

NOTITIE SLAGSCHADUW BEREKENMETHODEN

Datum	22 augustus 2014
Van	B. Vogelaar – Pondera Consult
Betreft	Slagschaduw rekenmethodieken
Versie	Concept 2

Inleiding

Slagschaduw is een veelbesproken onderwerp in de ontwikkeling van windenergie in Nederland. Bij vele projecten zijn er zorgen dat de omgeving hinder ondervindt van de schaduw afkomstig van windturbines. De hinder wordt veroorzaakt door het draaien van de windturbines in zonnige omstandigheden. Door het draaien ontstaan er snel bewegende schaduwcontouren die door de grote afmetingen van moderne windturbines ver kunnen reiken. De effecten die dit kan veroorzaken op de omgeving wordt ook wel schaduwflikker of slagschaduw genoemd. Indien de bewegende schaduwcontouren over een woning vallen dan zal tijdens zonnig weer de lichtintensiteit in deze woning gaan variëren. Dit zorgt ervoor dat in de woning de lichtintensiteit wisselt met een frequentie van tussen de 0,3 en de 1,5 Hz bij moderne windturbines. Dit leidt niet direct tot gezondheidsklachten aangezien deze effecten pas optreden bij frequenties boven de 2,5 Hz maar kan wel leiden tot vervelende hinder voor omwonenden.

Om omwonenden te beschermen tegen deze hinder is in de wet een maximale maat voor de hoeveelheid slagschaduw hinder op een gevoelig toetspunt met ramen opgenomen die niet mag worden overschreden. Dit betekent volgens de tekst uit art. 3.12 uit de Activiteitenregeling milieubeheer dat slagschaduw gemiddeld mag optreden gedurende maximaal 17 dagen met meer dan 20 minuten slagschaduw hinder. Het gebruik van de term gemiddeld geeft indicatie dat het niet gaat om de daadwerkelijk opgetreden slagschaduw uren per jaar maar om een langdurig gemiddelde wat veroorzaakt wordt over meerdere jaren. De formulering in de wettekst zorgt ervoor dat er meerdere methoden mogelijk zijn om de effecten van slagschaduw hinder te analyseren.

Gelukkig is slagschaduw hinder zeer eenvoudig te mitigeren. Door de windturbines stil te zetten op de tijdstippen dat slagschaduw optreedt kan de hinder tot nul worden gereduceerd. Als de windturbinebladen niet langer bewegen tijdens perioden van zonneschijn op het moment dat de zonnestand zodanig is dat slagschaduw zou optreden dan wordt de hinder op dat moment gereduceerd tot nul. Geen bewegend rotorblad = geen hinderopwekkende slagschaduw. Het stilstaan van de windturbine leidt echter tot een productieverlies voor de windturbine. Hoe minder de windturbine kan draaien, hoe kleiner de energieopbrengst van de windturbine is. Dit resulteert automatisch in hogere kosten per geproduceerde eenheid energie.

De belangrijkste vraag in het thema slagschaduw bij windturbines is dan ook de vraag:

“Hoeveel slagschaduw treedt op en voor welke woningen dient een windturbine stilgezet te worden om norm overschrijdende slagschaduw te voorkomen?”

Zoals beschreven zijn er meerdere berekenmethodieken aanwezig die hierop een antwoord kunnen voorstellen. De rekenmethodieken gebruiken modellen om een antwoord te kunnen geven over de hoeveelheid dagen waarop meer dan 20 minuten slagschaduw zou kunnen optreden. Aangezien een rekenmodel altijd een benadering van de werkelijkheid is zullen er afwijkingen en verschillen ontstaan in de verschillende berekenmethodes. Elke berekeningswijze heeft zijn eigen voordelen en nadelen en de beschikbare modellen variëren van simpel tot complex en van modelmatig tot statistisch. In deze notitie wordt een beschrijving van vier mogelijke berekeningsmethoden gegeven en worden de voor- en nadelen per methode benoemd. Aangezien de berekeningswijze en methodieken lastig zijn te omschrijven zijn er vier namen gegeven aan de berekeningsmethoden om ze te herkennen en communicatie eenvoudiger te maken. De rekenmethoden worden toegepast op een toets punt in de omgeving waar slagschaduw hinder zou kunnen optreden. Bij een toets punt wordt getoetst of norm overschrijdende slagschaduw optreden, indien de methode aangeeft dat dit het geval is dan zou een stilstand voorziening voor dit toets punt worden uitgevoerd. Een initiatiefnemer of beheerder van een windturbine of –park kan ervoor kiezen om voor meer woningen te windturbine stil te zetten dan volgens de wettelijke wet noodzakelijk is om hinder en overlast te voorkomen.

Methode 1 – De 6-uurs benadering

Methode 2 – Gemiddelde benadering overschrijdingsdagen (Wagendorpse methode)

Methode 3 – Modelmatige kansverdeling benadering

Methode 4 – Reflectieve benadering

Rekenmethoden

De berekening van de hoeveelheid slagschaduw kent twee stappen:

1. Bruto slagschaduw berekening
2. Correcties voor meteorologische omstandigheden

In de eerste stap wordt op basis van de bekende coördinaten en afmetingen van de windturbine en de woningen en de baan van de zon de precieze momenten bepaald waarop slagschaduw kan optreden. Dit is de bruto schaduwduur en de berekeningsmethode is altijd gelijk. Omdat de zon niet altijd schijnt en de windturbine niet altijd draait is dit echter een overschatting van de daadwerkelijk optredende schaduw. Daarom is een correctie nodig. In de tweede stap worden deze correcties uitgevoerd en wordt de ‘verwachte gemiddelde slagschaduw’ op de gevel van de woning bepaald. In deze tweede stap zijn vier de vier *verschillende methoden aan de orde*.

