃), rutiel (TiO₂), zircon (ZrSiO₄), thoriet (Th(SiO₄)), bariet (BaSO₄), xenotiem (YPO₄), zinkiet (ZnO) en diverse minerale vormen met cerium (Ce), lanthanum (La) en neodymium (Nd), zoals gadolinit en calcioancylit. Wat enigszins opvalt zijn de hoge concentraties aan ilmeniet in basaniet uit Werk Nickenich en granietgneis uit Eikefet, de hoge concentraties aan hematiet in zandsteen uit Bremanger en kwartsiet uit Taben-Rodt en de hoge concentratie aan pyriet in zandsteen uit Yvoir. De hoge concentratie aan hematiet in het kwartsiet gesteente uit Taben-Rodt is logisch gezien de rode kleur van het gesteente.

Nikkelhoudende mineralen zoals o.a. bunseniet (nikkeloxide) en milleriet (nikkelsulfide) zijn niet aangetroffen. Mica's met metallische elementen (zoals o.a. Ba, Cs, Fe, Zn, Cr, V, Ti, Mn, Ni) zijn ook niet aangetroffen.

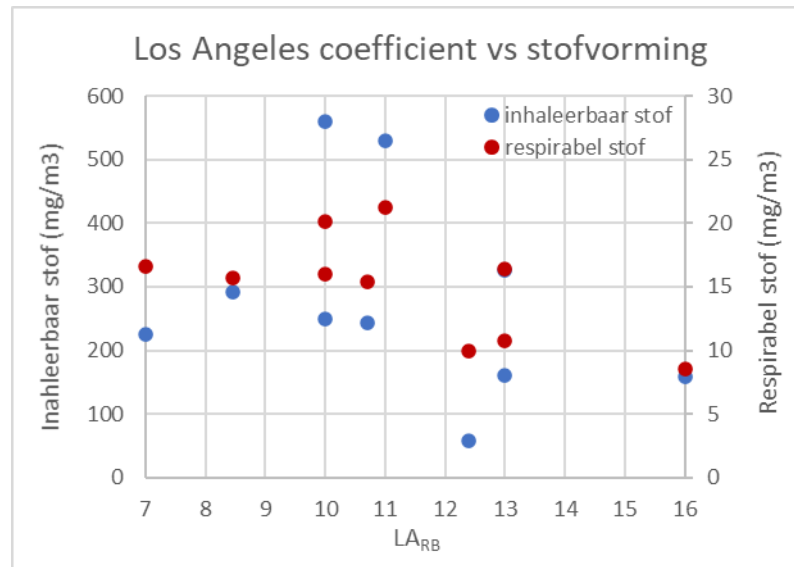


Afbeelding 18. Aantallen (n/m³) en onderverdeling in typen metallische minerale deeltjes (%) aangetroffen in inhaleerbaar stof, gemeten tijdens de simulatie experimenten met de verschillende typen gesteenten

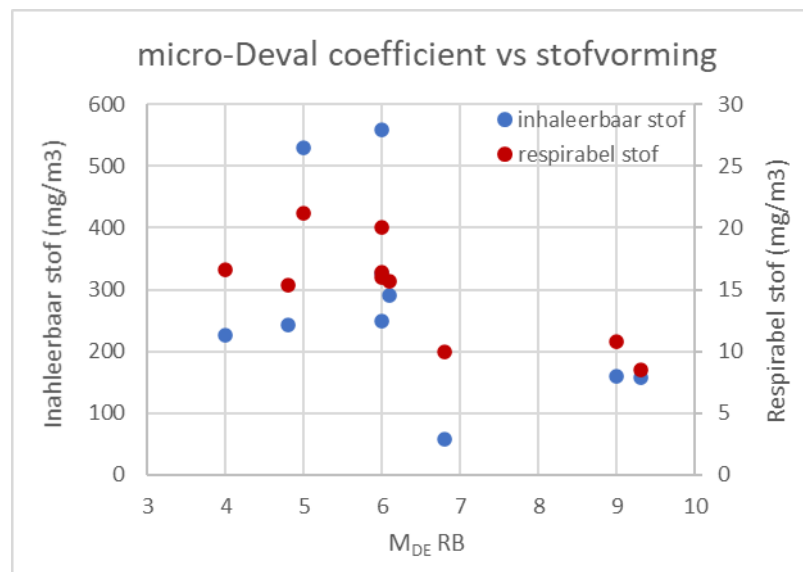
6.2.5 Stofconcentraties in relatie tot hardheidskenmerken ballast

Om meer inzicht te krijgen in de factoren die van invloed zijn op de stofontwikkeling is geprobeerd een relatie te vinden tussen twee hardheidskenmerken van het gesteente (weerstand tegen breuk “Los Angeles” en slijtage “micro-Deval”) en de concentratie aan inhaleerbaar en respirabel stof. In Afbeelding 19 en 20 zijn de gemeten inhaleerbaar en respirabel stofconcentraties uitgezet tegen de LA-waarde (LA_{RB}) en de micro-Deval waarde ($M_{DE RB}$). Voor zowel de Los Angeles test als de micro-Deval test geldt hoe lager de waarde hoe meer het gesteente bestand is tegen breuk en slijtage.

Op basis van de diagrammen kan worden gesteld dat er geen correlatie kan worden vastgesteld tussen de inhaleerbare stofconcentratie en de hardheidskenmerken van het ballastmateriaal ($R^2 < 0,5$). Alleen voor de respirabele stofconcentratie lijkt er een matige correlatie ($R^2 = 0,5 - 0,7$) te zijn met de micro-Deval waarde ($R^2 = 0,57$). Echter wat meer opvalt is dat bij de hardere gesteenten, met een hogere weerstand tegen breuk en slijtage, de stofvorming juist lijkt toe te nemen. Dit zou betekenen dat de hardheid van het gesteente een tegengesteld effect heeft op de vorming van vooral respirabel stof. De correlaties zijn echter matig zodat hier geen harde conclusies aan kunnen worden verbonden.



Afbeelding 19. Correlatiediagram van de inhaleerbaar- en respirabel stofconcentraties (mg/m³) gemeten tijdens de simulatie experimenten en de LA-waarde van de verschillende typen gesteenten.



Afbeelding 20. Correlatiediagram van de inhaleerbaar- en respirabel stofconcentraties (mg/m³) gemeten tijdens de simulatie experimenten en de micro-Deval waarde van de verschillende typen gesteenten.

6.3 Praktijkmetingen tijdens handelingen met gesteente uit Quenast

De praktijkmetingen zijn uitgevoerd tijdens alle handelingen met het porfiergesteente, vanaf het beladen van vrachtwagens in Quenast tot aan het storten en verdere bewerkingen van het gesteente in een baanvak in Geldermalsen. In totaal zijn tijdens negen handelingen de concentraties aan inhaleerbaar stof en respirabel stof in duplo gemeten en de concentratie aan respirabel kwarts in enkelvoud. Naast de metingen zijn op zes momenten monsters ballast genomen voor de bepaling van het vochtgehalte en het percentage stof (zie Tabel 11).

Tabel 11. Het vochtgehalte, percentage < 63 µm (fines) en de zeeffractie verdeling (na het natzeven) van het ballast gesteente na diverse handelingen

TNO code	Activiteit / handeling	Vochtgehalte (%)	Percentage v/d zeeffracties			
			<63µm	1 - 1mm	10mm	>10mm
15	Depot Quenast (uitgangsmateriaal)	0,54 ± 0,05	0,12%	0,01%	0,07%	99,8%
14	Na beladen schip in Tubeke	0,53 ± 0,01	0,38%	0,03%	0,26%	99,3%
18	Na lossen vrachtwagens op depot in Tiel	0,54 ± 0,03	0,27%	0,04%	0,18%	99,5%
16	Na beladen ballastwagens in Geldermalsen	0,77 ± 0,17	0,42%	0,05%	0,23%	99,3%
17	Na storten ballast in het spoor in Geldermalsen	0,85 ± 0,03	0,62%	0,13%	0,78%	98,5%
19	Na stop- en profileermachine in Geldermalsen	0,17 ± 0,01	0,53%	0,01%	0,21%	99,2%

In Tabel 12 staan de resultaten weergegeven van de gravimetrische bepalingen van inhaleerbaar en respirabel stof en de chemische bepalingen van respirabel kwarts. Voor de stofmetingen, die in duplo zijn uitgevoerd, is de gemiddelde concentratie en de standaarddeviatie (SD) weergegeven, aangegeven met '±'. In Afbeelding 21 en 22 zijn de resultaten van inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts tevens schematisch weergegeven. Het percentage kwarts in respirabel stof varieert van 4 – 9% bij de laad- en losactiviteiten, en is daarmee vergelijkbaar met het percentage kwarts tijdens de simulatieproeven (Tabel 8). Duidelijk is wel dat bij de activiteiten met de stop- en profileermachine het kwartspercentage hoger ligt (13 – 14%). Een mogelijke verklaring hiervoor is het lagere vochtgehalte van de ballast; ook wordt tijdens deze activiteiten plaatselijk nieuw ballast toegevoegd waarvan de oorsprong niet duidelijk is.

