
Vindoptimeret opladning V2G

Wind Optimized Charging V2G

Analyse af tidsstyret, optimeret opladning af elbiler med vindproduktion, midlertidig lagring af overskydende vindproduktion og V2G (Vehicle-to-Grid) energi-arbitrage. Baseret på simulering af en konstrueret brugerprofils kørsel og opladning, ved brug af alternative elbilmodeller, alternative opladningsstrategier og i forhold til historiske elmarkedsdata. Simuleringernes primære output er årlig opladningsudgift, CO₂-udledning per kørt km og vindandel i elforbrugets energimix.

Vindenergi Danmark

Af Jørgen Horstmann & Frank Nørgaard

Medfinansieret af Energistyrelsen

April 2015



Vindoptimizeret opladning V2G

Delrapport 2 af 4

Rapport

V1.1 web



VINDENERGI

D A N M A R K

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	1
1.1	Baggrund	2
1.2	Disponering af indhold	2
2	Metode	3
2.1	Strategiens opbygning og opgradering med V2G	4
2.1.1	Bagvedliggende vision	4
2.1.2	Tilstræbte optimeringseffekter	7
2.1.3	Opladningsstrategiens opbygning	8
2.1.4	Opgradering med V2G	10
2.1.5	V2G energi-arbitrage	11
2.1.6	Marginale V2G gevinster	11
2.1.7	V2G-procent og alternative budstrategier	13
2.2	Datagrundlag og forudsætninger	16
2.3	Batteri kostpris og slitage	17
2.4	Beregningsmetoder for output-variable	18
2.4.1	Beregning af opladningsudgift	20
2.4.2	Beregning af CO ₂	21
2.4.3	Beregning af vindandel	24
3	Analyse	25
3.1	En elbil: Direkte gevinster for elbilejere	25
3.1.1	Opladningsudgift før V2G-batterislitage	25
3.1.2	Opladningsudgift efter V2G-batterislitage (2015 batteri scenarie)	26
3.1.3	Opladningsudgift efter V2G-batterislitage (2022 batteri scenarie)	27
3.1.4	Udviklingstrends vedrørende V2G-energi-arbitrage og V2G-batterislitage	28
3.1.5	CO ₂ -udledning	30
3.1.6	Vindandel	35
3.2	Mange elbiler: Afledte gevinster for samfundet	38
3.2.1	55.000 elbilers bidrag til vindkraft balancering	38
3.2.2	55.000 elbilers bidrag til reducere af elforsyningens totale CO ₂ -udledning	40
4	Konklusion	41

Figuroversigt

Figur 1: Vindoptimeret opladning V2G gevinstdeling	1
Figur 2: Analysedesign	3
Figur 3: Vindoptimering udnytter forbrugsfleksibilitet imod vindfluktuationer	5
Figur 4: Vindoptimeret værdikæde med elmarked, prosumers og aggregatorer	6
Figur 5: Rangordning og prioritering af opladet vindproduktion (eksempel)	7
Figur 6: Tilstræbte optimeringseffekter	8
Figur 7: Opdeling af batteriets kapacitet i tre dele - uden og med V2G	8
Figur 8: Optimeringens beslutningstrin	9
Figur 9: Elbilers opladningsudgift uden og med V2G	11
Figur 10: V2G øger markedsdeltagelse og effektiviserer vindproduktion	12
Figur 11: Vindoptimeret opladning uden og med V2G – W2V og W2V2G	12
Figur 12: V2G-procent angiver energi-arbitrage andel af egenforbrug	13
Figur 13: Vindoptimeret opladning ved alternative budstrategier og V2G-omfang	15
Figur 14: Analysens datagrundlag og forudsætninger	16
Figur 15: V2G batteri slitage omkostninger	17
Figur 16: CO ₂ -udledning for elværker og udveksling 2012	18
Figur 17: Nettab	19
Figur 18: Underskud og overskud af dansk elproduktion – nettoimport/-eksport	19
Figur 19: Beregning af opladningsudgift for Vindoptimeret opladning V2G	20
Figur 20: Forbrugereprisens delkomponenter	20
Figur 21: Beregningsgrundlag for CO ₂ -indhold i Vindoptimeret opladning V2G	22
Figur 22: Beregning af CO ₂ -indhold i elforbrug til Vindoptimeret opladning V2G	23
Figur 23: Opladningsudgift før V2G-batterislitage omkostninger	25
Figur 24: Opladningsudgift efter V2G-batterislitage omkostninger (US DOE 2015)	26
Figur 25: Opladningsudgift efter V2G-batterislitage omkostninger (US DOE 2022)	27
Figur 26: V2G energi-arbitrage profit > V2G batterislitage omk = V2G mergevinst	28
Figur 27: V2G-batterislitage omkostningsparitet	28
Figur 28: Mængde elproduktion til forsyning af elforbrug til opladning	29
Figur 29: Elproduktion til Vindoptimeret opladning af Tesla S med 43 pct. V2G	30
Figur 30: CO ₂ -udledning g per kørt km for Vindoptimeret opladning V2G	31
Figur 31: CO ₂ -udledning g per kørt km for alternative opladningsstrategier	32
Figur 32: CO ₂ kg/år for Vindoptimeret opladning V2G fordelt på op-/afledning	33
Figur 33: CO ₂ g/kWh for Vindoptimeret opladning V2G fordelt på op-/afledning	34
Figur 34: Vindandel for Vindoptimeret opladning V2G	35
Figur 35: Vindandel i elbilens elforbrug til kørsel	36
Figur 36: Andel overskydende og ineffektiv vindproduktion i egenforbrug	37
Figur 37: Vindopladning 55.000 elbiler - V2G andel af balancering i DK-Vest 2012	38
Figur 38: Vindopladning 55.000 Nissan Leaf V2G _{opladning} og RK _{ned} månedsfordelt	39
Figur 39: Vindopladning 55.000 Tesla S V2G _{afledning} og RK _{op} månedsfordelt	39
Figur 40: 55.000 elbilers totale CO ₂ -udledning per år og CO ₂ -besparelser	40
Figur 41: Vindoptimeret opladning V2G gevinstdeling	41
Figur 42: Vindoptimeret opladning V2G resultater	42

