

TNO INTERN

Kampweg 55
3769 DE Soesterberg
Postbus 23
3769 ZG Soesterberg

www.tno.nl

T +31 88 866 15 00
F +31 34 635 39 77

TNO-rapport

TNO 2021 R11571

**Hinder door zonreflecties - Vuistregels voor
plaatsing van zonnevelden langs snelwegen**

Datum	30 augustus 2021
Auteur(s)	M.L. van Emmerik, K.P.H.M. van der Sanden, J.W.A.M. Alferdinck
Aantal pagina's	48 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat: K. Vreugdenhil, I. Booijink, K. van de Langenberg
Projectnaam	RWS Update rekenmodel zonreflectie
Projectnummer	060.41740

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

Zonnepanelen langs snelwegen plaatsen is een optie om de hoeveelheid hernieuwbare energie die opgewekt wordt in Nederland te vergroten. Bij het plaatsen van zonnepanelen naast snelwegen is het van belang dat de zonnepanelen het verkeer niet verstoren. Eén van de manieren waarop dit kan gebeuren is doordat het verkeer de reflectie van de zon kan zien in het spiegelende oppervlak van de zonnepanelen. Als dat gebeurt, kan een bestuurder verblind worden met mogelijk gevaarlijke situaties als gevolg.

In dit rapport wordt op basis van een aantal generieke snelweglocaties en zonnepaneeloriëntaties onderzocht wanneer hinderlijke (zonlicht) reflecties optreden. Factoren die hierbij worden gevarieerd zijn rijrichting, wegoriëntatie, afstand van de panelen tot de weg, hoogteverschil tussen het oogpunt van de bestuurder en de panelen, maximumsnelheid, en de brekingsindex van de panelen. Deze combinaties resulteren in bijna 50.000 situaties die allemaal zijn doorgerekend. Dit gebeurt met de door TNO ontwikkelde beoordelingsmethode, het TNOdisab-model op basis van maskerende verblinding (disability glare). Hiermee wordt per situatie berekend hoeveel uur per jaar er zodanige hinder is te verwachten dat de rijtaak niet meer voldoende veilig is uit te voeren. In 64% van alle doorgerekende situaties treedt geen enkele hinder op. In 87% van alle berekende combinaties blijft de tijd waarin hinderlijke reflecties op een locatie optreden beperkt tot minder dan 5 uur per jaar. Zo blijkt onder andere dat er op snelwegen in noordelijke of zuidelijke richting nooit hinder is van zuidelijk georiënteerde zonnepanelen. Op de situaties met een noordelijke rijrichting is er zelfs nooit hinder, ongeacht de oriëntatie van de zonnepanelen langs de weg. Waar er wel hinder optreedt zien we -in vergelijkbare situaties- dat een lagere rijsnelheid, het gebruik van panelen met een lagere brekingsindex en (of) vergroting van de zijdelingse afstand tussen rijbaan en panelen voor minder reflectiehinder kan zorgen.

Deze resultaten zijn in de vorm van handzame vuistregels opgesteld waarmee een inschatting gemaakt kan worden van de hoeveelheid hinder voor vergelijkbare situaties. Ook is het mogelijk met deze vuistregels maatregelen te definiëren om de hinder terug te brengen tot (voor RWS) acceptabele proporties. Voorbeelden van deze eenvoudig naar de praktijk te vertalen vuistregels zijn:

Het vergroten van de zijdelingse afstand van de panelen tot het wegdek vermindert het aantal uren hinder per jaar drastisch. Bij een vergroting van de zijdelingse afstand van 3,8 tot 30 m neemt de hinder met ruim 80% af.

De doorgerekende situaties waarbij de zonnepanelen op 30 meter afstand van de weg en op maaiveldhoogte staan leveren zelden hinder op bij rijsnelheden van 100 km/u of minder.

De doorgerekende situaties waarbij de zonnepanelen op (minstens) 13,5 meter afstand van de weg en op maaiveldhoogte staan leveren zelden hinder op voor rijsnelheden van 80 km/u of minder.

Deze studie levert echter geen normatief kader om te bepalen welke hoeveelheid hinder door zonnepanelen nog acceptabel zou moeten zijn. Dit laten we aan RWS omdat hier meer factoren in het spel zijn dan de reflecties: ook de rijtaak, de verkeersdruk en de eigenschappen van een bestuurder spelen een rol. Wel kunnen we stellen dat het strengste criterium (wanneer zonnepanelen nooit hinder mogen opleveren voor weggebruikers) het nog steeds mogelijk maakt om panelen te plaatsen op tal van locaties. Vraag is of het realistisch is om een dermate streng 'nul-hinder-criterium' te gebruiken aangezien reflecties ook optreden rondom wateroppervlakken en gebouwen. Bovendien worden weggebruikers ook regelmatig verblind door direct (zon)licht. Hoewel dit onprettig is en soms ook leidt tot ongevallen geeft dit geen aanleiding tot een brede discussie om bepaalde wegen af te sluiten of autorijden te verbieden wanneer dergelijke reflecties optreden. Het is duidelijk dat de directe zon in veel situaties de overhand heeft als het gaat om hinder. TNO kan momenteel geen uitspraken doen over de directe relatie tussen het aantal uren hinder per jaar en de veiligheid op de weg, maar het is aannemelijk dat zonnepanelen in zeer veel situaties minder hinder zullen opleveren dan de directe zon.

Ook op technologisch vlak wordt gewerkt om de hinder van zonnepanelen te verminderen. Er worden zonnepanelen ontwikkeld waarbij het oppervlak niet glad is maar een bepaalde textuur heeft. Volgens de onderzoekers, kan afhankelijk van de soort textuur, de reflectiefactor met een factor 2 tot 10 verminderd worden (Yellowhair & Ho, 2015). Daarnaast zijn er fabrikanten die anti-reflectiefolies leveren die kunnen worden toegepast op bestaande zonnepanelen (retrofit). Omdat het TNOdisab-model ontwikkeld is om te rekenen met reflecties op gladde oppervlakken zouden we het model moeten uitbreiden met de specificaties van deze (half)matte materialen om in een eventuele vervolgstudie ook uitspraken te kunnen doen over deze panelen.

Het is te allen tijde belangrijk om te bedenken dat de vuistregels opgesteld zijn om snel iets over een groot aantal situaties te kunnen zeggen (en niet specifiek iets over een enkele situatie). Dit is makkelijk voor de gevallen waar geen twijfel ontstaat over de al dan niet acceptabele hoeveelheid hinder. Mocht echter na het doorlopen van de vuistregels blijken dat een voorgesteld zonneveld 'op het randje zit' wat betreft acceptabele hinder, is het aan te raden om de exacte situatie grondiger te analyseren.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
1.1	Achtergrond	5
1.2	Vraagstelling	5
2	Aanpak	7
2.1	Algemene aanpak	7
2.2	Model	7
2.3	Reflectie	11
2.4	Factoren en onderbouwing van keuzes	13
2.5	Locaties	17
2.6	Van uitkomsten naar vuistregels	21
3	Analyse	22
3.1	Algemene aanpak	22
3.2	Analyse per factor	22
3.3	Hinder, een blik op de uitersten	34
4	Vuistregels	37
4.1	Introductie	37
4.2	Korte vuistregels	37
5	Discussie en conclusies	43
5.1	Validiteit	43
5.2	Factoren die ook een rol spelen bij hinder	44
5.3	Normering	45
5.4	Eindconclusies	47
6	Referenties	48

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat (RWS) verkent de mogelijkheden van het plaatsen van zonnepanelen langs snelwegen in bermen en bij knooppunten. Eén van de aandachtspunten bij deze plaatsing is het effect dat zonlichtreflectie via deze panelen op de verkeersveiligheid kan hebben. TNO heeft in een eerdere opdracht voor RWS het TNOdisab-model ontwikkeld waarmee hinder door zonreflectie (van reflecterende objecten zoals geluidschermen) kan worden berekend (Alferdinck, de Goede & van Buuren, 2016). Het model berekent of de wegbelijning bij verblinding door zonreflecties nog op voldoende afstand zichtbaar is voor automobilisten. Omdat berekeningen met dit model erg arbeidsintensief zijn heeft RWS aan TNO gevraagd om, op basis van dit model, handzame vuistregels te ontwikkelen. Deze vuistregels kunnen o.a. zicht geven op situaties waarbij zonreflectie van zonnepanelen geen tot weinig invloed heeft op de verkeersveiligheid.

1.2 Vraagstelling

De wens van RWS is om, uitgaande van een beperkte set relevante factoren, te komen tot een aantal vuistregels waarmee RWS een veelheid van situaties snel kan karakteriseren in termen van reflectiehinder voor automobilisten. Hierdoor hoeft RWS bij de ontwikkeling van toekomstige zonnevelden alleen in zeer ingewikkelde situaties nog met het model te laten rekenen. Dit zorgt voor lagere maatschappelijke kosten en kortere doorlooptijden bij de besluitvorming rondom de realisatie van zonnevelden. TNO vertaalt de wens van de opdrachtgever in de volgende vraagstelling:

Is het mogelijk om een set handzame vuistregels te formuleren waarmee Rijkswaterstaat een inschatting kan maken van de hoeveelheid te verwachten zonreflectiehinder voor automobilisten als gevolg van langs een snelweg te plaatsen zonnevelden?

Deze vraagstelling bevat verschillende componenten. De set vuistregels moet handzaam zijn voor Rijkswaterstaat zodat zij, zonder raadpleging van TNO, makkelijk zonnevelden kunnen beoordelen op het gebied van zonreflecties. De vuistregels moeten daarom ook een bepaalde mate van accuraatheid waarborgen waarmee Rijkswaterstaat zich comfortabel voelt.

Ten tweede wordt er gesproken over de hoeveelheid reflectiehinder. Hierbij is vooral belangrijk hoe vaak en hoe lang reflecties zichtbaar zijn. In hoofdstuk 2.3 gaan we hier verder op in.

Het derde aspect is de focus op zonnevelden rondom snelwegen. Rijkswaterstaat is vooral geïnteresseerd in de reflecties van zonnepanelen op 'RWS-gronden' langs snelwegen. In overleg met hen hebben we daarom gekozen om de maximale afstand tussen de weg en de panelen in deze studie op 30 meter te stellen.

Ten slotte is de wens van Rijkswaterstaat dat TNO een normatief kader aanlevert op basis waarvan een grenswaarde op te stellen is die aangeeft hoeveel hinder nog acceptabel is in termen van veiligheid. TNO zal aangeven onder welke condities gevaarlijke situaties kunnen ontstaan. Hiermee leveren we een bijdrage aan de discussie over veiligheid die RWS op beleidsniveau (zelf) zal moeten voeren.

In dit rapport beschrijven we achtereenvolgens de algemene aanpak, het TNOdisab-model en de factoren die effect hebben op de hinder door zonnevelden (hoofdstuk 2); de gebruikte methode om tot de vuistregels te komen (hoofdstuk 3) en de uitwerking van de vuistregels aan de hand van concrete voorbeelden (hoofdstuk 4). In het laatste hoofdstuk (5) leveren we input voor de discussie over een normatief kader waarbij we de hinder door direct zonlicht als referentie meenemen.

2 Aanpak

2.1 Algemene aanpak

In het verleden zijn er meerdere onderzoeken uitgevoerd waarbij TNO voor specifieke situaties de hoeveelheid hinder door voorgestelde of reeds aangelegde zonnevelden heeft bepaald (Alferdinck, 2015; Alferdinck, Toet & van Buuren, 2015). Daarnaast is er bij de ontwikkeling van het TNOdisab-model (Alferdinck, de Goede & van Buuren, 2016) een aantal generieke situaties onderzocht.

Het TNOdisab-model is tot nog toe vooral gebruikt om in *specifieke* situaties de (hinderlijke) reflecties te bepalen. Gegeven een aantal kenmerken van de situatie berekent het model dan de te verwachten hinderlijke reflecties in uren per jaar. Het variëren met kenmerken in een dergelijke benadering is echter erg arbeidsintensief en dit maakt het doen van algemene uitspraken over reflecties lastig. Daarom is hier gekozen voor een andere aanpak, namelijk het doorrekenen van een grote hoeveelheid *generieke* situaties. Door de kenmerken van een situatie stapsgewijs te wijzigen ontstaan steeds kleine verschillen tussen situaties. Hierdoor is voor ieder veranderend kenmerk achteraf een gemiddeld effect vast te stellen op de hoeveelheid hinderlijke reflecties.

Met deze benadering kunnen we na het doorrekenen van alle varianten van een situatie de data bekijken en daar patronen uit halen die als basis dienen voor vuistregels. We beoordelen of deze vuistregels ook logisch standhouden en of ze 'uitlegbaar' zijn.

Het grote aantal generieke situaties kan vervolgens gebruikt worden om de vergelijking te maken met een concrete situatie waar plannen zijn voor het plaatsen van zonnevelden. De vuistregels maken een (relatief) eenvoudige en snelle beoordeling mogelijk.

2.2 Model

Met de beoordelingsmethode voor lichthinder door zonreflectie op basis van disability glare (maskerende verblinding) kan worden uitgerekend of er hinderlijke zonreflecties voor weggebruikers kunnen optreden door een reflecterend object dat zich in de buurt van de weg bevindt. Voor een volledige beschrijving van dit TNOdisab-model verwijzen wij naar Alferdinck, de Goede & van Buuren (2016).

De beoordelingsmethode voor lichthinder door zonreflectie hangt af van een groot aantal factoren. De hoeveelheid hinder hangt af van de exacte locatie van zon, bestuurder en zonnepaneel, maar ook de leeftijd van de bestuurder, reflectie eigenschappen van de wegbelijning, etc. In het algemeen zijn de factoren onder te brengen zijn in één van volgende vier categorieën:

1. De geometrie van de wegsituatie
 - Bijvoorbeeld: De exacte posities van de zonnepanelen en bestuurder
 - Bijvoorbeeld: De rijrichting van de bestuurder
 - Bijvoorbeeld: De oriëntatie van het zonnepaneel

2. De reflectie-eigenschappen van de zonnepanelen en de weg(belijning)
 - Bijvoorbeeld: De brekingsindex van het paneel
 - Bijvoorbeeld: De invalshoek van de zon op het paneel
3. De waarnemingseigenschappen van de weggebruiker
 - Bijvoorbeeld: De leeftijd van de weggebruiker
 - Bijvoorbeeld: De oogkleur van de weggebruiker
 - Bijvoorbeeld: De reactietijd van de weggebruiker
4. Omgevingsomstandigheden
 - Bijvoorbeeld: Bewolking

In het huidige onderzoek variëren we alleen de factoren die te maken hebben met de geometrie van de wegsituatie (plaatsing van de panelen) en de reflectie-eigenschappen van de zonnepanelen. Voor de exacte factoren verwijzen wij naar sectie 2.4.

Voor de waarnemingseigenschappen van de bestuurder en omgevingsomstandigheden kiezen we worst-case waarden.