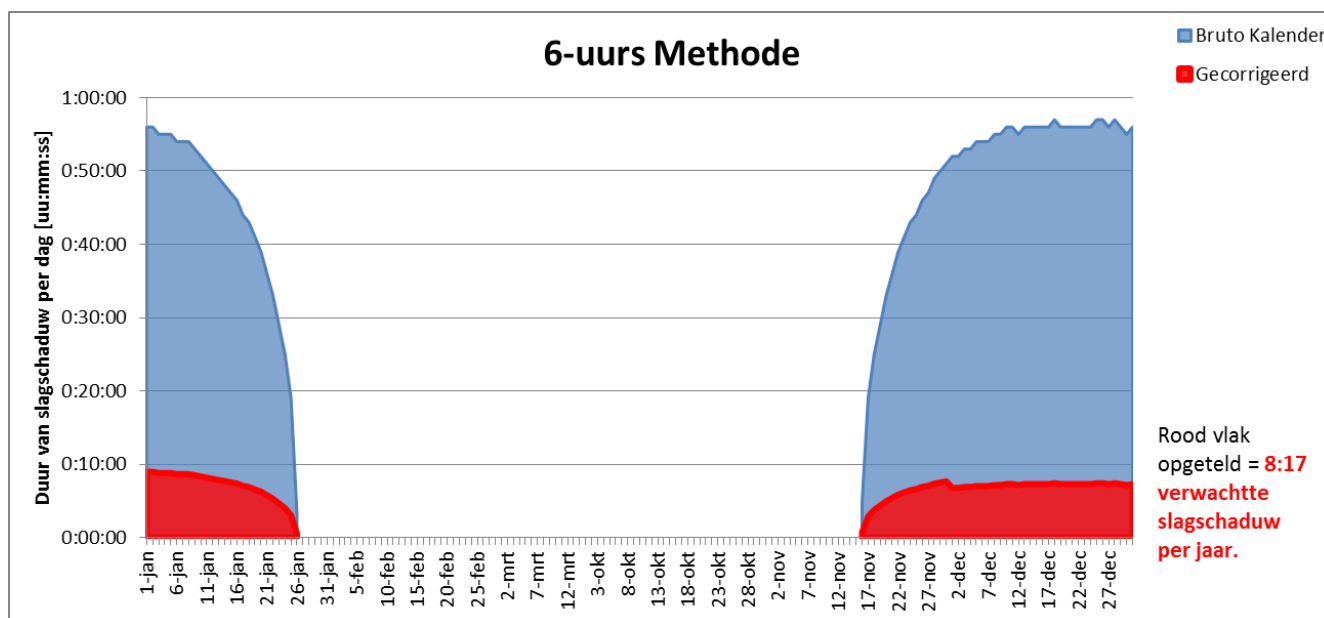
Methode 1 - De 6-uurs benadering

De 6 uren-benadering is de meest gebruikte methode in Nederland om snel en eenvoudig een indicatie te krijgen van de hoeveelheid slagschaduw die zou kunnen optreden. De 6 uren benadering gaat uit van de te verwachte slagschaduw in een jaar. Deze waarde komt voort uit een benadering van de wettelijke norm door een maximum te stellen aan de duur van de slagschaduw per jaar van 17 dagen maal 21 minuten slagschaduw = 357 minuten = afgerond naar boven 6 uur. Uit de praktijk blijkt dat er weinig tot geen klachten ontstaan indien toetspunten gemiddeld niet meer als zes uur slagschaduw per jaar ontvangen.

Om de duur van de gemiddeld te verwachte slagschaduw te berekenen wordt de bruto-slagschaduwkalender uitgerekend voor een toets punt waarna met behulp van maandgemiddelde correcties voor de zonschijn en jaargemiddelde correcties voor de windrichting de te verwachte slagschaduwduur per jaar wordt berekend. Een brutokalender voor slagschaduwhinder zal het volgende weergeven:

XX uur in januari
XX uur in februari

Dit kan uitgebeeld worden in een grafiek. De blauwe contour geeft de potentiële slagschaduwduur weer. Dit betekent dat dit de optredende slagschaduw zou zijn indien de zon altijd schijnt en de wind altijd uit de verkeerde richting waait. Dit wordt ook wel de brutokalender voor slagschaduw genoemd.



Vervolgens wordt een correctie toegepast voor de gemiddelde maandelijkse percentage zonschijnduren per periode tussen zonsopkomst en zonsondergang. Als bijvoorbeeld in januari per dag 9 uur heeft gezeten tussen zonsopkomst en zonsondergang en de zon heeft gemiddeld 2,5 uur per dag geschinen dan is de zonschijncorrectie 27,8%. Tevens wordt over de resulterende schaduwduren nog een correctie toegepast voor de stand van de wieken ten opzichte van het toetspunt, dit is afhankelijk van de windrichtingen. Indien de rotor haaks ten opzichte van het toetspunt draait treedt er immers slagschaduw over een groter vlak op dan als de rotor in gelijke kijkrichting als het toetspunt draait. Deze correctie is afhankelijk van de windrichtingverdeling per jaar en is normaliter een waarde tussen de 0,6 en 0,7. De resulterende waarden per maand worden opgeteld per jaar en worden beschreven als de gemiddeld te verwachten slagschaduwduren per jaar. In de figuur wordt dus het rode vlak opgeteld om te verwachten slagschaduwduur per jaar te achterhalen. Deze waarden zijn ook als een contour op de kaart weer te geven om de hoeveelheid slagschaduw per locatie aan te geven. Door de wijze van berekenen en modelmatige beperktheden van visuele contouren komt

een 5-uurscontour van de gemiddeld te verwachten slagschaduw op kaart overeen met circa 6 uren verwachte slagschaduw per woning per jaar. Bij de zes-uurs methodiek wordt voor alle toetspunten die meer dan 6 uur te verwachte slagschaduwinder per jaar ondervinden een stilstandvoorziening uitgevoerd.