1 Indledning

Formålet med denne rapport er at analysere, hvordan elbilers opladning kan optimeres med vindenergi til maksimal fælles gavn for elbilejere, vindproducenter, samfundsøkonomi og miljø. I tidligere analyse "Vindoptimeret opladning af elbiler" blev det konkluderet, at der vil kunne genereres betydelige gevinster ved at tidsstyre opladning til elbilers egenforbrug optimalt i forhold til vindproduktionen.

I nærværende analyse fokuseres på gevinstpotentialet med Vindoptimeret opladning af elbiler, der er udstyret med en smart agent og Vehicle-to-Grid (V2G) teknologi, der muliggør, at elbilens forbrugsfleksibilitet og batterilager vil kunne benyttes til at facilitere, at andre ikke-fleksible elapparater omkostningseffektivt vil kunne forsynes med CO₂-fri vindenergi. Og som samfundsøkonomisk kunne spare omkostninger til at forsyne en større del af Danmarks elforbrug med vindenergi, og derved spare alle forbrugere PSO-betaling.

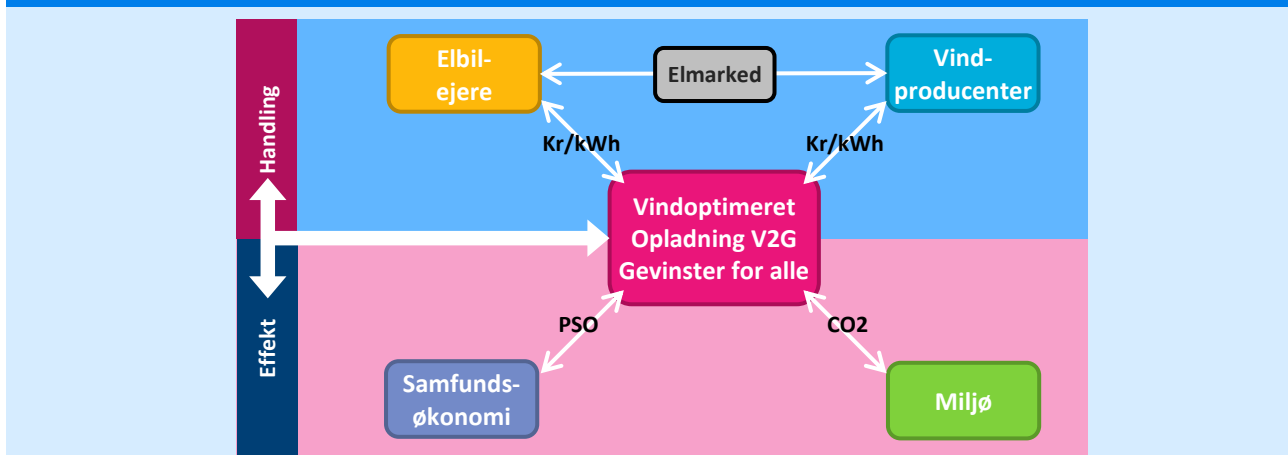
En agent er betegnelsen for en særskilt enhed, der på instruks, selvstændigt observerer, beslutter og handler på en andens vegne, og i overensstemmelse med vedkommendes behov og ønsker. Fx vindopladning for en elbilejer. V2G er betegnelsen for, at der kan aflades energi fra elbilens batteri tilbage til elnettet.

Med V2G oplades batteriet løbende med mere energi, end elbilen forbruger til kørsel. Den overskydende energi lagres midlertidig og sælges efter en periode tilbage til elmarkedet. Energiarbitrage er løbende køb og salg af energi, hvor princippet er at købe billigt og sælge dyrt. Den profit, der skabes med V2G-energiarbitrage, vil kunne tilfalde elbilejeren som et incitament, der modregnes i opladningsudgiften. Tilsvarende vil afledte CO₂-gevinster i det samlede elsystem kunne godskrives i elbilens miljøregnskab.

I nærværende analyse driver elbilen V2G-energiarbitrage handel med vind på regulerkraftmarkedet. Den køber/oplader med regulerkraft til nedregulering. En del bruger den til kørsel, og den resterende del sælger/aflader den tilbage til elmarkedet som regulerkraft til opregulering. Elbilen køber billig vindstrøm, når der er overskudsproduktion, og sælger den dyrt tilbage, når det er vindstille.

Det centrale spørgsmål er, om V2G yderligere vil kunne reducere elbilejerens opladningsudgift og CO₂-udledning samt skabe merværdi for vindproducenter og samfundet. Udover, hvad Vindoptimeret opladning uden V2G gør. Eller om de marginale omkostninger til V2G-batterislitage overstiger V2G-mergevinsterne.