Standaard waarnemingseigenschappen weggebruiker
Ooghoogte van 1,1 m boven wegdek
Leeftijd van 60 jaar en een lichte oogkleur (worst case voor disability glare)
Voorruit begrenzing van: - 16 graden naar boven - 13 graden naar onder - 27 graden naar links - 53 graden naar rechts

Standaard omgevingsomstandigheden
Zonnepanelen staan gegroepeerd in rijen (tafels) waarbij (over de gehele lengte van de tafel) 4 panelen in landscape boven elkaar liggen
Bewolkingskans is 2 op 3 (dus één derde van de daglicht-tijd zichtbare zonneschijn)
Breedte van wegbelijning 15 cm (worst case)
Wegbelijning reflecteert 40% van het opvallende licht
Wegdek reflecteert 15% van het opvallende licht

2.2.1 Benadering van zonnepanelen in het model

Het TNOdisab-model berekent de duur van reflectiehinder op jaarbasis. Het doet dit gebaseerd op de relatieve positie van de bestuurder ten opzichte van de panelen. De exacte hoek waaronder de bestuurder de panelen waarneemt speelt hierbij een belangrijke rol. Om de arbeidsintensiviteit van het modelleren en de benodigde computerkracht te verminderen is in eerdere rapporten het gehele zonneveld benaderd als één aaneengesloten spiegelend oppervlak dat gelijk ligt met de onderrand van de zonnepanelen.



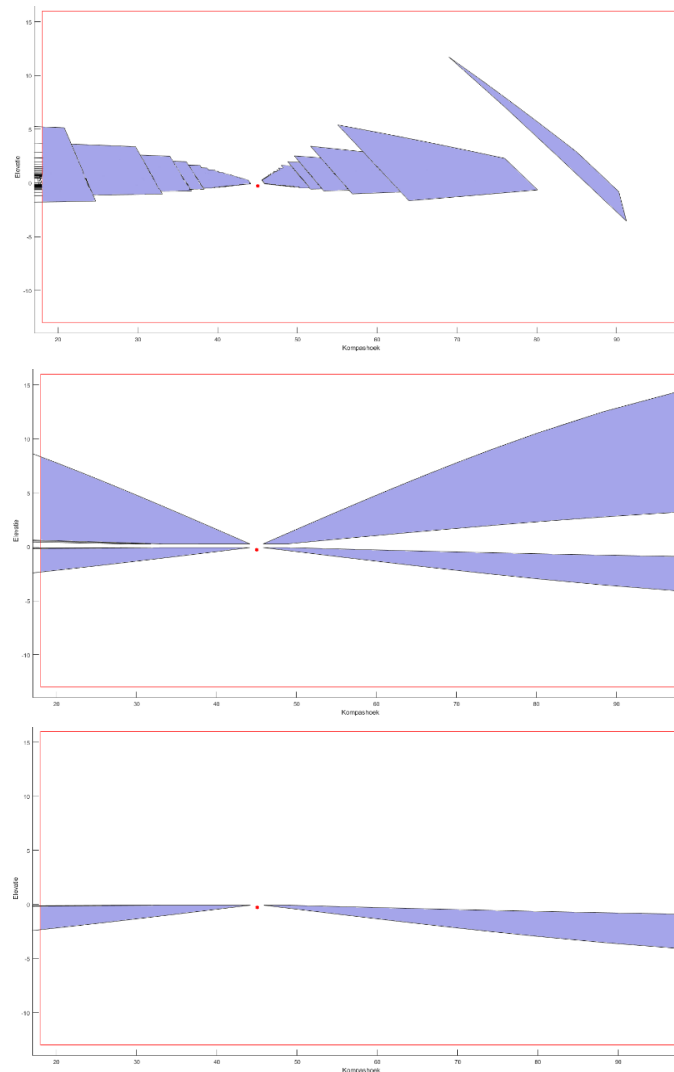
Figuur 2-1 Een illustratie van de overschatting van het reflecterend oppervlak. De groene delen worden volledig correct benaderd. De rode delen reflecteren in realiteit niet, maar worden door het model als reflecterend oppervlak meegerekend. Merk op dat deze foto vanaf een hoger punt is genomen en daardoor meer overschatting zichtbaar is dan voor een normale personenauto.

Door deze benadering hoeft niet ieder zonnepaneel individueel gemodelleerd te worden en dit maakt het modelleren- en rekenwerk minder complex. Deze vereenvoudiging leidt in sommige situaties echter ook tot onder- of overschatting van de reflecties door twee bijverschijnselen:

1. Omdat we in deze studie de bestuurder op verschillende hoogtes plaatsen ten opzichte van het zonneveld bleek het modelleren van de zonnepanelen als één groot vlak een vertekening op te leveren wanneer een bestuurder relatief laag zit ten opzichte van de zonnepanelen. Vanuit deze positie bekeken valt het onderste deel van een zonnepaneel onder, en het bovenste deel van het paneel boven het oogpunt van de bestuurder. In de benadering van de panelen als één vlak overschatten we dan de reflecties aan de onderzijde terwijl we de reflecties aan de bovenzijde missen. Hierdoor onderschatten we in het standaard TNOdisab-model de reflecties wanneer de bestuurder een laag gezichtspunt heeft. Bij een hoger gezichtspunt speelt dit geen rol omdat het zonneveld dan in zijn geheel lager ligt dan het oogpunt van de automobilist;

2. In het standaard TNOdisab-model overschatten we de hoeveelheid hinder wanneer er plekken zijn binnen het zonneveld waar de bestuurder in werkelijkheid de (niet-reflecterende) grond zou kunnen zien of tussen de panelen door zou kijken. Deze worden in de benadering van zonnepanelen als één groot vlak meegeteld in het spiegelend oppervlak. In praktijk is de overschatting klein, aangezien een zonneveld op enige afstand zeer snel als geheel aaneengesloten vlak gezien wordt (zie ook Figuur 2-1).

Voor beide fouten wordt in deze studie gecorrigeerd. De onderschatting van de hinder door hooggelegen zonnepanelen ten opzichte van de bestuurder wordt zo goed als geëlimineerd door het simuleren van een tweede reflecterend vlak ter hoogte van de bovenrand van de zonnepanelen (zie Figuur 2-2). Het eerste reflecterende vlak aan de onderrand van de zonnepanelen behouden wij ook, net als in het standaard TNOdisab-model.



Figuur 2-2 Een illustratie van de zichtbare delen van het zonneveld door de voorruit van de bestuurder. Bovenaan de daadwerkelijke zonnepanelen. In het midden de benadering met twee vlakken aan de boven- en onderrand. Onderaan de oorspronkelijke benadering met één vlak aan de onderrand.

De tweede fout leidt tot een overschatting van hinder door het meenemen van gebieden die niet reflecteren. Zoals genoemd is bij nadere inspectie gebleken dat dit effect doorgaans zeer klein is. Er blijkt echter één type situatie waarin de overschatting een groter effect heeft. Deze doet zich voor wanneer:

- er sprake is van een rechte weg;
- er sprake is van zonnepanelen waarvan het reflecterende vlak parallel is aan de weg, en
- het zonneveld op minder dan 10 meter zijdelingse afstand van de weg ligt.

Voor deze situaties passen wij een aanvullende correctiefactor van 0,57 toe. Dat wil zeggen dat we de (met behulp van de benadering) uitgerekende uren hinder per jaar vermenigvuldigen met 0,57 om zo de overschatting te corrigeren. Deze correctiefactor is uitgerekend in een kleine validatiestudie waarin de hinder door zonnevelden bestaande uit apart gemodelleerde rijen met panelen werd vergeleken met de huidige benadering waarin de panelen als één groot vlak worden bekeken.

2.3 Reflectie

Op basis van het TNOdisab-model maken we in dit rapport een onderscheid tussen zichtbare reflecties, verblindende reflecties en hinderlijke reflecties:

- Zichtbare reflecties zijn alle reflecties die zichtbaar zijn voor weggebruikers, onafhankelijk van hoe lang ze zichtbaar zijn of hoe fel ze zijn;
- Verblindende reflecties zijn zichtbare reflecties die zo fel zijn dat de bestuurder de wegmarkering niet meer waar kan nemen, ongeacht hoelang de verblindende duurt;
- Hinderlijke reflecties zijn verblindende reflecties die zo lang duren dat de rijtaak van de bestuurder in gevaar kan komen. Voor de eenvoud hanteren we hiervoor een grenswaarde van 1,8 seconden (ongeacht de rijsnelheid).

Het TNOdisab-model berekent of reflecties zichtbaar zijn op basis van de posities en oriëntaties van de bestuurder, de zon en de panelen. Vervolgens wordt berekend of deze reflecties een bestuurder dusdanig verblinden dat deze de wegbelijning op stopafstand niet meer kan onderscheiden van het wegdek. De stopafstand is de afstand die de weggebruiker nodig heeft om op een veilige manier tot stilstand te komen en wordt berekend met formule (1).

$$\text{stopafstand} = 1,5 \cdot \text{rijsnelheid} + \frac{\text{rijsnelheid}^2}{7} \quad (1)$$

Hierbij is de stopafstand in meters en de rijsnelheid in meter per seconde. We gaan ervan uit dat bestuurders een reactiesnelheid hebben van 1,5 s hebben, remmen met een gemiddelde remvertraging van 3,5 m/s² en met de maximum toegestane snelheid rijden. De formule voor de stopafstand wordt onder andere gebruikt bij het ontwerpen van tunnelverlichting (Alferdinck, de Goede & van Buuren, 2016; NSVV, 2003).

Voor het beoordelen van verblindende reflecties zijn twee aspecten van belang: de verblindingsduur en de verblindingsfrequentie:

- 1 Hoelang duurt de verblinding bij het passeren van een zonneveld? Dit betreft de hinder die een individuele automobilist ervaart bij een passage op een bepaald tijdstip;
- 2 Hoe vaak treedt de verblinding op? Dit betreft het aantal uren aan hinderlijke reflecties dat een zonneveld op jaarbasis zal geven.

Uit experimenteel onderzoek blijkt dat automobilisten maximaal tussen 1,4 en 1,8 s lang geen zicht op de weg accepteren, afhankelijk van de rijdsnelheid, de breedte van de stroken en ander verkeer. In de huidige studie gaan we er daarom van uit dat er bij een verblindingsduur die korter is dan 1,8 s geen problemen ontstaan bij het uitvoeren van de rijtaak (Alferdinck & Martens, 2009) en daarom spreken wij niet van hinder. Als verblindende reflecties langer dan 1,8 seconden zichtbaar zijn kan de bestuurder de rijtaak minder goed uitvoeren en spreken wij binnen deze studie van *hinderlijke* reflecties.

De hinderduur heeft voornamelijk te maken met het soort weg waarover de bestuurder rijdt en de lengte van het zonneveld. Binnen de tijdspanne van maximaal enkele tientallen seconden (de normale passagetijd van een zonneveld van een paar honderd meters) is de verplaatsing van de zon aan de hemel niet waarneembaar. Ook is de hinderduur langer op een rechte weg dan in een bocht omdat in een bocht de kijkrichting van de bestuurder snel verandert. In een bocht is het hebben van goed zicht op de weg echter belangrijker dan op een rechte weg.

Waar de hinderduur voor een automobilist tijdens het passeren van een specifieke weg met zonneveld is te vatten in termen van "*seconden hinder per passage*" hebben we daarnaast ook een maat die weergeeft *hoe vaak* hinderlijke reflecties voorkomen. Dat meten we in "*uren hinder per jaar*"¹. Een groter aantal uren hinder per jaar geeft aan dat een automobilist meer kans heeft om last te krijgen van een zonreflectie als hij het betreffende zonneveld passeert.

Beide maten samen zeggen iets over de hinder die een automobilist zal ondervinden. Immers als een verblindende reflectie de helft van het jaar optreedt, maar voor een bestuurder in een bocht altijd één seconde te zien zou zijn, levert dat waarschijnlijk geen problemen op. Andersom is denkbaar dat een reflectie maar gedurende één week in het jaar optreedt, maar dat deze een automobilist wel tien seconden lang verblindt. Een dergelijke configuratie leidt waarschijnlijk eerder tot gevaarlijke situaties.

¹ Het theoretisch mogelijke aantal *uren hinder per jaar* wordt gedeeld door drie om de kans op onbewolkte hemel in Nederland mee te nemen (1/3).

2.4 Factoren en onderbouwing van keuzes

Aangezien het niet mogelijk of zinvol is om alle mogelijke factoren te variëren om vuistregels op te stellen, hebben wij de factoren teruggebracht naar de onderstaande tien factoren en waarden (Tabel 2-1). Hiermee zijn we in staat om een veelheid van situaties te voorspellen.

Om de vuistregels te bepalen zijn alle combinaties uit de tabel doorgerekend tot situaties (zie kader).

Elke situatie ontstaat door voor elk van de factoren een waarde te kiezen. Door eerst te kiezen voor een locatie en vervolgens de tabel stap voor stap door te lopen waarbij steeds één waarde per factor (rij) gekozen wordt ontstaat als eerste situatie bijvoorbeeld *een rechte weg naar het noorden (0 graden) met zuidelijk georiënteerde panelen waarvan de onderkant op 0,5 meter onder ooghoogte ligt. De panelen liggen op een zijdelingse afstand van 3,8 meter en hebben een brekingsindex van 1,25. De weg heeft een maximumsnelheid van 100 km/u en tussen de noord en zuid rijbaan ligt een middenberm van 25 meter breed.*

Door een andere keuze te maken voor de breedte van de middenberm (80 meter breed in plaats van 25) ontstaat weer een nieuwe situatie, en zo kan ook de maximumsnelheid, of de brekingsindex aangepast worden. Zo worden stapsgewijs alle factoren betrokken en ontstaan alle variaties:

Locatie (wegtype)	Recht	...	...	...	...	...	...	...
Paneel oriëntatie	Zuid	...	...	...	...	...	...	...
Wegoriëntatie	Noord	...	...	...	...	...	...	...
Hoogteverschil	0,5	...	...	...	...	...	...	...
Zijdelingse afstand	3,8	...	...	...	...	...	...	...
Brekingsindex	1,25	1,25	1,25	1,25	1,5	1,5	1,5	1,5
Maximumsnelheid	100	100	130	130	100	100	130	130
Middenberm	25	80	25	80	25	80	25	80

De factoren en de verschillende waarden worden onder de tabel verder toegelicht. In paragraaf 2.5 werken we bovendien een aantal schematische situaties uit. In totaal is de hinder op 49.920 verschillende situaties doorgerekend waarvoor bijna 500.000 meetpunten zijn berekend.

Tabel 2-1 Alle combinaties van de in deze studie geselecteerde factoren.

Locatie	Rechte weg	Aansluiting	Klaverblad	Zonnewal
Oriëntatie zonnepanelen	Zuidelijk, Oostelijk, Westelijk, Zuidwestelijk			Rechtop, Hellend
Oriëntatie weg	Kompashoeken in 16 stapjes van 22.5° van 0 tot en met 337.5°			
Posities	20 meetpunten			
Hoogteverschil tussen ogen en zonneveld	Onderkant panelen 0,5 meter onder ooghoogte Onderkant panelen 4,0 meter onder ooghoogte Onderkant panelen 7,5 meter onder ooghoogte			

Locatie	Rechte weg	Aansluiting	Klaverblad	Zonnewal
<i>Zijdelingse afstand tussen einde wegdek en start zonneveld</i>	3,8m, 6,5m, 10,0m, 13,5m, 30,0m			
<i>Brekingindex</i> (maat voor hoeveel licht wordt gereflecteerd)	1,25, 1,5			
<i>Maximumsnelheid</i>	100 km/u, 130 km/u	60 km/u, 80 km/u, 100 km/u	60 km/u, 80 km/u, 100 km/u	100 km/u, 130 km/u
<i>Hoogte zonnewal</i>	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.	4 m, 6 m
<i>Breedte van de middenberm</i>	25 m, 80 m	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.