De voordelen van deze methodiek zijn:

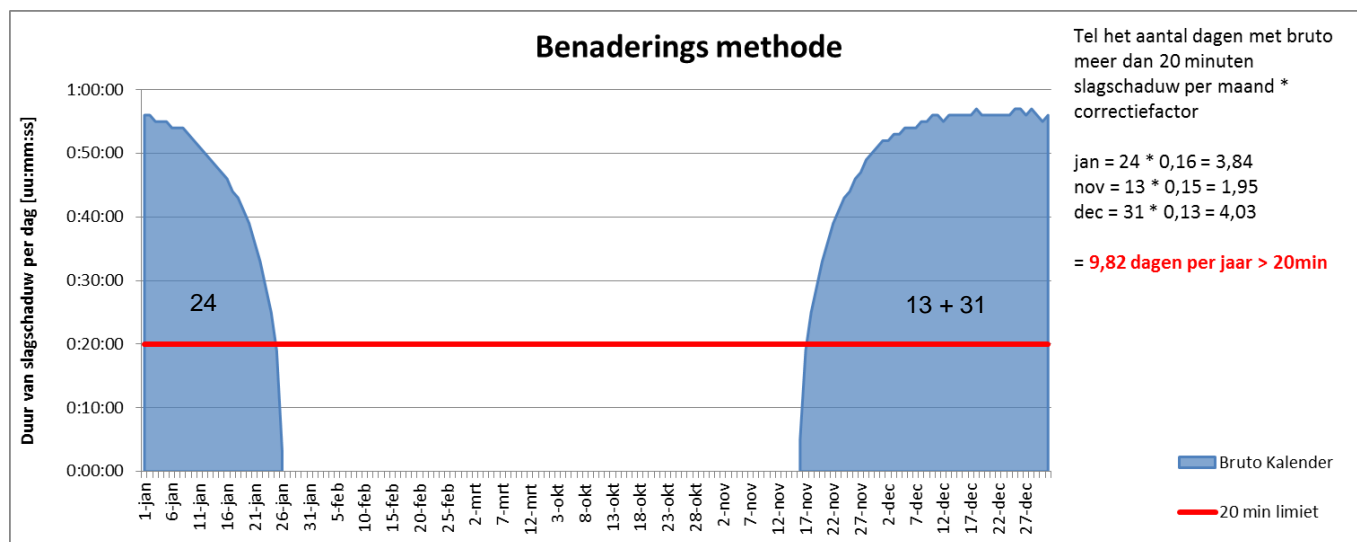
- Snel
- Contouren ook snel op kaart weer te geven.
- 6 uur verwachte slagschaduw per jaar is als regel begrijpelijk
- Ervaring leert dat klachten uit de praktijk beperkt aanwezig zijn
- Eenvoudig cumulatie van meerdere windturbines of windparken te berekenen.

Nadelen

- Geen directe relatie met wettelijke norm van maximaal 17 dagen meer dan 20minuten.
- Vaker stilstandvoorziening als wettelijk benodigd = meer productieverlies
- Door het gebruik van jaar/maand gemiddelde waarden kunnen er in de praktijk jaarlijks overschrijdingen van zes uur slagschaduw plaatsvinden.
- Geen inzicht in de spreiding van slagschaduwinder door meteorologische omstandigheden

Methodie 2 – Gemiddelde benadering overschrijdingsdagen (Wagendorpse methode)

In de case bij Windpark Wagendorp is in verband met een onderzoek naar het aantal dagen met overschrijding van 20 minuten slagschaduw een andere analyse gebruikt. Hierbij is in de bruto kalender het aantal dagen geteld met een waarde van meer dan 20 minuten slagschaduw per dag. Dit aantal dagen is per maand vermenigvuldigd met de correctiefactoren behorende bij deze maand. Dit resulteert in een benadering van het aantal dagen waarop meer dan 20 minuten slagschaduw zou kunnen optreden. Visueel is deze benadering als volgt voor te stellen:



Voordelen:

- Snelle benaderingsmethode van aantal dagen met overschrijding
- Tijd / kostenbesparend
- Geen beeld van verwachte slagschaduw duur

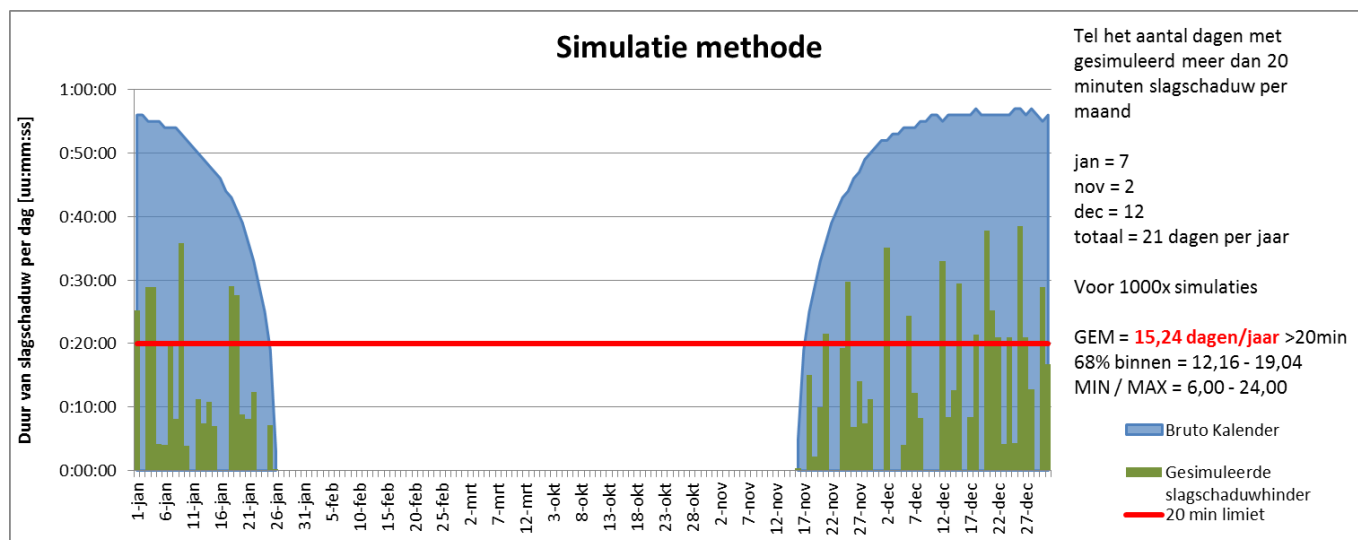
Nadelen:

- Geen relatie met praktijkresultaten
- Door gebruik van jaar/maandgemiddelde correctiefactoren wordt de hoeveelheid slagschaduw dagen uit de praktijk onderschat.
- Onvoorspelbare / onrealistische resultaten bij cumulatietijden van meerdere windturbines

Methode 3 – Modelmatige kansverdeling methode

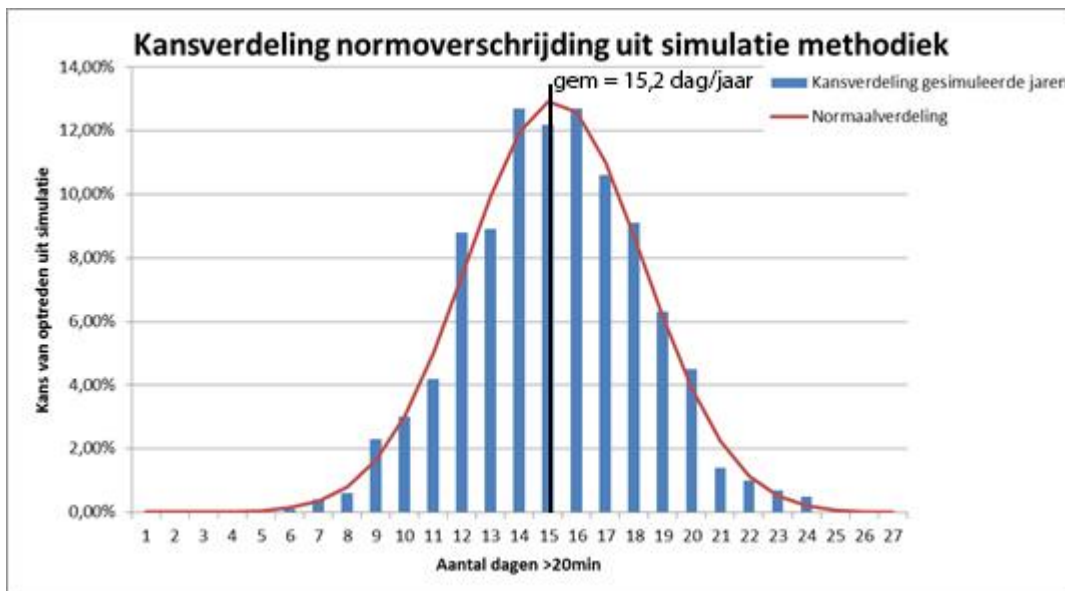
De kern van deze methode is om door middel van simulaties de slagschaduw te analyseren. Door statistieken over de kans op een bepaalde hoeveelheid zonschijn per dag te koppelen aan de bruto slagschaduwkalender kan een analyse worden gemaakt van de kans op een bepaald aantal dagen met meer dan 20 minuten slagschaduw. Uitgangspunt hierbij is dat niet alleen het gemiddelde in beeld wordt gebracht maar ook de kans op overschrijding en de spreiding indien de schaduw dagen in het jaar anders verdeeld worden over de zonnrijke dagen. In eerste instantie wordt weer uitgegaan van de bruto slagschaduwkalender.

Deze kalender wordt vermenigvuldigd met een zonschijnpercentage voor een specifieke dag. De kans dat een bepaalde dag in januari 10% zonschijn heeft is bijvoorbeeld 40%, de kans dat een januari dag met slagschaduw wordt vermenigvuldigd met 0,10 is dan ook 40% voor het eerste rekenjaar. Deze combinatie van kansen wordt voor elke dag in het jaar uitgevoerd. Voor het eerste rekenjaar kan het resultaat van het aantal dagen met meer dan 20 minuten slagschaduw worden opgeteld. Het eindresultaat per dag wordt nog met een factor voor de variatie in windrichting vermenigvuldigd. Een voorbeeld van één simulatiejaar is hieronder weergegeven. De groene balken geven de gesimuleerde slagschaduwhinder weer. Het blauwe vlak is wederom de bruto-kalender en de rode lijn is de grens van 20 minuten per dag.



Deze analyse wordt voor 1000 rekenjaren uitgevoerd waarbij specifieke dagen in het jaar dus elke keer een andere kans hebben om ingedeeld te worden bij een andere hoeveelheid

zonneshijn voor die dag, dit is gerelateerd aan de kansverdeling voor zonneshijn. Het resultaat is een grafiek met 1000 waarden die het aantal dagen met meer dan 20 minuten per jaar voorstellen voor alle 1000 rekenjaren. Deze grafiek kan gezien worden als een normaalverdeling van de kans op normoverschrijding. De gemiddelde waarde van deze normaalverdeling mag dan niet hoger zijn als 17 dagen.



Voordelen

- Inzicht in kansverdeling op hoeveelheid slagschaduw inclusief de uiterste waarden (extreme jaren)
- Variatie in effecthoeveelheid weergegeven
- Om te zetten in een kansverdeling van de te verwachte hoeveelheid slagschaduwduur per jaar.