Figur 1: Vindoptimeret opladning V2G gevinstdeling



En samfundsmæssig indsats for at udbrede Vindoptimeret opladning V2G kan kun berettiges, såfremt der skabes merværdi for de involverede aktører. For elbilejere handler det om lavere opladningsudgift, lavere CO₂-udledning og højere vindandel i elforbruget. For vindproducenter handler det om bedre driftsøkonomi. Samfundsøkonomisk handler det om afledte gevinster i form af lavere omkostninger til omstilling af elforsyningen med mere vindkraft, udfasning af fossile brændsler, mindre CO₂, energieffektivisering og PSO.

1.1 Baggrund

Nærværende rapport er forfattet af konsulenterne Jørgen Horstmann og Frank Nørgaard for Vindenergi Danmark a.m.b.a. og medfinansieret af Energistyrelsens forsøgsordning for elbiler. Vindenergi Danmark er et uafhængigt elhandelsselskab, som varetager vindmølleejernes interesser i elmarkedet. Vindenergi Danmark sælger strøm fra vindmøller på markedsvilkår og er i dag den største kommercielle aktør på markedet. Vindenergi Danmarks andelshavere har tilsammen over 3.000 vindmøller hvilket svarer til 68 % af de opstillede vindmøller i Danmark. Den installerede effekt er på over 2.500 MW, hvilket svarer til 52 % af den samlede danske kapacitet og til ca. 15 % af det danske elforbrug.

Energistyrelsens forsøgsordning for elbiler er oprettet og videreført som en del af energiaftalen fra marts 2012. Forsøgsordningen skal bidrage med erfaringer med elbiler og infrastruktur og bl.a. medvirke til at belyse mulighederne for indpasning af elbiler som et fleksibelt lager i det danske elsystem, der forbedrer både energiudnyttelsen og mulighederne for at indpasse fluktuerende vindkraft.

Analyseprojektet er en opfølgning på tidligere rapport "Vindoptimeret opladning af elbiler" og efterfølgende analyser i samarbejde med Aalborg Universitet om forsøgsordningens elbil data og batterislitage.

1.2 Disponering af indhold

Analysen omfatter fire publikationer, 1) Abstract & resume, 2) Rapport, 3) Bilag I: Datagrundlag, og 4) Bilag II: Batterislitage.

Nærværende rapport disponeres i fire kapitler: Indledning, metode, analyse og konklusion.

I kapitel 2 Metode beskrives opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G, analysens simuleringer, datagrundlaget og beregningsmetoder for output-variable. Indledningsvis forklares opbygningen af opladningsstrategien og tilstræbte optimeringseffekter. Derefter introduceres analysens simuleringer med henvisninger til de to særskilte bilagspublikationer om simuleringernes datagrundlag og forudsætninger samt om batteriets kostpris og slitage omkostninger. I kapitlets sidste del redegøres for de beregningsmetoder, der anvendes til simuleringens primære output-variable, opladningsudgift, CO₂-udledning og vindandel.

I kapitel 3 Analyse præsenteres simuleringernes resultater. Kapitlets to delafsnit handler om gevinsterne for en enkelt elbil, der anvender opladningsstrategien, og om afledte samfundsmæssige gevinster ved udrulning overfor et større antal elbiler. Første delafsnit handler elbilejerens gevinster vedrørende opladningsudgift, CO₂-udledning og vindandel. Andet delafsnit handler om strategiens samfundsøkonomiske potentiale i et fremtidigt scenarie med udbredelse af mange elbiler og 50 pct. vindandel i elforsyningen.

I kapitel 4 Konklusion opsummeres problemstillinger, delkonklusioner og analysens spørgsmål besvares.

2 Metode

Analysen baseres på simuleringer af elbilers kørsel og opladning for en konstrueret brugerprofil, der benytter elbilen til typisk, rutinemæssig jobpendling kørselsforbrug. Simuleringerne omfatter to konstruerede elbilmodeller med specifikationer svarende til Nissan Leaf og Tesla S, samt tre alternative opladningsstrategier, referencen Ikke-styret opladning samt Vindoptimeret opladning og Vindoptimeret opladning V2G. Analyseårets historiske elmarkedsdata er for 2012.

På den baggrund beregnes output-variable for opladningsudgift, CO₂-udledning og vindandel. Gevinsterne med V2G vurderes i forhold til Ikke-styret opladning og mergevinsterne i forhold til Vindoptimeret opladning uden V2G. Endvidere analyseres mergevinsterne ved varierende omfang af V2G. Endelig vurderes gevinst potentialet set ud fra et samfundsøkonomisk og miljømæssigt synspunkt, under forudsætning af en given udbredelse af et større antal elbiler.

Tanken er, at elbilerne udstyres med en smart opladningsagent, dvs. en software-kodet, matematisk beslutningsalgoritme, indlejret i elbilens opladning styresystemet. Agenten varetager elbilejerens interesser vedrørende opladningsbehov og elmarkedsdeltagelse. Den indsamler markedsinformation, prognosticerer pris- og vindudviklingen, indsamler information om brugerpræferencer, kørsel og opladningsbehov, osv.

