

SwitchString



"Frisse kijk op luchtkwaliteit"

Colofon

Bosvariant *ScheppingsStrategen*

Ruseschans 31 2728 HD Zoetermeer
tel 079 – 3521998 mobiel 06-21506500
bosvariant@planet.nl
www.bosvariant.info

projectleider: ir. Willem Bos

Opgesteld in samenwerking met:

Paaijmans Balsportafschermingen bv

Postbus 357 5550 AJ Valkenswaard
Tel 040 – 2076006 mobiel 06-29434659
info@ballenvangers.nl
www.ballenvangers.nl

En onderzoeksbijdrage van:

TNO Bouw en Ondergrond
TNO Efectis

Kenmerk: SwitchString-Bosvariant- 2008-3.0

Inhoudsopgave

- 1.0 Samenvatting
- 2.0 SwitchString systeem
 - 2.1 Systeem doel
 - 2.2 Ontwikkeltraject
 - 2.3 Spanmedium systemen
 - 2.4 Windgedreven tegendruk systeem
 - 2.5 Lamel systeemtypes
 - 2.6 Bevindingen
- 3.0 Windkracht analyse
 - 3.1 Windstorm-belasting in open stand
 - 3.2 Minimale openingshoek per windkacht
 - 3.3 Frekwentie-verdeling per windkracht
 - 3.4 Bevindingen
- 4.0 Luchtkwaliteitsverbetering
 - 4.1 Methodiek luchtkwaliteitsverbetering
 - 4.2 Uitgangspunten luchtkwaliteitsverbetering
 - 4.3 Resultaten luchtkwaliteitsverbetering uit CFD simulaties
 - 4.4 Resultaten luchtkwaliteitsverbetering geïntegreerd naar tijd en windkracht
 - 4.5 Bevindingen
- 5.0 Techniek en kosten
 - 5.1 Kostenanalyse
 - 5.2 Materialen en technieken
 - 5.3 Milieuvriendelijkheid materialen
 - 5.4 Verkeersdoorstroming
 - 5.5. Verkeersveiligheid
 - 5.6 Verkeersbeleving
 - 5.7 Bevindingen
- 6.0 Aanbevelingen

Literatuur

Bijlagen:

1. Tijdsfrequentieverdeling windsnelheid
2. Windbelasting op dichte en open schermen
3. Windbelasting SwitchString lamellen
4. Relatieve concentratiewaarden SwitchString bij diverse schermconfiguraties
5. Offerte Paaijmans balsportafschermingen bv
6. Resultaten CFD berekeningen aan stroming om en door SwitchString

SwitchString

1.0 Samenvatting

De SwitchString is een semi-permeabel scherm waarmee vuile lucht op de juiste momenten op passieve wijze gemengd wordt met hogere luchtlagen. Hierdoor treedt verdunning op en die leidt tot lagere concentraties fijn stof en stikstofdioxide. De SwitchString kan op een nieuwe of vlak achter een bestaand geluidsscherm worden geplaatst. Het scherm heeft daarmee zowel positief effect op het geluid als op de luchtkwaliteit.

De SwitchString is een passief dynamisch systeem dat zich vooral gesloten gedraagt bij windarm weer en omstandigheden met lagere windsnelheden waarbij de luchtvervuiling het ernstigst is. Bij hogere windsnelheden gaat het systeem over in een open stand waarbij de windbelasting aanzienlijk gereduceerd wordt. De windbelasting ligt dan circa een factor 10 lager dan van een standaard scherm. Hierdoor kan volstaan worden met een uiterst lichte constructie en navenante lage kosten.

Voor de situatie van een 2x3 baans snelweg zijn CFD berekeningen gemaakt waarin de concentratie van de lucht voor en achter het scherm bepaald is. Daarbij is uitgegaan van een bestaand geluidsscherm van 4 meter hoogte waarachter een twee- tot driemaal zo hoge SwitchString geplaatst is. Berekend is de relatieve concentratiewaarde d.w.z. de luchtconcentratie van de SwitchString ten opzichte van de luchtconcentratie van een referentie-situatie zonder scherm. Deze relatieve concentratiewaarde geldt in principe voor zowel PM2.5, PM10 als NOx.

De relatieve concentratiewaarde van de SwitchString blijkt in de orde van 66 – 72 % te liggen in geval van een semi-permeabel scherm van 8 meter hoogte, en deze waarde daalt naar minder dan 50 % in geval van een semi-permeabel scherm van 12 meter hoogte. Deze waarden gelden op een meetafstand van 40 meter achter het scherm.

Bij een standaard gesloten geluidsscherm van 8 m hoogte ligt deze overeenkomstige waarde op 64 %, en bij een hoogte van 12 meter op een waarde van 46 %.

Met de SwitchString zijn praktisch bijna dezelfde concentratiewaarden te behalen als met een evenhoog standaard gesloten scherm. Het grote voordeel van de SwitchString is echter de relatief lage kostprijs.

De kosten van een 8 tot 12 m hoge SwitchString worden ingeschat op 40 tot 45 euro per m², excl. BTW. De aanlegkosten zijn inbegrepen met uitzondering van verkeersmaatregelen en bijzondere situaties als leidingen verleggen. De kosten liggen een factor 4 tot 6 lager dan van een standaard scherm.

In basale vorm is de SwitchString ontworpen als een systeem met dunne platen, doeken of folies die zich onder invloed van winddruk openen en onder invloed van zwaartekracht sluiten. Horizontale lamellen lijken het meest kansrijk. Door een uitgekiende positie van het draaipunt van deze lamellen kan volstaan worden met een uiterst laag contra-gewicht waarbij de lamellen zo lang mogelijk in de (semi-)gesloten stand staan.

2.0 SwitchString systeem

De SwitchString voorziet in een eenvoudig, betrouwbaar en voordelig systeem om vuile lucht op de juiste momenten te mengen met hogere luchtlagen waardoor verdunning optreedt die tot lagere concentraties leidt.

2.1 Systeendoel

De SwitchString is een dynamisch systeem dat actief is bij windarm weer en omstandigheden met lagere windsnelheden. In weerssituaties waarbij de fijne stofproblematiek het ernstigst is.

Bij hogere windsnelheden gedraagt de SwitchString zich als een virtueel systeem waarbij de lucht min of meer ongehinderd kan passeren. Onder deze weersomstandigheden is in het algemeen minder sprake van een fijnstof problematiek.

Vanwege het dynamische gedrag waarbij de SwitchString zich bij hogere windsnelheden gedraagt als een virtueel systeem, worden de maatgevende windbelastingen aanzienlijk gereduceerd. De dimensionering kan zich aldus richten op een uiterst lichte constructie.

De SwitchString richt zich dus op verbetering van de luchtkwaliteit bij rustige weersomstandigheden als de concentratie aan vervuulende stoffen het hoogste is. Bij hogere windsnelheid treedt vanzelf verdunning op door de grotere luchtsnelheid en meer turbulente vermenging van luchtlagen.

De SwitchString heeft geen geluidsisolerende eigenschappen, maar het systeem is wel goed te plaatsen boven nieuwe of vlak achter bestaande geluidsschermen tegen relatief lage kosten. Evenals plaatsing in de middenberm in combinatie met de hoge lantaarnpalen met hanglampen. Op deze wijze wordt gestand gedaan aan de geluidsnormen en wordt de luchtkwaliteit toch aanmerkelijk verbeterd.

Belangrijke doelstelling is een mechanisme te vinden waarbij het spanmedium bij lagere windkrachten zich overwegend gesloten gedraagt en zich pas bij een bepaalde hogere windkracht (volledig) opent, en waarbij sprake is van een relatief laag eigen gewicht van het scherm. Eenvoud, betrouwbaarheid en lage kosten zijn hierbij van doorslaggevend belang.

2.2 Ontwikkeltraject

Voor de ontwikkeling van het SwitchString systeem wordt ingehaakt op de kennis en ervaring die er is bij systemen van grootschalige doeken en netten die tussen stalen masten opgespannen worden. Sinds vele jaren worden vergelijkbare constructies aangelegd bij sportvelden en golfbanen voor opvang van ballen.

Bij verdere ontwikkeling kan onderscheid worden gemaakt naar de draagconstructie en het spanmedium. Voor beide systeemdelen is ervaring en kennis voorhanden. Bij de draagconstructie is gebruik te maken van bestaande technieken en materialen. Aanleg langs een snelweg behoeft geen bijzondere problemen op te leveren.

Voor het spanmedium valt te denken aan enerzijds dunne, harde platen en anderzijds flexibele doeken, folies en netten. De ontwikkeling richt zich met name op het SwitchStand mechanisme waarbij het spanmedium zich bij lage windsnelheden gedraagt als een gesloten scherm en bij hogere windsnelheden zich gedraagt als een open scherm. Op de markt zijn nog geen volledig kant- en klare oplossingen hiervoor verkrijgbaar.

2.3 Spanmedium systemen

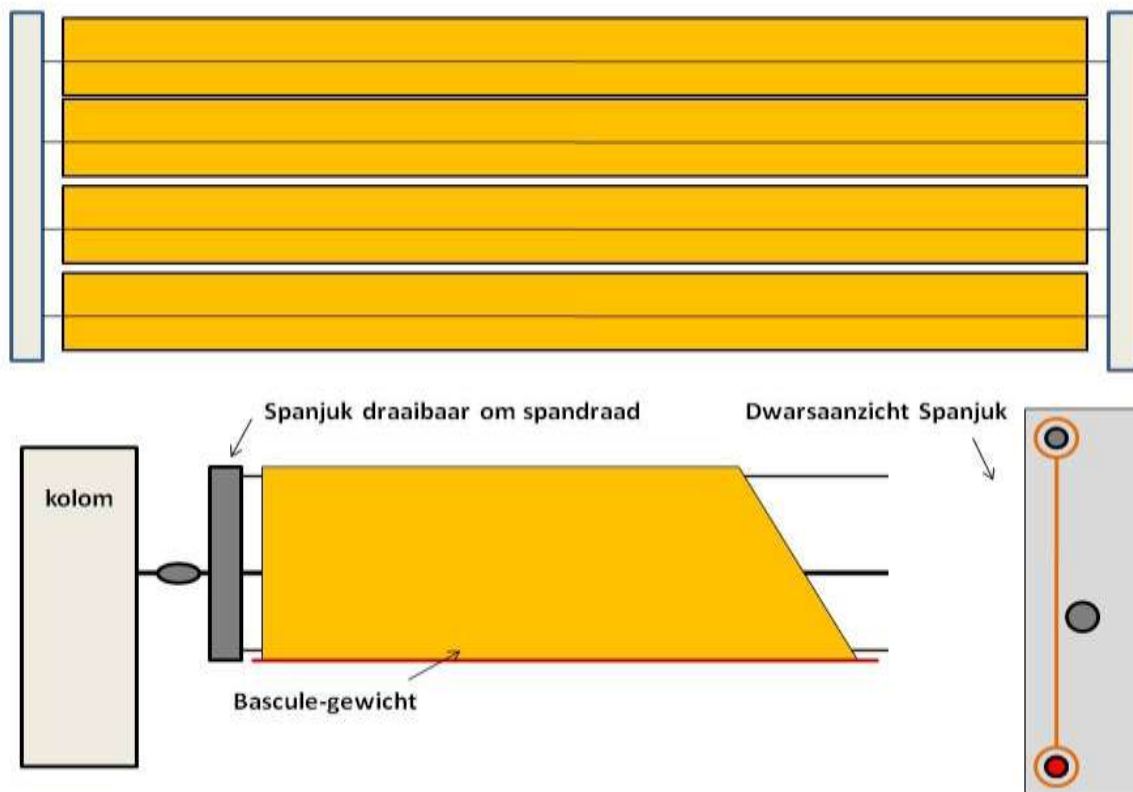
In een basale vorm bestaat het spanmedium uit horizontale stroken of lamellen van tegels, doeken of folies die in dichte stand vertikaal hangen en in open stand zich naar een horizontale positie bewegen. Onder winddruk vindt de beweging passief plaats. Deze beweging van dichte naar open stand kan gradueel plaatsvinden waarbij de openingen in het scherm zich proportioneel met de winddruk vergroten. Het eigen gewicht van het spanmedium drukt het scherm weer naar een dichte positie. Het eigen gewicht is te vergroten door het aanbrengen van verzwarende elementen, zoals staven in een zoom.