2.4.1 Fysieke locatie (vier typen wegen + zonnewal)

We hebben gekozen voor vier verschillende locaties: een rechte weg met middenberm (van verschillende breedtes), een aansluiting op een snelweg, een klaverbladkruising en een rechte weg met een zonnewal (zie ook 2.4.9) in plaats van een zonneveld. Deze vier locaties zijn voornamelijk gekozen omdat deze zeer veel voorkomen in het snelwegennetwerk. Vuistregels op basis van deze locaties zorgen er dus voor dat de resultaten representatief zijn voor de meest voorkomende zonnevelden zoals die verwacht worden langs de snelweg.



Daarnaast zijn een groot aantal locaties die niet gemodelleerd zijn vaak wel gedeeltelijk aanwezig in de gemodelleerde locaties. Bijvoorbeeld een snelweg die een bocht maakt zonder afslagen is te vergelijken met de buitenbocht in een klaverblad; een situatie waar twee snelwegen elkaar kruisen is te vergelijken met twee rechte wegen met verschillende hoogtes². Zo zijn er vele andere locaties die te vergelijken zijn met (een gedeelte van) één van deze vier locaties.

2.4.2 Oriëntatie van de zonnepanelen

Zonnepanelen kunnen op meerdere manieren geplaatst worden. Zo kunnen ze relatief vlak in een veld worden gelegd, of juist (nagenoeg) verticaal tegen een geluidswal (zonnewal) worden bevestigd. In dit rapport kijken wij naar de vier meest voorkomende plaatsingen van zonnepanelen in zonnevelden (zuidelijk, westelijk, oostelijk of zuidwestelijk georiënteerde zonnepanelen) en naar twee typen zonnewallen (rechttopstaand of hellend).



2.4.3 Oriëntatie van de weg (kompashoek)

Voor de reflectiehinder maakt het uit of een weg van noord naar zuid loopt of van oost naar west. De oriëntatie van de weg bepaalt namelijk de relatieve hoek van de weg met de zon aan de hemel. Aangezien dit een cruciale factor is in de berekening hebben we ervoor gekozen zestien mogelijke oriëntaties door te rekenen.



² Voor wat betreft de tijdstippen waarop -en de richtingen waaruit- hinderlijke reflecties waarneembaar zijn

Hiermee bestrijken we de volledige kompasroos (van 360°) in stappen van 22,5°. Met dit aantal krijgen we een acceptabele resolutie en missen we geen grote reflectiegebieden. Het is tegelijkertijd een mooi compromis voor het doorrekenen van alle 360 mogelijke oriëntaties wat een te zwaar beroep op de computerkracht zou doen.

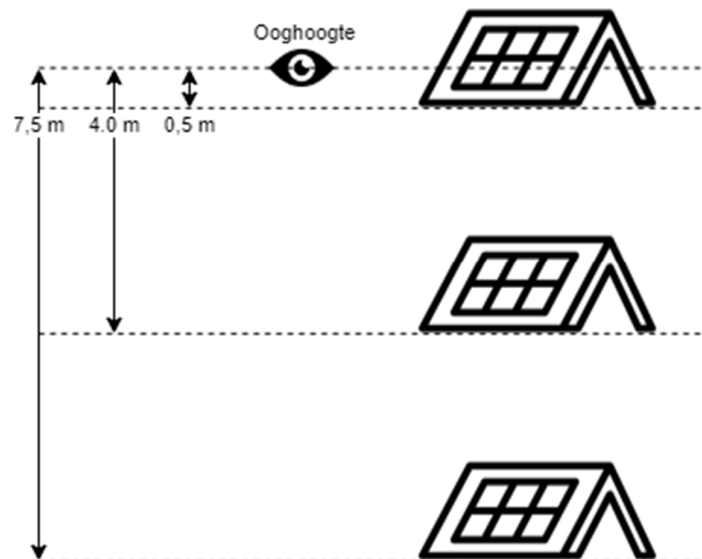
2.4.4 *Positie van de automobilist*

Een automobilist staat niet stil op een snelweg. We berekenen daarom de hinder tijdens de passage van een zonneveld op een aantal opeenvolgende posities van de automobilist. Zo krijgen we een beeld van de hinderduur van reflecties tijdens het rijden. Uitdagend is dat we een aantal complexe locaties hebben zoals de aansluiting en het klaverblad. Deze bevatten scherpe bochten waar de kijkrichting snel verandert. Om voldoende informatie te krijgen over deze snel veranderende situatie hebben wij gekozen om twintig posities per locatie te modelleren. De exacte posities voor iedere locatie zijn te zien in sectie 2.5.1.



2.4.5 *Hoogteverschil tussen automobilist en zonnepanelen*

We modelleren de locatie van de zonnepanelen op drie verschillende kijkhoogtes. De kijkhoogte is het verschil tussen de ooghoogte van de automobilist en de onderkant van de zonnepanelen.



Figuur 2-3 Schematische weergave van de verschillende kijkhoogtes.

De keuze voor de drie kijkhoogtes maakt het mogelijk om de reflectiehinder te vergelijken die een automobilist ervaart van zonnepanelen die:

- op maaiveldhoogte staan (onderkant panelen 0,5m onder ooghoogte);
- halverwege een af- of oplopend talud staan (onderkant panelen 4,0m onder ooghoogte);

- worden bekeken vanaf de bovenkant van een viaduct (onderkant panelen 7,5m onder ooghoogte).



2.4.6 *Afstand tussen wegdek en zonnepanelen (zijdelingse afstand)*

We hebben in overleg met RWS gekozen voor vijf verschillende afstanden vanaf het wegdek tot de zonnepanelen (3,8m, 6,5m, 10,0m, 13,5m, en 30,0m). Bovendien kunnen we verschillen in hinder benaderen door waarden voor de tussenliggende afstanden te interpoleren.

2.4.7 *Brekingsindex zonnepanelen*

De reflectie-eigenschappen van de zonnepanelen kunnen gevarieerd worden door bijvoorbeeld een antireflectie-coating aan te brengen. Via raadpleging van de TNO expertisegroep "Photovoltaic Modules and Applications" en op basis van voorgaande rapportages (Alferdinck, 2015; Alferdinck, de Goede & van Buuren, 2016) is vastgesteld dat de huidige antireflectie-coatings voor zonnepanelen maximaal een effectieve brekingsindex opleveren van 1,25. Dit is lager dan een brekingsindex van 1,5 wat gebruikelijk is voor glazen panelen zonder coating. Overigens hebben de meeste zonnepanelen die op dit moment worden geïnstalleerd nog een afdekplaat van glas zonder dergelijke coating (Burgers, 2021 persoonlijke communicatie).



2.4.8 *Maximumsnelheid*

Er worden vier verschillende maximumsnelheden meegenomen (in km/uur): 60, 80 en 100 voor locaties met bochten, 100 en 130³ voor locaties zonder bochten.

In vergelijking met een hogere snelheid zorgt een lagere maximumsnelheid voor een kortere stopafstand en dus hoeft een bestuurder minder ver voor zich uit te kijken. Door de lagere snelheid duurt de blootstelling aan reflecties daarentegen weer iets langer.



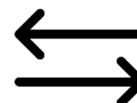
2.4.9 *Hoogte zonnewal (alleen voor zonnewal)*

Als aanvulling op de wegen bekijken we ook een zogenaamde zonnewal. Dit is een locatie waarbij bijvoorbeeld een geluidsscherm is bedekt met zonnepanelen. We rekenen twee hellingshoeken door voor een dergelijke zonnewal: 90 of 70 graden. De oriëntatie van een zonnewal is altijd parallel aan de richting van de weg. Verder hebben we gekozen voor twee verschillende hoogtes voor de zonnewal, namelijk 4m en 6m hoog. Het verschil tussen deze twee varianten is zodanig groot dat het effect van de hoogte duidelijk naar voren moet komen.



2.4.10 *Breedte middenberm (alleen voor rechte weg)*

We hebben gekozen voor twee verschillende afstanden voor de middenberm van een rechte weg. Hierbij wordt uitgegaan van een kleinere middenberm (25m) en een grotere middenberm (80 m).



³ In Nederland geldt de maximumsnelheid van 130 voornamelijk in de avond en nacht (tussen 19:00 en 06:00). Voor de berekeningen in deze studie gaan we desondanks uit van de daglichtsituatie.

2.5 Locaties

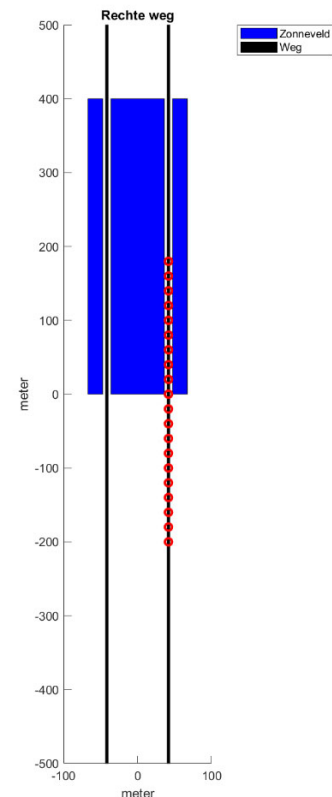
2.5.1 Bovenaanzicht locaties

Om een beter beeld te geven van de verschillende locaties is hieronder voor iedere locatie één bovenaanzicht weergegeven. Houd er dus rekening mee dat de exacte locatie van de zonnevelden en wegen nog afhangt van de keuze van de overige factoren. Alle wegen zijn 3,5 m breed en de bestuurder bevindt zich in het midden van de weg.

2.5.1.1 Rechte weg

De rechte weg loopt exact parallel aan het zonneveld. Het zonneveld is 400 meter lang in de rijrichting en 20 meter breed in beide buitenbermen. Er is gekozen voor een 400 meter lang zonneveld omdat dit zo ver voor de bestuurder uit zal strekken dat het vrijwel tot aan de horizon zal reiken. Deze lengte is bovendien onder alle omstandigheden ruim voldoende om een overschrijding van de grenswaarde van 1,8 seconde hinderduur aan te tonen. Het modelleren van een langer zonneveld heeft geen toegevoegde waarde omdat een dergelijk veld (op jaarbasis) niet vaker hinder zal genereren. De middenberm (hier 80 meter breed) wordt compleet opgevuld met zonnepanelen⁴ voor zover dat mogelijk is, rekening houdend met de zijdelingse afstand tussen panelen en wegdek.

Bij de rechte weg worden alle 20 posities op de rechter weghelft geplaatst. Aangezien we elke situatie vanuit 16 verschillende kompasrichtingen bekijken (waarbij de andere kenmerken zoals stand van de zonnepanelen, afstand tot de weg, etc. gelijk blijven) vinden we de reflectie voor de linker weghelft (automatisch) via de rotatie met 180 graden. De 20 posities zijn geplaatst in het deel van de weg net voor en net na (200 m) de eerste zonnepanelen. In eerder onderzoek is gevonden dat dit het meest kritieke gebied is (Alferdinck & van Buuren, 2016).



Figuur 2-4 Bovenaanzicht van de rechte weg.

De rode punten geven de locaties weer waarop de hinderlijke reflectie wordt doorgerekend.

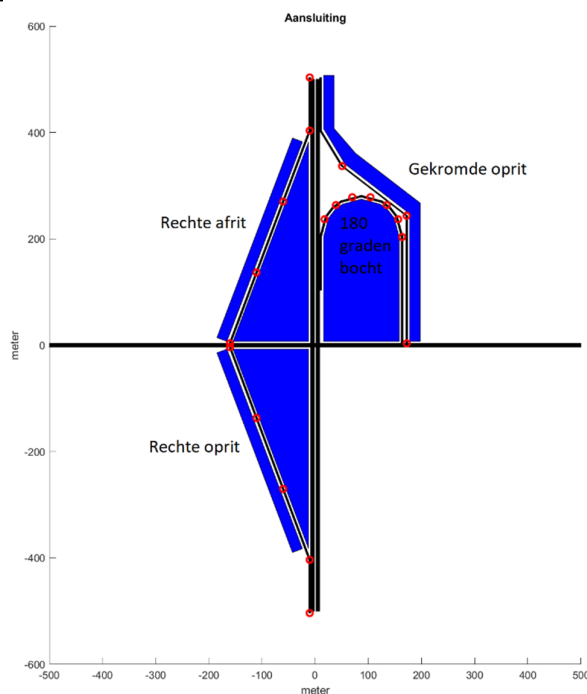
2.5.1.2 Aansluiting

De aansluiting is een typische aansluiting op een snelweg. Hierbij is er een diagonale op- en afrit aan één kant van de weg en een tweede op- en afrit met scherpere bochten aan de andere kant van de snelweg. Alle posities die worden doorgerekend op de aansluiting liggen op de op- en afritten.

⁴ De 80 meter wordt opgevuld door een zonneveld met een breedte van minimaal 20 meter en maximaal 74 meter (afhankelijk van de zijdelingse afstand tussen de weg en de panelen zoals beschreven in paragraaf 2.4.6)

De rechte wegen worden opzettelijk niet doorgerekend omdat deze niet wezenlijk zullen verschillen van de rechte weg uit 2.5.1.1.

De eerste en laatste posities per op- of afrit liggen respectievelijk aan het begin en het einde van de op- of afrit. Een groot deel van de 20 posities wordt gebruikt om de scherpe bocht door te rekenen, aangezien reflecties hier snel kunnen variëren. Hierdoor zijn er relatief weinig meetpunten over voor de rechte op- en afritten.⁵

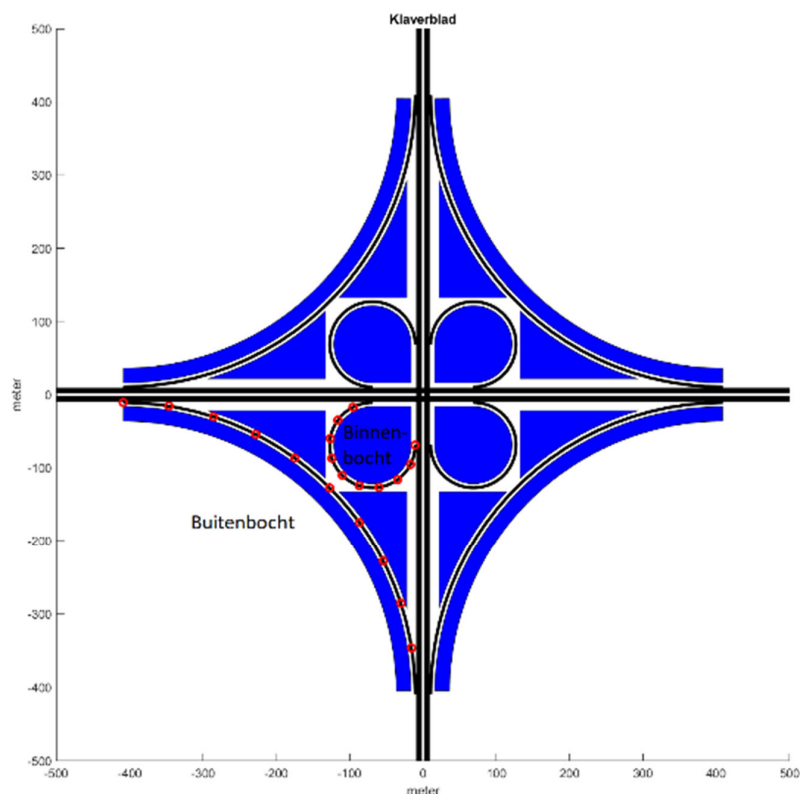


Figuur 2-5 Bovenaanzicht van de aansluiting. De rode punten geven de locaties weer waarop de hinderlijke reflectie wordt doorgerekend. Er worden vier passages binnen de aansluiting doorgerekend: de rechte af- en oprit, de gekromde oprit en de 180 graden bocht.