Informationen indgår i optimerings kriteriet og danner basis for tidsstyringen af elbilens opladning og deltagelse i elmarkedet. På baggrund af informationen om opladningsbehov og markedsdata beregner og planlægger agenten en opladningsplan, som den eksekverer i elmarkedet ved afgivelse af købs- og salgsbud på op- og afladning, hvorefter den tidsstyret aktiverer op- og afladning på baggrund af vundne markedsbud.

Elbilernes opladningsagent tænkes at modsvare de tilsvarende agenter, der forventes indbygget i vindmøller til fx styring af markedsdeltagelse og automatisk produktionsfrakobling ved prognosefejl og nul/negativ elmarkedspris. Dermed optræder elbiler og vindmøller side om side på elmarkedet som prosumers, der repræsenteret ved deres respektive agents aggregatorer deler information og udveksler elprodukter.

Figur 2: Analysedesign

Input	Simulering	Output
<p><u>Forståelsesramme</u></p> <p>Vindoptimeret opladning Opgradering med V2G Optimeringskriterier Aflødte effekter</p>	<p><u>Elbil modeller</u></p> <p>Lille batteri: Nissan Leaf Stort batteri: Tesla S</p>	<p><u>Analyse: En elbil Gevinster for elbilejere</u></p> <p>Opladningsudgift CO₂-udledning Vindandel</p>
<p><u>Datagrundlag</u></p> <p>Elmarkedsdata Kørselsprofiler Elbilmodeller ...</p>	<p><u>Opladningsstrategier</u></p> <p>Ikke-styret opladning (reference) Vindoptimeret opladning G2V Vindoptimeret opladning V2G</p>	<p><u>Analyse: Mange elbiler Gevinster for samfundet</u></p> <p>Vindkrafts markedsværdi Vindkrafts integrationsomkostninger Elforsyningsens CO₂-udledning</p>

Elbilernes markedsdeltagelse defineres som op- og afladning i spot- og regulerkraftmarkedet. Optimeringens hovedprincipper er, at nødvendig opladning til næste dags planlagte kørsel gennemføres i spotmarkedet, eventuelt overskydende batterikapacitet oplades med nedregulering i regulerkraftmarkedet, og lagret energi aflades som opregulering i regulerkraftmarkedet. I senere, videreudviklede udgaver af opladningsstrategien udvides markedsdeltagelsen til også at omfatte afladning i spotmarkedet og deltagelse i øvrige, relevante elmarkedspladser for kapacitet og energi, fx manuel reserve og frekvensregulering.

Metodekapitlet er opdelt i fire delafsnit, strategiens opbygning og opgradering med V2G, datagrundlag og forudsætninger, batteri kostpris og slitage samt beregningsmetoder for outputvariable.

Indledningsvis forklares opbygningen af opladningsstrategien Vindoptimeret opladning, herunder opgraderingen med V2G og de tilsligtede samfundsøkonomiske og miljømæssige effekter. Dernæst introduceres delafsnittet om analysens datagrundlag og forudsætninger, og efterfølgende delafsnittet om batteri kostpris og slitage, og der henvises til de to bilagspublikationer for mere detaljerede forklaringer til de to delafsnit. I fjerde og sidste delafsnit redegøres for de metoder, der benyttes til at beregne simuleringernes output variable, opladningsudgift, CO₂-udledning og vindandel. Analysens hovedpunkter illustreres i figur 1.

2.1 Strategiens opbygning og opgradering med V2G

I dette afsnit beskrives opladningsstrategien Vindoptimeret opladning og V2G opgraderingen med udgangspunkt i den bagvedliggende vision og de optimeringseffekter, strategiens kriterier skal opfylde. På den basis formuleres strategien og de underliggende optimeringsalgoritmer.

2.1.1 Bagvedliggende vision

Den bagvedliggende vision med opladningsstrategien Vindoptimeret opladning beskrives fra tre vinkler:

1. Vindoptimeret grøn omstilling: Elbilers forbrugsfleksibilitet effektiviserer indpasning af ny vindkraft
2. Elbilers indpasning på elmarkedet: Opladning og vindproduktion handles og balanceres side om side på to elmarkedspladser
3. Vindoptimering er prioriteret opladning med overskydende og ineffektiv vindproduktion

2.1.1.1 Vindoptimeret grøn omstilling

Danmarks grønne omstilling indebærer udbygning med ny vindkraft, nedbringelse af CO₂-udledningen, udfasning af fossile brændsler og udbredelse af elbiler. Allerede med den nuværende udbygning udgør vindproduktion en høj andel af forbruget, og det presser afregningsprisen. Jævnfør analysen "Vindoptimeret opladning af elbiler" forringes vindkraftens markedsværdi primært som følge af tre forhold:

- Vindproduktion opnår lavere gennemsnitlig afregningspris på elmarkedet end anden produktion
- Vindproduktion har høje balanceomkostninger
- Vindproduktion frakobles ved nul/negative elmarkedspriser

Den planlagte udbygning med ny vindkraft vil yderligere forringe eksisterende vindkrafts markedsværdi. Tilsvarende vil udbredelse af elbiler uden incitament til Vindoptimeret opladning også forringe vindkraftens markedsværdi og øge integrationsomkostninger. Alt sammen med den samlede konsekvens, at elkunderne vil skulle betale højere PSO end ellers.

Visionen med Vindoptimeret opladning V2G er, som vist i figur 3 nedenfor, at udnytte elbilers forbrugsfleksibilitet og ledig batteri kapacitet til at modsvare de negative effekter, vindkraftens fluktuationer har på vindkraftens markedsværdi og samfundsøkonomien. Og reducere stigningen i elkunders PSO-betaling.