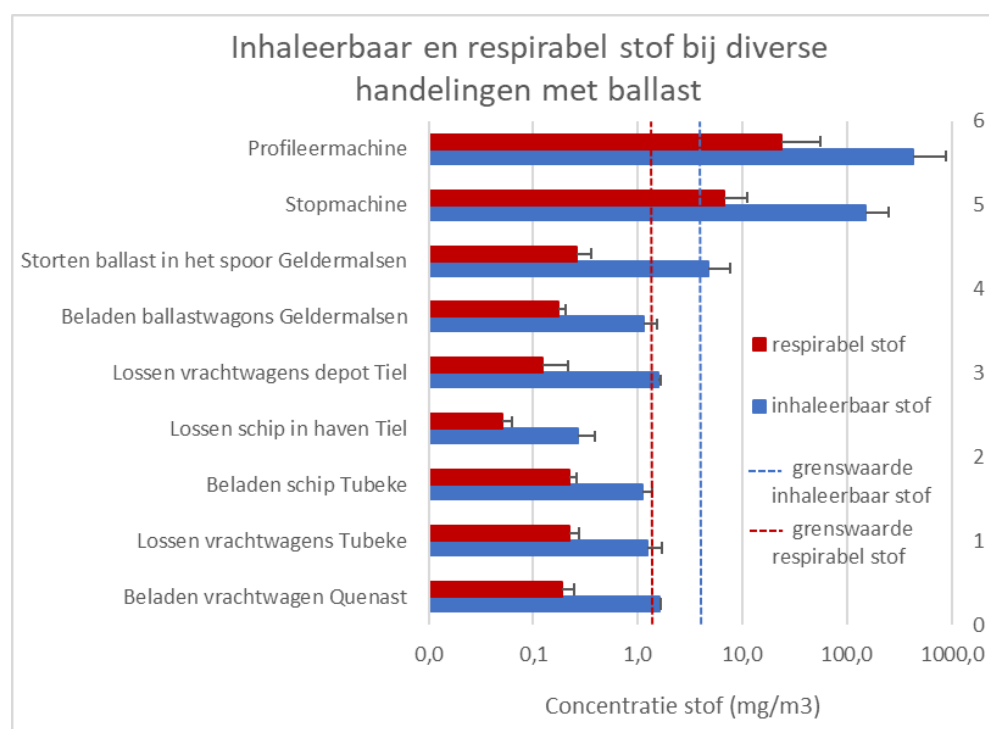
Voor de diverse transporthandelingen vanaf de steengroeve Quenast tot aan het storten in het spoor in Geldermalsen zijn de gemeten concentraties aan stof en kwarts licht verhoogd maar blijven nog ruim onder de geldende grenswaarden. Tijdens handelingen met de stopmachine en profileermachine is wel een duidelijke verhoging te zien in de gemeten concentraties aan stof en kwarts, waarbij grenswaarden ruim worden overschreden. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de metingen dicht op de diverse handelingen zijn uitgevoerd (binnen enkele meters) en als 'worst case' moeten worden beschouwd. Daarnaast gaat het om relatief kort durende handelingen (30 – 120 minuten) en dienen, voor een juiste toetsing aan grenswaarden, deze concentraties te worden omgerekend naar 8 uren gemiddelde waarden.

Tabel 12. Concentratie inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, gemeten tijdens diverse handelingen met ballast gesteente

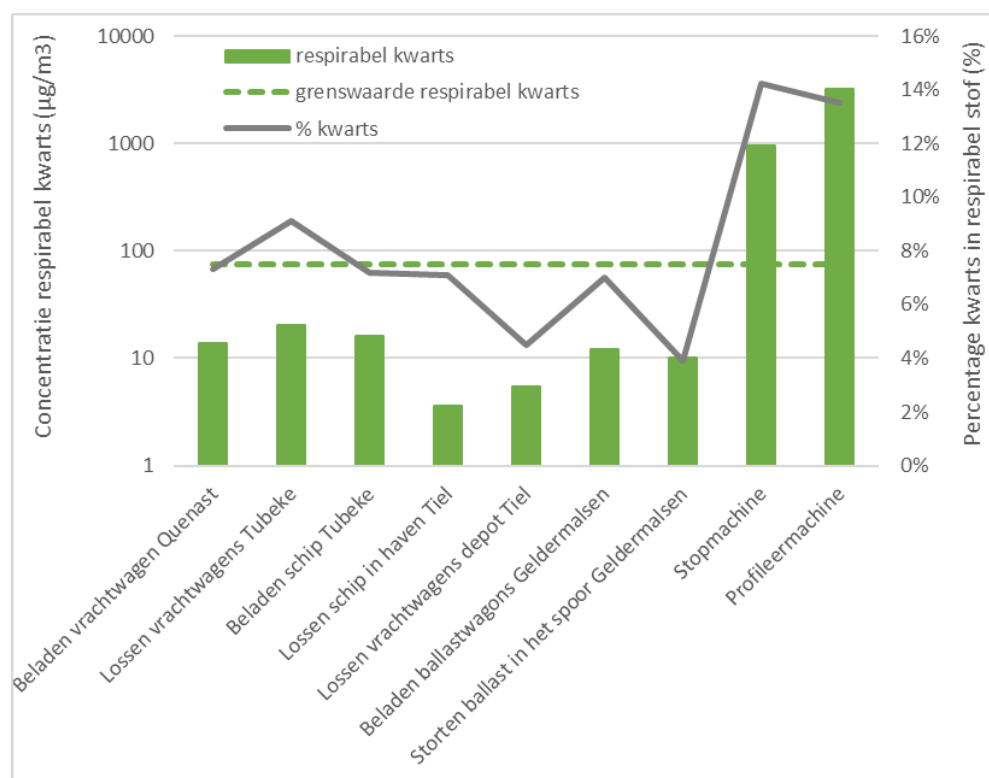
Activiteit / handeling	Inhaleerbaar stof ³⁾ (mg/m^3) ²⁾ Gem $\pm$ SD	Respirabel stof ³⁾ (mg/m^3) ²⁾ Gem $\pm$ SD	Respirabel Kwarts ³⁾ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹⁾ Gem $\pm$ SD
Beladen vrachtwagen Quenast	1,6 $\pm$ 0,03	0,19 $\pm$ 0,06	14 (7,3%)
Lossen vrachtwagens Tubeke	1,2 $\pm$ 0,5	0,22 $\pm$ 0,05	20 (9,1%)
Beladen schip Tubeke	1,1 $\pm$ 0,2	0,22 $\pm$ 0,03	16 (7,2%)
Lossen schip in haven Tiel	0,27 $\pm$ 0,12	0,05 $\pm$ 0,01	3,6 (7,1%)
Lossen vrachtwagens depot Tiel	1,6 $\pm$ 0,1	0,12 $\pm$ 0,10	5,5 (4,5%)
Beladen ballastwagons Geldermalsen	1,1 $\pm$ 0,4	0,17 $\pm$ 0,03	12 (7,0%)
Storten ballast in het spoor Geldermalsen	4,8 $\pm$ 3,0	0,26 $\pm$ 0,1	10 (3,9%)
Stopmachine	150 $\pm$ 97	6,8 $\pm$ 4,2	970 (14%)
Profielermachine	430 $\pm$ 450	24 $\pm$ 31	3200 (13%)

Opmerkingen bij Tabel 12:

- 1) De getallen tussen haakjes geven het percentage kwarts in respirabel stof
- 2) Voor inhaleerbaar en respirabel stof zijn ook de standaarddeviaties ($\pm$) weergegeven op basis van de duplometing
- 3) Grenswaarden voor inhaleerbaar en respirabel stof en respirabel kwarts zijn achtereenvolgens $4 \text{ mg}/\text{m}^3$, $1,25 \text{ mg}/\text{m}^3$ en $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Afbeelding 21. Concentratie inhaleerbaar en respirabel stof, in mg/m^3 , gemeten tijdens de diverse handelingen met ballast gesteente.



Afbeelding 22. Concentratie respirabel kwarts, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, inclusief percentage kwarts in respirabel stof, gemeten tijdens diverse handelingen met ballast gesteente.

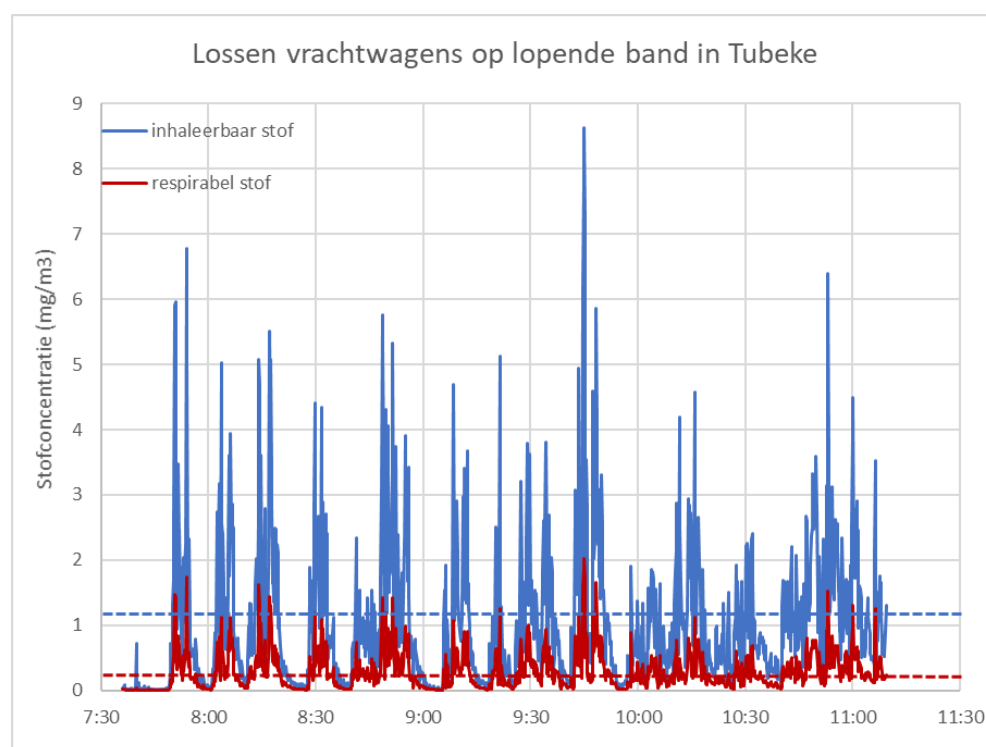
De nu gemeten concentraties met het porfier gesteente uit Quenast tijdens het storten in het spoor komen redelijk overeen met de in 1998 door TNO gemeten concentraties aan inhaleerbaar stof en respirabel kwarts (Moons, 1998). Deze metingen zijn net zoals nu al lopend in de stofwolk op ca. 0,5 - 1 mtr van de rails uitgevoerd. Gemeten concentraties respirabel stof waren toen: 11,4 – 13,4 mg/m^3 voor granietgneis, 2,1 – 7,5 mg/m^3 voor porfier en 15,0 – 26,9 mg/m^3 voor een mengsel van basalt en granietgneis. Ook de respirabele kwartsconcentraties zijn toen op dezelfde manier bepaald als nu. De resultaten toen lagen wel iets hoger dan nu: 64 - 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voor granietgneis, 67 – 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voor porfier en 96 – 199 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voor basalt/granietgneis. De vochtigheid van het basalt/granietgneis mengsel lag toen iets lager (ca. 20%) wat de hogere gemeten concentraties kan verklaren.