Nadelen:

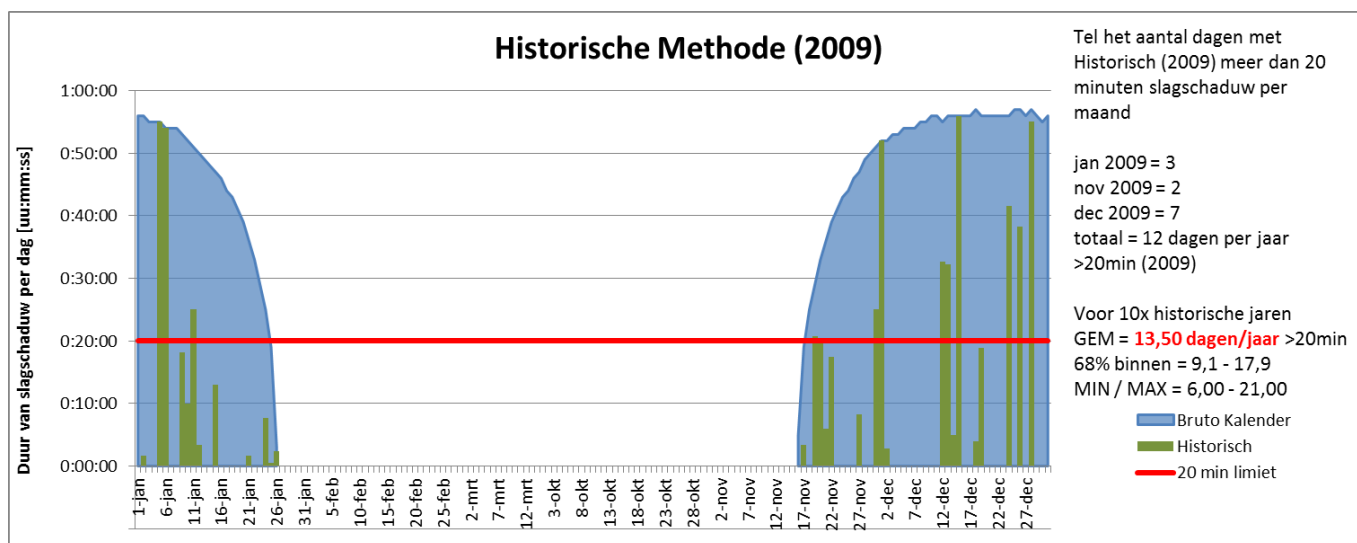
- Rekenmethode door gebruik van kansberekening lastiger uit te leggen aan leken
- Contouren niet op kaart weer te geven
- Enigszins worst-case benadering doordat wordt uitgegaan dat de kans op een percentage zonneshijn volledig wordt toegekend aan het deel van de dag dat slagschaduw kan optreden is.

Methode 4 – Reflectieve/historische methode

Bovenstaande drie methoden maken allen gebruik van langjarige gemiddelden of kansverdelingen van de zonneshijn per dag of maand. Een andere methode is om de toekomstige slagschaduw te analyseren door terug te kijken op de recente geschiedenis. Dit kan gezien worden als een reflectieve methode. De vraag die hierbij wordt gesteld is niet hoeveel slagschaduw in de toekomst zal optreden maar de vraag is hoeveel slagschaduw zou hebben opgetreden in de laatste 10 jaar als de windturbines er al hadden gestaan.

Om dit te analyseren wordt aan de hand van de bruto slagschaduwkalender de hoeveelheid potentiële slagschaduw in kaart gebracht. Deze hoeveelheid wordt vergeleken met de

uurwaarden voor de zonneschijnduur en de dagelijkse windrichting die daadwerkelijk in een modeljaar per uur en dag is opgetreden (bv. 2009). De waarde die niet overlappen worden verwijderd uit de gegevens. Dit resulteert in een grafiek met gaten op momenten wanneer de zon niet heeft geschinen. Door de resultaten op te tellen per dag kan een indicatie worden gegeven van de duur van de slagschaduw per dag in het jaar 2009. Vervolgens wordt het aantal dagen geteld waarop meer dan 20 minuten slagschaduw zou hebben opgetreden in 2009. Door deze berekening voor 10 jaren uit te voeren wordt de kans op extreme modeljaren verminderd. Het resultaat van het aantal dagen met meer dan 20 minuten van de 10 modeljaren kan worden gemiddeld en mag dan niet meer dan 17 dagen bevatten. In een grafiek kan dit als volgt worden weergegeven:



Voordelen

- Rekenmethode aan de hand van daadwerkelijk opgetreden zonneschijn in een jaar
- De historische methode is simpeler te verklaren dan prognosemethoden
- Cumulatie zeer realistisch mee te nemen