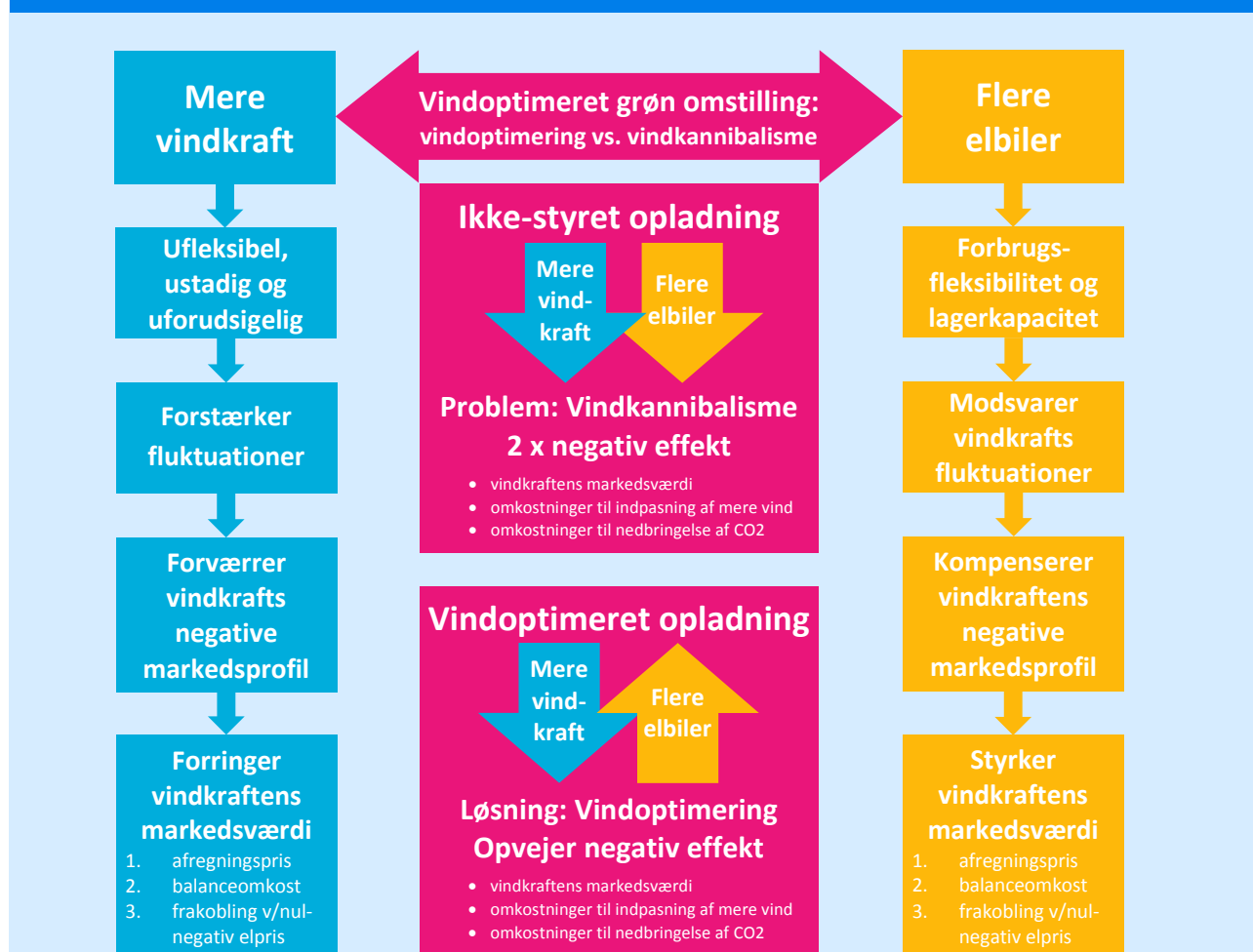
2.1.1.2 Elbilers deltagelse i elmarkedet som vindproduktion

Tanken med Vindoptimeret opladning er, at elbilers opladning indpasses på elmarkedet side om side med vindproduktionen. Så der er en direkte forbindelse mellem de mekanismer, der bestemmer prisdannelsen på vindproduktion, og de der gør det for elbilernes opladning, forbrugsfleksibilitet og midlertidig lagring.

Elbilernes opladning indpasses i værdikæden via en forbrugsaggregator med balanceansvar, der køber og sælger elbilernes ydelser på elmarkedet, dvs. opladning, lagring og balancering. Organiseret efter samme principielle model som for vindproducenternes vindproduktion. Handlet som Demand Side Bidding.

Vindenergi Danmark er et uafhængigt elhandelsselskab, der sælger strøm fra vindmøller på markedsvilkår. Vindenergi Danmark er produktions aggregator for vindproducenter mellem vindproducenterne og den

Figur 3: Vindoptimering udnytter forbrugsfleksibilitet imod vindfluktuationer



balanceansvarlige virksomhed, der repræsenterer vindproducenterne på elmarkedet. Vindenergi Danmark driver en ehandelsplatform for vindproducenterne, der benyttes til at afgive salgsbud på deres vindproduktion på spotmarkedet, afregner omsætning og balancering, afgiver bud på regulerkraftmarkedet, frakobling ved nul/negative elpriser og balanceafregning afsætter.