Uitdaging is een mechanisme te ontwikkelen waarbij het spanmedium bij lagere windkrachten zich overwegend gesloten gedraagt en zich pas bij een bepaalde hogere windkracht (volledig) opent, en waarbij sprake is van een relatief laag eigen gewicht van het scherm.

Volgens het principe van het SwitchString systeem zijn een aantal technische modellen beschouwd waarmee het principe verder in concreto te verkennen is:

A Vlieger-model

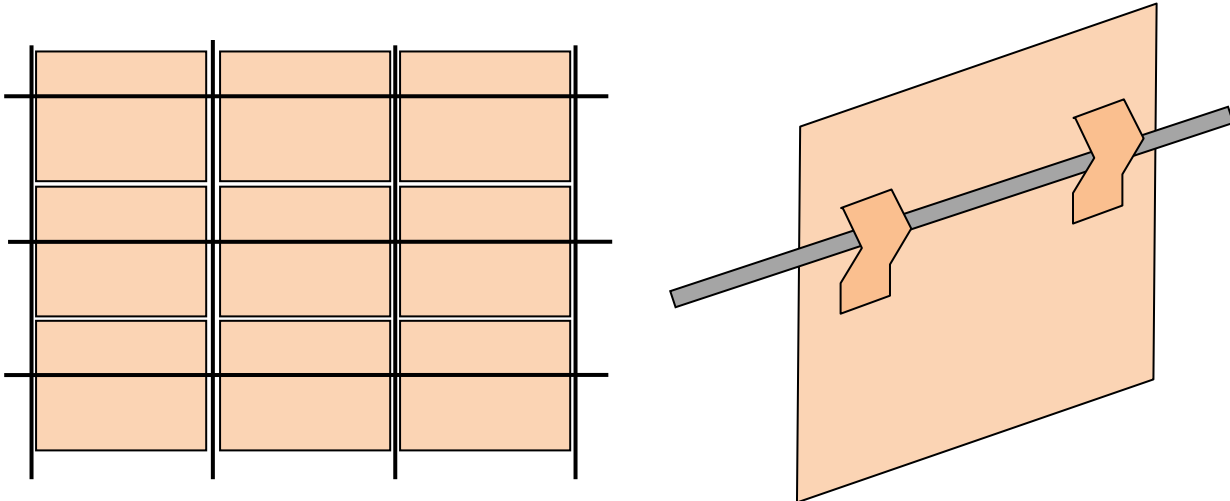
Horizontale smalle doeken worden opgespannen tussen twee spankabels die op hun beurt gekoppeld zijn aan een spanjuk (armen) dat draaibaar bevestigd is aan de kolommen. De draaibare as van het spanjuk is op bepaalde hoogten ten opzichte van de bovenzijde van de spandoeken te plaatsen. De stabiliteit van de kolommen is - gescheiden van de spanjukken - geborgd door vaste kabels tussen de kolommen aan te brengen in combinatie met schoorkabels aan de einden.



B Veder-model

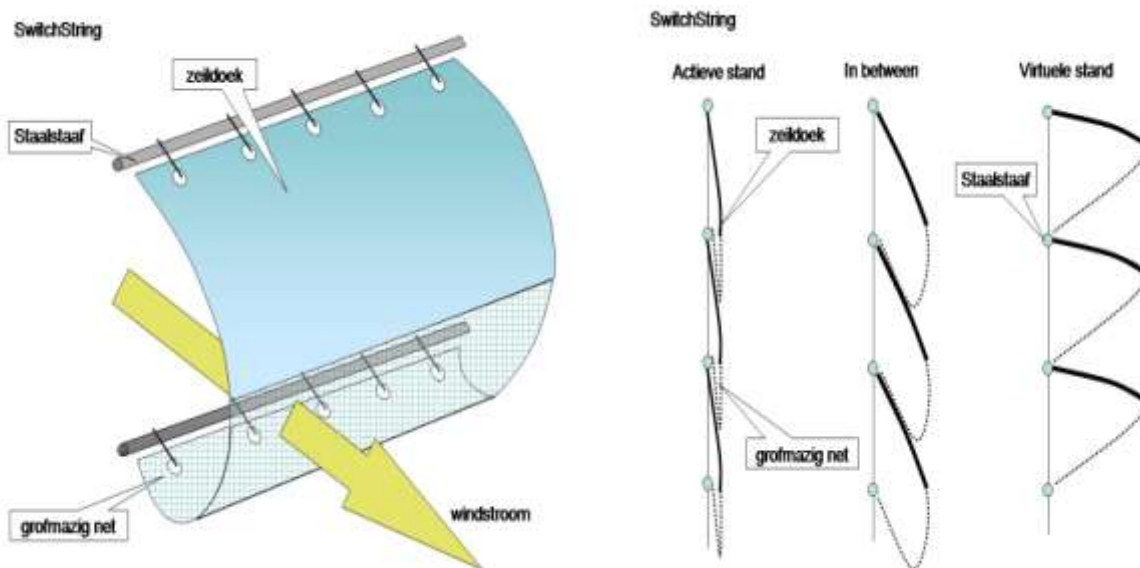
Relatief smalle elastische panelen (platen of met staven omzoomde doeken) worden naast elkaar opgehangen aan horizontale spankabels die tussen de kolommen bevestigd zijn. De panelen zijn vrij draaibaar ten opzichte van elkaar.

In meest verregaande vorm zijn zeer smalle panelen (enkele cm's breedte) denkbaar die dicht tegen elkaar geregen zijn tot een lang (serpentine)lint van veders (veren).



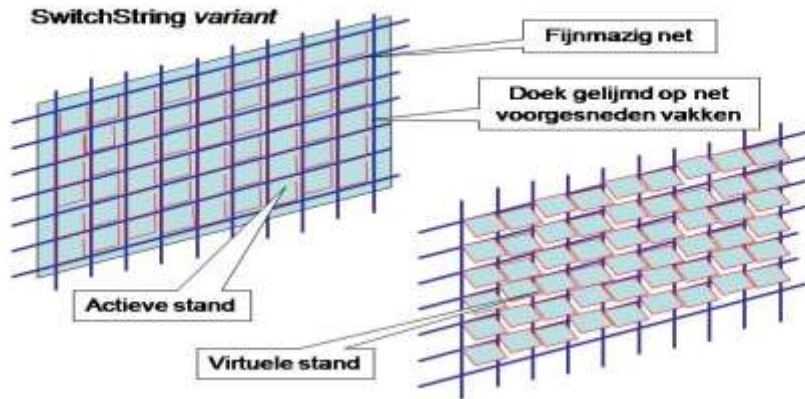
C Vlag-model

Horizontale smalle doeken worden aan de bovenzijde opgehangen aan een bovenliggende spankabel. Aan de onderzijde zijn de doeken gekoppeld aan netten die weer verbonden zijn aan een onderliggende spankabel. De netten verhogen de duurzaamheid door de doeken rustiger te laten bewegen.



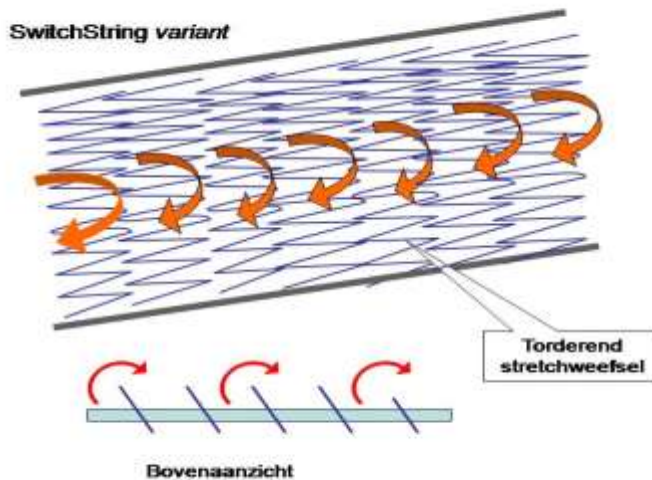
D Flappen-model

Op een stevig kunststofnet is een doek of folie gelijmd of gelast dat ingesneden is in u-vormige flappen tussen de mazen van het net die zich openen bij winddruk.



E Weefsel-model

Speciale elastische weefsels zijn denkbaar die kunnen torderen en stretchen, en zich tot een permeabel systeem openen bij winddruk en tevens op elastische wijze tegendruk geven aan de winddruk.



De modellen A en B en C zijn vanwege de beschikbaarheid van de materialen op korte termijn (< 1 jaar) uitvoerbaar. Voor de modellen D en E is nader speurwerk naar materialen nodig om de haalbaarheid van deze concepten vast te stellen.

Verder blijkt model C minder gunstige windtechnische eigenschappen te hebben dan model A en B.

In het kader van deze beknopte haalbaarheidsstudie is de verdere uitwerking om deze praktische redenen gericht op A Vlieger-model en B Veder-model.