⁵ Het geringe aantal punten zorgt niet voor problemen bij het berekenen hoe vaak er hinder op zal treden per jaar. Het kan echter wel voor een vertekend beeld zorgen bij het berekenen van de duur van de hinder.

2.5.1.3 Klaverblad

Het klaverblad is een vereenvoudigd en (rotatie)symmetrisch klaverblad. Daarom kunnen we omwille van efficiëntie volstaan met het doorrekenen van één kwadrant voor de posities van de bestuurder. De zonnepanelen worden wel over het gehele klaverblad doorgerekend. In deze studie hebben we alleen voor het blad linksonder twintig posities doorgerekend. De twintig posities zijn evenredig verdeeld over de binnen- en buitenbocht.



Figuur 2-6 Bovenanzicht van het klaverblad. De rode punten geven de locaties weer waarop de hinderlijke reflectie wordt doorgerekend. Er worden twee passages doorgerekend voor het klaverblad, de binnen- en de buitenbocht.

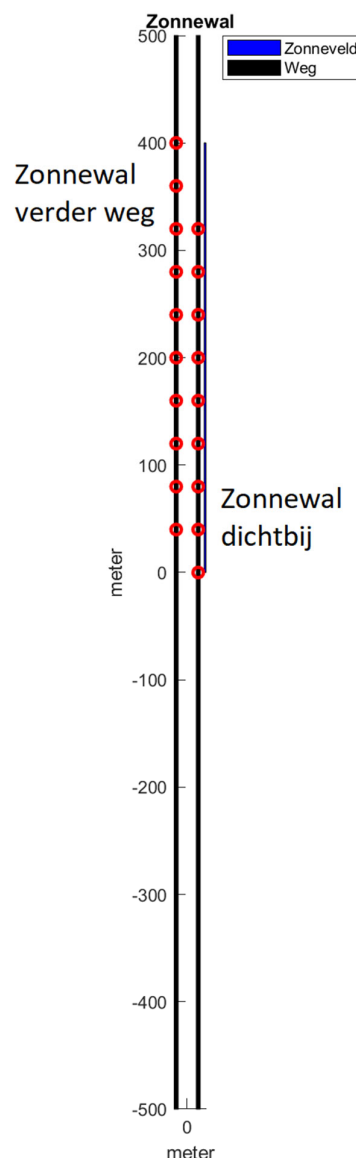
2.5.1.4 Zonnewal

Omdat de zonnewal langs een rechte weg ligt staan de panelen altijd richting de weg geplaatst.

We variëren de kompasshoek van de panelen dus niet onafhankelijk van de richting van de weg. Hierom beschouwen we de zonnewal als een aparte locatie. De breedte van de middenberm is in deze situatie altijd 25 m en er wordt geen zonneveld in de middenberm geplaatst. De posities van de bestuurder “verder weg” van de zonnewal bevinden zich dus 28,5 m verder van de zonnewal dan de posities “dichtbij”.

Voor de zonnewal gaan we uit van twee varianten, een rechtopstaande en iets hellende zonnewal (met helling 90 of 70 graden) die parallel aan de weg loopt. Een overzicht van de gebruikte oriëntaties van de zonnepanelen met de bijbehorende kompasshoek en hellingshoek is te vinden in Tabel 2-2.

Figuur 2-7 Boven-aanzicht van de zonnewal. De rode punten geven de locaties weer waarop de hinderlijke reflectie wordt doorgerekend. Er worden twee passages doorgerekend, de ene op de weghelft dichtbij de zonnewal en de andere passage verder weg van de zonnewal.



Tabel 2-2 Overzicht van de oriëntaties van de zonnepanelen en de bijbehorende kompasshoek en helling. Helling is de hoek van het oppervlak van het paneel met het (horizontale) grondvlak.

Oriëntatie	Kompasshoek (graden)	Helling (graden)
Zuid	180	35
Oost	90	10
West	270	10
Zuidwest	220	10
Zonnewal-rechtop	Afhankelijk van wegoriëntatie	90
Zonnewal-gekanteld	Afhankelijk van wegoriëntatie	70

2.5.2 *Combinaties van zonnepanelen*

Het kan voorkomen dat in één zonneveld meerdere oriëntaties van panelen voorkomen. Eén gebruikelijke variant is bijvoorbeeld een zonneveld waarbij oostelijk en westelijk georiënteerde panelen elkaar afwisselen. De panelen in een dergelijke opstelling geven op verschillende tijdstippen hinder. Opgeteld levert dit dus een relatief hoge hinder op jaarbasis op. Per passage is de hinderduur voor een individuele bestuurder echter niet hoger dan bij zonnevelden waarin de panelen allemaal dezelfde oriëntatie hebben.

2.6 **Van uitkomsten naar vuistregels**

Iedere combinatie van de factoren die in het model wordt gestopt levert een tijdstip (dag van het jaar, uur van de dag) op (met een temporele resolutie van 6 minuten⁶) waarvoor bepaald is of reflecties zichtbaar zijn en of de wegbelijning hierdoor onzichtbaar is voor de bestuurder. Hiermee is de verwachte duur van de hinder (in uren per jaar) uit te rekenen voor elke passage van een zonneveld. Daarnaast is ook de gemiddelde duur van de hinderlijke reflecties berekend per individuele passage (in seconden).

Met de vergaarde data worden vuistregels opgesteld door alle situaties eerst te splitsen per locatie en passage. Met de locaties werd bedoeld: rechte weg, aansluiting, klaverblad en zonnewal. De passages zijn één niveau dieper en maken onderscheid tussen bijvoorbeeld de binnen- en buitenbocht bij een klaverblad.

Vervolgens wordt gekeken naar de gemiddelde uren hinder per jaar voor een passage (bijvoorbeeld een rechte weg) in combinatie met steeds één andere factor (bijvoorbeeld de brekingsindex). Mocht er geen sterk interactie-effect zijn met enige andere factor dan kan het effect van de onderzochte factor samengevat worden op passageniveau. Mochten er ook tussen verschillende passages, zoals rechte weg of buitenbocht klaverblad, geen verschillen in effect zijn dan kan de invloed van de factor samengevat worden in één waarde voor alle situaties, bijvoorbeeld: “een brekingsindex van 1,25 zorgt voor een afname van 11% uren hinder per jaar ten opzichte van een brekingsindex van 1,5”. Hoe minder de verschillende factoren tussen situaties verschillen, hoe beter het mogelijk is om te generaliseren. Als er echter sterke interactie-effecten zijn met andere factoren moet er gekozen worden om niet voor volledige generalisatie (over alle situaties) te gaan.

⁶ Elk uur is in 10 blokken van 6 minuten verdeeld en elk etmaal dus in 240 blokken waarin mogelijk (hinderlijke) reflecties zichtbaar zijn.

3 Analyse

In dit hoofdstuk presenteren we kort de resultaten en beschrijven wij de vuistregels die wij uit de resultaten kunnen afleiden, inclusief onderbouwing. In hoofdstuk 4 vatten we deze analyse samen in kwantitatieve vuistregels.

3.1 Algemene aanpak

Om in algemene zin vuistregels op te stellen kijken we naar het effect van elke factor op de doorgerekende situaties. Allereerst kijken we daarbij per factor of deze alle hinder kan uitsluiten. Daarna kijken we hoe het aanpassen van een enkele factor de hoeveelheid hinder op jaarbasis beïnvloedt. Tenslotte kijken we naar een aantal combinaties van factoren die samen een sterk effect hebben op de hoeveelheid hinder.

We kiezen er bewust voor om bij de combinaties maximaal drie factoren met elkaar te combineren. Meer dan drie kan namelijk snel leiden tot onoverzichtelijk veel specifieke vuistregels. Bij combinaties van vier factoren met elk tussen de drie en zestien mogelijke waarden loopt het aantal mogelijke combinaties al snel in de honderden. Hierdoor ontstaan zoveel regels dat feitelijk niet meer van vuistregels gesproken kan worden. Daarom proberen we ons te beperken tot combinaties van maximaal drie factoren.

De vuistregels moeten een maat geven voor hoe vaak er hinderlijke reflecties optreden (in uren per jaar) en hoelang deze duren voor een bestuurder die over de passage rijdt. Als vuistregels aangeven dat er in bepaalde situaties geen hinder ontstaat is het niet nodig is om in de toekomst te rekenen aan lichtreflectie bij een weg die zeer vergelijkbaar is met de gesimuleerde situatie.

3.2 Analyse per factor

3.2.1 *Geen reflecties op basis van zonnepaneeloriëntatie*

Eén factor geeft in tal van situaties uitsluitsel over of er überhaupt hinder optreedt: de oriëntatie van de zonnepanelen. Wanneer de reflecties zichtbaar zijn hangt alleen af van de kijkrichting van de bestuurder en de oriëntatie van de zonnepanelen. De zon zelf volgt een voorspelbare baan aan de hemel.

Hieronder geven we voor elk van de vier gespecificeerde configuraties van de zonnevelden (zie ook Tabel 2-2) aan bij welke weg-oriëntaties er reflecties zichtbaar kunnen zijn. We gaan er daarbij van uit dat de kijkrichting van de bestuurder de weg volgt⁷.

⁷ Als extra marge voor hoofdbewegingen van de bestuurder nemen we alle reflecties mee die zichtbaar zijn tot 20 graden links en rechts van de kijkrichting. Op basis van de data kunnen we zeggen dat reflecties die horizontaal meer dan 20 graden van de kijkrichting verwijderd zijn wel zichtbaar kunnen zijn, maar doorgaans niet veel hinder veroorzaken.

3.2.1.1 Zuidelijk georiënteerde zonnepanelen

Zuidelijk georiënteerde panelen reflecteren voornamelijk in de oostelijke en westelijke kijkrichtingen. In Figuur 3-1 is te zien dat kijkrichtingen rondom het zuiden en het noorden geen last van enige reflecties hebben (aangegeven met groen). Bij deze oriëntatie van de panelen is de meeste reflectiehinder te verwachten bij snelwegen die oost-west lopen. Het rood gearceerde gebied van de kompasroos geeft de bandbreedte van risicovolle kijkrichtingen aan.



Figuur 3-1 Voor de zuidelijk georiënteerde panelen zijn de grootste risicogebieden (rood) kijkrichtingen tussen 40-115 graden (oostzuidoost tot noordoost) en 245-320 graden (westzuidwest tot noordwest).

3.2.1.2 Oostelijk georiënteerde zonnepanelen

De oostelijk georiënteerde panelen reflecteren voornamelijk voor kijkrichtingen naar het zuiden en westen zoals te zien is in Figuur 3-2. Hier geldt dus dat bestuurders die richting het noorden en oosten rijden nooit last zullen hebben van hinder door deze panelen. Bestuurders die richting het zuidwesten kijken en rijden kunnen echter wel hinder ondervinden. Een noordoost-zuidwest snelweg met deze panelen ernaast kan dus wel hinderlijke reflecties ondervinden, maar alleen in het rood gearceerde gebied richting zuid tot noordwest.



Figuur 3-2 Voor de oostelijk georiënteerde panelen valt het grootste risicogebied binnen de kijkrichtingen tussen 165-315 graden (zuid tot noordwest).

3.2.1.3 *Westelijk georiënteerde zonnepanelen*

De westelijk georiënteerde panelen reflecteren voornamelijk voor kijkrichtingen naar het zuiden en oosten. Zie Figuur 3-3.

Deze panelen lijken zeer op de oostelijk georiënteerde panelen, alleen spiegelen zij juist voornamelijk richting het zuidoosten in plaats van het zuidwesten.



Figuur 3-3 Voor de westelijk georiënteerde panelen is het grootste risicogebied kijkrichtingen tussen 40-195 graden (noordoost tot zuid).

3.2.1.4 *Oostelijk en Westelijk georiënteerde zonnepanelen (combinatie)*

Hoewel het niet expliciet is doorgerekend in dit rapport, is het toch mogelijk om iets te zeggen over een zonneveld waarop zowel oostelijk als westelijk georiënteerde zonnepanelen staan opgesteld. De richtingen waarin een dergelijk zonneveld hinder kan opwekken is afgebeeld in Figuur 3-4.

De westelijk georiënteerde panelen geven vooral in de ochtend hinder terwijl de oostelijk georiënteerde panelen vooral in de namiddag hinderlijke reflecties kunnen veroorzaken.



Figuur 3-4 Voor de combinatie van oostelijk en westelijk georiënteerde zonnepanelen is het grootste risico gebied kijkrichtingen tussen 40-315 graden.

3.2.1.5 Zuidwestelijk georiënteerde zonnepanelen

De zuidwestelijk georiënteerde panelen reflecteren voornamelijk voor kijkrichtingen naar het oosten en noordwesten.

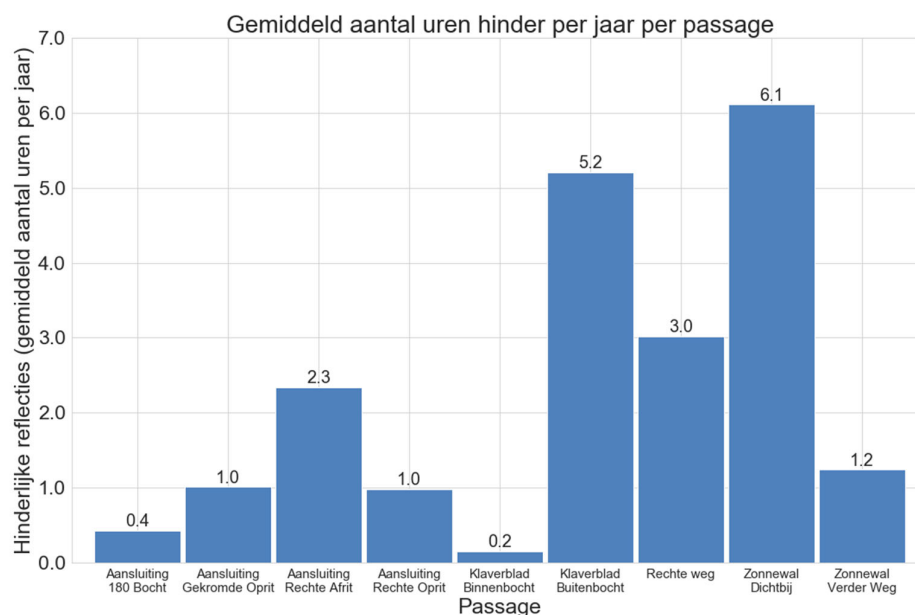
Figuur 3-5 laat zien dat deze panelen reflecteren in een groot gebied ten opzichte van de andere oriëntaties die hier bekeken zijn. Ook de zuidwestelijke panelen reflecteren echter niet in noord-zuid richtingen. Snelwegen die noord-zuid georiënteerd zijn, zijn dus altijd vrij van hinder van deze panelen.