Nadelen

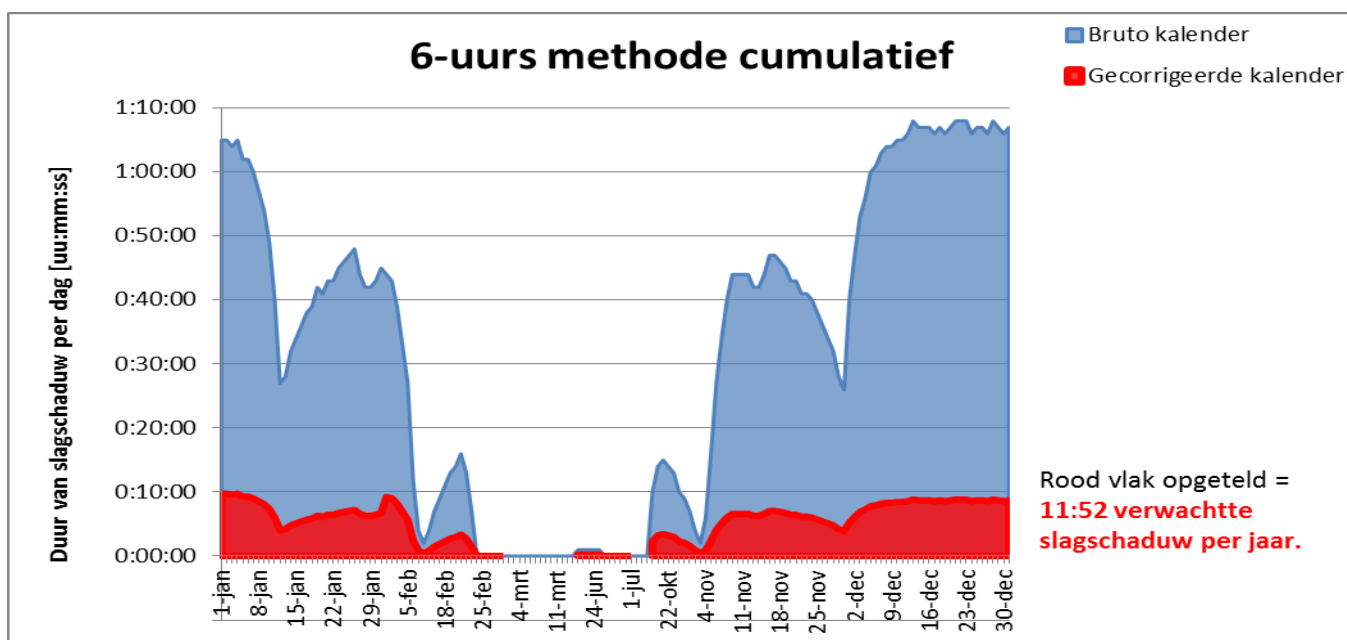
- Aangezien dit per toetspunt voor 10 jaren aan specifieke zon- en windrichting-data uitgevoerd dient te worden is dit een tijdrovende en kosten intensieve methode (24 uur * 365 dagen * 10 jaren per toetspunt). Dit is echter wel door te ontwikkelen en dus te optimaliseren en te automatiseren in de nabije toekomst. Hierdoor zouden berekeningen sneller kunnen worden uitgevoerd.
- Onderschatting van kortstondige slagschaduwperioden door lokale opklaringen in wolken.

Cumulatieve effecten

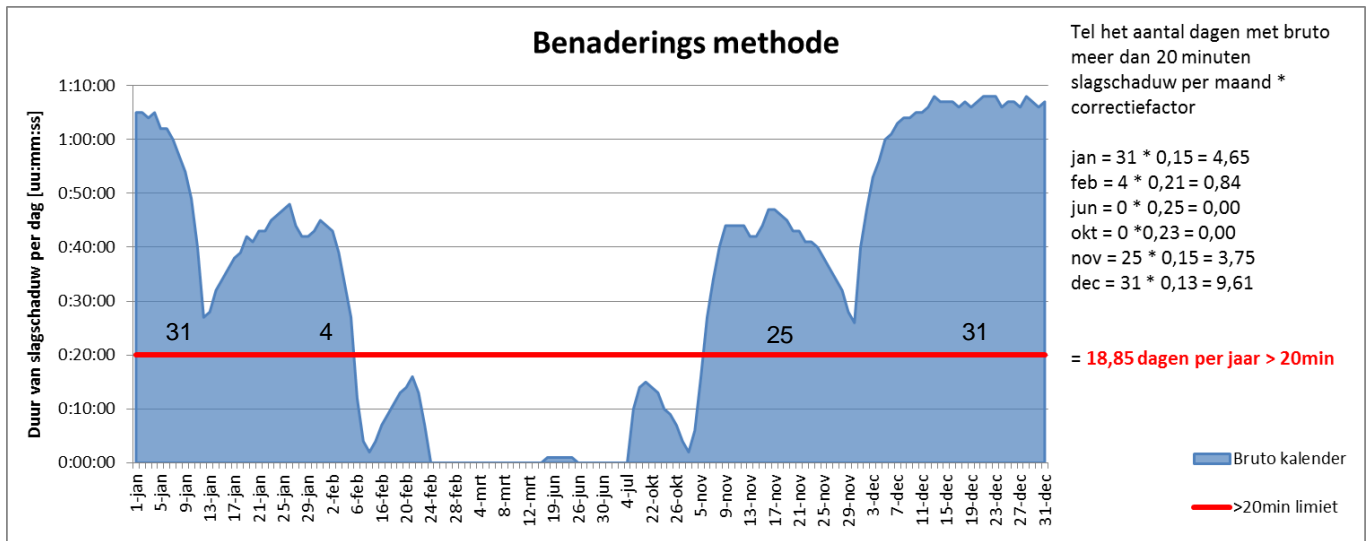
Een veel besproken onderwerp bij windparken zijn cumulatieve slagschaduweffecten. Indien een toetspunt door meerdere windturbines is omgeven kan deze op dagen slagschaduw ondervinden van beide windturbines. Ook kan er een geheel nieuwe periode aan slagschaduw door een meervoud aan windturbines aan de slagschaduwkalender worden toegevoegd. De verschillende rekenmethodieken kunnen in meer of mindere mate omgaan met cumulatieve effecten.

Methode 1 – de 6-uurs methode.

De 6-uurs methode geeft een inschatting van de cumulatieve effecten en kan ook goed op kaart worden weergegeven. Dit geeft een behoorlijke inschatting van of normoverschrijding kan optreden. Nadeel van deze methode is wel dat toetspunten die relatief vele dagen met slagschaduw hinder ondervinden maar relatief korte perioden (25 min) in de praktijk weinig dagen met meer dan 20 minuten slagschaduw hinder ervaren. Cumulatief kan de 6-uurs methode hier echter wel een overschrijding van de zes uur constateren. De methode houdt dus op een worst-case manier rekening met cumulatieve effecten.