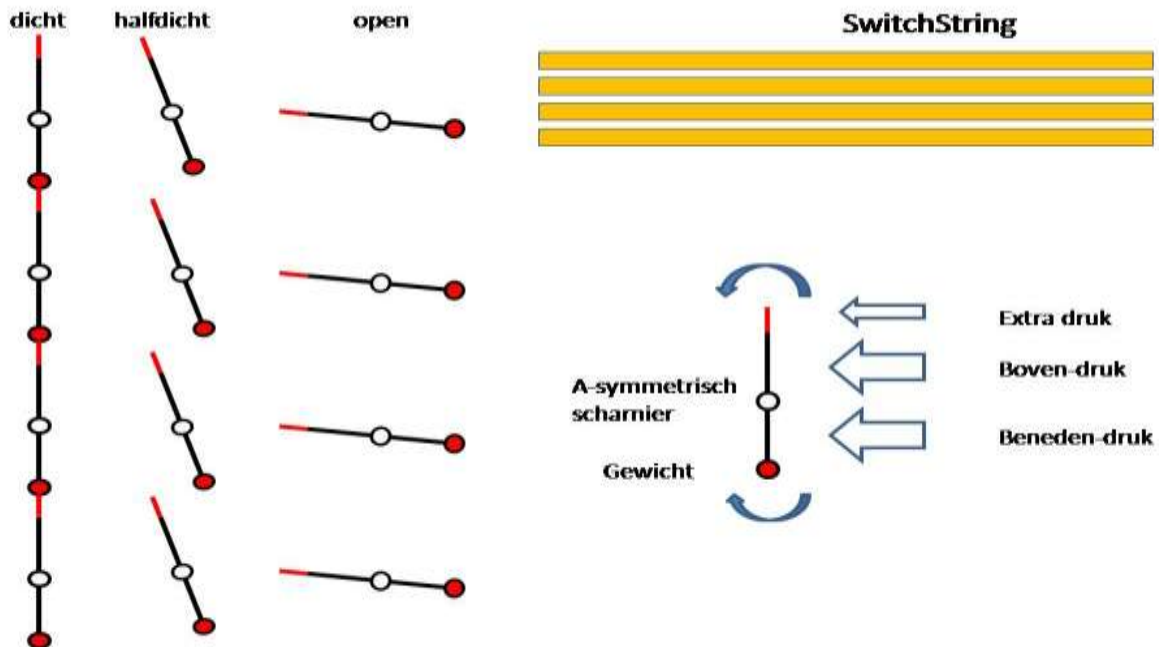
2.4 Windgedreven tegendruk systeem

Doelstelling is - zoals eerder aangegeven - een mechanisme te ontwikkelen waarbij het spanmedium bij lagere windkrachten zich overwegend gesloten gedraagt en zich pas bij een bepaalde hogere windkracht (volledig) opent, en waarbij sprake is van een relatief laag eigen gewicht van het scherm.

Bij horizontale lamellen die zich onder luchtdruk openen, zoals bij ventilatieroosters, bevindt het scharnier zich traditioneel aan de bovenzijde van de lamel. De zwaartekracht van de lamel geeft dan de benodigde tegendruk.

Innovatief principe is het scharnier niet langer aan de bovenzijde te positioneren maar te kiezen voor een positie die zich bevindt juist boven of beneden de middellijn van de lamel. Bij een dergelijke positie zal de lamel aan onder- en bovenzijde van het scharnier winddruk ontvangen. De lamel zal hierdoor gedurende langere tijd in gesloten stand willen blijven. Het verschil in winddruk aan onder- en bovenzijde is bepalend voor het moment waarop de lamel open zal gaan staan. De zwaartekracht is niet langer de enige kracht die tegendruk geeft. De windkracht zelf zorgt hier ook voor. Zodoende is te volstaan met een aanzienlijk lager contra-gewicht.

Het windgedreven tegendruk systeem is met name goed toepasbaar bij de SwitchString modellen waarbij sprake is van een relatief stijf spanmedium, zoals bij het Vlieger-model en het Veder-model.



De SwitchString mag zich aan zowel de bovenzijde als de benedenzijde openen, door het scharnier net onder of boven het midden te positioneren. De luchtstroming wordt dan naar boven of beneden gericht. Op de totale luchtstroming op enige afstand van het scherm heeft dit echter marginale betekenis.

Door de keuze-combinatie van grootte van het contra-gewicht en positionering van de scharnierlijn is de werking van de SwitchString op fijne wijze instelbaar.

2.5 Lamel systeemtypes

Voor de analyse van de luchtkwaliteitsverbetering is het noodzakelijk om een aanname te doen van de openheid van het systeem in relatie tot de windkracht.

Op basis van het Vlieger-model of Veder-model zijn de volgende systeemtypes of lameltypes vooralsnog aangehouden (zie ook bijlage 3 onderaan):

Lameltype 1: traditionele lamel, scharnier bovenzijde, contra-gewicht < 10 N/m²

Lameltype 2: innovatieve lamel, scharnier in buurt middellijn, nihil contra-gewicht

Lameltype 3: ideaal lameltype, snelle omslag open-dicht bij bepaalde windkracht

De hoekstand van de lamellen is instelbaar in relatie tot de windkracht. Bijvoorbeeld met een extra contra-gewicht dat onderin de lamel hangt. De zwaarte van dit gewicht bepaalt de grootte van de hoekstand.

Ook het draaipunt van de lamellen is instelbaar. Bij een lager gelegen draaipunt oefent de windkracht op het bovenzvlak en ondervlak een kracht uit die de lamel in (bijna) verticale positie houdt. Hierdoor is te volstaan met een beduidend lager contra-gewicht.

Door de combinatie van contra-gewicht en draaipunt is de werking van de lamel op fijne wijze instelbaar.

De gekozen drie lameltypes geven een indruk van de capaciteiten van het SwitchString systeem. In de onderstaande tabel zijn de karakteristieke kenmerken van de gekozen lameltypes weergegeven.

Openingshoek lamel in relatie tot windkracht (in graden)							
windkracht	< 1	2	3	4	5	6	7>
Lameltype 1	0	30	45	60	90	90	90
Lameltype 2	0	0	30	45	90	90	90
Lameltype 3	0	< 5	< 5	< 5	90	90	90

De kenmerken zijn daarbij zodanig gekozen dat de maximale windbelasting bij elke windkracht niet wordt overschreden. Daartoe wordt verwezen naar het volgende hoofdstuk.

2.6 Bevindingen

Een aantal technische modellen beantwoorden in principe aan de SwitchString doelstelling: eenvoudig, betrouwbaar en voordelig semi-permeabel systeem om vuile lucht op de juiste momenten te mengen met hogere luchtlagen waardoor verdunning optreedt die tot lagere concentraties leidt.

Bij deze modellen vindt het gehele bewegingsysteem op eenvoudige en passieve wijze plaats waardoor de bedrijfszekerheid gegarandeerd is.

De systeem-modellen A t/m C zijn op korte termijn - binnen 1 jaar - toepasbaar. Grote problemen worden niet verwacht. Nader onderzoek is noodzakelijk naar de windstroming, de krachtswerking en de precieze werking van het bewegingsmechanisme. Voor de modellen D en E is eerst nader onderzoek nodig naar de beschikbaarheid en toepasbaarheid van de materialen.

Bij een innovatieve positionering van het scharnierpunt van het spanmedium (lamel) in de nabijheid van het midden van het spanmedium geeft de windkracht zelf ook de benodigde tegendruk om het scherm zo lang mogelijk in gesloten stand te houden. Zonder dat grote gewichten nodig zijn. Dit is met name het geval bij de modellen A en B. Deze modellen worden hierna verder uitgewerkt.

3.0 Windkracht analyse

De maximale windbelasting die in open stand van het systeem optreedt, wordt bepaald op basis van de bouwtechnische voorschriften voor windstorm waarna deze belasting maatgevend wordt gesteld voor de windbelasting die bij lagere windkrachten maximaal mag optreden in de semi-gesloten standen van het systeem. Hieruit is de maximaal toelaatbare geslotenheid van het systeem te herleiden.

Tevens is de frekwentie-verdeling van de windkracht over het jaar geanalyseerd dat mede van betekenis is voor de duur van openheid en geslotenheid van het systeem.

3.1 Windstorm-belasting in open stand

Bouwconstructies dienen volgens de NEN 6072 (Technische grondslagen voor gebouwconstructies) te worden gedimensioneerd op windkrachten van circa 25 - 30 m/s. Een situatie die slechts in uitzonderlijke omstandigheden zich voordoet.

Volgens de eveneens geldende GCW-2007 "Richtlijnen voor geluidbeperkende constructies langs wegen" worden met name zwaardere eisen dan de NEN 6702 gesteld in korte zones aan de beide uiteinden van de schermen. (zie ook bijlage 2: windbelasting op dichte en open schermen)

In onderstaande berekening zijn de korte eindzones buiten beschouwing gelaten. De analyse richt zich op het middenstuk van het scherm.

De windbelasting wordt aldus berekend volgens NEN 6702:

$$\text{Prep} = C_{dim} \cdot C_{index} \cdot C_{eq} \cdot Q_1 \cdot P_w \text{ en } P_w = C_{turbulentie} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^2$$

Voor de verschillende windgebieden en bebouwd of onbebouwd is de stuwdruk P_w weergegeven. Voor een veel voorkomend windgebied II en bebouwd bedraagt de stuwdruk 540 N/m² op 8 m hoogte.

Stuwdruk P_w in N/m ²						
Hoogte	Gebied I kop Noord-Holland		Gebied II Randstad, Noord-Nederland		Gebied III midden, oosten, zuiden land	
	onbebouwd	bebouwd	onbebouwd	bebouwd	onbebouwd	bebouwd
	4 m	780	640	620	540	490
8 m	990	640	810	540	670	460
12 m	1120	810	940	680	780	580

De windbelasting is indicatief berekend voor een standaard scherm en voor het SwitchString systeem.

Voor de coëfficiënten in de formule Prep zijn vooralsnog standaardwaarden aangehouden:

C_{dim} (afh. afmetingen bouwwerk) = 1,0

C_{eq} (drukvereffeningsfactor) = 1,0

Q_1 (dynamische vergrotingsfactor) = 1,1

C_{index} (vormfactor) = bij gesloten vlak 1,6; bij vakwerk met scherpe randen 2,0 en met ronde staven 1,2;

$C_{wrijving}$ = 0,01 per m² lamelzijde

Voor C_{index} is de hogere oudere waarde van 1,6 (uit GCW 2001) aangehouden. Alternatief is hantering van de nieuwe lagere waarde van 1,2 in geval van rechte schermen, oplopend naar een waarde van 1,4 bij hellende schermen. Voor het overige zijn de waarden overeenkomstig de GCW2007.

Het windvang oppervlak van de SwitchString in de volledig geopende stand wordt ingeschat op 2 tot 4 % van het frontale oppervlak in geval van het Vlieger-model of Veder-model. (zie bijlage 3 Windbelasting SwitchString lamellen)

Daarbij wordt uitgegaan van kolommen met een dikte van 150 – 250 mm en kolomafstand van 10 tot 20 m en van lamellen met een breedte van 50 tot 150 cm en 6 – 10 mm dikte (voor draad en doek).

De Cindex varieert tussen 1,2 en 2,0 afhankelijk van de ruwheid van het windvangend systeem. Met deze bandbreedte is vooralsnog rekening gehouden.