Figuur 3-5 Voor de zuidwestelijk georiënteerde panelen zijn de grootste risicogebieden kijkrichtingen tussen 40-165 (noordoost tot zuid) en 250-330 graden (west tot noordwest).

3.2.2 Gemiddelde hinder in uren per jaar

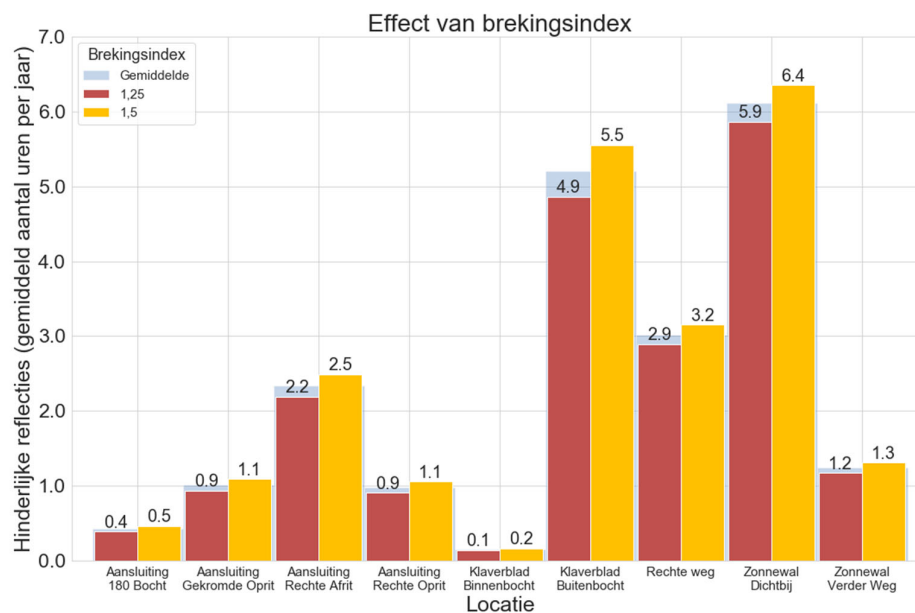
De kijkrichting van de bestuurder in combinatie met de vaste oriëntatie van de zonnepanelen geeft dus uitsluitsel over of er überhaupt hinder kan ontstaan. Het kan zo zijn dat de wegsituatie zo is dat men in één van de rode gebieden van de kompasrozen terecht komt. In deze situatie kan daarom hinder ontstaan. In onderstaande secties beschouwen wij per factor hoe die hinder geminimaliseerd kan worden. Ook bekijken wij hoeveel invloed die factor heeft op de hoeveelheid hinder. Daarvoor is het goed om een baseline te hebben waarmee vergeleken kan worden. De gemiddelde hoeveelheid hinder over alle doorgerekende situaties is daarom weergegeven in Figuur 3-6.



Figuur 3-6 De gemiddelde hinder op jaarbasis (uren per jaar) per passage. Voor iedere passage is het gemiddelde berekend over alle verschillende combinaties van factoren beschreven in sectie 2.4. De gemiddelden uit deze figuur staan ook in de volgende figuren in de achtergrond geplot zodat snel duidelijk is in hoeverre de hoogte van een specifieke factorwaarde afwijkt van het gemiddelde. In figuur 3-7 is bijvoorbeeld te zien hoeveel hinder er optreedt bij panelen met een hoge (geel) of lage (rood) brekingsindex. (In blauw de gemiddelde waarden uit figuur 3-6).

3.2.3 Een hogere brekingsindex zorgt voor meer hinder

Een hogere brekingsindex betekent dat een groter deel van het invallende licht gereflecteerd zal worden. We verwachten daarom dat panelen met een lagere brekingsindex minder hinderlijke reflecties zal genereren. In Figuur 3-7 is te zien dat dit inderdaad zo is.



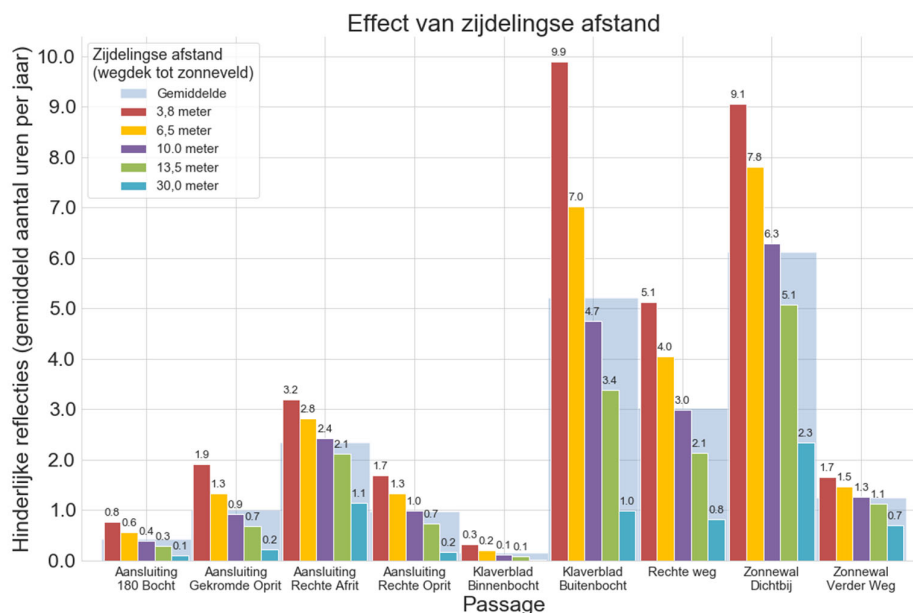
Figuur 3-7 Het effect van brekingsindex op het gemiddelde aantal uren hinder per jaar voor iedere passage. In rood de lagere brekingsindex (1,25) en in geel de hogere brekingsindex (1,5). Op de achtergrond in blauw het gemiddelde over alle factoren.

Er zijn binnen de gesimuleerde situaties geen grote interactie-effecten aangetroffen met andere factoren. Als vuistregel kan men dus zeggen:

“Een afname van de effectieve brekingsindex door coatings of gelaagd glas vermindert de hoeveelheid hinder. Een afname van een brekingsindex van 1,5 naar een brekingsindex van 1,25 zorgt voor een gemiddelde afname van 11% hinderlijke reflecties per jaar.”

3.2.4 Een grotere zijdelingse afstand zorgt voor minder hinder

Door het vergroten van de zijdelingse afstand tussen wegdek en zonnepanelen verwachten we intuïtief dat de hoeveelheid hinder zal afnemen. Immers, als de zonnepanelen verder van de weg staan zullen zij kleiner lijken voor bestuurders. Hierdoor neemt de kans dat de zon precies goed staat om via de panelen richting de bestuurder te reflecteren af. We verwachten dat dit effect vrij sterk is, omdat de ruimtewinkel voor een oppervlak met het kwadraat van de afstand afneemt. De resultaten bevestigen de verwachting zoals te zien is in Figuur 3-8.



Figuur 3-8 De gemiddelde (lichtblauwe achtergrond) hoeveelheid hinder (uren per jaar) uitgesplitst per passage en zijdelingse afstand. Op de achtergrond in blauw het gemiddelde over alle factoren.

Merk op dat voor de aansluiting en het klaverblad een grotere zijdelingse afstand ook kan leiden tot een verkleining van het zonneveld doordat er minder ruimte ontstaat (bijvoorbeeld in de binnen lus van een klaverblad). We hebben geen sterke interactie met één van de andere factoren gevonden en daarom stellen wij de volgende vuistregel op:

“Een grotere zijdelingse afstand zorgt voor een sterke afname van het aantal hinderlijke reflecties op jaarbasis. Door het vergroten van de zijdelingse afstand van 3,8 meter naar 30 meter neemt het aantal hinderlijke reflecties af met 81%.”

Ook voor tussenliggende afstanden kunnen wij een dergelijke maat stellen. In Tabel 3-1 is weergegeven hoe het gemiddelde aantal uren hinder per jaar afneemt door het vergroten van de zijdelingse afstand vanaf 3,8 meter.

Tabel 3-1 Relatieve hoeveelheid hinder voor verschillende zijdelingse afstanden t.o.v. de zijdelingse afstand 3,8 m.

Zijdelingse afstand (m)	Relatieve hinder
3,8	100% (uitgangssituatie)
6,5	78%
10,0	59%
13,5	45%
30,0	19%

Ter illustratie bij Tabel 3-1: stel men neemt twee identieke situaties waarbij alleen de zijdelingse afstand tussen wegdek en zonneveld verschilt. Eén van de situaties heeft een zijdelingse afstand van 3,8 meter en de andere situatie een afstand van 13,5 meter. De verwachting is dat de panelen op 13,5 meter slechts 45% van de hinder opleveren die dezelfde panelen zouden opleveren als zij op een afstand van 3,8 meter hadden gestaan. Dat is een afname van 55% van het aantal uren hinder per jaar.

3.2.5 *Een hogere maximumsnelheid zorgt voor meer, maar kortere hinder*

Voor situaties met een hogere maximumsnelheid verwachten wij dat de hinder vaker zal optreden, maar korter zichtbaar is als men langs het zonneveld rijdt. Dat er vaker hinder op zal treden komt door het feit dat bij een hogere snelheid de wegbelijning vanaf grotere afstand onderscheiden moet kunnen worden. Bestuurders moeten verder vooruit kunnen kijken. Hierdoor wordt de maximale intensiteit die de reflecties mogen hebben lager en zullen dus meer reflecties als hinderlijk worden ervaren.

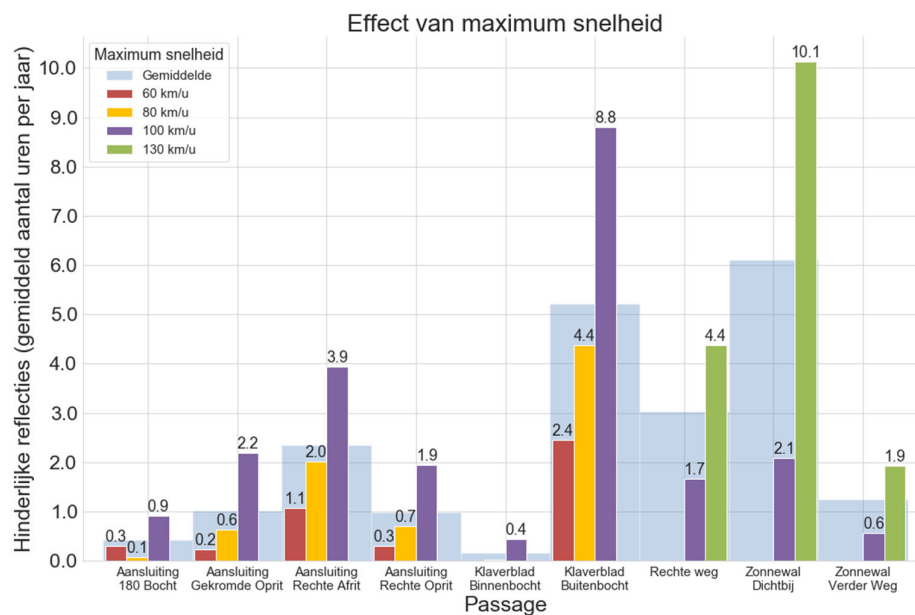
Tegelijkertijd zal een bestuurder met een hogere snelheid het zonneveld sneller gepasseerd zijn dan een bestuurder met een lagere snelheid. De hinderduur wordt voornamelijk bepaald door de tijd die de bestuurder nodig heeft om het zonneveld voorbij te rijden of zijn kijkrichting te veranderen (in een bocht). De aangegeven hinderduur zal voor vrijwel alle situaties aaneengesloten zijn.

Bij het kijken naar de hinderduur per passage (Figuur 3-10) is het goed om het volgende nog te verduidelijken: wanneer de hinder in één passage eindigt kan die doorlopen in de aansluitende passage. Dit speelt vooral bij rechte weg passages die elkaar (eindeloos) kunnen opvolgen. Hier kunnen dus langdurige hinderlijke reflecties ontstaan langs (kilometers lang) uitgestrekte zonnevelden.

Als extra toelichting:

Voor de rechte weg wordt op 200 meter voor het zonneveld de eerste positie doorgerekend. Indien al op (bijvoorbeeld) 300 meter voor het zonneveld ook hinder zichtbaar zou zijn is deze niet meegenomen in de onderstaande hinderduur. Dit geldt ook voor hinder voorbij de laatste doorgerekende positie. De berekende hinderduur op rechte weg-passages in dit rapport is dus een ondergrens, afhankelijk van de lengte van het zonneveld.

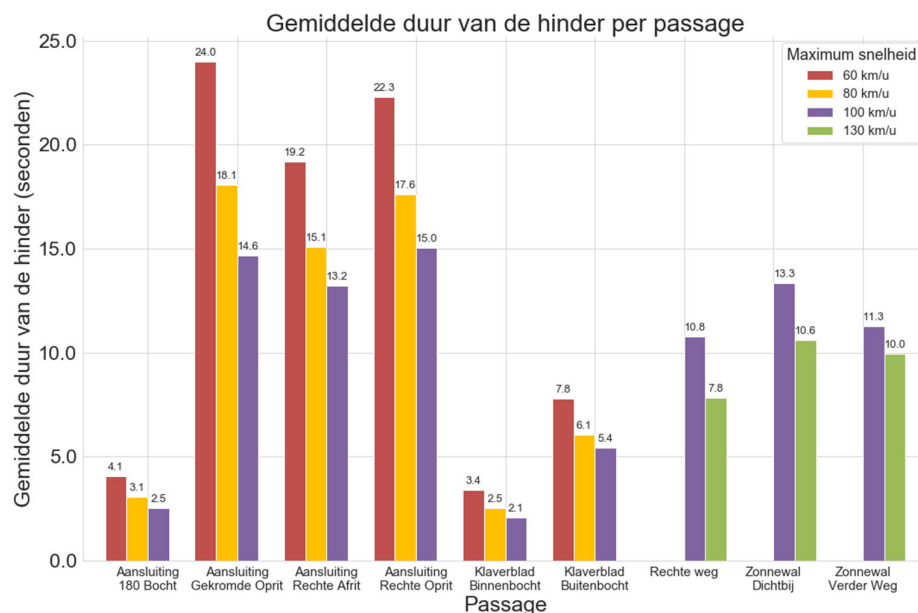
Zowel de toename in hoeveelheid hinder als de afname in hinderduur zien we terug in de gemiddeldes van de gesimuleerde situaties (Figuur 3-9, Figuur 3-10).