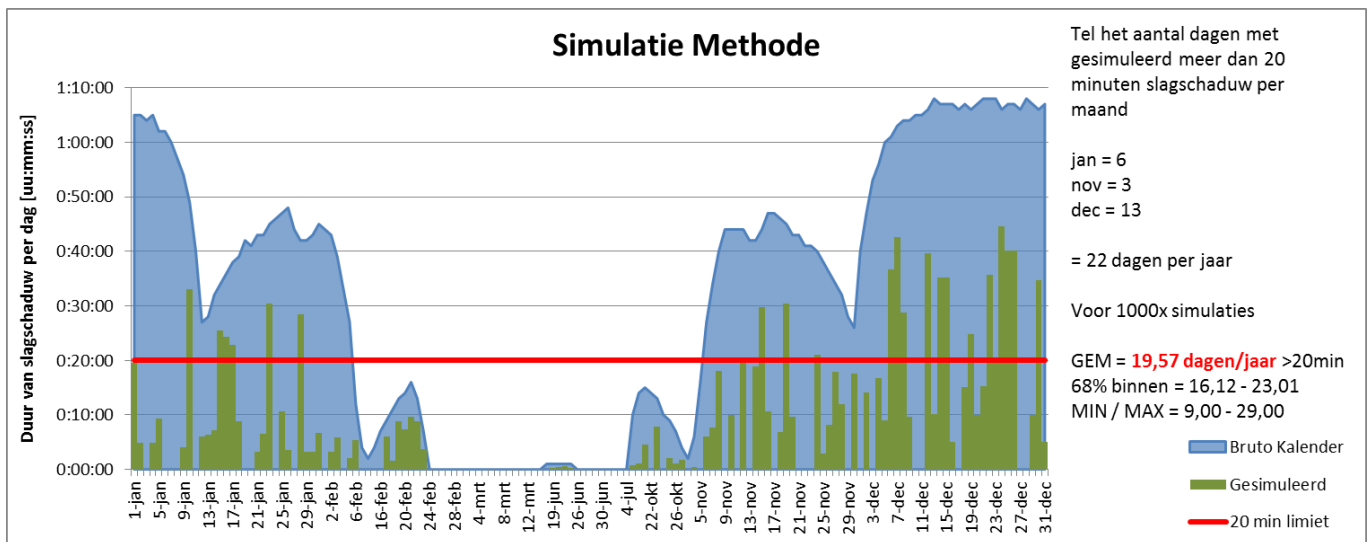


Methode 2 – Gemiddelde benadering overschrijdingsdagen (Wagendorpse methode)



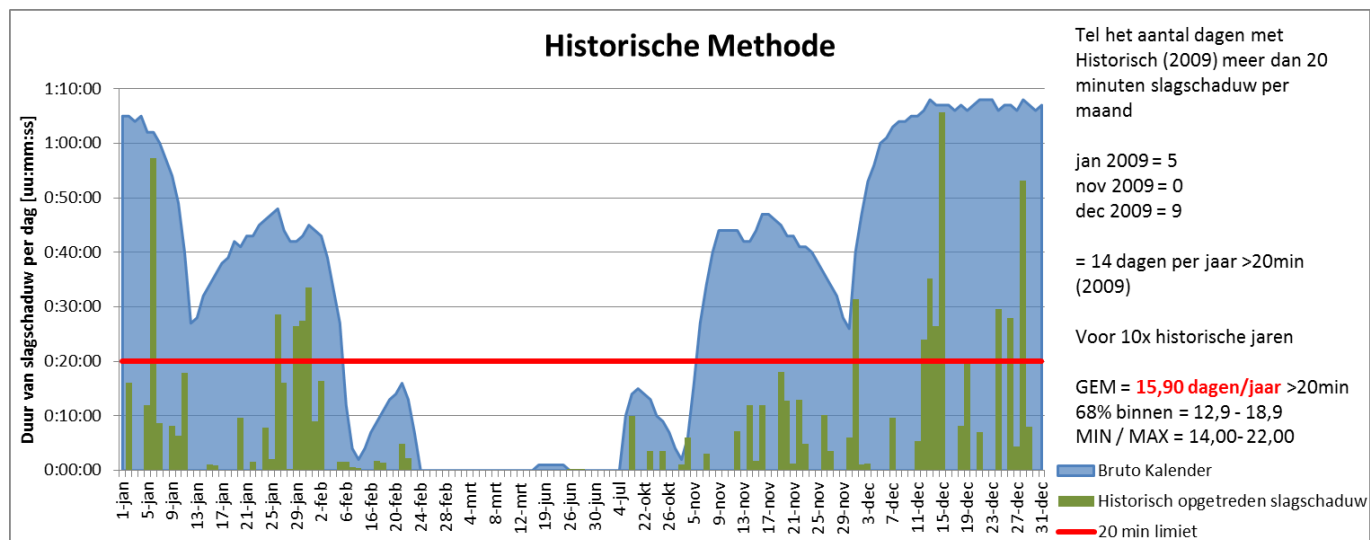
De benaderingsmethode werkt relatief goed indien de cumulatieve slagschaduwkalenders op dezelfde dag vallen en er dus dagen met grote perioden aan slagschaduw worden gecreëerd zoals in dit voorbeeld. Deze methode onderschat echter de hoeveelheid slagschaduw dagen met meer dan 20 minuten slagschaduw indien de cumulatieve effecten op verschillende dagen actief zijn.

Methode 3 – Modelmatige kansverdeling methode



De simulatie methode geeft een indicatie van de slagschaduw per jaar. Deze methode geeft echter ten opzichte van de praktijk een overschatting van de slagschaduw op dagen met lange bruto slagschaduw tijden (+50 minuten). De methode geeft echter een beter resultaat indien de dagen van verschillende windturbines niet overlappen.

Methode 4 – Reflectieve/historische methode



De historische methode geeft een inschatting van de daadwerkelijk opgetreden slagschaduw in een bepaald jaar. Indien dit voor 10 historische jaren wordt uitgevoerd ontstaat een redelijk zicht op de cumulatieve effecten. Hieruit blijkt echter wel dat de spreiding groot is en dat resultaten sterk afhankelijk kunnen zijn van de weersomstandigheden.