Windbelasting Prep in N/m2 frontaal schermvlak op basis van stuwdruk 540 N/m2		
Schermtyp	Standaard scherm	SwitchString open stand
Windvangoppervlak	100 %	2 – 4 %
Cdim x C eq x Q1	1,1	1,1
Cindex	1,6	1,2 - 2,0
Stuwdruk Pw (windgebied II, bebouwd, 8 m)	540	540
Windbelasting Prep	950	13 – 48
Extra: Windwrijving (= 0,02 x 100 % x 950)	nvt	19

De windbelasting op de open SwitchString is dan circa 30 – 70 N/m2 frontaal vlak dat 15 tot 30 maal zo laag ligt als de windbelasting bij een standaard (geluids)scherm.

Vanwege dynamische effecten zoals golfweerstand van het doek en eigentrilling kan vooralsnog een extra veiligheid worden aangehouden van bijvoorbeeld een factor 2. De windbelasting op de SwitchString is ook dan nog niet hoger dan 7 - 15 % van de windbelasting op een standaard (geluids)scherm.

3.2 Minimale openingshoek per windkracht

In de volledig geopende stand is de maximale windstormbelasting hierboven berekend. Uitgangspunt bij de optimalisatie van de SwitchString is dat deze maximale windbelasting in open stand niet overschreden wordt bij de andere meer gesloten standen van de lamellen.

Het volgende belastingsmechanisme doet zich daarbij voor. Enerzijds neemt het windvangend oppervlak toe bij een meer gesloten stand van het scherm en anderzijds daalt de stuwkracht bij lagere windkrachten. Beide componenten tesamen bepalen de minimaal noodzakelijke openingshoek bij gegeven windkracht.

In formule: $P_{rep-ij} < P_{rep-windstorm}$

met P_{rep-ij} = windbelasting bij windkracht i en windvangoppervlak j

en $P_{rep-windstorm}$ = windbelasting bij volledig geopende stand

De maximale windstorm-belasting bedraagt circa 30 – 70 N/m2 frontaal vlak die vanwege dynamische effecten wellicht nog verhoogd wordt naar 60 – 140 N/m2. Deze windbelasting wordt deels veroorzaakt door de stuwkracht op de kolommen en deels door de stuwkracht op de lamellen. Eenvoudshalve wordt hiervoor 50 % / 50 % vooralsnog aangehouden.

De maximaal toelaatbare windbelasting op de lamellen bedraagt dan 30 – 70 N/m2 frontaal schermvlak.

Maximaal toelaatbare windbelasting op de lamellen (in N/m2 frontaal schermvlak)			
Max. windbelasting	Incl. dynamisch effect	Kolom deel 50 %	Lamel deel 50 %
30 – 70	60 – 140	30 – 70	30 -70

Op basis van deze maximaal toelaatbare windbelasting van 30 – 70 N/m² op de lamellen valt vervolgens de minimaal noodzakelijke openingshoek van de lamellen te berekenen. (zie bijlage 3)

Minimaal benodigde openingshoek lamel in relatie tot maximale windbelasting (in graden)							
windkracht	< 1	2	3	4	5	6	7>
Windbelasting 30 N/m ²	0	0	0	60	75	90	90
Windbelasting 70 N/m ²	0	0	0	0	45	75	90

De windbelasting is evenredig met het kwadraat van de windsnelheid zodat bijvoorbeeld windkracht 4 leidt tot een windbelasting die al een factor 16 lager ligt dan de maximale windstorm-belasting. Hieruit volgt dat de lamellen bij lagere windkrachten lang in de semi-gesloten stand kunnen blijven.

De SwitchString blijkt tot en met windkracht 3 zelfs in volledig gesloten toestand te kunnen blijven. Vanaf windkracht 4 of 5 dient de SwitchString bij voorkeur snel om te schakelen naar de open stand.

3.3 Frekwentie-verdeling per windkracht

De frekwentie-verdeling van de windkracht die over het jaar gemiddeld optreedt, is in combinatie met de maximaal toelaatbare windbelasting per windkracht bepalend voor de mate van openheid en geslotenheid van het systeem.

De frekwentie-verdeling van de windkracht is ontleend aan het Windklimaat van Nederland. (zie bijlage 1 Tijdsfrekwentieverdeling windsnelheid).

Uitgangspunt is hier windgebied II genomen die het grootste deel van de Randstad bestrijkt.

De windkracht is afhankelijk van de hoogte boven het maaiveld en de ruweidssklasse van het terrein. Hoe lager de hoogte en hoe ruwer het terrein hoe meer de windkracht daalt. De periodes met lage windkracht overheersen dan. In deze periodes is door de lage windsnelheid, tevens de concentratie aan vuile stoffen het hoogst.

Maximale windkracht bij overschrijdingsperiode van 50 % en 90 %				
windgebied	ruweidssklasse	hoogte	overschrijdingsperiode	
			> 50 %	> 90 %
II	3	10 m	3	5
II	6	10 m	2,5	4
II	6	3 m	2	3

Gedurende meer dan 50 % van de tijd blijkt de windbelasting op 10 m hoogte met een ruweidssklasse 3 niet hoger dan windkracht 3, en niet hoger dan windkracht 5 gedurende 90 % van het jaar.

Ruweidssklasse 3 is weideland of braakliggend bouwland met vrijwel geen obstakels. In meer stedelijk buitengebied is ruweidssklasse 5 meer van toepassing: cultuurland met verspreide obstakels (bomenrijen, huizen), heggen, hoge gewassen of ruweidssklasse 6: parkland met veel obstakels en weinig open ruimte (ca 10 x obstakelhoogte), boomgaardje en struikgewas.

Bij ruweidssklasse 6 blijkt dat gedurende meer dan 50 % van de tijd maximaal windkracht 2,5 optreedt, en niet meer dan windkracht 4 gedurende 90 % van het jaar.

Gedurende meer dan 90 % van de tijd blijft de windkracht op 10 meter hoogte in windgebied II beperkt tot windkracht 4 tot 5. De windsnelheid blijft dan beperkt tot 6 – 9 m/s die een factor 3 tot 4 lager ligt dan de maximale windstorm-snelheid.

3.4 Bevindingen

De windstormbelasting op een semi-permeabel SwitchString behoeft bij een goede dimensionering niet hoger te liggen dan 7 – 15 % van de windstormbelasting op een standaard (geluids)scherm. Hoe lager deze waarde, hoe ranker en hoe voordeliger in principe de constructie uit te voeren is.

De gewenste lage windstormbelasting leidt er echter ook toe dat het systeem al bij lagere windkrachten gedeeltelijk open dient te gaan om overbelasting bij lagere windkrachten te voorkomen.

Het omslagtraject van open naar gesloten blijkt vanaf windkracht 4 tot 5 te beginnen waarbij dit traject doorloopt tot maximaal windkracht 6 tot 7, en het systeem geheel open dient te zijn.

Deze hogere windkrachten blijken echter slechts in beperkte mate over het jaar op te treden. Gedurende minder dan 10 % van de tijd staat er meer dan windkracht 3 op een hoogte van 3 meter boven maaiveld in een parklandschap met veel obstakels. En overeenkomstig meer dan windkracht 5 op een hoogte van 10 meter in een open weidegebied. In veel voorkomende situaties langs snelwegen zal gedurende meer dan 90 % van de tijd dan ook de wind niet hoger zijn dan windkracht 4.

De SwitchString wordt in de semi-gesloten stand gedimensioneerd op de concentratiegevoelige perioden die samen een groot deel van het jaar duren. In de overige periodes van hogere windsnelheden gedraagt de SwitchString zich steeds meer als een open scherm.

4.0 Luchtkwaliteitsverbetering

De luchtkwaliteit in een aantal situaties is berekend op basis van een CFD simulatie. De resultaten zijn uitgedrukt in een relatieve concentratiewaarde ten opzichte van een referentie-situatie zonder scherm. De mate van openheid van het systeem in relatie tot windkracht en tijdsduur zijn medebepalend.

4.1 Methodiek luchtkwaliteitsverbetering

Naast reiniging van de lucht door intensief contact met een schermfilter is verdunning van de concentratie van vervuilende stoffen ook een middel om tot een betere luchtkwaliteit te komen.

Aangenomen wordt dat 95 % van de verkeersemisies zich bevinden in een luchtpakket van 5 m hoogte boven de weg. Door een obstakel langs de weg kan deze vervuilde lucht worden opgestuwd en gemengd met hogere schonere luchtlagen. Geluidsschermen zijn bijvoorbeeld een dergelijk gunstig obstakel. Aan (verhoging van) geluidsschermen is echter een relatief duur prijskaartje gebonden om uitsluitend de luchtkwaliteit te kunnen verbeteren.

Windstroming dwars over een weg zorgt voor verdunning van de op de weg uitgestoten verontreiniging. Daarbij is de optredende concentratie omgekeerd evenredig met de windsnelheid. Bij twee keer zo hoge windsnelheid wordt de verontreiniging in twee keer zoveel lucht opgenomen en halveert de concentratie. Bij hogere windkrachten is verdunning van de lucht minder noodzakelijk dan bij rustiger weer. Bij hogere windkrachten treedt vanzelf verdunning op door grotere luchtsnelheid en meer turbulente vermenging van luchtlagen.

De hoogste concentraties treden op onder uitwisselingsarme omstandigheden. In deze weerssituatie is de dynamische SwitchString actief waarbij de vuile lucht naar hogere schonere luchtlagen wordt gestuwd dat leidt tot verdunning en lagere concentraties.

4.2 Uitgangspunten luchtkwaliteitsverbetering

Op basis van CFD-onderzoek dat uitgevoerd is bij Efectis (TNO) wordt een inschatting gemaakt van de verwachte luchtkwaliteitsverbetering. (zie bijlage 6 Resultaten CFD berekeningen aan stroming om en door SwitchString)

Modellering

De CFD simulaties zijn verricht met het softwarepakket Flunet, versie 6.3.26. De simulaties zijn 2D en isotherm uitgevoerd waarbij het k-e turbulentiemodel is gebruikt met standaardcoëfficiënten. Tevens is ervan uitgegaan dat de vervuiling de stroming instantaan volgt.

Rijbaanstelsel (posities ten opzichte van as in meter)				
	breedte	binnenrand	as	buitenrand
Middenberm	3,7	0	1,85	3,7
redresseestrook	0,8	3,7	4,1	4,5
Linker rijbaan	3,5	4,5	6,25	8
Midden rijbaan	3,5	8	9,75	11,50
rechterrijbaan	3,5	11,5	13,25	15
vluchtstrook	3,5	15	16,75	18,5
berm	4,5	18,5	20,75	23
scherm			23	

Geometrie van de weg

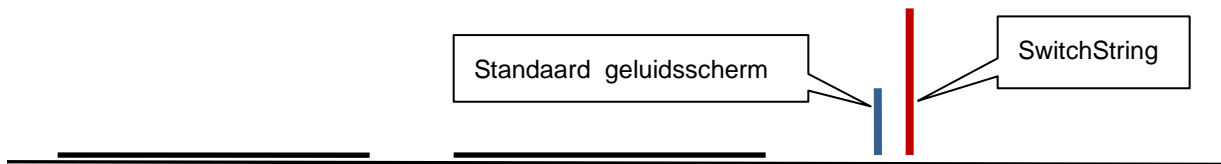
De weg bestaat uit 2 x 3 rijstroken en een vluchtstrook aan beide zijden. De rijstroken bevinden zich op 4,5 tot 15 meter van de as van de weg.