Figuur 3-9 Het effect van de maximumsnelheid op de het gemiddelde aantal hinderlijke reflecties per passage. Op de achtergrond in blauw het gemiddelde over alle factoren.
NB Niet alle snelheden komen voor bij iedere passage (zie Tabel 2-1).

Tabel 3-2 Percentage van de te verwachten hinder afhankelijk van de maximumsnelheid. Voor de snelheid van 130 km/u worden twee waarden gegeven (voor de rechte weg en de zonnewal passages respectievelijk).

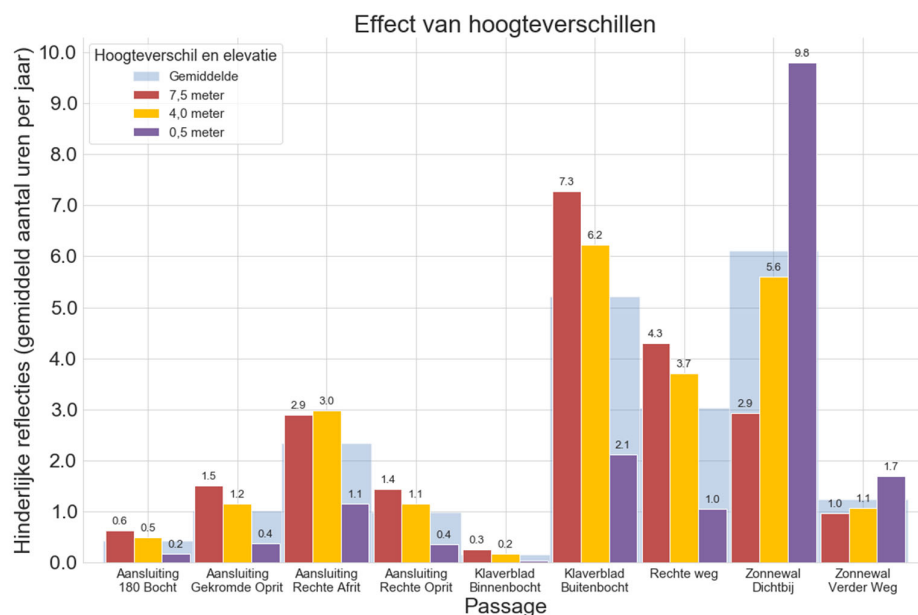
Maximumsnelheid (km/u)	Relatieve hinder
60	26%
80	47%
100	100% (uitgangssituatie)
130	263% (rechte weg), 457% (zonnewal)



Figuur 3-10 Gemiddelde duur van de hinderlijke reflecties per passage en maximumsnelheid voor een individuele bestuurder.

3.2.6 Hoogteverschil interacteert met de hellingshoek van de panelen

Vlakliggende panelen reflecteren meer naar boven en veroorzaken daardoor meer hinder naarmate ze lager liggen dan het oogpunt van de automobilist. Bij rechtopstaande panelen is dit andersom.



Figuur 3-11 Het effect van hoogteverschil tussen het oogpunt van de bestuurder en de onderkant van de panelen op de hoeveelheid hinder in uren per jaar.

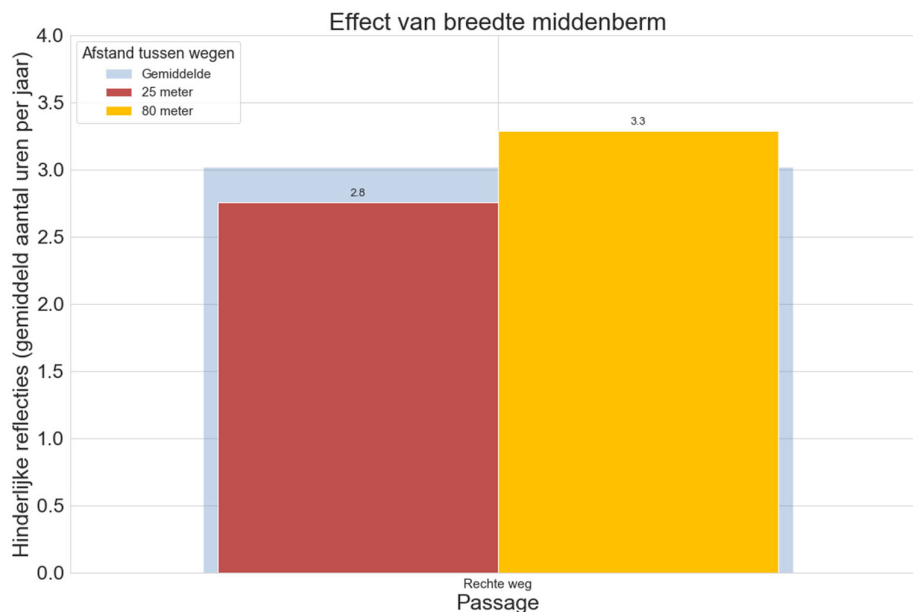
Het beschreven effect is te zien in Figuur 3-11. Het relatieve verschil in uren hinder per jaar ten opzichte van panelen op maaiveldhoogte (0,5m onder ooghoogte) is te vinden in Tabel 3-3.

Tabel 3-3 De relatieve hinder voor de verschillende locaties en zonnepanelen ten gevolge van een hoogteverschil tussen de ogen en de panelen. Een hoogteverschil van 0,5 m is de uitgangssituatie (100%). Helling is de hoek van het paneel met het grondvlak.

Locatie	Helling (graden)	Hoogteverschil (m)	Relatieve hinder
Rechte weg	35	0,5	100%
		4,0	203%
		7,5	240%
	10	0,5	100%
		4,0	454%
		7,5	524%
Aansluiting	35	0,5	100%
		4,0	132%
		7,5	147%
	10	0,5	100%
		4,0	418%
		7,5	461%
Klaverblad	35	0,5	100%
		4,0	127%
		7,5	149%
	10	0,5	100%
		4,0	423%
		7,5	502%
Zonnewal	90	0,5	100%
		4,0	29%
		7,5	0%
	70	0,5	100%
		4,0	139%
		7,5	129%

3.2.7 Een bredere middenberm zorgt voor meer hinder

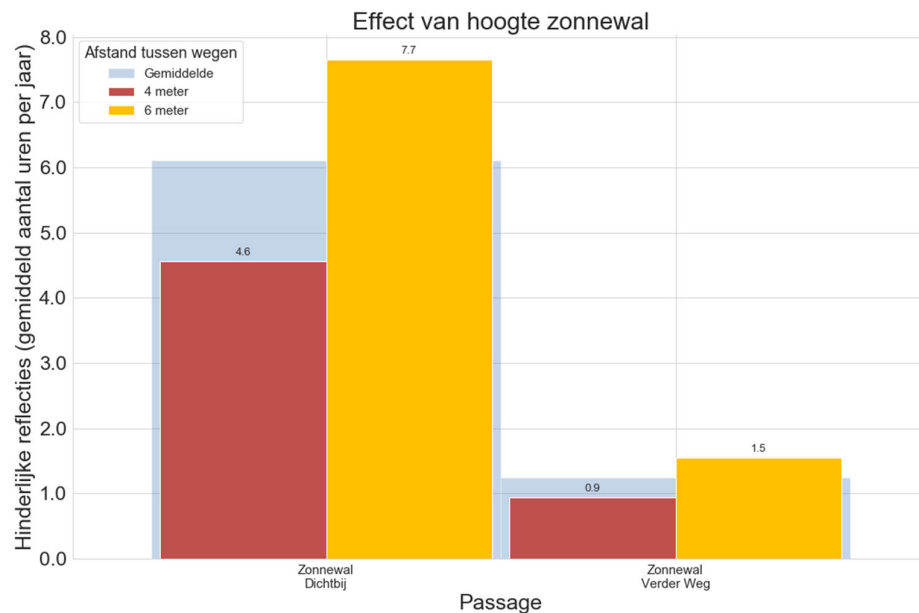
Op een bredere middenberm kan een breder zonnenveld geplaatst worden. Dat zal ervoor zorgen dat een groter deel van het zichtveld van de bestuurder ingenomen zal worden door zonnepanelen. Deze hebben daardoor meer kans om te reflecteren. Dit is wat terug te zien is in Figuur 3-12. In verhouding tot een berm van 25 meter breed geeft een berm met een breedte van 80 meter een relatief kleine toename in de hoeveelheid uren hinder per jaar (+19%.)



Figuur 3-12 Het effect van de verschillende breedtes van de middenberm op de gemiddelde hoeveelheid hinder per jaar. In het blauw wederom het gemiddelde.

3.2.8 Een hogere zonnewal zorgt voor meer hinder

Net als een breder zonnenveld op de middenberm zorgt een hogere zonnewal ervoor dat een groter deel van het zichtveld in beslag wordt genomen door zonnepanelen. Een zonnewal van 6 meter hoog genereert gemiddeld over de simulaties 59% meer uren hinder per jaar dan een zonnewal van 4 meter hoog. Dit is ook te zien in Figuur 3-13.



Figuur 3-13 Het effect van de grootte van de zonnepanelen op de gemiddelde hoeveelheid hinderlijke reflecties per jaar. Het gemiddelde per passage is aangegeven in het blauw.

3.2.9 *Scherpe bochten zorgen vaker voor hinder, maar verkorten de hinderduur.*
 Scherpe bochten zorgen ervoor dat een bestuurder meerdere kijkrichtingen doorloopt. Op de binnenbocht van een klaverblad kan een bestuurder bijvoorbeeld van een zuidelijke kijkrichting helemaal naar een oostelijke kijkrichting gaan via het westen. Aangezien snel meerdere kijkrichtingen doorlopen worden is de kans op hinder groter, want de kans dat de panelen in één van alle doorlopen richtingen reflecteren is groter dan de kans voor één specifieke kijkrichting.

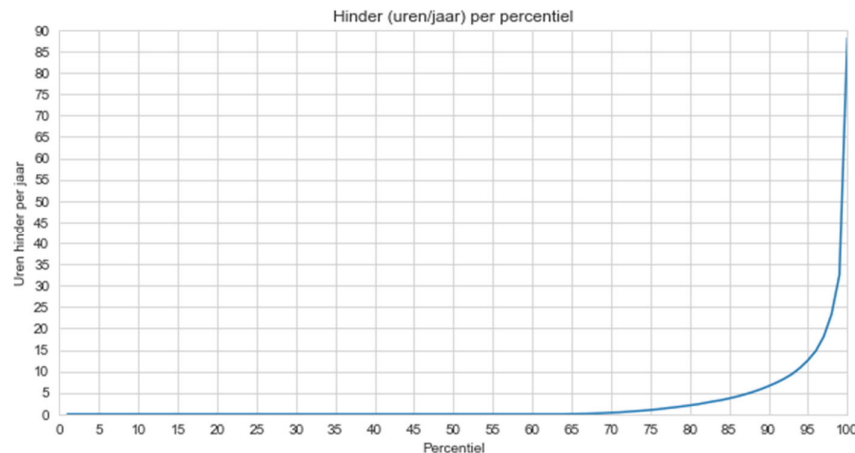
De hinderduur neemt echter wel af, aangezien iedere kijkrichting snel doorlopen wordt. Stel bijvoorbeeld dat de panelen hinderlijke reflecties opwekken in westelijke kijkrichtingen. Een rechte weg richting het zuiden heeft hier geen last van, maar een bestuurder op de binnenbocht van een klaverblad die eerst zuidelijk reed wel. Deze bestuurder kijkt op een bepaald punt namelijk richting het westen. De bestuurder heeft echter maar kort last van de hinder aangezien hij korte tijd later alweer richting het noorden kijkt omdat hij zich verderop in de bocht bevindt. Het effect op de hinderduur van deze scherpe bochten is te zien in Figuur 3-10.

3.3 Hinder, een blik op de uitersten

Voordat wij de vuistregels opstellen is het goed om te weten waar we precies naar kijken. In totaal is de hinder op bijna 500.000 posities berekend. Door de punten binnen elke passage steeds te aggregeren ontstaan zo 49.920 passages met verschillende zonnepaneelopstellingen, eigenschappen, etc. die zijn doorgerekend. Hiermee dekken we alle combinaties van de in deze studie geselecteerde factoren af.

In Figuur 3-14 staan al deze bijna 50.000 situaties geordend naar de hoeveelheid hinder die ze kunnen veroorzaken (de gemiddelde hoeveelheid hinder is 2,2 uur per jaar en de mediaan is 0,0 uur hinder per jaar). In de grafiek is te zien dat in 64% van alle doorgerekende situaties geen enkele hinder optreedt. Tot in 87% van de gevallen is er nog minder dan 5 uur hinder per jaar. In slechts 7% van de gevallen vinden wij meer dan 10 uur hinder per jaar.

In de meeste gevallen is er dus (bijna) geen hinder door zonnepanelen en een groot deel van de hinder wordt dus veroorzaakt door een relatief klein deel van alle doorgerekende situaties (het gebied onder de curve in Figuur 3-14).



Figuur 3-14 Percentage van de doorgerekende situaties (x-as) uitgezet tegen het aantal uren hinder per jaar (y-as).

Een aantal combinaties van factoren levert consistent uiterst gunstige of juist ongunstige situaties op qua hinder, vrijwel ongeacht de waarden van andere factoren. Door met een computeralgoritme alle combinaties van drie factoren af te gaan is een aantal situaties geïdentificeerd als zeer gunstig (of ongunstig) ten opzichte van het gemiddelde over alle situaties. Vaak zijn dit combinaties van factoren die individueel gezien (zie sectie 3.2) allemaal een sterke afname (of toename) veroorzaken. We geven hier twee voorbeelden, één waarbij de combinatie van factoren uiterst gunstig is en één waarbij de combinatie ongunstig is.

Een gunstige combinatie van factoren is bijvoorbeeld de situatie waarbij:

- de panelen op 30 meter afstand van de weg staan;
- de onderkant van de panelen 50 cm onder de ooghoogte ligt;
- de maximum rijsnelheid 100 km/u of minder is.

In deze situatie is de hoeveelheid hinder slechts 0,13 uur per jaar. Deze combinatie van factoren zorgt dus voor relatief gunstige situaties.

Daarentegen is er gemiddeld 7,6 uur per jaar hinder van zonnepanelen

- liggend op het zuidwesten;
- bij een maximum snelheid van 130 km/u.

Deze combinatie van zonnepanelen en rijsnelheid is dus relatief ongunstig (uit Figuur 3-14 valt af te lezen dat ongeveer 85% van de situaties minder hinder geeft).

In het volgende hoofdstuk worden nog enkele combinaties die zeer (on)gunstig zijn genoemd.

4 Vuistregels

4.1 Introductie

Met de geformuleerde vuistregels is het mogelijk om de hoeveelheid hinder te verminderen waar die optreedt. Het is daarbij belangrijk om te beseffen dat wij hier dus over slechts een klein deel van alle doorgerekende situaties spreken.