De activiteiten met de stop- en profileermachine zijn continu waarbij ook voortdurend stof wordt geemiteerd. Bij de overige transportgerelateerde handelingen gaat het steeds om laad- en losactiviteiten met een discontinu karakter. De stof- en kwartsmetingen geven hierbij het tijdsgemiddelde resultaat over de gehele periode van een bepaalde activiteit. Om ook inzicht te krijgen in piekmissies is tijdens het lossen van vrachtwagens op een lopende band in Tubeke met een stofmonitor (APS) gemeten. In Afbeelding 23 zijn de inhaleerbaar en respirabel stofconcentraties gemeten met de APS stofmonitor schematisch weergegeven. Hierbij zijn als vergelijking met een stippellijn ook de tijdsgemiddelde waarden weergegeven op basis van de gravimetrische bepalingen.

Voor inhaleerbaar stof is de tijdsgemiddelde concentratie 1,2 mg/m^3 , terwijl de maximale 15 minuten piekwaarde 2,0 mg/m^3 is. Voor respirabel stof is dat 0,22

mg/m³ (tijdsgemiddeld) en 1,0 mg/m³ (15 minuten piekwaarde). Voor respirabel kwarts kan een 15 minuten piekwaarde van 90 µg/m³ worden afgeleid op basis van de respirabel stof concentratie en het percentage kwarts (Tabel 12). Dit betekent dat voor inhaleerbaar en respirabel stof de 15 minuten grenswaarden vermoedelijk niet worden overschreden tijdens de diverse transporthandelingen (laden en lossen). Voor kwarts bestaat er geen grenswaarde voor kortdurende blootstelling; de 8 uren gemiddelde grenswaarde voor respirabel kwarts zou wel tijdelijk kunnen worden overschreden.

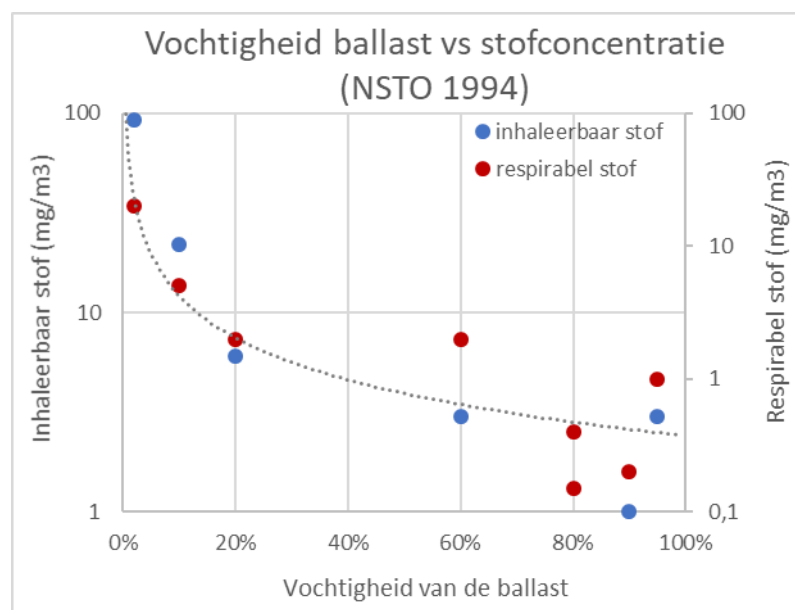
De simulatiemetingen hebben al laten zien dat de emissie van stof en kwarts voor een (belangrijk) deel wordt bepaald door het percentage stof (fines) in het gesteente. Door een halvering van het percentage stof (fines) kan de stof- en kwartsemissie met ca. 50% worden teruggebracht. Het wassen van het gesteente op de productie-locatie heeft dan ook aantoonbaar positief effect op de emissie van stof en kwarts in de lucht. Nog meer dan het percentage stof is ook het vochtgehalte van het gesteente een belangrijke factor bij het omlaag brengen van de stof- en kwartsemissie. Binnen TNO wordt voor de schatting van beroepsmatige blootstelling aan poedervormige materialen gebruik gemaakt van het zogenaamde “Advanced Reach Tool” (ART). Dit is een mechanistisch model, gebaseerd op diverse praktijkmetingen tijdens verschillende handelingen onder wisselende omstandigheden.



Afbeelding 23. Variatie in de concentratie inhaleerbaar en respirabel stof, in µg/m³, tijdens het lossen van vrachtwagen op de lopende band in Tubeke, gemeten met een fijnstof monitor. De stippellijnen geven de tijdsgemiddelde gravimetrisch waarden aan over de gehele periode.

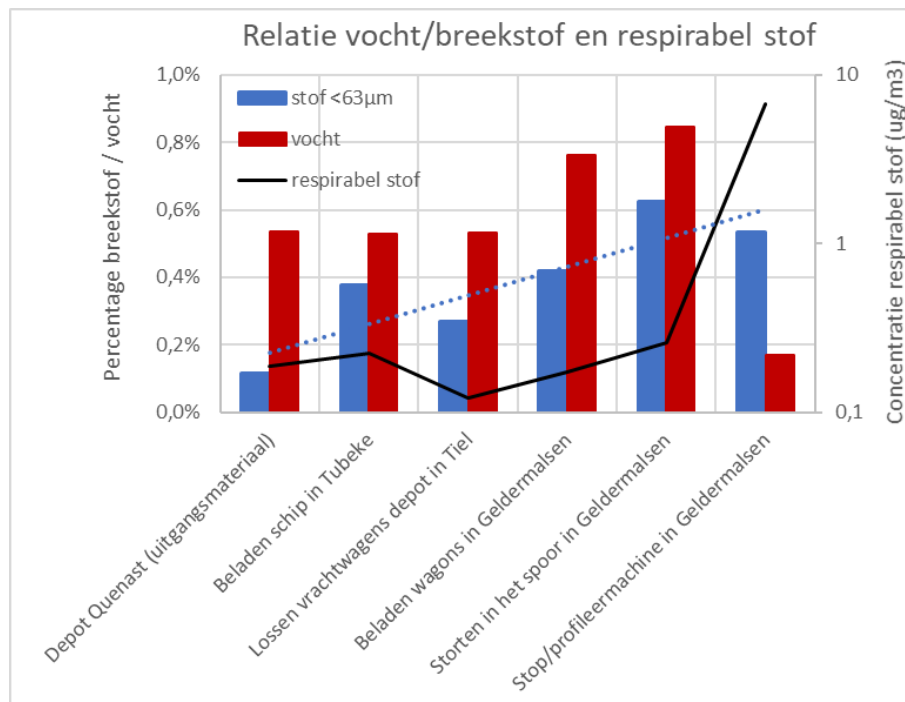
Bij het schatten van de emissie en blootstelling aan (inhaleerbaar) stof gaat het ART-model er vanuit dat wanneer het vochtgehalte van het product groter is dan 5%, de potentie voor stofemissie met 90% wordt gereduceerd (factor 10 lager) in

vergelijking tot het werken met een droog product. Wanneer het vochtgehalte van het product >10% is, wordt deze reductie zelfs 99% (factor 100 lager). Deze reductiefactoren komen goed overeen met het onderzoek dat in 1994 is uitgevoerd door NS Technisch Onderzoek, waarbij stof- en kwartsconcentratiemetingen in de lucht zijn uitgevoerd bij het lossen van basalt, porfier en granietgneis in het spoor (NSTO, 1994). De vochtigheid van het ballastmateriaal is toen visueel ingeschat, waarbij deze is uitgedrukt in het percentage van de stenen dat visueel nat was. De resultaten van dit onderzoek zijn samengevat in Afbeelding 24, waarbij de concentraties aan inhaleerbaar en respirabel stof zijn uitgezet tegen de vochtigheid van het ballastmateriaal.



Afbeelding 24. Correlatiediagram van de concentraties aan inhaleerbaar- en respirabel stof bij oplopende vochtigheid van het ballastmateriaal, tijdens het storten in het spoor, gemeten door NS Technisch Onderzoek in 1994.

Op basis van de metingen door TNO is in Afbeelding 25 de relatie tussen het percentage stof (fines), het vochtgehalte (%) en de gemeten concentratie aan respirabel stof schematisch weergegeven. Hieruit blijkt dat tijdens de transporthandelingen het percentage stof (fines) steeds verder toeneemt (met ca. 0,1%-punt per handeling). Dit wordt geïllustreerd door de omhoog lopende gestippelde blauwe correlatielijn. Uitzondering hierop is het geloste materiaal dat in een tijdelijk depot in Tiel is gezet; dit gesteente blijkt minder stof te bevatten dan bij het beladen van het schip in Tubeke. Enerzijds moet rekening worden gehouden met een zekere variantie in de monsterneming; het percentage stof zal niet op ieder punt hetzelfde zijn. Echter, een belangrijke oorzaak voor de “terugval” in het percentage stof (fines) is het feit dat er tijdens het lossen van het schip in Tiel enorme hoeveelheden water over de ballast zijn uitgespoeld. Dit heeft er waarschijnlijk voor gezorgd dat een deel van het stof met het water is weggespoeld. Het “gewassen” materiaal is daarna in depot gestort en bemonsterd.



Afbeelding 25. Het vochtgehalte en percentage stof (<63µm) van de ballast gesteente na diverse handelingen en de concentratie respirabel stof, in µg/m³, gemeten tijdens deze handelingen.

Voorafgaand aan alle laad- en losactiviteiten is het materiaal bevochtigd. In Quenast is het materiaal vlak voor het beladen van de vrachtwagens gewassen, waarna de vrachtwagens direct naar Tubeke zijn gereden. Tijdens het lossen van de vrachtwagens en het beladen van het schip in Tubeke was het materiaal zichtbaar nog vochtig. Dit blijkt ook uit de gemeten vochtgehalten in Quenast en Tubeke van ca. 0,5%. Na aankomst van het schip in Tiel is het materiaal voorafgaand aan het lossen in vrachtwagens gespoeld met een overschot aan water, waarna dit natte materiaal direct naar het tijdelijk depot in Tiel is gereden. Het vochtgehalte van dit in depot gezette materiaal is ook ca. 0,5%.

Vanuit een ander tijdelijk depot in Geldermalsen is het materiaal voorafgaand aan overslag in ballastwagons nogmaals besproeid met veel water door middel van een giertank. Het vochtgehalte van het materiaal in de ballastwagons, direct gemeten na het beladen, ligt op ca. 0,8%. Dit materiaal heeft vervolgens in de avond ca. 5 uur in de ballastwagons gelegen, waarna het 's nachts is gestort in het baanvak. Het vochtgehalte van het materiaal in het baanvak bleek nogmaals ca. 0,8% te zijn, wat betekent dat vrijwel geen verdamping heeft plaatsgevonden in de avond. Echter, net zoals bij het percentage stof moet ook bij het vochtgehalte rekening worden gehouden met een zekere variantie (spreiding) als gevolg van 'lokale' verschillen in de partij; het percentage vocht zal niet op ieder punt hetzelfde zijn.