De wegdekhoogte is gelijk aan de maaiveldhoogte.

Schermsconfiguratie

De volgende schermsituaties zijn in het CFD onderzoek doorgerekend:

- A geen (geluids)schermen langs de weg.
- B éénzijdig standaard geluidsscherm van 4 m hoogte op 23 m van de as van de weg.
- C SwitchString op 1 m afstand geplaatst achter geluidsscherm van 4 m hoogte:
 - C1 SwitchString van 8 m hoogte;
 - C2 SwitchString van 12 m hoogte



Uitgangspunt is een combinatie van de SwitchString met een bestaand geluidsscherm. Motivatie is dat de SwitchString met name toegepast zal worden bij snelwegen in stedelijk gebied waarbij ook eisen gesteld zijn aan de geluidshinder dat zijn beslag gekregen heeft met een geluidsscherm. Veel voorkomende geluidsschermen zijn 4 meter hoog.

Lameltype

Voor de lamellen is in bijlage 6 uitgegaan van een breedte van 32 cm en dikte van 2 cm. Bij een gelijke breedte/dikte verhouding zijn de resultaten ook geldig bij veel bredere lamellen, bijvoorbeeld 50 - 150 cm zoals aangehouden in paragraaf 3.1.

Ook is het van marginaal belang of de stroming door de lamellen naar boven of beneden gericht wordt.

Windprofiel

Uitgangspunt is een logaritmisch windprofiel met een snelheid van 5 m/s op 10 m hoogte, en met een ruwheidshoogte van $Z(0) = 0,25$ m.

Door de relatieve concentratie zijn de resultaten overigens onafhankelijk van de windsnelheid.

Vervuilsbron

De vervuilsbron is gemodelleerd als een volumetrische bron met een hoogte van 1 meter die zich bevindt boven de 2 x 3 rijstroken vanaf het wegdek tot een hoogte van 1 m.

4.3 Resultaten luchtkwaliteitsverbetering uit CFD simulatie

De luchtkwaliteit verbetert sterk achter een hoog obstakel zoals een geluidsscherm of SwitchString die zorgt voor opstuwing van de lucht. De luchtkwaliteit neemt sterk toe met de hoogte van het obstakel.

De verbetering van de luchtkwaliteit wordt gepresenteerd in de relatieve concentratie op een bepaald punt waarbij de concentratie met scherm procentueel uitgedrukt wordt in de concentratie zonder scherm.

Deze relatieve waarden zijn in principe van toepassing voor zowel PM2,5, PM10 als NOx.

In onderstaande tabel is de relatieve concentratie K(i) gegeven bij verschillende standen van het systeem d.w.z. met een openingshoek van 0, 45 en 90 graden. Deze waarden zijn berekend. De tussenliggende standen dienen te worden geïnterpoleerd.

Relatieve concentratie K(i) achter scherm op 1,5 m hoogte					
Afstand achter scherm in m	20	40	60	80	100
Referentie geen scherm	100 %				
Standaard geluidsscherm 4 m hoogte	91 %	87 %	88 %	93 %	93 %
SwitchString 8 m hoogte					
- 90 graden open	91 %	87 %	88 %	93 %	93 %
- 45 graden open	86 %	81 %	79 %	79 %	83 %
- 0 graden open	58 %	64 %	67 %	69 %	73 %
SwitchString 12 m hoogte					
- 90 graden open	91 %	87 %	88 %	93 %	93 %
- 45 graden open	94 %	77 %	74 %	74 %	77 %
- 0 graden open	38 %	46 %	50 %	51 %	53 %

In geheel open stand (90 graden) is de SwitchString die met 8 tot 12 meter hoogte aan de bovenzijde uitsteekt boven het standaard geluidsscherm van 4 m hoogte bijna vanzelfsprekend vergelijkbaar met de resultaten van dat standaard scherm.

In de dichte stand (0 graden) blijkt de relatieve concentratie sterk te dalen. Op een afstand van 20 meter achter het scherm daalt de concentratie naar 58 % bij een 8 meter hoog scherm en bij een 12 meter hoog scherm naar 38 %. Bij een 4 meter hoog standaard scherm was deze waarde nog 91 %.

Op grotere afstand van 100 meter achter het scherm daalt de concentratie altijd nog naar 73 % bij een 8 meter hoog scherm en bij een 12 meter hoog scherm naar 53 %. Bij een 4 meter hoog standaard scherm is deze waarde nog 93 %.

Bij een half-open stand (45 graden) worden tussenliggende resultaten bereikt. Met name op wat grotere afstand van 100 meter achter het scherm. Op korte afstand gedraagt het half-open systeem zich steeds meer als een open systeem. Op heel korte afstand (minder dan 20 meter) en bij grote schermhoogte van 12 meter is de half-open stand zelfs ongunstiger dan een geheel open stand. Verklaring hiervoor is dat relatief veel vervuiling met een lagere windsnelheid door het scherm gaat, zodat de concentratie per saldo toeneemt ten opzichte van de referentie-situatie. Op grotere afstand wordt dit aspect gecompenseerd.

4.4 Resultaten luchtkwaliteitsverbetering geïntegreerd naar tijd en windkracht

In voorgaande paragraaf zijn de resultaten voor de luchtkwaliteit gesimuleerd voor enkele situaties van een SwitchString in open, half open en dichte stand. De tussenliggende standen dienen te worden geïnterpoleerd.

Voor de uiteindelijke prestatie van de SwitchString voor wat betreft de luchtkwaliteitsverbetering dienen deze CFD resultaten geïntegreerd te worden met de periode en de windkracht dat de lamellen in deze standen staan. Op basis hiervan wordt de relatieve concentratiewaarde K bepaald.

De relatieve concentratiewaarde K wordt als volgt berekend:

$$K = \text{som} (K_i \times T_i \times Q / V_i) / \text{som} (T_i \times Q / V_i)$$

waarin:

K_i = relatieve concentratie-coëfficiënt per windkracht en lamelstand

T_i = periode per windkracht en lamelstand in s

Q = emissie-bron in gr/m¹

V_i = windsnelheid per windkracht in m/s

i = windkracht, lamelstand in verschillende posities

De K waarde is na vereenvoudiging onafhankelijk van de Q van de snelwegbron:

$$K = \text{som} (K_i \times T_i / V_i) / \text{som} (T_i / V_i)$$

De K-waarde is berekend voor een aantal kenmerkende situaties. Daarbij zijn de volgende parameters aangehouden:

Variabele parameters		
Windsituatie	Windgebied II	Voor alle situaties
	Ruwheidsklasse 3	Weideland met vrijwel geen obstakels
	Ruwheidsklasse 6	Parkland met veel obstakels
	Windhoogte 3 meter	KNMI meetgegevens beschikbaar
	Windhoogte 10 meter	KNMI meetgegevens beschikbaar
Scherm situatie	Schermhogte 8 m	Uit CFD simulatie
	Schermhogte 12 m	Uit CFD simulatie
	Lameltype 1	Zie hfdst 2
	Lameltype 2	Zie hfdst 2
	Lameltype 3	Zie hfdst 2
Meetsituatie	Meethogte 1,5 meter	Voor alle situaties
	Meetafstand 40 meter	Voor alle situaties

Windgebied II is aangehouden omdat dit windgebied het grootste deel van de Randstad bestrijkt. Een meetafstand van 40 meter is een afstand waarbij schommelingen in de luchtkwaliteit achter het scherm zich stabiliseren.

In bijlage 4 Relatieve concentratiewaarden SwitchString bij diverse wind- en schermconfiguraties is de berekening van de relatieve concentratiewaarde gemaakt voor deze kenmerkende situaties.

In de onderstaande tabel zijn de resultaten weergegeven.

Relatieve concentratie K van SwitchString in verschillende omstandigheden					
Meetsituatie: afstand achter scherm 40 m en meethogte 1,5 m					
Windsituatie			Scherm situatie		K
windgebied	ruwheidsklasse	windhoogte	schermhoogte	lameltype	
II	3 $z(0)=0,03$	10 m	8 m	1	73 %
II	6 $z(0)=0,50$	10 m	8 m	1	72 %
II	3 $z(0)=0,03$	3 m	8 m	1	69 %
II	6 $z(0)=0,50$	10 m	8 m	2	66 %
II	6 $z(0)=0,50$	10 m	12 m	2	52 %
II	6 $z(0)=0,50$	10 m	12 m	3	47 %

De relatieve concentratiewaarde van de SwitchString van 8 m hoogte varieert afhankelijk van de situatie tussen 66 – 72 %. Bij een hoogte van 12 meter is een relatieve concentratiewaarde bereikbaar van 47 %.

Ter vergelijking zijn hierna de relatieve concentratiewaarden gegeven van standaard (geluids)schermen van overeenkomstige hoogten van 4, 8 en 12 meter.

Relatieve concentratie K van referentiesituatie en standaard (geluids)schermen			
Meetsituatie: afstand achter scherm 40 m en meethoogte 1,5 m			
Schermsituatie		schermhoogte	K
Referentiesituatie	geen scherm	geen	100 %
Standaard (geluids)scher		4 m	87 %
idem		8 m	64 %
idem		12 m	46 %

Bij een gesloten standaard scherm van resp. 8 en 12 meter hoogte ligt de relatieve concentratiewaarde op resp. 64 % en 46 %.

4.5 Bevindingen

Met het SwitchString systeem blijkt het mogelijk te zijn om praktisch dezelfde prestaties te bereiken in luchtkwaliteitsverbetering als met een standaard (geluids)schermer van gelijke schermhoogte.

De luchtkwaliteitsverbetering is uitgedrukt in de relatieve concentratiewaarde ten opzichte van de situatie zonder scherm. Deze referentie-situatie is 100 %. Deze waarden gelden voor PM_{2,5}, PM₁₀ en NO_x.

De relatieve concentratiewaarde is berekend met CFD simulaties voor een aantal lamel-standen. Deze waarde is vervolgens geïntegreerd naar tijd en windkracht waarbij rekening is gehouden met de mate van openheid van het systeem. Drie lameltypes zijn daarbij onderscheiden.

De periode van hogere windkrachten is dermate kort dat de periode van lagere windkrachten bepalend is voor de bijdrage aan de luchtkwaliteit. In deze periode is ook de SwitchString overwegend dicht.

Bij een gesloten standaard scherm van 8 m hoogte ligt de relatieve concentratiewaarde op 64 % bij een afstand van 40 meter achter het scherm. Bij de evenhoge SwitchString is zonder veel kunstgrepen een percentage bereikbaar van 66 %.