Voor de meeste doorgerekende situaties is de hinder al minimaal.

In Figuur 4-1 is te zien dat pas na ongeveer het 85^e-90^e percentiel het aantal uren hinder per jaar snel omhoog schiet. Een mooi ronde (maar arbitraire) grenswaarde in dit gebied is vijf uur hinder per jaar. Voor de eenvoud gebruiken wij voor enkele vuistregels deze grens om te bepalen of de situatie relatief gunstig of ongunstig is.

Voor het overzicht geven we hieronder in

Tabel 4 aan welke vuistregels samenhangen met welke factoren. Zo is te zien dat vuistregel 1 van belang is voor alle factoren. De andere vuistregels zijn meer specifiek. Vuistregel 7 zegt specifiek iets over het effect van de zijdelingse afstand op de reflecties (gemiddeld over alle situaties). Vuistregel 13 combineert de zijdelingse afstand met de gereden snelheid.

Tabel 4 Relatietabel tussen factoren en bijbehorende vuistregels.

	Vuistregel (sectie 4.2.x)																	
Factor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Wegtype	X											X						
Paneel-oriëntatie	X	X	X	X	X				X						X		X	
Weg-oriëntatie	X	X	X	X	X													
Positie	X											X						
Hoogte-verschil	X								X					X	X			
Zijdelingse afstand	X						X						X	X	X	X		X
Brekingsindex	X					X												
Snelheid	X							X					X	X		X	X	X
Zonnewal	X										X							X
Middenberm	X									X								

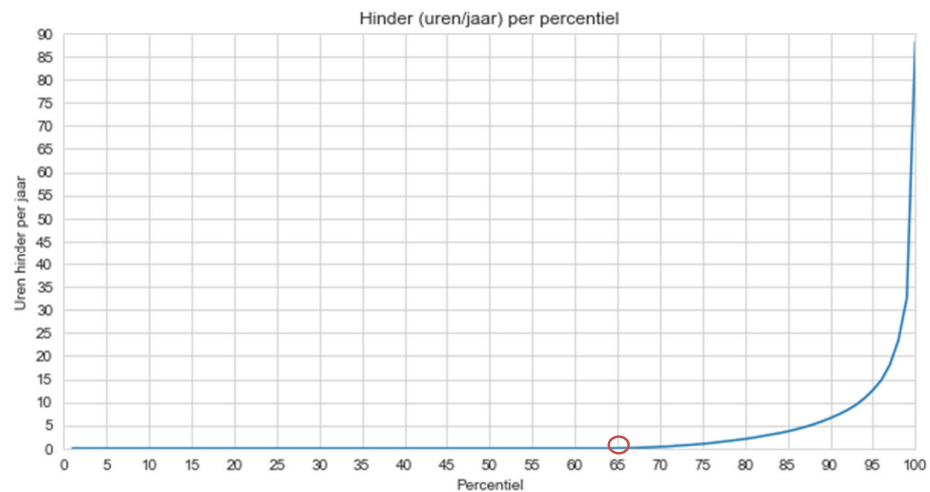
4.2 Korte vuistregels

In deze sectie geven wij korte vuistregels op basis van de analyses uit hoofdstuk 3.

4.2.1 De meeste situaties ondervinden geen enkele of slechts minimale hinder.

Zoals uit Figuur 4-1 af te lezen is ondervindt een automobilist in de meeste gevallen (64% van alle doorgerekende situaties) geen hinder door reflecties van zonnepanelen. In 87% van alle berekende combinaties blijft de tijd waarin hinderlijke reflecties op een locatie optreden nog beperkt tot minder dan 5 uur per jaar. Om inzicht te geven in welke situaties er specifiek hinder op kan treden kan het

Excelbestand "Hinder door zonreflecties – rekentool.xlsx" dat als bijlage bij deze rapportage is opgeleverd gebruikt worden voor hinderberekening. In dit Excelbestand is de volledige dataset van deze studie opgenomen. Door selectie van zonnepaneeltype, locatie (type passage), brekingsindex, maximum snelheid, afstand tussen wegen (bermbreedte), afstand tussen zonnepaneel en weg (zijdelingse afstand), en hoogteverschil kan voor alle 16 rijrichtingen de hinder door directe zon en door reflecties worden gezien.



Figuur 4-1 In 64% van de doorgerekende situaties is er geen enkele hinder op enig moment van het jaar (aangegeven met de rode cirkel).

- 4.2.2 *Wegen die grofweg richting het noorden (gebied tussen 320 - 40 graden) of het zuiden (tussen 115 – 245 graden) lopen ondervinden nooit hinder van panelen die gericht zijn op het zuiden met een helling van 35 graden.*



Figuur 4-2 Panelen op het zuiden (kompashoek 180 graden) met een hellingshoek van 35 graden veroorzaken geen hinder in noordelijke en zuidelijke kijkrichtingen.

- 4.2.3 *Wegen die grofweg richting het noordwesten tot zuiden (tussen 315 - 167 graden) lopen ondervinden nooit hinder van panelen die gericht zijn op het oosten met een helling van 10 graden.*



Figuur 4-3 Panelen op het oosten (kompashoek 90 graden) en een hellingshoek van 10 graden veroorzaken nooit hinder in in het gebied tussen noord-west en zuid.

- 4.2.4 *Wegen die grofweg richting het noordoosten tot zuiden (tussen 193 en 40 graden) lopen ondervinden nooit hinder van panelen die gericht zijn op het westen met een helling van 10 graden.*



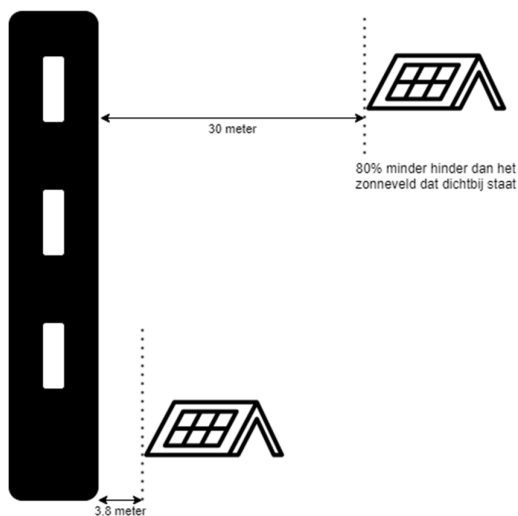
Figuur 4-4 Panelen op het westen (kompashoek 270 graden) en een hellingshoek van 10 graden veroorzaken nooit hinder in het gebied met kijkrichtingen tussen noordoost tot zuid .

- 4.2.5 *Wegen die een richting hebben tussen 330 – 40 graden of een richting hebben tussen 165 – 250 graden ondervinden nooit hinder van panelen die gericht zijn op het zuidwesten met een helling van 10 graden.*



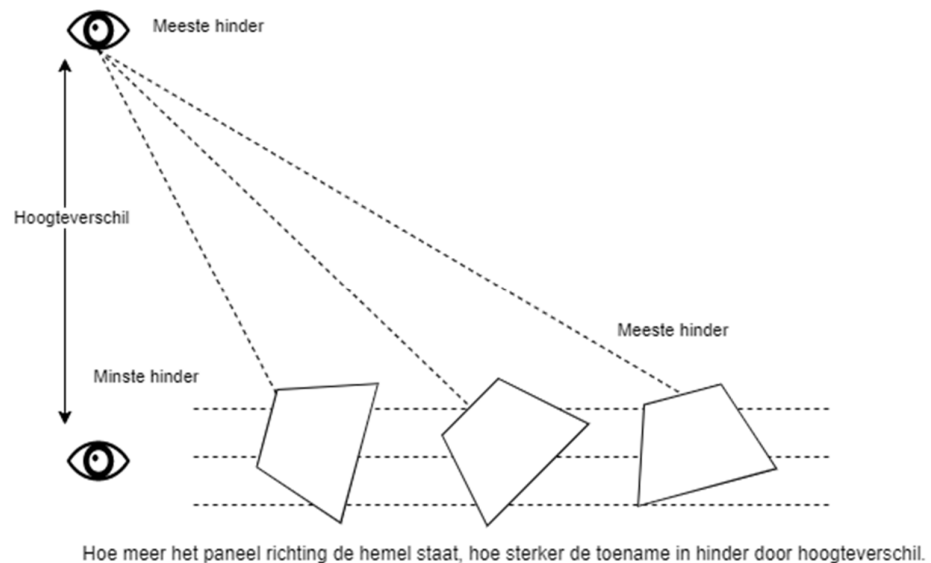
Figuur 4-5 Panelen gericht op het zuidwesten (kompashoek 220 graden) met een hellingshoek van 10 graden veroorzaken nooit hinder in noordelijke en zuidzuidwestelijke kijkrichtingen.

- 4.2.6 *Het verlagen van de brekingsindex van de panelen (bijvoorbeeld d.m.v. een antireflectie-coating) van 1,5 naar 1,25 vermindert het aantal uren hinder per jaar met 11%.*
- 4.2.7 *Het vergroten van de zijdelingse afstand van de panelen tot het wegdek vermindert het aantal uren hinder per jaar drastisch. Bij een vergroting van de zijdelingse afstand van 3,8 tot 30 m neemt de hinder met ruim 80% af.*



Figuur 4-6 Schematisch bovenaanzicht ter illustratie van vuistregel 4.2.7.

- 4.2.8 *De maximumsnelheid heeft grote invloed op het aantal uren hinder per jaar. Een weggebruiker die 130 km/u rijdt in plaats van 100 km/u ervaart een verviervoudiging van de hoeveelheid hinder. Bij een snelheid van 60 km/u vermindert de hinder juist met een factor vier ten opzichte van een maximumsnelheid van 100 km/u*
- 4.2.9 *Het hoogteverschil heeft gemiddeld genomen grote invloed op het aantal uren hinder per jaar. Hoe hoger een automobilist zich boven het zonneveld bevindt, hoe vaker hij hinder zal ervaren. De grootte van het effect heeft een sterke interactie met de hellingshoek van de zonnepanelen. Naarmate de hellingshoek kleiner wordt neemt de hinder sterker toe voor automobilisten op hoger gelegen wegen. Bij panelen met een hellingshoek van 35 graden is het verschil in hinder tussen een zonneveld langs een weg op maaiveldhoogte (-0,5 m) en onder een viaduct (-7,5 m) ongeveer een factor tweeëneenhalf, terwijl dat voor panelen met een hellingshoek van 10 graden ongeveer een factor vijf is. In beide gevallen zorgt het grotere hoogteverschil voor meer hinder. Zie Figuur 4-7.*



Figuur 4-7 Een groter hoogteverschil zorgt voor meer hinder. Dit effect wordt versterkt door panelen met een kleine hellingshoek.

- 4.2.10 *Het versmallen van een zonneveld op de middenberm van 80 m naar 25 m vermindert het aantal uren hinder per jaar met 16%.*
- 4.2.11 *Het verlagen van de zonnewal van 6 m hoogte naar 4 m hoogte vermindert het aantal uren hinder per jaar met 37%.*
- 4.2.12 *Scherpe bochten zoals die in een binnenbocht van een klaverblad vergroten het aantal uren per jaar dat hinder ondervonden wordt, maar verkleinen de hinderduur per passage. Als de bocht flauwer is en de kijkrichting ongeveer gelijk blijft over de tijdspanne van anderhalve seconde zal het aantal uren hinder per jaar drastisch omhooggaan.*
- 4.2.13 *De doorgerekende situaties waarbij de zonnepanelen op 30 meter afstand van de weg en op maaiveldhoogte staan leveren zelden hinder op voor rijsnelheden van 100 km/u of minder.*
- 4.2.14 *De doorgerekende situaties waarbij de zonnepanelen op 13,5 meter afstand van de weg en op maaiveldhoogte staan leveren zelden hinder op voor rijsnelheden van 80 km/u of minder. (NB. Rechte weg situaties zijn niet doorgerekend voor deze snelheden).*
- 4.2.15 *De doorgerekende situaties waarbij de zonnepanelen als zonneveld in oostelijke, zuidelijke of westelijk oriëntatie geplaatst zijn en waarbij de panelen op 30 meter afstand van de weg en op maaiveldhoogte staan ondervinden nooit meer dan 5 uur hinder per jaar.*
- 4.2.16 *Zonnepanelen op 6,5 meter of minder afstand van de weg zorgen zeer vaak voor meer dan 5 uur hinder per jaar bij rijsnelheden van 130 km/u, tenzij deze op basis van vuistregels 4.2.2 - 4.2.5 niet reflecteren.*
- 4.2.17 *Zuidelijk en zuidwestelijk georiënteerde panelen zorgen zeer vaak voor meer dan 5 uur hinder per jaar bij rijsnelheden van 130 km/u, tenzij deze op basis van vuistregels 4.2.2 - 4.2.5 niet reflecteren.*
- 4.2.18 *Een licht hellende zonnewal met panelen zorgt zeer vaak voor meer dan 5 uur hinder per jaar als deze op 6,5 meter afstand van de weg staat (of dichterbij). Dit effect is nog sterker als de rijsnelheid 130 km/u is.*

5 Discussie en conclusies

5.1 Validiteit

Hoewel de vuistregels de gesimuleerde situaties goed reproduceren is het belangrijk om de beperkingen van deze aanpak te benoemen. Aan de start van het project is in overleg met RWS een aantal veelvoorkomende situaties geschetst en deze zijn doorgerekend als “generieke situaties”. Hiermee hebben TNO en RWS als het ware een gebied afgebakend waarbinnen de vuistregels zullen gelden. Als men zonnevelden wil plaatsen op locaties die niet lijken op de generieke situaties zoals in dit rapport beschreven is het belangrijk om extra opletten te zijn.

Enkele vuistregels hebben een duidelijke richting, zoals de afname van hinder bij het verder van de weg plaatsen van de zonnevelden. Als een zonneveld verder dan 30 meter van de weg wordt geplaatst valt dit in principe buiten de grenzen van de generieke situaties. Het is echter duidelijk dat dit zonneveld nooit méér hinder opwekt dan het zonneveld op 30 meter zijdelingse afstand. De vuistregels kunnen daarom alsnog gebruikt worden.

Een situatie die ook niet binnen de grenzen van de generieke situaties valt is de situatie waarbij de onderkant van de panelen boven de ogen van de bestuurder wordt geplaatst. De vuistregels met betrekking tot hoogteverschil geven, in tegenstelling tot die over zijdelingse afstand, geen eenduidige richting aan de hoeveelheid hinder ten opzichte van panelen onder ooghoogte en kunnen daarom niet, of slechts als indicatie, gebruikt worden om dergelijke zonnevelden te beoordelen.

Een belangrijke uitzondering op de grenzen van de gesimuleerde situaties zijn vuistregels in 4.2.2 tot 4.2.5. Deze vuistregels zijn enkel gebaseerd op kijkrichting en oriëntatie van de zonnepanelen en zijn daarom niet gebonden aan de exacte locatie van het zonneveld.