Het gestorte ballastmateriaal heeft vervolgens ca. 1½ dag in het baanvak gelegen bij droog en half bewolkt weer waarna het verder is behandeld door de stop- en profileermachine. Na deze activiteiten is het vochtgehalte van het materiaal in het baanvak nogmaals gemeten en bleek slechts ca. 0,2% te zijn. De reductie van het vochtgehalte is deels door verdamping veroorzaakt maar kan ook door de activiteiten van de stop- en profileermachine zijn veroorzaakt, aangezien daarbij

plaatselijk nieuw droog ballastmateriaal is bijgestort. Het is niet te achterhalen of dit bijgestorte materiaal ook van Quenast afkomstig is.

In Afbeelding 25 is ook een correlatie zichtbaar tussen de concentratie respirabel stof en het percentage stof (fines) en vocht. Dat wil zeggen, meer stof en/of minder vocht heeft als consequentie dat de concentratie respirabel stof toeneemt. Aangezien het stofgehalte en het vochtgehalte tegelijkertijd invloed hebben op de concentratie respirabel stof is moeilijk te achterhalen wat het individuele effect is van de het stof- en vochtgehalte. De correlatie in Afbeelding 25 voor pirabel stof geldt ook voor inhaleerbaar stof en respirabel kwarts. Ook hiervoor geldt dat de concentratie toeneemt naarmate het percentage stof toeneemt en het vochtgehalte afneemt. Alhoewel de activiteiten niet exact vergelijkbaar zijn en ook het vochtgehalte van de ballast enigszins varieert kan met enige voorzichtheid worden gesteld dat bij een verdubbeling van het percentage stof de gemeten respirabel stof- en kwartsconcentraties een factor $1\frac{1}{2}$ - 2 toenemen. Voor inhaleerbaar stof is het effect niet goed zichtbaar.

Bij de eerste drie meetpunten (Quenast, Tubeke en Tiel) is het vochtgehalte redelijk constant; uit deze meetpunten blijkt dat de concentratie respirabel stof redelijk correleert met het percentage stof (fines). Wel is de concentratie respirabel stof in Quenast in verhouding met de andere meetpunten vrij hoog. Dit kan worden verklaard door een mogelijke hoge bijdrage van de achtergrondconcentratie op de steengroeve in Quenast, veroorzaakt door de stoffige ondergrond in combinatie met rondrijdende vrachtwagens en shovels. Opgemerkt dient te worden dat er regelmatig sproeiwagens over het terrein rijden om deze resuspensie van stof tegen te gaan.

Bij de meetpunten 'Tiel', 'beladen wagons Geldermalsen' en 'storten in het spoor Geldermalsen' loopt het percentage stof (fines), het vochtgehalte en de concentratie respirabel stof steeds verder op. Aan de hand van deze gegevens zou ten onrechte kunnen worden verondersteld dat het percentage stof een grotere invloed heeft op de stofconcentratie dan het vochtgehalte. Deze conclusie is echter te voorbarig aangezien de meetcondities (afstand tot de emissiebron en weersomstandigheden) niet gelijk zijn, maar wel een belangrijke rol spelen.

Wat de laatste twee meetpunten (storten in het spoor Geldermalsen en stop- en profileermachine) wel duidelijk maken is dat het vochtgehalte een grote invloed heeft op de respirabel stofconcentratie. Uit de meetresultaten blijkt dat de stof- en respirabel kwartsconcentratie een factor 10 – 100 hoger is als het materiaal niet wordt bevochtigd voorafgaand aan de handelingen. Bij deze metingen op het spoor waren de meetcondities vergelijkbaar, echter onduidelijk is of de activiteiten (storten, verdichten, profileren) vergelijkbaar zijn.

De door TNO gemeten stofconcentraties tijdens het storten in het spoor in Geldermalsen komen goed overeen met de in 1994 door NSTO gemeten concentraties tijdens het storten van basalt, porfier en granietgneis. Wanneer de stenen voldoende vochtig zijn blijven de stofconcentraties laag en zullen de grenswaarden niet worden overschreden. Bij een directe vergelijking van de resultaten moet er rekening mee worden gehouden dat het "vochtgehalte" in het onderzoek van TNO (Afbeelding 25) niet één op één kan worden vergeleken met de "vochtigheid" van het onderzoek van NSTO in 1994 (Afbeelding 24). Het

vochtgehalte is daadwerkelijk gemeten en is uitgedrukt in het massapercentage vocht in het ballastmateriaal, terwijl de vochtigheid een inschatting is op basis van het percentage stenen dat visueel nat is. Een kwantitatieve relatie tussen deze twee verschillende termen is moeilijk te maken. Wel blijkt uit visuele observaties van TNO tijdens de metingen dat de stenen tijdens het lossen vrijwel allemaal nat waren (vochtigheid >90%).

In 1995 is door NS Technisch onderzoek nog een kleiner aanvullend onderzoek uitgevoerd naar het vrijkomen van stof bij het lossen van “gewassen” en “niet gewassen” porfier (NSTO, 1995). Dit onderzoek bevestigt het beeld van het huidige onderzoek, namelijk dat het percentage stof een effect heeft op de stofconcentratie. In dit onderzoek bleek dat bij een reductie van het percentage stof (fractie <1mm) met een factor 2½ (van 0,34% naar 0,13%) de respirabel stofconcentratie met ruim 30% werd verminderd (van 1,9 mg/m³ naar 1,3 mg/m³). Deze reductie is iets minder dan de door TNO bepaalde reductiefactor op basis van de simulatietesten (Afbeelding 14), maar vergelijkbaar met de reductiefactor die op basis van de praktijkmetingen is geschat. Er is wel een verschil in de definitie van stof in beide studies. In het TNO onderzoek is voor stof de fractie < 63µm genomen en in de metingen uit 1995 is de fractie < 1mm gebruikt. Dit grovere stof heeft waarschijnlijk minder effect op de respirabel stofconcentratie.

6.4 Inzicht in stofemissie van andere typen gesteenten

Om enig inzicht te krijgen in de potentiële emissie van inhaleerbaar- en respirabel stof en respirabel kwarts tijdens dezelfde handelingen met andere typen gesteenten zijn op basis van de resultaten van de simulatiemetingen hiervoor concentratiewaarden afgeleid. Hierbij is de onderstaande formule gebruikt, waarbij ‘C’ de concentratie aan inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts is:

$$C_{\text{gesteente praktijk}} = \frac{C_{\text{gesteente simulatie}}}{C_{\text{porfier simulatie}}} \times \frac{\% \text{breekstof gesteente}}{\% \text{breekstof porfier}} \times C_{\text{porfier praktijk}}$$

Aangenomen is dat het vochtpercentage van de andere typen gesteenten hetzelfde is als het porfier gesteente uit Quenast tijdens de praktijktesten. Hierbij wordt ook aangenomen dat de stofreductie door toevoeging van water bij deze typen gesteente hetzelfde is als bij het porfier gesteente; dit is wel waarschijnlijk, maar kan niet met zekerheid worden gesteld. Ook wordt aangenomen dat er een lineair verband is tussen het percentage stof (< 63µm) in de ballast en de concentratie inhaleerbaar/respirabel stof en respirabel kwarts in de lucht. Op basis van de simulatiemetingen (Afbeelding 14) en praktijkmetingen is deze correlatie voor respirabel stof en respirabel kwarts gerechtvaardigd; voor inhaleerbaar stof is een lineaire correlatie minder duidelijk.

Daarnaast wordt in de berekeningen gebruik gemaakt van het stofpercentage in het gewassen gesteente zoals bepaald door TNO. Als alleen ongewassen gesteente beschikbaar was, zijn de percentages stof gebruikt die de steengroeven zelf hebben gerapporteerd. Aangezien er bij iedere steengroeve een variatie aanwezig is in het percentage stof in de ballast, geeft dit ook een spreiding in de afgeleide concentraties. Tevens moet worden opgemerkt dat de handelingen bij de andere typen gesteenten vaak niet hetzelfde zijn, aangezien de steengroeven zich bevinden op andere locaties, waarbij mogelijk andere transportmiddelen worden gebruikt en/of

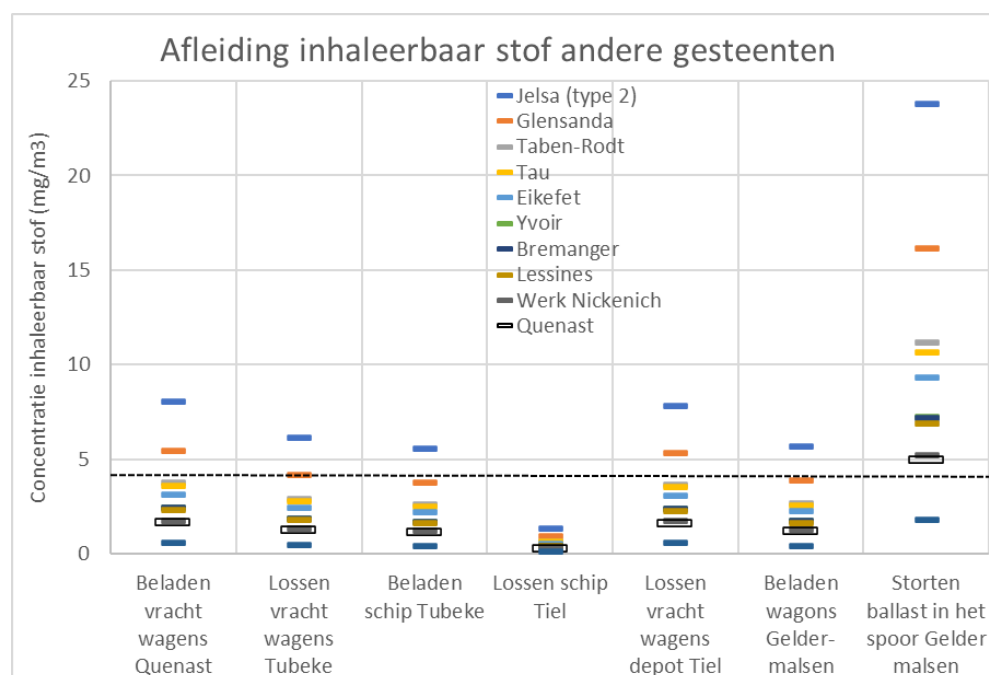
het aantal transporthandelingen anders kan zijn. Samenvattend moeten de afgeleide concentraties worden beschouwd als indicatieve waarden, waarbij rekening moet worden gehouden met een behoorlijke spreiding (geschatte variatie ca. 50%).