Bij een hoogte van 12 meter ligt de relatieve concentratiewaarde van een standaard scherm op 46 %, en bij de SwitchString is toch nog een waarde bereikbaar van 47 %.

Een relatieve concentratiewaarde van minder dan 50 % is dus bereikbaar bij schermen met een hoogte van 12 meter langs een driebaans-snelweg. Voor een standaard geluidsschermer is een dergelijke grote hoogte echter wel uitzonderlijk ingrijpend en kostbaar. Dat ligt anders bij het SwitchString systeem waar de eenvoud van de constructie en de lage windbelasting het mogelijk maakt om hoogten van 12 meter praktisch realiseerbaar te laten zijn.

5.0 Techniek en kosten

Ter concrete verkenning van het SwitchString systeem is een kostenraming opgesteld van de toepassing van het Vlieger-model. De mogelijke materialen en technieken passeren hierbij de revue die echter ook toepasbaar zijn op andere model-opties. Op een aantal verkeersaspecten wordt ook ingegaan.

5.1 Kostenanalyse

In de toepassing van hoge masten waartussen winddoeken en netten gespannen zijn, bestaat er ruime gebruikservaring als afscheiding van sportvelden en golfterreinen.

Op basis van deze ervaring van Paaijmans Balsportafschermingen is een kostencalculatie opgesteld waarbij is uitgegaan van een recht traject langs de snelweg van 1 km lengte op maaiveldniveau.

De ondergrond bestaat uit matige zand, lichte klei of siltgronden. (zie bijlage 5, offerte Paaijmans)

Alle genoemde kosten zijn inclusief materialen en aanleg, maar exclusief BTW.

Ook zijn de kosten voor leidingentracé verleggen en verkeersmaatregelen buiten beschouwing gelaten. Voor verkeersmaatregelen kan uit ervaring wel een stelbedrag worden genoemd van circa 50 euro per strekkende meter snelweg. De aanleg van de masten gaat relatief zeer snel, zodat verkeersmaatregelen relatief kort behoeven te duren.

De kosten zijn voor maaiveldniveau. Voor werken in een talud is conform de methodiek van BSV (Bureau Sanering Verkeerslawaaï) te rekenen met een toeslag van 9 % tot 30 %.

Kostencalculatie SwitchString bedragen in euro			
projektlengte	recht traject 1.000 meter, geen talud		
ondergrond	matige zand, lichte klei of siltgronden		
systeem-opbouw	stalen masten hoh 20 m, lamellen 1,50 m breed, kunststof doeken		
systeemhoogte	4 m	8 m	12 m
totaalkosten	250.000	360.000	475.000
- kosten per m1	250	360	475
- kosten per m2	63	45	40

Noot: Kostenverdeling in onderdelen: masten en fundatie 35 %, kabels 15 %, lamellen en doeken 50 %

De netto bouwkosten van de SwitchString liggen in de orde van grootte van 40 tot 60 euro per m2. Dit is een groot prijsverschil met de netto kosten voor standaard geluidsschermen die veelal tussen 150 en 300 euro per m2 liggen, eveneens exclusief verkeersmaatregelen, leidingen verleggen etc.

Voorzichtige conclusie is dat men voor de prijs van één geluidsscherm ook 4 tot 6 maal zoveel vierkante meter SwitchString aanbrengen kan.

Onderhoud

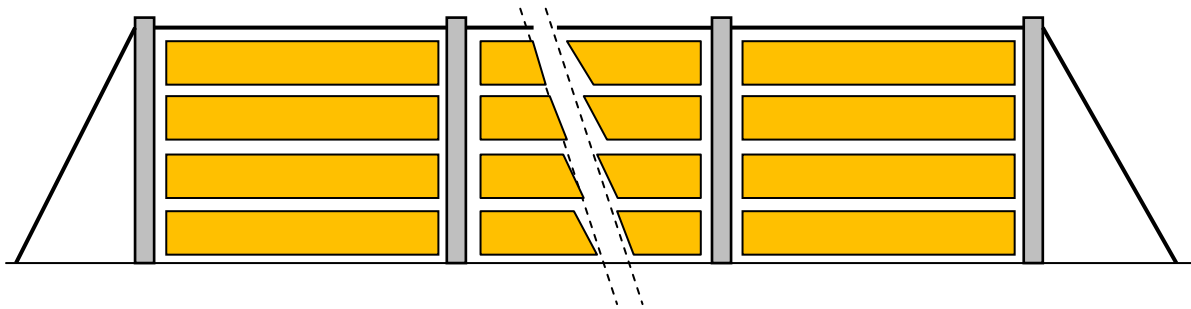
De SwitchString behoeft beperkt onderhoud. De verzinkte stalen masten hebben een levensduur van meer dan 25 jaar. Het lameldoek wordt bij een goede duurzame kwaliteit ingeschat op een levensduur van 10 tot 15 jaar. De vervangingskosten in materiaalkosten en manuren bedragen circa 10 tot 15 euro per m².

5.2 Materialen en techniek

Masten

De stalen masten zijn verjongd uitgevoerd. Bij een 12 meter hoge mast verloopt het onderste mastdeel van 355 x 6,3 mm naar 159 x 4 mm voor het bovenste mastdeel. De hart-op-hart afstand is 20 meter. Masten zijn verzinkt volgens NEN-norm 1275.

De stalen masten worden met een trijkraan H500 in ongeroerde grond hydraulisch ingebracht. De diepte steekt in het algemeen de helft tot éénderde van de mastlengte in de grond.

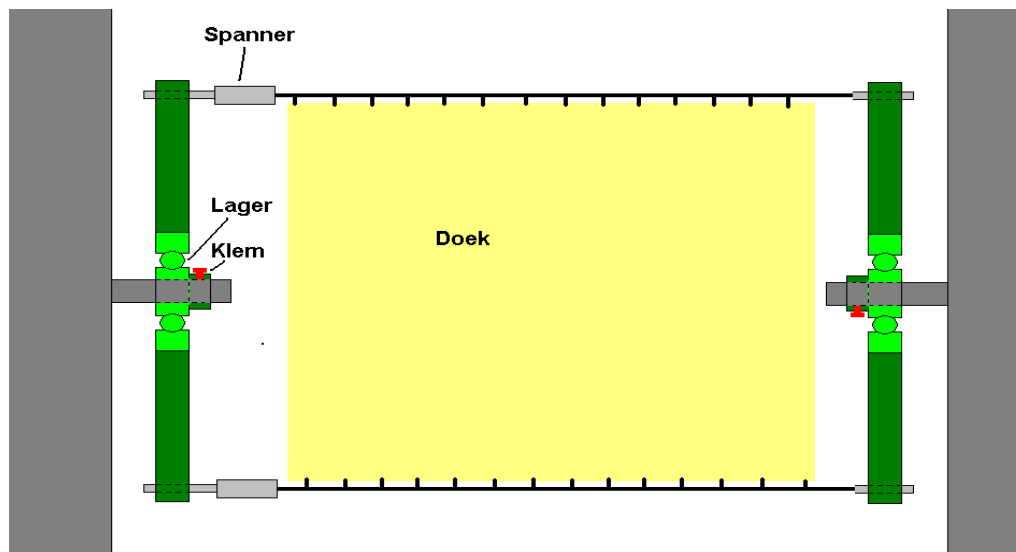


Kabels

Aan beide uiteinden van het scherm worden - in het schermvlak - schoorkabels rond 16 mm toegepast. Tussen de masttoppen loopt een bovenkabel rond 14 mm t.b.v. de onderlinge stabiliteit van de masten. Ter compartimentering is voorzien in loodrecht op het schermvlak gespannen schoorkabels per 200 meter scherm lengte. Ook bij bochten is op deze wijze te voorzien in extra schoorkabels.

De middenkabels rond 8 mm verbinden de kolommen met een spanjuk die tevens de horizontale lamellen opspannen. De lamellen hebben een breedte van 1,00 tot 1,50 meter.

Een 12 meter hoge mast is dan bijvoorbeeld opgedeeld in acht vakken van 1,50 meter.



Lamellen

Voor het spanmedium van de SwitchString lamellen zijn een aantal materialen beschikbaar. Onderscheid is te maken tussen platen, doeken en folies.

Doeken bestaan uit een orthogonale structuur van synthetische vezels. Het weefsel wordt afgedicht en beschermd door een coating. Door additieven toe te voegen of top-coatings aan te brengen kunnen oa de UV-bestendigheid, brandwerendheid, vuilafstotendheid gecontroleerd worden.

De synthetische polyester-, glas- of carbonweefsels bepalen met name de mechanische eigenschappen (sterkte, stijfheid ed) van het doek. Glasweefsels dienen strak gespannen te zijn.

Folies zijn dunne, geëxtrudeerde films uit een homogeen materiaal. Vanwege deze homogeniteit gedraagt een folie zich anders dan een doekmateriaal.

Veel toegepaste doek- en foliematerialen zijn PVC gecoate polyesterweefsels, PTFE of siliconen gecoate glasweefsels en ETFE folies. De doekmaterialen zijn in allerlei kleuren te verkrijgen, zowel lichtdoorlatend als lichtdicht. De levensduur varieert van circa 15 jaar voor pvc gecoate polyesterweefsels tot meer dan 40 jaar voor PTFE gecoate weefsels.

ETFE folie is een duurzaam en volledig transparant materiaal dat in luchtkussenvorm toegepast wordt in atria overkappingen.

Voor de lamellen van de SwitchString zijn de volgende materialen denkbaar:

- hoogwaardig PVC met maas van polypropyleen (kassenfolie, ook transparant);
- hoogwaardig PVC met polyester-weefsel (bisonyl, vrachtwagendoek, 500 gr/m2 of meer);
- ETFE folies (duurzaam, transparant);

Ook dunne, buigzame platen zijn denkbaar waarbij gedacht kan worden aan kunststoffen en metalen.

5.3 Milieuvriendelijkheid materialen

De toegepaste materialen voldoen aan de eisen van het bouwstoffenbesluit. Het kunststof van de doeken en netten is veelal te recyclen.

5.4 Verkeersdoorstroming

Het SwitchString systeem is eenvoudig aan te leggen en in uitvoering redelijk vergelijkbaar met de aanleg van lichtmasten langs snelwegen.

Onderhoud is in principe niet noodzakelijk. Naar verwachting éénmaal in de tien jaar zou het lameldoek op relatief snelle wijze vervangen kunnen worden.

5.5 Verkeersveiligheid

De SwitchString constructie is aangebracht gedacht achter standaard verkeersgeleidingssystemen.

De constructie is redelijk vergelijkbaar met lichtmasten voorzien van kabels met hangende lampen. Bij lichtmasten zijn geen aanvullende veiligheids-eisen bekend in het geval van kabelbreuk.

5.6 Verkeersbeleving

Door een transparante uitvoering van het spanmedium (platen, doeken, folies) kan tegemoet worden gekomen aan een prettige verkeersbeleving. Ook het principe van het semi-open mechanisme geeft beduidend minder aanleiding voor gevoelens van opgeslotenheid.