Naast de beperkingen van de vuistregels zelf is het van belang de restricties van het TNOdisab-model te benoemen. Hoewel het model berust op een sterke wetenschappelijke onderbouwing door modellen die het resultaat zijn van internationaal erkend onderzoek kan het in praktijk voorkomen dat bepaalde factoren afwijken. In het TNOdisab-model worden alleen reflecties meegerekend die door een schone voorruit zichtbaar zijn en wordt uitgegaan van een schone wegbelijning. In de praktijk kunnen de wegbelijning en de voorruit vervuild zijn waardoor de wegbelijning moeilijker te zien is en kunnen er hinderlijke reflecties ontstaan in spiegels die niet meegenomen worden in de berekeningen. We bespreken hieronder diverse factoren die niet goed in het model te vatten zijn.

5.2 Factoren die ook een rol spelen bij hinder

In dit rapport zijn hinderlijke reflecties strak gedefinieerd als reflecties waardoor de bestuurder de wegbelijning op stopafstand niet meer kan onderscheiden gedurende 1,8 seconden. Dit is zo gekozen om strakkere vuistregels op te kunnen stellen, maar in werkelijkheid is de definitie veel flexibeler en wordt deze beïnvloed door allerlei andere factoren. Wij noemen hier een aantal factoren die de hinder beïnvloeden buiten het TNOdisab-model om, maar dit is geen uitputtende lijst.

5.2.1 *Moeilijkheid van de rijtaak*

Een moeilijkere rijtaak zorgt ervoor dat bestuurders waarschijnlijk minder lang verblindende reflecties kunnen verdragen. Kortere reflecties, maar wellicht ook minder felle reflecties, zullen daarom hinderlijk zijn. Wij adviseren daarom om bij stukken weg waar de rijtaak in moeilijkheid toeneemt met extra zorg om te gaan met de in dit rapport voorgestelde vuistregels.

5.2.2 *Vuile voorruit*

Als de voorruit van de bestuurder vuil is, zal licht dat hierop valt een extra 'semi-transparante laag' over het uitzicht van de bestuurder leggen. Dit zorgt ervoor dat alle contrasten voor de bestuurder afnemen. Hierdoor vallen objecten moeilijker te onderscheiden.

5.2.3 *Andere weggebruikers*

Andere weggebruikers spelen een belangrijke rol in de rijtaak. Zonlichtreflecties zoals die hier zijn uitgerekend zullen alle bestuurders die langs het zonnenveld rijden treffen. Het kan daardoor voorkomen dat sommige bestuurders besluiten te remmen, van baan te wisselen, etc. Mochten zij dit niet goed signaleren, of mocht het signaal gemist worden door andere bestuurders omdat deze verblind zijn, kan dat leiden tot meer gevaarlijke situaties.

5.2.4 *Tijd van de hinder*

Hoewel benoemd voor de verschillende typen zonnepanelen kan de exacte tijd van de hinder een belangrijke rol spelen voor de aanvaardbaarheid. Hinder tijdens de spits zal meer gevaarlijke situaties opleveren vanwege de moeilijkere rijtaak en het drukker verkeer. Dit kan eventueel ook nog verschillen per weg, aangezien verschillende wegen op andere momenten drukte zullen ervaren.

5.2.5 *Brekingsindex*

De zonnepanelen in deze studie hebben, net als de meeste panelen in de praktijk, een glad oppervlak. Dit geeft relatief hoge (spiegelende) reflecties als de lichtstraal bijna evenwijdig met het paneeloppervlak invalt. Door een coating te gebruiken met een lagere brekingsindex dan glas (bijv. 1,25 i.p.v. 1,50) kan de reflectie wat verminderen zoals we in het huidige onderzoek hebben gezien. Een zonnepaneel met een mat oppervlak zou dit probleem kunnen oplossen. Er worden nu zonnepanelen ontwikkeld waarbij het oppervlak niet glad is maar een bepaalde textuur heeft. Volgens de onderzoekers, kan afhankelijk van de soort textuur, de reflectiefactor met een factor 2 tot 10 verminderd worden (Yellowhair & Ho, 2015). Daarnaast zijn er fabrikanten die anti-reflectiefolies leveren die kunnen worden toegepast op bestaande zonnepanelen (retrofit).

Ons huidige model kan de reflectie van dergelijke panelen (nog) niet berekenen omdat het is gebaseerd op spiegeling in gladde oppervlakken en deze materialen waarschijnlijk niet glad zijn maar (half)mat). Wanneer we ons model zouden uitbreiden met de specificaties van deze (half)matte materialen kunnen we in een vervolgstudie ook uitspraken doen over deze panelen.

5.2.6 *Lengte van een zonneveld*

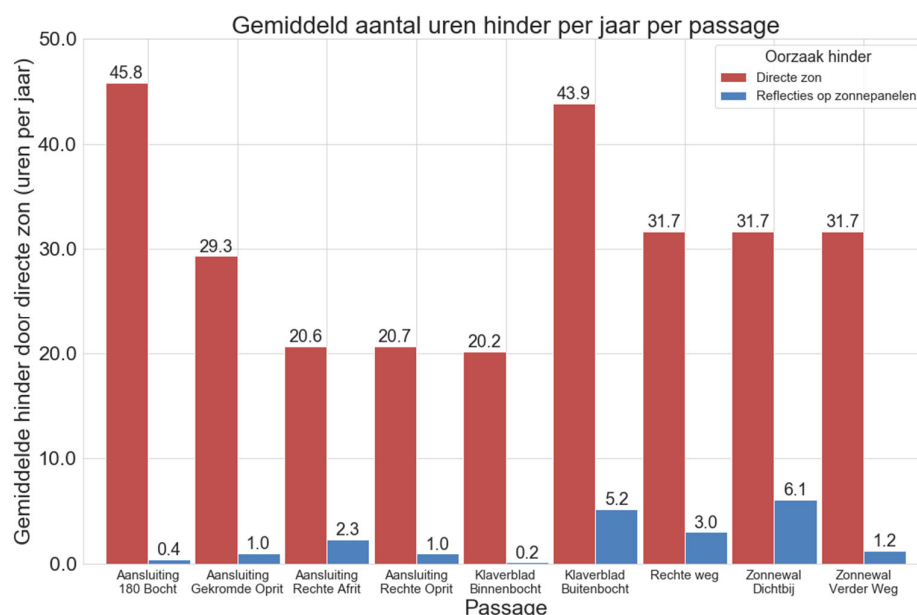
Binnen deze studie gaan we uit van zonnenvelden met een vaste lengte (400 meter). De gekozen lengte is lang genoeg voor het doormeten van de verschillende passages en om aan te tonen of er reflecties zijn die langer aanhouden dan 1,8 seconden. In de praktijk kunnen echter ook (veel) langere zonnenvelden worden aangelegd. De hinderlijke reflecties langs dergelijke velden kunnen worden geschat door meerdere passages 'achter elkaar te leggen' en de berekende hinderduur per passage te sommeren.

5.3 **Normering**

In dit rapport worden reflecties pas als hinderlijk bestempeld als een bestuurder door de reflectie de wegbelijning op stopafstand niet meer kan zien en deze reflectie langer aanhoudt dan 1,8 seconden.

In vergelijking met andere onderzoeken is deze normering erg ruim. Zo is door Alferdinck e.a. (2016) onderzocht hoe het TNOdisab-model, gebaseerd op disability glare, zich verhoudt tot het TNOdiscom model, gebaseerd op discomfort glare, en het Amerikaanse *SGHAT* model. Het in deze studie gebruikte TNOdisab-model berekende in vrijwel alle situaties minder hinder dan de andere modellen. In dit rapport wordt daar nog aan toegevoegd dat de reflectie langer dan 1,8 seconden moet aanhouden. De 1,8 seconden regel volgt uit Alferdinck & Martens (2009) waarin is onderzocht hoelang bestuurders de rijtaak nog konden blijven uitvoeren nadat hen het zicht (tijdelijk) ontnomen werd. Dit onderzoek vond plaats in een rustige, gecontroleerde omgeving. Het is denkbaar dat door een moeilijkere rijtaak, bijvoorbeeld vanwege drukte of een scherpe bocht, bestuurders minder lang zonder zicht kunnen rijden.

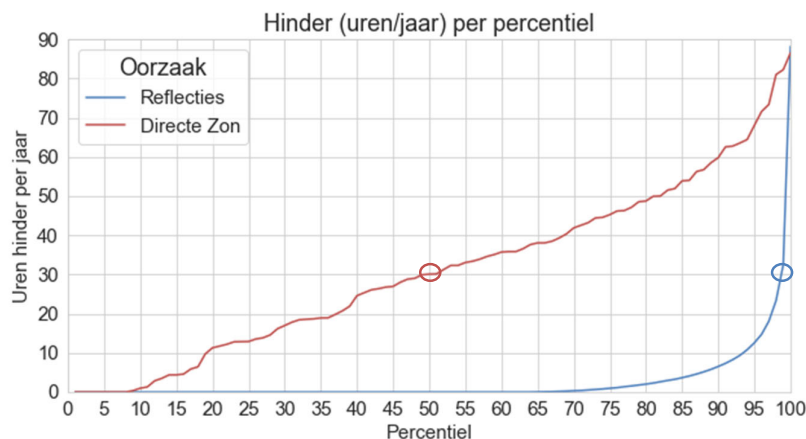
Net als in voorgaande onderzoeken kan TNO niet op basis van slechts de kennis in dit rapport bepalen welke hoeveelheid hinder, in uren per jaar, acceptabel is voor RWS en weggebruikers. Wel geven Alferdinck & van Buuren (2016) een inzicht in de hinder door de directe zon. Let er hierbij op dat weggebruikers gewend zijn aan hinder door directe zon en er maatregelen voor ingebouwd hebben in de auto, zoals de zonnepaneel. Zonnepanelen daarentegen staan vaak lager of direct langs de weg en zijn daardoor moeilijker om uit het zichtveld te verwijderen voor bestuurders.



Figuur 5-1 Gemiddeld aantal uren hinder per jaar per passage door direct zonlicht. Zonder gebruik van zonnepaneel. In blauw ook de hinder door reflecties van zonnepanelen.

In Figuur 5-1 laten we uitgesplitst per passage zien hoeveel hinder er optreedt door direct zonlicht op jaarbasis (rode balkjes). Ter vergelijking zijn de gegevens uit Figuur 3-6 (reflectie) in blauw toegevoegd.

Dat de definitie van hinder in dit rapport relatief strikt is, is ook te zien aan het aantal uren hinder per jaar door direct zonlicht. Er is sterke variatie in de hoeveelheid hinder die bestuurders ondervinden van de directe zon. Hinder door directe zon op noord-zuid wegen is vrijwel nul, terwijl voor oost-west wegen de hinder geregeld de 50 uur per jaar overschrijdt. Om een inzicht te geven in hoe vaak dit voorkomt geven wij in Figuur 5-2 dezelfde waarden als in Figuur 3-14. Het is duidelijk dat de directe zon in veel situaties de overhand heeft als het gaat om hinder. TNO kan momenteel geen uitspraken doen over de directe relatie tussen het aantal uren hinder per jaar en de veiligheid op de weg, maar het is aannemelijk dat zonnepanelen in zeer veel situaties minder hinder zullen opleveren dan de directe zon.



Figuur 5-2 Voor iedere situatie is ook het aantal uren hinder per jaar uitgerekend door directe zon. In de grafiek is bijvoorbeeld te zien dat ongeveer 50% van alle doorgerekende situaties 30 of meer uur hinder per jaar ondervindt door directe zon (rode cirkel). Door combinatie met de gegevens uit Figuur 3-14 is te zien dat reflecties door zonnepanelen slechts in ca. 2% van de situaties een vergelijkbaar aantal uren hinder opleveren (blauwe cirkel)

5.4 Eindconclusies

In dit rapport is op basis van een grote hoeveelheid generieke snelwegsituaties en zonnevelden berekend welke opstellingen relatief weinig of veel hinder opleveren. In hoofdstuk 3 is op basis van afwijking van het gemiddelde gekeken wat het effect is op de hoeveelheid hinder als de situatie slechts op één factor veranderd wordt, bijvoorbeeld de afstand van het zonneveld tot de weg.

Met de invloed van de individuele factoren zijn in hoofdstuk 4 korte vuistregels opgesteld die de relatieve hoeveelheid hinder van een situatie bepalen. Allereerst moet worden opgemerkt dat in 64% van alle doorgerekende situaties er geen hinder optreedt. De eerste vuistregels geven aan of het -gegeven de kijkrichting van de weggebruiker en oriëntatie van de panelen- überhaupt mogelijk is dat er hinder optreedt.

Zo niet, kunnen zonnepanelen geplaatst worden zonder dat specifieke maatregelen nodig zijn. Als er wel hinder kan ontstaan, geven de overige vuistregels aan hoe het voorgestelde zonneveld zo veilig mogelijk gemaakt kan worden.

Naast de vuistregels die één factor beschrijven worden ook enkele vuistregels genoemd voor combinaties van factoren die ervoor zorgen dat er zeer vaak of zeer zelden een grote hoeveelheid hinder optreedt. Deze vuistregels kunnen worden gebruikt om een gecombineerde situatie snel te beoordelen.

Het is te allen tijde belangrijk om te bedenken dat de vuistregels opgesteld zijn om snel iets over een groot aantal situaties te kunnen zeggen (en niet specifiek iets over een enkele situatie). Dit is makkelijk voor de gevallen waar geen twijfel ontstaat over de al dan niet acceptabele hoeveelheid hinder. Mocht echter na het doorlopen van de vuistregels blijken dat een voorgesteld zonneveld 'op het randje zit' wat betreft toegestane hinder, is het aan te raden om de exacte situatie grondiger te analyseren.

6 Referenties

Alferdinck, J.W.A.M. & Martens, M.H. (2009). *Lichthinder van geluidschermen - Fase 3: Verdere ontwikkeling model* (TNO-rapport TNO-DV 2009 C603R). Soesterberg: TNO Defensie en Veiligheid.

Alferdinck, J.W.A.M. (2015). *Analyse van reflectie zonnepanelen langs de A15* (Memorandum TNO 2015 M10331, 12 maart 2015). Soesterberg: TNO.

Alferdinck, J.W.A.M., Toet, A., & van Buuren, R.A. (2015). *Lichthinder zonnepanelen knooppunt Almere* (TNO 2015 R11190). Soesterberg: TNO.

Alferdinck, J.W.A.M. & van Buuren, R.A. (2016). *Lichthinder zonreflectie voor weggebruikers - invloed directe zon* (TNO-rapport: TNO 2016 R11684). Soesterberg: TNO Earth, Life & Social Sciences.

Alferdinck, J.W.A.M., de Goede, M., & van Buuren, R.A. (2016). *Lichthinder zonreflectie voor weggebruikers – ontwikkeling beoordelingsmethode op basis van disability glare* (TNO-rapport: TNO 2016 R10690, 28 september 2016). Soesterberg: TNO.

NSVV (2003). *Verlichting van tunnels en onderdoorgangen* (1ste druk, mei 2003). Arnhem: Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde NSVV.

Yellowhair, J. & Ho, C.K. (2015). *Assessment of Photovoltaic Surface Texturing on Transmittance Effects and Glint/Glare Impacts* (Presentation at ASME 2015 Power and Energy Conference on Energy Sustainability, San Diego CA, June 27 - July 2). American Society of Mechanical Engineers.