Aanbeveling

Onze aanbeveling luidt dat als een eerste methode het gebruik van de zes-uurs methodiek een goede indicatie geeft of er voor een toetspunt mogelijk normoverschrijding zal plaats kunnen vinden. Dit is een worst-case benadering die eventuele hinder zo ver mogelijk minimaliseert. In de praktijk blijkt dat toepassing van stilstand voorzieningen bij windturbines voor alle toets punten met meer dan zes uur verwachte slagschaduw leidt tot weinig klachten en zekerheid biedt dat gemiddelde normoverschrijding niet zal plaatsvinden. Wij adviseren om in vroegtijdige fasen van een project de 6-uurs methodiek te hanteren voor het bepalen van de slagschaduw, in het gros van de projecten leidt dit slechts tot een zeer beperkt productieverlies per windturbine.

In die projecten waar specifieke problemen spelen en de belangen rondom slagschaduw groot zijn kan ervoor worden gekozen om de hinder uitgebreider in kaart te brengen. Door toepassing van de historische methode kan op een duidelijke, communicateerbare en heldere manier de effecten van slagschaduw worden beoordeeld. Deze methode is echter complex en omvangrijk en is tijdsintensief om uit te voeren voor een groot veelvoud aan toets punten. De simulatie methode leent zich dan ook beter voor grootschalige toepassingen. De historische methode heeft echter concrete voordelen door zijn helderheid en praktijkgerichte toepassing. Het doel is om in de toekomst een model uit te werken die de praktijktoets van de historische methode combineert met de rekentijd van de simulatiemethode. Dit model zal naar waarschijnlijkheid half 2015 ontwikkeld zijn.

De benaderingsmethode voor norm overschrijding kan in sommige gevallen snel en eenvoudig worden toegepast. Uitvoering hiervan dient echter zeer zorgvuldig te toegepast aangezien bijzondere specifieke slagschaduw situaties door deze methode aanzienlijk onderschat kunnen worden.

Technisch gezien zou een normstelling op basis van een maximaal gemiddeld te verwachte hoeveelheid slagschaduwuren per jaar het eenvoudigst zijn om te verklaren en uit te rekenen. Zo lang er echter wordt gekeken naar de huidige normstelling van gemiddeld maximaal 17 dagen per jaar meer dan 20 minuten slagschaduw hinder zullen de berekeningsmethoden voor het wel of niet toepassen van stilstandvoorzieningen onderling afwijkende resultaten kunnen geven. Wij adviseren dan ook stellig om een worst-case benadering van de 6-uurs methodiek toe te passen om onnodige onrust en kosten intensieve berekeningen te besparen.

Voorbeeld van schaduw op een huis

We onderzoeken de slagschaduw op 29 januari 2009 met de vier verschillende methoden. Op deze dag kan er bij 100% zonneshijns en zuidwesten wind maximaal (bruto) 42 minuten aan slagschaduw optreden.

Methode 1: Zes uren methodiek

In methode 1 wordt een zonccorrectie toegepast voor de maand januari van 0,25 aangezien de zon gemiddeld gezien de maand januari overdags maar 25% van de tijd schijnt. Tevens wordt een jaargemiddelde windrichtingcorrectie toegepast van 0,64 aangezien de wind niet altijd vanuit het zuidwesten schijnt. Deze methode voorspelt hiermee:

$42 \text{ minuten} \times 25\% \times 64\% = 6 \text{ minuten en } 18 \text{ seconden}$ aan slagschaduw op deze dag.

Alle dagen in het jaar worden opgeteld en getoetst aan een maximum van zes uur per jaar.

Methode 2: Gemiddelde benadering overschrijdingsdagen

In methode 2 wordt bekeken of er 20 minuten aan slagschaduw opgetreden zou kunnen hebben. Met een waarde van 42 minuten is dit het geval. Deze dag wordt dus als een potentiële normoverschrijdende dag geteld.

$1 \text{ overschrijding} \times 25\% \times 64\% = 0,16 \text{ overschrijdingsdag}$

Alle overschijdingen worden opgeteld en worden getoetst aan een maximum van 17.

Methode 3: Modelmatige kansverdeling methode (simulatie)

In methode 3 worden 1000 verschillende dagen gesimuleerd met verschillende hoeveelheden zonneshijns gebaseerd op de meteostatistieken van de hoeveelheid zonneshijns per dag. In simulatiejaar 204 was de uiteindelijke slagschaduw op 29 januari bijvoorbeeld 36 minuten terwijl in simulatiejaar 5 de uiteindelijke slagschaduw op 29 januari slechts 3 minuten bedroeg. In simulatiejaar 756 was het de hele dag bewolkt en heeft er geen slagschaduw opgetreden. Gemiddeld gezien over alle 1000 simulatiejaren voorspeld het model een slagschaduwduur van 8 minuten voor de dag 29 januari.

Getoetst wordt echter op een maximale kans van optreden van 50% van meer dan 16 dagen met meer dan 20 minuten slagschaduw gemiddeld over alle 1000 simulatiejaren.

Methode 4: Reflectieve/historische methode

In methode 4 is gekeken naar de historisch opgetreden slagschaduw. De 42 minuten slagschaduwduur zou kunnen optreden van 14:55 tot 15:37. In het jaar 2009 was op 29 januari de gemiddelde windrichting West (90 graden). De duur van de mogelijk op treden slagschaduw werd hiermee beperkt tot een periode van 14:58 tot 15:34. Tijdens deze periode was het deels bewolkt en begon de zon pas te schijnen vanaf 15:15. De totale hoeveelheid opgetreden slagschaduw was hiermee op 29 januari 2009 19 minuten.

Toetsing zou nu plaatsvinden door analyse te herhalen voor 10 historische jaren. Het aantal dagen met normoverschrijding per jaar kan worden geteld en de gemiddelde hoeveelheid hiervan mag niet meer bedragen als 17 minuten.