5.7 Bevindingen

Ruime ervaring bestaat er met de aanleg van systemen die verwant zijn aan het SwitchString systeem, zoals de plaatsing van hoge masten met netten en doeken in de sportwereld.

Aanleg van het SwitchString systeem langs de snelweg zou geen praktische bezwaren behoeven op te leveren, waarbij ook gerefereerd kan worden aan de ervaring met en werkwijze van lichtmasten langs de snelweg voorzien van hangkabels en hanglampen.

De kosten van het SwitchString systeem liggen – door de lichte constructie en de lage windbelasting - al snel een factor 4 tot 6 lager dan de kosten van een standaard (geluids)schermbank van gelijke hoogte en lengte.

De plaatsing van SwitchString systemen met grote hoogten van 12 meter of meer langs de snelweg zou anders dan bij standaard (geluids)schermen, niet tot een “opgesloten” gevoel behoeven te leiden voor de automobilist. De lamellen zijn transparant uit te voeren, en het dynamische systeem van half-openheid geeft wisselende doorkijkjes naar de omgeving.

6.0 Aanbevelingen

Het SwitchString concept lijkt zeer kansrijk te zijn voor wat betreft een goede kosten-kwaliteit verhouding in de verbetering van de luchtkwaliteit tegen relatief lage kosten.

Realisatie langs de rijkswegen is ook op korte termijn mogelijk. Daartoe dienen wel een aantal stappen te worden gezet.

In dit stappenplan worden drie fases A, B en C onderscheiden die volgtijdelijk te doorlopen zijn. In fase A lopen een aantal stappen/activiteiten parallel aan elkaar.

1. Windtunnel proeven met lamellen op ware grootte fase A 3 - 6 maanden
Het dynamische gedrag en de stromingsweerstand van de lamellen door te meten voor verschillende windsituaties en lamelstanden dat als input kan dienen voor de CFD berekeningen en de windkracht berekeningen.
2. Aanvullende CFD berekeningen fase A 3 - 6 maanden
De verbetering van de luchtkwaliteit in te schatten voor enkele relevante situaties:
 - SwitchString zonder combinatie met geluidsscherm
 - SwitchString geplaatst in middenberm (in combinatie met hangende wegverlichting)
 - SwitchString aan beide zijden van de weg
3. Windkracht berekeningen fase A 3 – 6 maanden
Met dynamische windvorm factoren ondermeer verkregen uit de windtunnelproeven is de constructie nader te dimensioneren op de windbelasting.
4. Optimalisatie spansysteem met lamellen fase A 3 – 6 maanden
Het bewegingsmechanisme van de lamellen (vliegermodel) wordt nader geanalyseerd en gedimensioneerd, mede aan de hand van windtunnelproeven.
Het doek of folie wordt nader geselecteerd aan de hand van programma van eisen.
5. Testen van prototype op demo-locatie fase B 3 – 6 maanden
Proefstuk scherm (8 m hoog bij 20 m lengte) te testen op veldlocatie.
Meerdere lameltypes en doeken zijn hierbij eventueel te testen.
6. Test van SwitchString in praktijksituatie fase C 6 – 12 maanden
Aanleg van SwitchString van beperkte lengte langs Rijksweg.
Meten van eigenschappen gedurende testfase.

Van Rijkswaterstaat wordt een financiële bijdrage gevraagd om de SwitchString verder te kunnen ontwikkelen op voorgaande wijze alsmede is facilitering van een praktijksituatie wenselijk.

Bijlage 1 Tijdsfrequentie-verdeling windsnelheid

Bron: Windklimaat van Nederland Wieringa en Rijkoort, KNMI, 1983

Tijdsfrequentie-verdeling windsnelheid op 10 m hoogte												
windkracht		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Windsnelheid minimaal	m/s	0,0	0,3	1,6	3,4	5,5	8,0	10,8	13,9	17,2	20,8	24,5
Windsnelheid maximaal	m/s	0,2	1,5	3,3	5,4	7,9	10,7	13,8	17,1	20,7	24,4	28,4
Windgebied II Ruwheidsklasse 3 open terrein $Z(0) = 0,03$ 10 m hoogte (Schiphol)												
Tijdsfrequentie	in %	1	7,4	19,4	28,6	24,7	12,4	4,9	1,0	0,3	0,05	0,01
Cumulatief	in %	1	8,4	27,8	56,4	81,1	93,5	98,4	99,4	99,7		
Windgebied II Ruwheidsklasse 6 zeer ruw gebied $Z(0) = 0,5$ 10 m hoogte ($U_{10}/U_p = 0,82$)												
Tijdsfrequentie	in %	1,4	10,5	28,1	28,8	21,1	7,7	1,9				
Cumulatief	in %	1,4	11,9	40,0	68,8	89,9	97,6	99,5				
Windgebied II Ruwheidsklasse 6 zeer ruw gebied $Z(0) = 0,5$ 3 m hoogte ($U_{10}/U_p = 0,54$)												
Tijdsfrequentie	in %	2	20,2	49,7	18,4	7,9	0,8					
Cumulatief	in %	2	22,2	71,9	90,3	98,2	99,0					

Ruwheidsklasse 3:

Weideland of braakliggend bouwland met vrijwel geen obstakels

Ruwheidsklasse 5:

Cultuurland met verspreide obstakels (bomenrijen, huizen), heggen, hoge gewassen

Ruwheidsklasse 6:

Parkland met veel obstakels en weinig open ruimte (ca 10 x obstakelhoogte), boomgaard en struikgewas

Bijlage 2 Windbelasting op dichte en open schermen.

Algemeen.

De windbelasting op constructies wordt conform het Bouwbesluit uitgerekend. Dit Bouwbesluit verwijst naar NEN 6702 voor de belastingen. Sinds 2008 kunnen ook met EN 1991 de belastingen worden uitgerekend. Voor het berekenen van de belasting op schermen is de volgende berekening van belang:

$$p_d = \gamma C_p \phi_1 C_{dim} p_w$$

De volgende componenten zitten in deze berekening:

1: de stuwdruk p_w .

Daarvoor wordt in NEN 6702, als ook in de NB bij EN 1991-1-4 een tabel gegeven. Deze is afhankelijk van de hoogte van het scherm geografische locatie en de omliggende terreinruwheid. Voor het ontwerp van een schermconstructie wordt geadviseerd uit te gaan van windgebied I, onbebouwd gebied. Dit levert over de hoogte de volgende stuwdrukken:

hoogte	Stuwdruk in NEN 6702, onbebouwde omgeving, windgebied I, in kN/m ²
4 m	0,78
8 m	0,99
12 m	1,12
16 m	1,21
20 m	1,29

Deze waarden zijn, na een ingewikkelde rekenslag die hier verder niet wordt toegelicht, terug te voeren op een uurgemiddelde windsnelheid die op 10 meter hoogte onder standaard terreinruwheid eens in de 12,5 jaar wordt overschreden. Deze is voor Windgebied I gelijk aan 27,5 m/s.

Bij andere basis windsnelheden worden andere stuwdrukken gevonden die eenvoudig zijn af te leiden uit bovenstaande gegevens. Bij een gemiddelde wind van 5 m/s kan een bijbehorende stuwdruk worden bepaald door bovenstaande tabel te vermenigvuldigen met $(5/27,5)^2 = 0,033$.

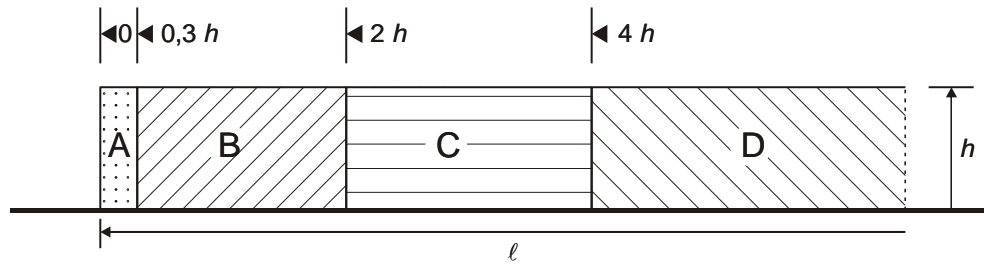
2: De vormfactor C_p

De vormfactor C_p is niet nader gespecificeerd in NEN 6702 voor geluidschermen. In zowel de GCW-2001, als de EN 1991-1-4 zijn waarden gegeven voor schermen.

Een nieuwe versie van de GCW is in voorbereiding, die voor een deel is gebaseerd op EN 1991-1-4, en deels op windtunnelonderzoek, in opdracht van RWS-DWW uitgevoerd door TNO.

Zowel de waarden in EN 1991-1-4 als in de GCW hebben betrekking op dichte schermen.

Voor de bepaling van de windvormfactor wordt het geluidsscherm verdeeld in een aantal zones, conform EN-1991-1-4:2004 (zie figuur 1). De zones A, B en C komen aan beide einden van het geluidsscherm voor, met zone A het dichtst bij de rand gelegen. Zone D is de 'middenzone' en betreft bij een geluidsscherm verreweg de grootste lengte van het scherm.



Figuur 1 – Zone-indeling

Voor verticale geluidsschermen, voor geluidsschermen die onder een hoek met de verticaal zijn geplaatst, beiden al dan niet voorzien met een T-top gelden de volgende waarden van de netto vormfactor op het geluidsscherm zelf per zone:

Scherm-zone	Netto vormfactor verticaal scherm, of hellend, met wind mee hellend	Toeslagen op netto vormfactor scherm	
		hellend scherm, naar de wind hellend, $\alpha = 10$ graden	hellend scherm, naar de wind hellend, $\alpha = 20$ graden
A	3,4	0,1	0,2
B	2,8		
C	1,7		
D	1,2		

Tabel 1: Waarden voor netto vormfactoren op de schermen¹

Voorwaarden voor toepassing van deze tabel zijn:

- De vormfactoren in tabel 1 zijn netto waarden. Dit betekent dat de vormfactor de combinatie van de overdruk aan de windopwaartse kant en de onderdruk aan de windafwaartse kant in rekening brengt;
- De waarde voor de vormfactor voor een hellend scherm en/of voorzien van een T-top wordt bepaald door bij de waarde van een verticaal scherm de relevante toeslagen op te tellen;
- Een verticaal scherm is gedefinieerd als een scherm met een maximale hoek ten opzicht van de verticaal van 5 graden;
- Voor hellingshoeken tussen 5 en 10 graden, en voor hellingshoeken tussen 10 en 20 graden, mag rechtlijnig worden geïnterpoleerd;
- Voor schermen onder een hoek van meer dan 20 graden is deze tabel niet van toepassing. Hiervoor dient aanvullend onderzoek te worden uitgevoerd;
- Bij toepassing van schermen op viaducten of bruggen gelden dezelfde netto vormfactoren. Voor de referentiehoogte dient de hoogte ten opzichte van maaiveld onder viaduct of brug te worden aangehouden (zie figuur 2);

Voor permeabele schermen wordt in EN 1991-1-4 een reductiefactor gedefinieerd voor schermen die voor 20% open zijn.