2.1.1.3 Prioriteret opladning med overskydende og ineffektiv vindproduktion

Vindoptimeret opladning V2G tilstræber, at opladningens elforbrug primært forsynes med overskydende og ineffektivt udnyttet vindproduktion. Overskydende og ineffektivt udnyttet vindproduktion defineres som vindproduktion, der opfylder en eller flere af følgende kriterier:

- Vindproduktion til nul/negativ elpris, der ellers ville blive frakoblet
- Vindproduktion til særlig lav, positiv elpris, der ellers ville blive eksporteret med høje nettab
- Vindproduktion med høje integrationsomkostninger, høje PSO-bidrag og subsideret forbrug

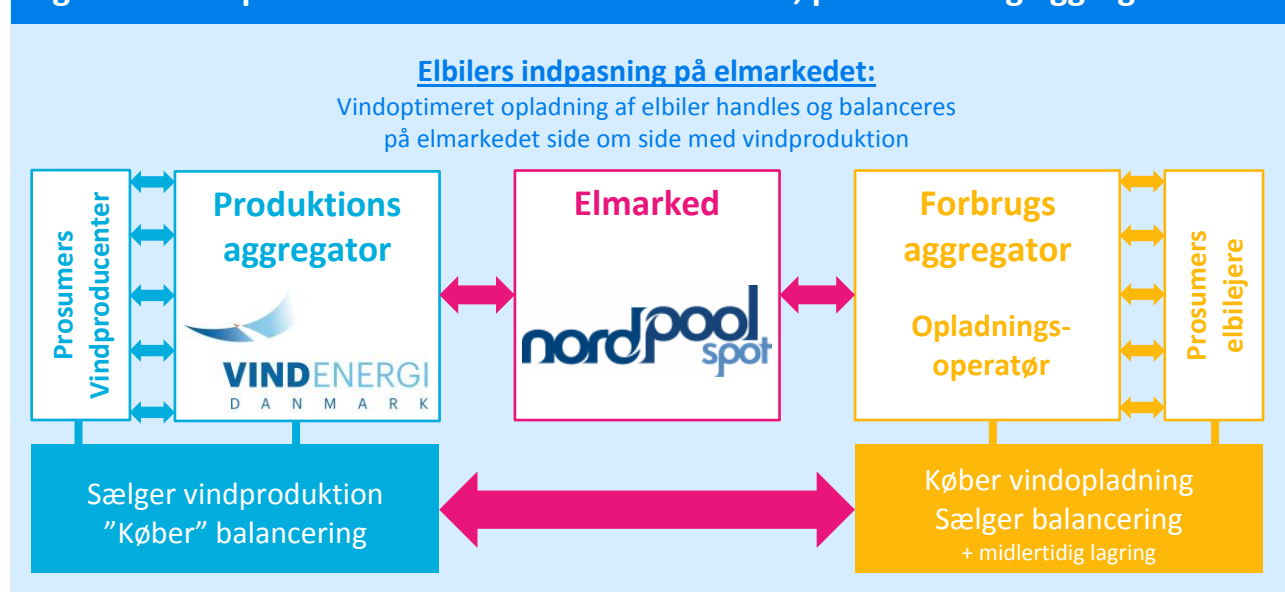
Vindoptimeret opladning V2G bygger på en antagelse om, at alt vindproduktion vil kunne rangordnes ud fra elpris, og at rangordenen for en tidshorisont svarende til en elbils fleksibilitet med en vis sandsynlighed vil kunne prognosticeret. Elprisen, når den er særlig lav eller nul/negativ, på de elmarkedspladser, hvor vindproduktionen handles, fx spotmarkedet og regulerkraftmarkedet, kunne være rangordningsnøglen, forudsat konkurrencen på elmarkedet er fuldkommen og prisdannelsen omkostningsægte.

Skillelinjen i elprisen kunne fx være nul kr., hvor lavere (negative) priser ville være udtryk for overskydende vindproduktion, der ellers ville blive frakoblet, og særligt lave (positive) elpriser ville indikere parametre som nettab, integrationsomkostninger, PSO-bidrag osv. for (ellers) ineffektivt udnyttet vindproduktion.

Lignende kriterier formuleres for afladning af midlertidig lagret vindproduktion tilbage til elnettet, hvor rangordningen ville vedrøre særligt høje elpriser på elmarkedet, fx opregulering på regulerkraftmarkedet.

Med Vindoptimeret opladning V2G vil elbilen inden for dens fleksibilitetsrum altid tilstræbe at oplade med den marginalt mest overskydende kilowatttime vindproduktion, og i mangel herpå, med den marginalt mest ineffektivt udnyttede kilowatttime vindproduktion, og så fremdeles.

Figur 4: Vindoptimeret værdikæde med elmarked, prosumers og aggregatorer



Overskydende og ineffektiv udnyttet vindproduktion indikeres ved henholdsvis de laveste negative elpriser og de laveste (positive) elpriser. Tilsvarende vil opladningsstrategien altid tilstræbe at aflade energi fra batteriet tilbage til elnettet til den højeste elpris, når den er over en fastsat tærskelværdi.