In Afbeelding 26 tot en met 28 zijn de afgeleide concentraties aan inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts schematisch weergegeven. De werkelijk gemeten concentraties met het porfier gesteente uit Quenast zijn als bredere (doorzichtige) balkjes in de figuren herkenbaar gemaakt. De andere gesteenten zijn met verschillende kleuren weergegeven. De volgorde van de steengroeven in de legenda komt overeen met de volgorde in de hoogte van de afgeleide concentraties. Bijvoorbeeld, de steengroeve met de hoogste concentraties wordt als eerste genoemd in de legenda. De resultaten van de stop- en profileermachine zijn niet opgenomen in deze figuren aangezien bij deze activiteiten bij vrijwel alle typen gesteenten, met uitzondering van basaniet, de concentraties aan inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts de grenswaarden worden overschreden (zie tevens Bijlage C). Voor het basanietgesteente uit Werk Nickenich, worden de concentraties voor respirabel kwarts waarschijnlijk niet overschreden.

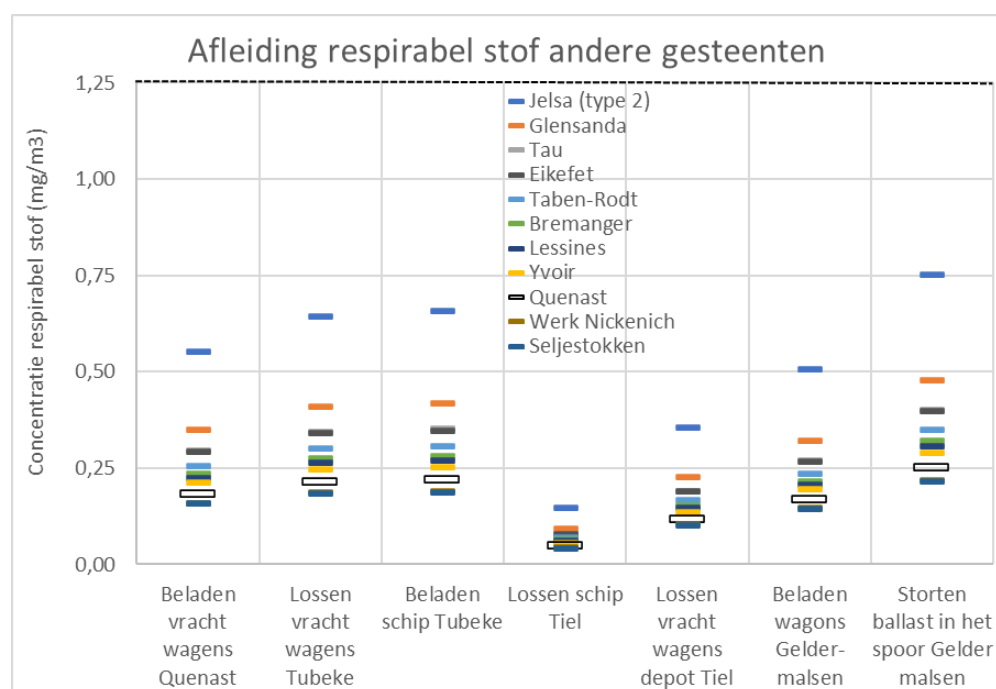
Uit de resultaten blijkt dat bij handelingen met de andere gesteenten de afgeleide (potentiele) stof- en kwartsconcentraties over het algemeen iets hoger liggen dan het porfiergesteente uit Quenast, met uitzondering van de gesteenten uit Seljestokken en Werk Nickenich.

Bij vrijwel alle handelingen met het gesteente uit Jelsa en het merendeel van de handelingen met het gesteente uit Glensanda is het waarschijnlijk dat de grenswaarde voor inhaleerbaar stof (4 mg/m^3) zal worden overschreden. Voor het granodioriet gesteente uit Jelsa moet hierbij worden opgemerkt dat de waarden betrekking hebben op het type 2 (22 – 40mm) gesteente. Bij het storten van de ballast in het spoor is het waarschijnlijk dat bij alle typen gesteente, met uitzondering van het zandsteen gesteente uit Seljestokken, de grenswaarde voor inhaleerbaar stof zal worden overschreden. Voor respirabel stof liggen de afgeleide concentraties voor alle typen gesteenten onder de grenswaarde van $1,25 \text{ mg/m}^3$.

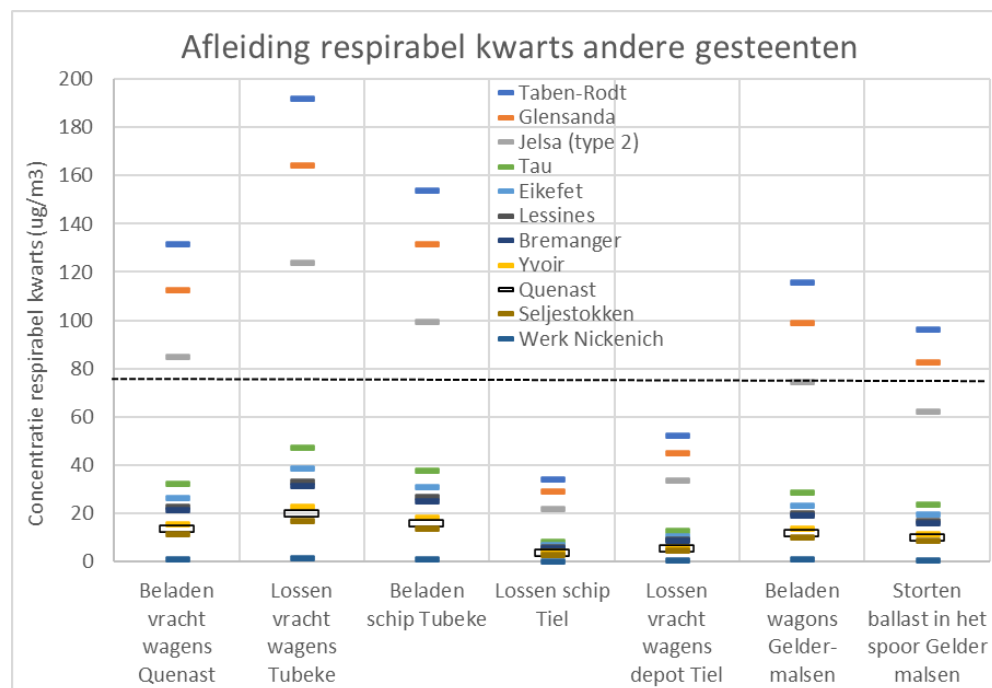
Bij handelingen met de meeste typen gesteente zullen de respirabel kwartsconcentraties onder de grenswaarde van $75 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ liggen, met uitzondering van het kwartsiet gesteente uit Taben-Rodt en de granodioriet gesteenten uit Glensanda en Jelsa. Bij praktijkhandelingen met deze drie typen gesteenten is het waarschijnlijk dat in veel gevallen de grenswaarde voor respirabel kwarts zal worden overschreden. Ook hier geldt dat de waarden voor het granodioriet gesteente uit Jelsa betrekking hebben op het type 2 (22 – 40mm) gesteente.



Afbeelding 26. De inhaleerbaar stofconcentraties voor de andere type gesteenten, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, afgeleid op basis van de simulatie experimenten aan de hand van vergelijking met het porfiergesteente uit Quenast (aangegeven met brede balkjes). De stippellijn is de grenswaarde voor inhaleerbaar stof ($4 \text{ mg}/\text{m}^3$).



Afbeelding 27. De respirabel stofconcentraties voor de andere type gesteenten, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, afgeleid op basis van de simulatie experimenten aan de hand van vergelijking met het porfiergesteente uit Quenast (aangegeven met brede balkjes). De stippellijn is de grenswaarde voor respirabel stof ($1,25 \text{ mg}/\text{m}^3$).



Afbeelding 28. De respirabel kwartsconcentraties voor de andere type gesteenten, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, afgeleid op basis van de simulatie experimenten aan de hand van vergelijking met het porfiergesteente uit Quenast (aangegeven met brede balkjes). De stippellijn is de grenswaarde voor respirabel kwarts ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Stof (fines)

Het op locatie wassen van de ballast kan het percentage stof drastisch reduceren. Van de gewassen ballast is het percentage 'fines' (fractie <63 µm) kleiner dan 0,4%; in de ongewassen ballast ligt dit percentage tussen de 0,4 – 1,3%. Het percentage 'fines' van de gewassen ballast ligt daarmee onder de in de SPC00033 V005 gestelde eis van 0,5%. Uit de inspectie van de wasinstallaties op de steengroeven en verwerkingslocatie blijkt dat de afmeting en het aantal sproeiers per wasinstallatie varieert. Op basis van de gegevens blijkt dat het aantal sproeiers een gunstig effect heeft op de effectiviteit van de wassing en daarmee het percentage stof. Hierbij is nog geen rekening gehouden met de doorvoer van de ballast (ton/uur) en de hoeveelheid waswater (m³/uur). Op basis van onderzoek in 1998 op de steengroeve in Quenast blijkt de hoeveelheid waswater ook een duidelijk positief effect te hebben op de hoeveelheid stof. Het toevoegen van een gelijke hoeveelheid waswater aan het ballast (ratio 1:1) lijkt optimaal; bij toevoegen van nog meer waswater neemt het effect af.

Naast het type gesteente heeft ook het percentage stof (fines) een duidelijk effect op de emissie aan stof en respirabel kwarts (kristallijn silica) tijdens handelingen. Uit de simulatie experimenten met ongewassen en gewassen gesteente uit Tau (kwartsdioriet) en Quenast (porfier/kwartsmicrodioriet) blijkt dat door een halvering van het percentage 'fines' (fractie < 63µm) de emissie van inhaleerbaar- en respirabel stof en respirabel kwarts met een factor 2 wordt gereduceerd. Praktijkmetingen bevestigen dit beeld, met een reductiefactor van 1½-2. Een goede wasinstallatie heeft dus, zoals verwacht, veel effect op de emissie van stof en respirabel kwarts tijdens handelingen met ballast.