¹ De waarden in tabel 1 zijn gebaseerd op windtunnelonderzoek aan geluidsschermen in opdracht van RWS-DWW. De resultaten zijn gerapporteerd in TNO rapport 2006-D-R0010, d.d. 21 maart 2006.

Voor schermen met een grotere doorlaatbaarheid wordt aanbevolen uit te gaan van de vormfactor voor de individuele staven ($C_t = 2,0$ is daarvoor een veilige waarde), en dan uit te gaan van de relatieve dichtheid: Zo levert een scherm met 50% openheid een netto $C_t = 1,0$ op. Deze zienswijze is reeds in het aanvullende document van Switchstring overgenomen.

Deze beschouwing is van toepassing op schermen die verder niet bewegen in de wind. De invloed van bewegende delen in de wind kan mogelijk tot een vergroting van de kracht in de constructie leiden. Dit effect is op basis van de constructiegegevens niet in te schatten. Daarvoor is deze constructie te uniek.

3: factoren voor dynamica en afmetingen ϕ_1 en C_{dim}

Voor de factor C_{dim} kan een waarde worden afgeleid aan de hand van de Eurocode windbelasting, of NEN 6702. Dit is een omslachtige procedure en er wordt hier verder niet behandeld. De in de voorliggende documenten gehanteerde waarde van 0,85 kan, afhankelijk van de uitvoering van de constructie, weleens te laag gekozen zijn. Er kan worden aangenomen dat een waarde gelijk aan 1 een veilige aanname is. Voor de dynamische vergrotingsfactor geeft de GCW een waarde 1,1. Voor slappe constructies kan dit aan de lage kant zijn. Een analyse van de eigenfrequentie van het scherm is noodzakelijk om deze factor in te schatten.

4: De partiële veiligheidsfactor γ

Voor de constructieberekening moet een rekenwaarde van de belasting worden bepaald, met een partiële veiligheidsfactor. Daarvoor wordt een waarde gelijk aan 1,5 aanbevolen.

Bron: TNO-notitie tbv SwitchString d.d. juli 2008

Bijlage 3 Windbelasting SwitchString lamellen

Windvang oppervlakte in procenten van frontaal oppervlakte								
Lamelbreedte/dikte			Kolomafstand/breedte					
			10 m	150 mm	15 m	200 mm	20 m	250 mm
			1,5 %		1,4 %		1,3 %	
30 cm	6 mm	2,0 %	3,5		3,4		3,3	
100 cm	8 mm	0,8 %	2,3		2,2		2,1	
150 cm	10 mm	0,7 %	3,2		2,4		2,0	

Windbelasting Prep op basis van gemiddelde windsnelheid per windkracht							
lamelhoek	0	15	30	45	60	75	90
windvangend deel	100 %	97 %	87 %	70 %	50 %	25 %	3 %
Cindex	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	2,0
Cdim, Ceq, Q1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
windkracht	snelheid						
1	0,90	0,89	0,86				
2	2,45	6,6	6,4	5,7	4,6		
3	4,37	21,0	20,4	18,3	14,7	10,5	
4	6,93	52,8	51,2	45,9	37,0	26,4	14,0
5	9,46	98,3	95,4	85,5	68,8	49,2	26,1
6	12,14	162			113,4	81,0	43,0
7	15,50	240					63,8
8	19,00	397					
9	22,60	562					
10	26,50	772					

Waarin: Prep = Cdim . Ceq . Q1 . Cindex . Ctur . 0,5 . rho . v² . windvangend deel in %

Contra-gewicht in N per m2 lamel bij lameltype 1 (scharnier bovenzijde, gewicht onderaan)							
Lamelhoek	0	15	30	45	60	75	90
Armlengte wind	50 %	49 %	44 %	35 %	25 %	12,5 %	0 %
Armlengte gewicht	0 %	27 %	50 %	70 %	83 %	97 %	100 %
windkracht							
1		2					
2		12	5				
3		37	16	7			
4		93	40	19	8		
5				35	15	3	
6						6	

Waarin: Gewicht = Prep . (armlengte wind / armlengte contra-gewicht)

Bijlage 4 Relatieve concentratiewaarden SwitchString bij diverse wind- en schermconfiguraties

De relatieve concentratiewaarde K wordt als volgt berekend:

$$K = \text{som} (K_i \times T_i / V_i) / \text{som} (T_i / V_i)$$

$$\text{ofwel } K = \text{som} [K_i \times [(T_i / V_i) / \text{som} (T_i / V_i)]] \quad \text{ofwel } K = \text{som} [K_i \times C_i]$$

waarin:

K_i = relatieve concentratie-coëfficiënt per windkracht en lamelstand

T_i = periode per windkracht en lamelstand in s

V_i = windsnelheid per windkracht in m/s

i = windkracht, lamelstand in verschillende posities

C_i = procentueel aandeel van concentratiebijdrage T_i / V_i

Windsnelheid en periode per windkracht is te vinden in bijlage 1 Tijdsfrequentie-verdeling windsnelheid.

De lamelstandhoek per windkracht volgt uit het gekozen Lameltype dat gegeven is in hoofdstuk 2.

De concentratie-coëfficiënt K_i volgt uit bijlage 5 CFD simulaties, en is samengevat in paragraaf 4.3.

Windsituatie	Windgebied II Ruwheidsklasse 3 $Z(0)=0,03$ 10 m hoogte							
Schermsituatie	Schermhoogte 8 m Lameltype 1							
Meetsituatie	Afstand 40 m achter scherm meethoogte 1,5 m							
windkracht			< 1	2	3	4	5 >	totaal
Windsnelheid	v	m/s	0,9	2,5	5,0	6,7	9,4	
Periode	t	fractie	0,08	0,19	0,29	0,25	0,19	
Conc. bijdrage	t / v		0,088	0,076	0,058	0,037	0,020	0,28
C geen scherm	C gs		31 %	27 %	21 %	13 %	7 %	100 %
Lamelstandhoek		graden	0	30	45	60	90	
Conc. coëfficiënt	K_i		0,64	0,72	0,81	0,84	0,87	
K switchstring	$C_{gs} \times K_i$		20 %	19 %	17 %	11 %	6 %	73 %

windsituatie	Windgebied II Ruwheidsklasse 6 $Z(0)=0,50$ 10 m hoogte							
schermsituatie	Schermhoogte 8 m Lameltype 1							
Meetsituatie	Afstand 40 m achter scherm meethoogte 1,5 m							
windkracht			< 1	2	3	4	5 >	totaal
Windsnelheid	v	m/s	0,9	2,5	5,0	6,7	9,4	
Periode	t	fractie	0,12	0,28	0,29	0,21	0,10	
Conc. bijdrage	t / v		0,13	0,11	0,058	0,031	0,011	0,34
C geen scherm	Cgs		38 %	32 %	17 %	9 %	3 %	100 %
Lamelstandhoek		graden	0	30	45	60	90	
Conc. coëfficiënt	K_i		0,64	0,72	0,81	0,84	0,87	
K switchstring	$C_{gs} \times K_i$		24 %	23 %	14 %	8 %	3 %	72 %

windsituatie	Windgebied II Ruwheidsklasse 3 Z(0)=0,50 3 m hoogte							
scherm situatie	Schermhoogte 8 m Lameltype 1							
Meetsituatie	Afstand 40 m achter scherm meethoogte 1,5 m							
windkracht			< 1	2	3	4	5 >	totaal
Windsnelheid	v	m/s	0,9	2,5	5,0	6,7	9,4	
Periode	t	fractie	0,22	0,50	0,18	0,08	0,008	
Concentratie-deel	t / v		0,24	0,20	0,036	0,012	0,001	0,49
C geen scherm	Cgs		49 %	41 %	7 %	3 %	0 %	100 %
Lamelstandhoek		graden	0	30	45	60	90	
Conc. coefficient	Ki		0,64	0,72	0,81	0,84	0,87	
K switchstring	Cgs x Ki		31 %	30 %	6 %	2 %	0 %	69 %

windsituatie	Windgebied II Ruwheidsklasse 6 Z(0)=0,50 10 m hoogte							
scherm situatie	Schermhoogte 8 m Lameltype 2							
Meetsituatie	Afstand 40 m achter scherm meethoogte 1,5 m							
windkracht			< 1	2	3	4	5 >	totaal
Windsnelheid	v	m/s	0,9	2,5	5,0	6,7	9,4	
Periode	t	fractie	0,12	0,28	0,29	0,21	0,10	
Concentratie-deel	t / v		0,13	0,11	0,058	0,031	0,011	0,34
C geen scherm	Cgs		38 %	32 %	17 %	9 %	3 %	100 %
Lamelstandhoek		graden	0	< 5	30	45	90	
Conc. coefficient	Ki		0,64	0,64	0,72	0,81	0,84	
K switchstring	Cgs x Ki		24 %	21 %	12 %	7 %	2 %	66 %

windsituatie	Windgebied II Ruwheidsklasse 6 Z(0)=0,50 10 m hoogte							
scherm situatie	Schermhoogte 12 m Lameltype 2							
Meetsituatie	Afstand 40 m achter scherm meethoogte 1,5 m							
windkracht			< 1	2	3	4	5 >	totaal
Windsnelheid	v	m/s	0,9	2,5	5,0	6,7	9,4	
Periode	t	fractie	0,12	0,28	0,29	0,21	0,10	
Concentratie-deel	t / v		0,13	0,11	0,058	0,031	0,011	0,34
C geen scherm	Cgs		38 %	32 %	17 %	9 %	3 %	100 %
Lamelstandhoek		graden	0	< 5	30	45	90	
Conc. coefficient	Ki		0,46	0,46	0,61	0,77	0,87	
K switchstring	Cgs x Ki		17 %	15 %	10 %	7 %	3 %	52 %

windsituatie	Windgebied II Ruwheidsklasse 6 Z(0)=0,50 10 m hoogte							
scherm situatie	Schermhoogte 12 m Lameltype 3							
Meetsituatie	Afstand 40 m achter scherm meethoogte 1,5 m							
windkracht			< 1	2	3	4	5 >	totaal
Windsnelheid	v	m/s	0,9	2,5	5,0	6,7	9,4	
Periode	t	fractie	0,12	0,28	0,29	0,21	0,10	
Concentratie-deel	t / v		0,13	0,11	0,058	0,031	0,011	0,34
C geen scherm	Cgs		38 %	32 %	17 %	9 %	3 %	100 %
Lamelstandhoek		graden	0	< 5	< 5	< 5	90	
Conc. coefficient	Ki		0,46	0,46	0,46	0,46	0,87	
K switchstring	Cgs x Ki		17 %	15 %	8 %	4 %	3 %	47 %

Bijlage 5 Offerte Paaijmans balsportafschermingen bv

Bijlage 6 Resultaten CFD berekeningen aan stroming om en door SwitchString