Regelsættet for kategorisering af overskydende og ineffektiv vindproduktion til optimeret udnyttelse af elbilers fleksible elforbrug er:

1. Handlet vindproduktion på spot- og regulerkraftmarkedet, rangordnet stigende efter elpris
 - a. Vindproduktion til nul/negativ elpris kategoriseres som overskydende vindproduktion, der ellers ville blive frakoblet
 - b. Vindproduktion til særlig lav, positiv elpris, evt. i kombination med nettoeksport, høje integrationsomkostninger, PSO-bidrag, subsidieret forbrug osv., kategoriseres som ineffektiv udnyttet vindproduktion
 - c. Vindproduktion til marginal lav elpris kategoriseres som priselastisk
2. Tidsforskyd fleksibelt elforbrug prioriteret til timerne i de tre kategorier a, b og c fra timer med høje elpriser og lav vindandel

Figur 5: Rangordning og prioritering af opladet vindproduktion (eksempel)

Prioritet	Kategori betegnelse	Rangordning elpris timeværdier	Beskrivelse
1	OPLADNING Overskydende vindproduktion	$-3.750 < P_{spot} \leq 0$	<ul style="list-style-type: none"> Vindproduktion til nul/negativ elpris, forudsættes at være Vindproduktion, der ellers ville blive frakoblet Gulv -500 EUR/MWh, max. 3.000 EUR/MWh
2	OPLADNING Ineffektiv vindproduktion	$0 < P_{spot,rk} \leq 0,15^{*)}$	<ul style="list-style-type: none"> Vindproduktion til særlig lav, positiv elpris, evt. i kombination med nettoeksport, høje integrationsomkostninger, PSO-bidrag, subsidieret forbrug osv., kategoriseres som ineffektiv udnyttet vindproduktion
3	OPLADNING Energimix m/ højeste vindandel	$0,15 < P_{spot,rk} \leq GNS$	<ul style="list-style-type: none"> Vindproduktion i prisintervallet mellem en nedre, positiv fraktil og gennemsnittet
-	AFLADNING Lav eller ingen vindproduktion	$P \geq \text{gennemsnit} + \text{batterislitage omkostning}$	<ul style="list-style-type: none"> Vindproduktion til afladning

2.1.2 Tilstræbte optimeringseffekter

Formålet med Vindoptimeret opladning V2G er at optimere elbilers opladning med vindkraft til gavn for elbilejere, vindproducenter, samfundsøkonomi, samt miljø og klima. Optimeringen bygger på en antagelse om, at opladningen kan tids- og markedsstyres til at opfylde en række kriterier, så der opnås flere målrettede, samtidige nytteeffekter, hvor hovedkriterierne er at minimere opladningsudgift og CO₂-udledning samt maksimere vindandel. Figur illustrerer de kriterier, der tilstræbes opfyldt inden for fire kategorier, elbilejere, vindproducenter, samfundsøkonomien og miljøet.

Figur 6: Tilstræbte optimeringseffekter	
For elbilejere	For vindproducenter
<ul style="list-style-type: none"> • minimere opladningsudgift (hovedkriterie) • minimere CO₂-udledningen per kørt kilometer • maksimere vindandelen i elforbrugets energimix 	<ul style="list-style-type: none"> • styrke vindproduktionens markedsværdi • minimere omkostninger til balancering • undgå frakobling ved nul/negative markedspriser
For samfundsøkonomien	For miljø og klima
<ul style="list-style-type: none"> • effektivisere udnyttelsen af vindkraft • effektivisere driften af elsystemet • reducere ny vindkrafts integrationsomkostninger • reducere behovet for fossil kraftværkskapacitet • reducere behovet for transmissionsudbygning • reducere behovet for PSO-bidrag 	<ul style="list-style-type: none"> • reducere den samlede energiforsynings CO₂-udledning