7.2 Type gesteente

Ook het type gesteente heeft een duidelijk effect op de emissie van inhaleerbaar stof. Het effect op de emissie van respirabel stof is iets minder nadrukkelijk, maar zeker aanwezig. In grote lijnen zijn de gesteenten in drie groepen in te delen: (1) zandsteen, (2) kwarts(micro)dioriet, granietgneis, basaniet en kwartsiet en (3) granodioriet. Bij de simulatie experimenten met zandsteen wordt de laagste stofemissie gemeten en bij granodioriet de hoogste stofemissie. Als kanttekening moet worden vermeld dat granodioriet uit Jelsa is getest als type 2 gesteente, wat een negatieve invloed zou kunnen hebben op de stofontwikkeling.

Alhoewel het type gesteente een effect heeft op de stofvorming is de invloed van de hardheid en slijtvastheid van het gesteente minimaal. Voor de inhaleerbare stoffractie is namelijk géén correlatie aangetoond met LA-waarden en micro-Deval waarden van de gesteenten. Alleen voor de respirabele stoffractie lijkt er een matige correlatie te zijn met de micro-Deval waarde van het ballastmateriaal. Echter, wat meer opvalt is dat bij de slijtvastere gesteenten de vorming van respirabel stof juist lijkt toe te nemen. Dit zou betekenen dat de slijtvastheid van het gesteente een tegengesteld effect heeft op de vorming van vooral respirabel stof.

De correlaties zijn echter matig zodat hier vooralsnog geen harde conclusies aan kunnen worden verbonden.

Voor de meeste typen gesteenten is de emissie van respirabel kwarts (kristallijn silica) vergelijkbaar. Bij twee typen gesteenten wordt duidelijk meer respirabel kwarts geëmitteerd, dit zijn het granietgesteente uit Glensanda en het kwartsietgesteente uit Taben-Rodt. Uit de petrografische beschrijving van het kwartsiet gesteente blijkt dat daar duidelijk meer kwarts aanwezig is ($\geq 70\%$) dan de overige typen gesteenten ($< 55\%$) wat de hoge emissie aan respirabel kwarts tijdens de simulatie experimenten (deels) zou kunnen verklaren.

7.3 Schadelijke componenten

Uitgezonderd kristallijn silica zijn in géén van de gesteenten schadelijke componenten (zoals vezels en nikkelhoudend mineralen) aangetroffen. Wel zijn vezelvormige silicadeeltjes aangetroffen, echter, over de extra nadelige effecten van deze vezels ten opzichte van granulaire kristallijne silicadeeltjes zijn geen gegevens bekend. Bekend is dat de genoemde schadelijke componenten sporadisch als (micro)verontreiniging in de gesteenten kunnen voorkomen. Aangezien TNO per steengroeve op één moment één monster heeft geanalyseerd dient het resultaat als indicatief te worden beschouwd.

7.4 Handelingen in de praktijk

Diverse emissiemetingen zijn uitgevoerd tijdens handelingen (voornamelijk storten) met het porfiergesteente uit Quenast. Voor al deze transporthandelingen, vanaf de steengroeve Quenast tot aan het spoor in Geldermalsen zijn de gemeten concentraties aan inhaleerbaar en respirabel stof en respirabel kwarts (kristallijn silica) licht verhoogd maar blijven nog ruim onder de meest strenge grenswaarden binnen Europa. Ook de grenswaarden voor kortdurende blootstelling (15 minuten) aan inhaleerbaar en respirabel stof worden zeer waarschijnlijk niet overschreden. Voorafgaand aan deze laad- en losactiviteiten is het materiaal steeds bevochtigd.

Tijdens verdere handelingen met het ballast in het spoor (stopmachine en profileermachine) is wel een duidelijke verhoging te zien in de gemeten concentraties aan inhaleerbaar- en respirabel stof en respirabel kwarts, waarbij grenswaarden worden overschreden. Hierbij is de ballast niet meer bevochtigd en moet worden opgemerkt dat de metingen moeten worden beschouwd als 'worst case' omdat ze dicht op de kortdurende handelingen zijn uitgevoerd. Voor een juiste toetsing aan grenswaarden, zullen blootstellingsmetingen bij werknemers moeten worden uitgevoerd bij verschillende activiteiten, waarbij de concentraties moeten worden omgerekend naar 8 uren gemiddelde waarden op basis van een representatieve dagindeling. Deze activiteiten zullen in een volgende fase van het onderzoek worden uitgevoerd.

Tijdens het transport van Quenast naar Geldermalsem is op diverse momenten het percentage stof (fines) in de ballast bepaald. Iedere extra handeling (voornamelijk storten) zorgt ervoor dat er meer stof ontstaat. Voor het porfiergesteente uit Quenast blijkt dat per handeling het percentage 'fines' (fractie $< 63 \mu\text{m}$), in absolute zin, met ca. 0,1%-punt toeneemt.

Voorafgaand aan alle laad- en losactiviteiten van de ballast tijdens het transport van Quenast naar Geldermalsen is het materiaal bevochtigd. Het vochtgehalte van de ballast, op basis van steekproefsgewijze monsterneming, ligt tussen de 0,5 – 0,9 %. Zoals verwacht, blijkt ook op basis van deze metingen dat het bevochtigen van de ballast voorafgaand aan de handelingen een gunstig effect heeft op de emissie van inhaleerbaar en respirabel stof en respirabel kwarts (kristallijn silica). Het is waarschijnlijk dat de hoge emissie van stof en respirabel kwarts tijdens de activiteiten met de stop- en profileermachine, mede te maken heeft met het lage vochtgehalte van het ballast (0,2%). Voorafgaand aan deze activiteiten is de ballast namelijk niet extra bevochtigd. Het is echter onduidelijk of het extra besproeien van de ballast zal resulteren in een dusdanige verlaging van de stofemissie dat grenswaarden niet meer worden overschreden.

Het gunstige effect van bevochtiging van het ballastmateriaal op de stofvorming is ook al een keer in 1994 onderzocht door NS Technisch Onderzoek. De vochtigheid van het ballastmateriaal is toen visueel ingeschat. Uit dit onderzoek kwam naar voren dat wanneer ca. 20% van de stenen visueel nat was de stofvorming met een factor 10 was gereduceerd; bij 90% was de stofreductie bijna een factor 100.

Voor de gesteenten uit alle overige steengroeven zijn stof- en respirabel kwartsconcentraties afgeleid voor dezelfde transporthandelingen als het gesteente uit Quenast. Hieruit blijkt dat bij handelingen met de andere gesteenten de afgeleide (potentiele) stof- en kwartsconcentraties over het algemeen iets hoger liggen dan het porfiergesteente uit Quenast, met uitzondering van de gesteenten uit Seljestokken en Werk Nickenich. In de meeste gevallen worden grenswaarden voor stof en kwarts niet overschreden.

Op de groeves (productielocaties) zullen, tijdens het beladen van transportmiddelen, de gehalten aan stof en respirabel kwarts voor de meeste gesteenten onder de meest strenge grenswaarden binnen Europa blijven. Alleen voor de gesteenten uit Glensanda, Jelsa en Taben-Rodt is het mogelijk dat grenswaarden worden overschreden. Bij handelingen met de gesteenten uit Jelsa en Glensanda komt relatief veel inhaleerbaar stof vrij en zal de grenswaarde, ook tijdens de overige transporthandelingen, waarschijnlijk worden overschreden. Bij het storten van de ballast in het spoor is het waarschijnlijk dat bij alle typen gesteente, met uitzondering van het zandsteen gesteente uit Seljestokken, de grenswaarde voor inhaleerbaar stof zal worden overschreden. Bij de meeste praktijkhandelingen met de gesteenten uit Taben-Rodt, Glensanda en Jelsa is het waarschijnlijk dat de grenswaarde voor respirabel kwarts zal worden overschreden. Hier wel als opmerking dat de ballast uit Jelsa van het type 2 (22 – 40mm) is.

7.5 Bronmaatregelen

Bij werkzaamheden met ballast dient te worden gewaarborgd dat blootstelling aan respirabel kwarts en stof tijdens handelingen (in de steengroeve) zoveel mogelijk wordt beperkt waarbij grenswaarden in géén geval mogen worden overschreden.

Volgens de arbeidshygiënische strategie in de Arbowet is het belangrijk om eerst de gevaarbron (het type gesteente en het productieproces in de groeve) aan te pakken. Als het nemen van deze bronmaatregelen niet leidt tot het volledig wegnemen van het gevaar ((kwarts)stof) dienen collectieve maatregelen te worden genomen.

ProRail voldoet deels aan deze verplichting door strenge eisen te stellen aan het percentage stof (fines). Echter, om volledig te voldoen aan de verplichtingen in de Arbowet, is het selecteren van gesteenten op basis van de vorming van kwartsstof in de lucht gewenst. Hierbij dient ook rekening te worden gehouden met duurzaamheid- en veiligheidsaspecten conform de SPC00033 V005. Gezien het feit dat bij handelingen met de gesteenten uit Glensanda en Taben-Rodt vermoedelijk grenswaarden worden overschreden is uitsluiting van deze gesteenten voor toepassing als ballast in het spoor wenselijk. Voor het gesteente uit Jelsa is dit onduidelijk aangezien alleen het type 2 ballast (22 – 40mm) is getest.

7.6 Aanbevelingen

Het percentage vocht en stof zijn belangrijke factoren bij de vorming van stof en kwarts. Om stofvorming te verminderen wordt aanbevolen om het percentage stof (fines) zo laag mogelijk te houden door middel van wassen op de productielocaties en het aantal handelingen met het ballastmateriaal tijdens transport te beperken. Daarnaast is het bevochtigen van het ballastmateriaal voorafgaand aan iedere handeling essentieel.

De verschillen in percentage stof tussen de gesteenten wordt voor een belangrijk deel bepaald door het ontwerp van de wasinstallatie: aantal sproeiers en de hoeveelheid waswater. Op de meeste productielocaties zijn verbeteringen mogelijk om het percentage stof (fines) nog verder terug te brengen. TNO heeft hierbij alleen gekeken naar de technische haalbaarheid los van eventuele economische aspecten.

Voor de meeste typen gesteente geldt dat, mits deze wordt gewassen en voorafgaand aan de transporthandelingen wordt bevochtigd, de vorming van stof en kwarts tijdens het laden en lossen beperkt zal zijn en vermoedelijk geen grenswaarden zullen worden overschreden. Voor granodioriet uit Glensanda en kwartsiet uit Taben-Rodt is het waarschijnlijk dat grenswaarden voor respectievelijk inhaleerbaar stof en respirabel kwarts zullen worden overschreden bij handelingen met ballast. In overeenstemming met de arbeidshygiënische strategie in de Arbowet wordt aanbevolen om als bronmaatregel deze typen gesteenten niet meer als ballast in het spoor toe te passen.

Het gehele transport vanaf de steengroeve tot aan toepassing in het spoor is voor het porfiergesteente uit Quenast in kaart gebracht. Andere typen gesteenten afkomstig van andere locaties worden ook als ballast gebruikt, waarbij transport op andere manieren plaatsvindt. Om de observaties en conclusies uit dit onderzoek te bevestigen wordt aanbevolen om voor minstens één ander type gesteente het transport en de stofvorming in kaart te brengen.

Gezien de grote stofemissie tijdens de activiteiten met de stop- en profileermachine wordt aanbevolen om het ballastbed in het spoor en de reserveballast in de machine voorafgaand aan het stabiliseren en profileren te besproeien/bevochtigen. Geadviseerd wordt om het effect van deze maatregel te onderzoeken met aanvullende stof- en kwartsmetingen.

8 Referenties

Arcadis Bouw/Infra, Onderzoek naar de concentratie respirabel kwarts tijdens het lossen van basalt, porfier en gneis, opdracht nr. 61806592, kenmerk Bbc52, 23 december 1998.

Cherrie, J., Brosseau, L., Donaldson, K. Low-Toxicity Dusts: Current Exposure Guidelines Are Not Sufficiently Protective, *Ann. Occup. Hyg.* 2013; 57(6): 685-91

Fransman W, Cherrie J, van Tongeren M, Cherrie J, Tischer M, Schneider T, Schinkel J, Kromhout H, Warren N, Goede H, Tielemans E. The Advanced REACH Tool (ART): Development of the mechanistic model. *Ann. Occup. Hyg.* 2011; 55 (9): 957-979.

Moons A.M.M., Bepaling concentratie respirabel kwarts tijdens het lossen van basalt, porfier en gneiss, TNO rapport 98-BBI-R1474, 5 oktober 1998.

NEN-ISO 14966. Ambient air - Determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles - Scanning electron microscopy method. Nederlands normalisatie instituut.

NEN-EN 933-1. Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 1: Bepaling van de korrelgrootteverdeling – Zeefmethode. Nederlands normalisatie instituut.

NEN-EN 12341. Luchtkwaliteit - Algemene gravimetrische referentiemethode voor de bepaling van de PM10 of PM2,5-massafractie van zwevende stof in de buitenlucht. Nederlands normalisatie instituut.

NEN-EN 689. Werkplekatmosfeer - Leidraad voor de beoordeling van de blootstelling bij inademing van chemische stoffen voor de vergelijking met de grenswaarden en de meetstrategie. Nederlands normalisatie instituut.

NEN-EN 481. Werkplekatmosfeer - Definitie van de deeltjesgrootteverdeling voor het meten van de in de lucht zwevende deeltjes. Nederlands normalisatie instituut.

NIOSH 7602. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Silica, Crystalline by IR: Method 7602, Issue 2, 1994.

NS Technisch Onderzoek, Resultaten van stof- en kwartsconcentratie metingen in de lucht bij het lossen van basalt, porfier en gneis gedurende de periode 7 juni tot en met 3 oktober 1994, NSTO/4/10.133/0047, oktober 1994.

NS Technisch Onderzoek, Een vergelijkend onderzoek naar het vrijkomen van stof bij het lossen van "gewassen" en "niet gewassen" porfier, NSTO/4/10.133/0050, juni 1995.

4infra, Toetsing beleid spoorbranche kwartsstof aan de Arbeidsomstandighedenwet, rapport 201801080900, januari 2018

9 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever

ProRail

Postbus 2038
3500 GA Utrecht

Naam en functies van medewerkers

Namen van instanties en instellingen waar een deel van het onderzoek is uitbesteed

RPS Analyse bv - Analyse kwarts en cristobaliet conform NIOSH 7602
De analyse is uitgevoerd onder RvA Testen accreditatie (registratienummer L192).

Kwaliteitsborging

Het onderzoek is uitgevoerd onder een kwaliteitssysteem dat voldoet aan ISO-9001.

Datum waarop of tijdsbestek waarin het onderzoek heeft plaatsgehad

September 2019 – Oktober 2020

Naam en paraaf tweede lezer

Utrecht, 31 augustus 2021

TNO

Research Manager

Auteur

Bijlage A. Foto's van de geteste typen gesteente



1 Eikefet (ongewassen)



2 Seljestokken (ongewassen)



3 Tau (ongewassen)



4 Jelsa (ongewassen)



5 Bremanger (gewassen)



6 Glensanda (ongewassen)



7 Taben-rodt (gewassen)



8 Werk Nickenich (ongewassen)



9 Lessines (gewassen)



10 Yvoir (gewassen)



12 Quenast (gewassen)



13 Tau (gewassen)

Bijlage B. Foto's wasinstallaties op de steengroeven



Seljestokken: 1 wasser met 3 buizen x ca 4 sproeiers



Eikefet: 2 wassers, nadere inspectie niet mogelijk



Tau: 1 wasser met 5 buizen x 11 sproeiers



Jelsa: 1 wasser met 5 buizen x 4 sproeiers



Taben-rodt: 1 wasser met 6 buizen x 5 sproeiers



Werk-Nickenich: installatie, nadere inspectie niet mogelijk



Lessines: 1 wasser met 10 buizen x 6 sproeiers



Quenast: 2 wassers met respectievelijk 8 en 9 buizen x 8 sproeiers



Yvoir: 1 wasser, nadere inspectie niet mogelijk



Amsterdam (Bremanger/Glensanda): 1 wasser met 5 buizen x 5 sproeiers

Bijlage C. Afleiding concentraties bij handelingen

Op basis van de resultaten van de simulatiemetingen met de diverse typen gesteente en de percentages stof van deze gesteenten zijn concentratiewaarden afgeleid voor dezelfde praktijkhandelingen als het porfier gesteente uit Quenast. Hierbij is de onderstaande formule gebruikt, waarbij 'C' de concentratie aan inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts is:

$$C_{\text{gesteente praktijk}} = \frac{C_{\text{gesteente simulatie}}}{C_{\text{porfier simulatie}}} \times \frac{\% \text{breekstof gesteente}}{\% \text{breekstof porfier}} \times C_{\text{porfier praktijk}}$$

Op basis van bovenstaande formule zijn in Tabel C1 voor de zandsteen (Bestone) uit Bremanger voorbeeldberekeningen gegeven voor het afleiden van de concentratie inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts bij het beladen van vrachtwagens in de steengroeve. In Tabellen C2 – C4 en Figuren C1 – C3 zijn de afgeleide concentraties gegeven voor alle geteste typen gesteente en alle praktijkhandelingen: (1) beladen vrachtwagen Quenast, (2) lossen vrachtwagens Tubeke, (3) beladen schip Tubeke, (4) lossen schip in haven Tiel, (5) lossen vrachtwagens depot Tiel, (6) beladen ballastwagens Geldermalsen, (7) storten ballast in het spoor Geldermalsen, (8) stopmachine en (9) profileermachine.

Voor de afleiding van concentraties is voor zover mogelijk gebruik gemaakt van de door TNO zelf bepaalde percentages stof in het gewassen materiaal (Bremanger, Lessines, Quenast, Taben-Rodt en Tau). De percentages stof staan in Tabel 7. Voor het ballast materiaal dat niet "gewassen" beschikbaar was zijn de percentages stof gebruikt die de steengroeven zelf hebben gerapporteerd (Jelsa, Seljestokken, Werk Nickenich en Yvoir). Deze percentages stof staan in Tabel 6. Voor de steengroeven Glensanda en Eikefet was geen exact percentage stof bekend (<0,5%). Voor Glensanda is hetzelfde percentage stof aangehouden als Bremanger (0,3%), aangezien beide gesteenten op dezelfde locatie met dezelfde wasser worden gewassen. Voor Eikefet is een realistische 'worst case' schatting gemaakt (0,3%) op basis van de reductie in percentage stof door wassen bij de steengroeven waar zowel het percentage stof in ongewassen als gewassen materiaal bekend was (Jelsa, Yvoir en Tau).

Tabel C1. Voorbeeldberekeningen voor het afleiden van de concentratie inhaleerbaar stof, respirabel stof en respirabel kwarts voor het zandsteen (Bestone) gesteente uit Bremanger tijdens het beladen van vrachtwagens in de steengroeve

	C Bestone simulatie	C porfier simulatie	%stof Bestone	%stof porfier	C porfier praktijk	Berekening en afgeleide concentratie: C Bestone praktijk
inhaleerbaar stof	160	226	0,30%	0,13%	1,6	$160/226 \times 0,30\%/0,13\% \times 1,6 = 2,6 \text{ mg/m}^3$
respirabel stof	10,8	16,6	0,30%	0,13%	0,19	$10,8/16,6 \times 0,30\%/0,13\% \times 0,19 = 0,28 \text{ mg/m}^3$
respirabel kwarts	0,42	0,62	0,30%	0,13%	14	$0,42/0,62 \times 0,30\%/0,13\% \times 14 = 22 \text{ } \mu\text{g/m}^3$

Tabel C2. Afgeleide concentraties inhaleerbaar stof voor alle typen gesteente en alle praktijkhandelingen die met het porfier gesteente uit Quenast zijn uitgevoerd

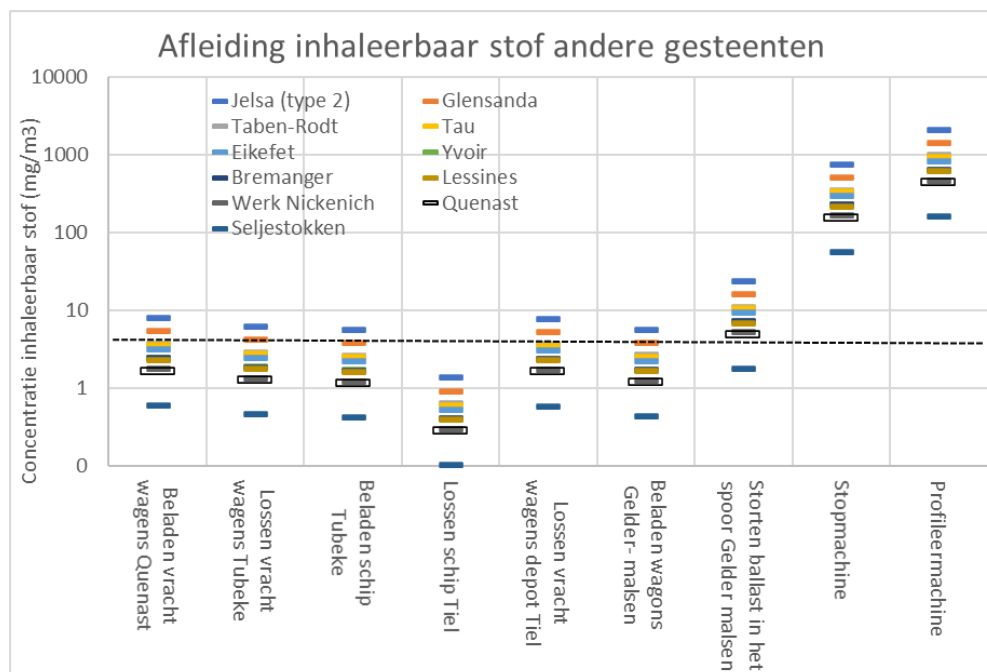
Steengroeve	C inh.stof simulatie	% stof (fines)	Afgeleide concentratie inhaleerbaar stof ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Jelsa (type 2)	530	0,50%	14	11	10	2,4	14	10	43	1400	3800
Glensanda	560	0,30%	9,2	7,0	6,4	1,5	8,9	6,5	27	860	2400
Eikefet	315	0,30%	5,1	3,9	3,6	0,87	5,0	3,7	15	490	1400
Taben-Rodt	326	0,20%	3,5	2,7	2,5	0,60	3,5	2,5	11	330	940
Tau	243	0,26%	3,4	2,6	2,4	0,58	3,3	2,4	10	320	910
Bremanger	160	0,30%	2,6	2,0	1,8	0,44	2,5	1,9	7,8	250	690
Yvoir	158	0,30%	2,6	2,0	1,8	0,44	2,5	1,8	7,7	240	690
Lessines	249	0,19%	2,6	2,0	1,8	0,43	2,5	1,8	7,6	240	680
Werk Nickenich	291	0,15%	2,4	1,8	1,7	0,40	2,3	1,7	7,0	220	630
Quenast	226	0,13%	1,6	1,2	1,1	0,27	1,6	1,1	4,8	150	430
Seljestokken	58	0,25%	0,79	0,61	0,55	0,13	0,77	0,56	2,4	75	210

Tabel C3. Afgeleide concentraties respirabel stof voor alle typen gesteente en alle praktijkhandelingen die met het porfier gesteente uit Quenast zijn uitgevoerd

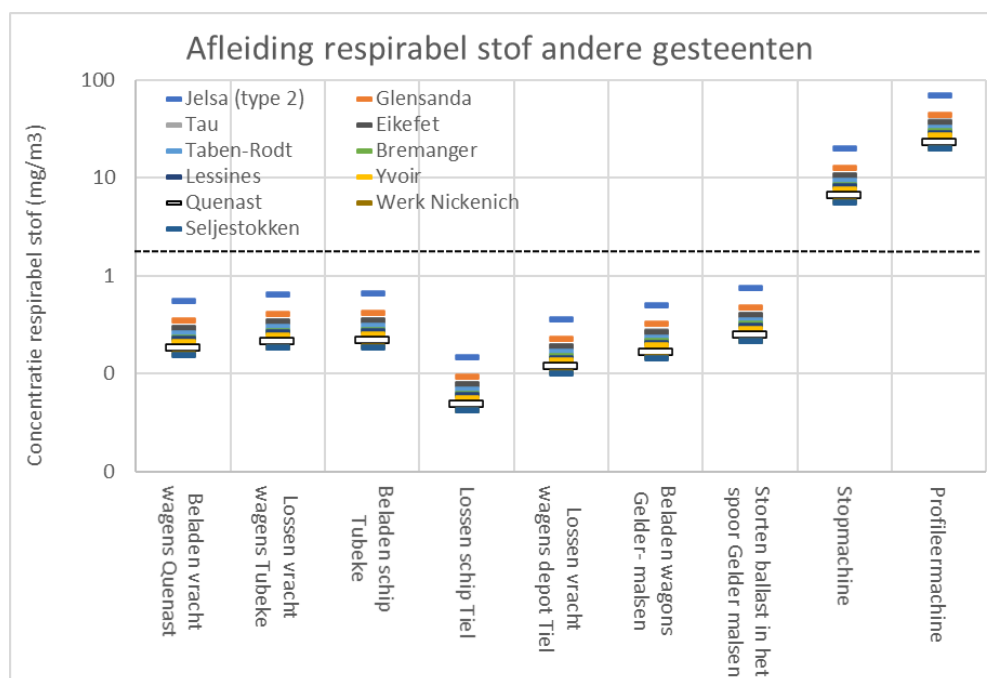
Steengroeve	C resp.stof simulatie	% stof (fines)	Afgeleide concentratie respirabel stof ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Jelsa (type 2)	21	0,50%	0,92	1,1	1,1	0,25	0,60	0,85	1,3	33	120
Glensanda	20	0,30%	0,52	0,61	0,63	0,14	0,34	0,48	0,72	19	66
Eikefet	18	0,30%	0,46	0,54	0,55	0,12	0,30	0,42	0,63	17	58
Tau	15	0,26%	0,35	0,41	0,42	0,09	0,22	0,32	0,48	13	44
Taben-Rodt	16	0,20%	0,29	0,33	0,34	0,08	0,18	0,26	0,39	10	36
Bremanger	11	0,30%	0,28	0,33	0,34	0,08	0,18	0,26	0,38	10	36
Lessines	16	0,19%	0,26	0,31	0,32	0,07	0,17	0,24	0,36	9,5	33
Yvoir	8,5	0,30%	0,22	0,26	0,27	0,06	0,14	0,20	0,30	8,0	28
Seljestokken	10	0,25%	0,22	0,25	0,26	0,06	0,14	0,20	0,30	7,8	28
Werk Nickenich	16	0,15%	0,21	0,24	0,25	0,06	0,13	0,19	0,28	7,4	26
Quenast	17	0,13%	0,19	0,22	0,22	0,05	0,12	0,17	0,26	6,8	24

Tabel C4. Afgeleide concentraties respirabel kwarts voor alle typen gesteente en alle praktijkhandelingen die met het porfier gesteente uit Quenast zijn uitgevoerd

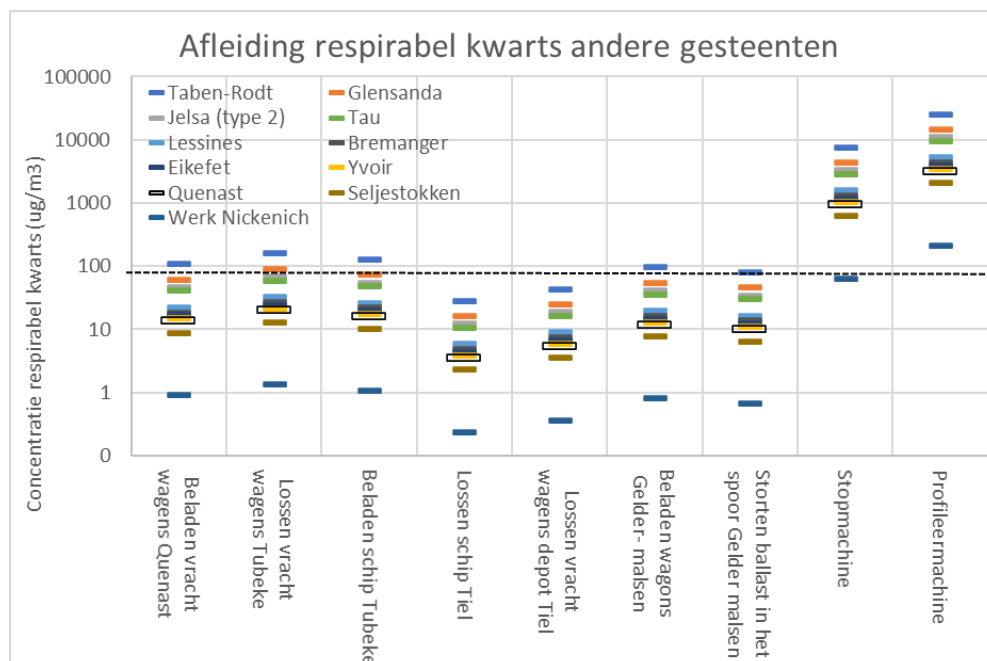
Steengroeve	C kwarts simulatie	% stof (fines)	Afgeleide concentratie respirabel kwarts ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Taben-Rodt	3,8	0,20%	130	190	150	34	52	120	96	9200	31000
Glensanda	2,2	0,30%	110	160	130	29	45	99	82	7900	26000
Jelsa (type 2)	0,99	0,50%	85	120	99	22	34	74	62	5900	20000
Tau	0,63	0,30%	32	47	38	8,4	13	28	24	2300	7600
Eikefet	0,51	0,30%	26	39	31	6,9	11	23	19	1900	6200
Lessines	0,70	0,19%	23	33	27	5,9	9,1	20	17	1600	5300
Bremanger	0,42	0,30%	22	31	25	5,6	8,6	19	16	1500	5000
Yvoir	0,30	0,30%	15	23	18	4,0	6,2	14	11	1100	3600
Quenast	0,62	0,13%	14	20	16	3,6	5,5	12	10	970	3200
Seljestokken	0,27	0,25%	12	17	14	3,0	4,6	10	8,5	810	2700
Werk Nickenich	0,04	0,15%	0,97	1,4	1,1	0,25	0,39	0,86	0,71	68	230



Afbeelding C1. De inhaleerbaar stofconcentraties voor de andere type gesteenten, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, afgeleid op basis van de simulatie experimenten aan de hand van vergelijking met het porfiergesteente uit Quenast (aangegeven met brede balkjes). De stippellijn is de grenswaarde voor inhaleerbaar stof ($4 \text{ mg}/\text{m}^3$).



Afbeelding C2. De respirabel stofconcentraties voor de andere type gesteenten, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, afgeleid op basis van de simulatie experimenten aan de hand van vergelijking met het porfiergesteente uit Quenast (aangegeven met brede balkjes). De stippellijn is de grenswaarde voor respirabel stof ($1,25 \text{ mg}/\text{m}^3$).



Afbeelding C3. De respirabel kwartsconcentraties voor de andere type gesteenten, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, afgeleid op basis van de simulatie experimenten aan de hand van vergelijking met het porfiergesteente uit Quenast (aangegeven met brede balkjes). De stippellijn is de grenswaarde voor respirabel kwarts ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$).