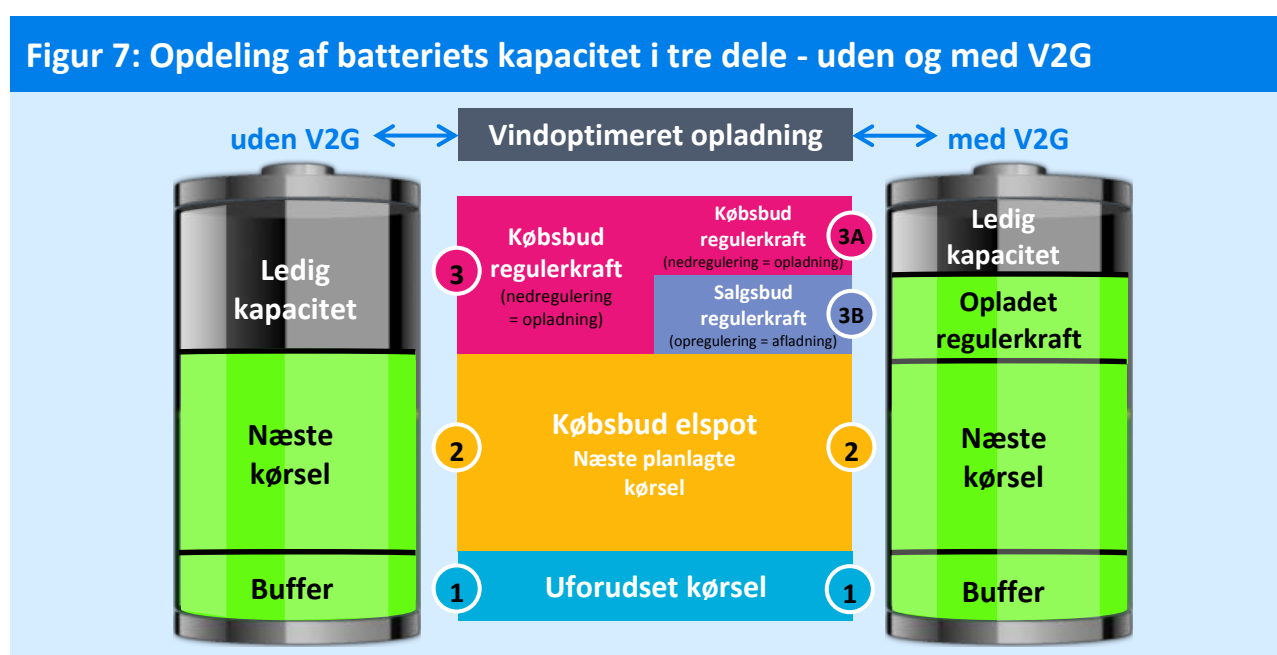
2.1.3 Opladningsstrategiens opbygning

Vindoptimeret opladning er en beslutningsstrategi for optimeret opladning af elbiler med vindproduktion. Strategien veksler mellem at oplade på de to elmarkedspladser, spotmarkedet og regulerkraftmarkedet, hvor der handles med vindkraft. Markedsvekslingen i kombination med underliggende algoritmer minimerer opladningsudgiften samtidig med, at strategiens øvrige optimeringskriterier opfyldes.

2.1.3.1 Opdeling af batteriets kapacitet i tre dele

Strategien opdeler som udgangspunkt elbilens batterikapacitet i tre dele ud fra opladningens kørselsformål og elmarkedsplads (se figur 7):

1. Buffer
2. Opladning til næste kørsel
3. Ledig kapacitet til opladning med regulerkraft



Buffer er den minimum kapacitet, batteriet altid skal være opladet med, til at imødekomme uforudset kørsel og ekstra energiforbrug. Buffer anvendes per definition kun undtagelsesvis.

Næste kørsel er den kapacitet, batteriet skal være opladet med, for at kunne forsyne dagens kørsel. Næste planlagte kørsels forventede elforbrug tilpasses løbende det faktiske elforbrug og ændret kørselsforbrug.

Ledig kapacitet er den tilbageværende batterikapacitet, der ikke er øremærket til buffer og næste kørsel. Ledig kapacitet anvendes til budafgivelse og opladning med regulerkraft.

2.1.3.2 Optimering i tre trin

Eksekveringen af opladningsstrategien Vindoptimeret opladning består af tre trin:

Trin 1: Opdel batteriets kapacitet efter brugsformål

Trin 2: Beregn og afgiv købsbud på opladning til næste kørsel

Trin 3: Beregn og afgiv købsbud på regulerkraft

De tre beslutningstrin er illustreret og uddybet i figur 8 nedenfor.

Figur 8: Optimeringens beslutningstrin		
Trin 1	Opdel batteriets kapacitet efter opladningsformål	<ul style="list-style-type: none"> Batteriets kapacitet opdeles i tre dele efter brugsformål, buffer, næste kørsel og ledig kapacitet Opdelingen beregnes på basis af data vedrørende batteriets kapacitet, brugerprofil, kørselsstatistik mv.
Trin 2	Beregn og afgiv købsbud på spot opladning til næste kørsel	<ul style="list-style-type: none"> Hovedregel: Buffer og næste kørsel oplades i spotmarkedet Behovet for opladning til buffer og til næste planlagte kørsel beregnes ud fra indhentede data vedrørende batteriets kapacitet og status, brugerens kørselsprofil og kørselsstatistik Afgivelse af købsbud beregnes og prognosticeret ud fra indhentede data om elmarkedets forventede udvikling Tidsstyringen af opladningen bestemmes af det beregnede "prissignal" i form af aktiveringen i elmarkedet Beregningen og de udløste handlinger udføres kun én gang, og i praksis forud for spotmarkedets lukning kl. 12:00, hvilket indebærer prognosticeret vedrørende kørselsforbrug og batteristatus i den mellemliggende periode frem til opladningsperiodens start
Trin 3	Beregn og afgiv købsbud på regulerkraft opladning	<ul style="list-style-type: none"> Hovedregel: Ledig kapacitet oplades i regulerkraftmarkedet Muligheden for at oplade ledig kapacitet med regulerkraft beregnes og prognosticeret ud fra indhentede data vedrørende batteriets kapacitet og status, brugerens kørselsprofil og kørselsstatistik Afgivelse af købsbud beregnes og prognosticeret ud fra indhentede data om elmarkedets forventede udvikling Tidsstyringen af opladningen bestemmes af det resulterende "prissignal" i form af aktiveringen i elmarkedet Beregningerne og handlingerne gentages hver time i hele rådgighedsperioden

2.1.3.3 Veksler mellem to elmarkedspladser

Egentlig ville det være at foretrække alene at oplade i regulerkraftmarkedet, hvis det eneste hensyn var optimeringen vedrørende minimering af opladningsudgift osv. Priserne er per definition henholdsvis lavere og højere end på spotmarkedet, og store prisudsving forekommer hyppigere.

Spotmarked opladningen indebærer, at der er garanti for, at batteriet som minimum altid bliver opladet tilstrækkeligt til, at elbileren vil kunne gennemføre næste dags kørsel.

Opladningen i regulerkraftmarkedet tilsigter, at elbilen inden for dens givne råderum altid oplades, så de tre gevinst kriterier for den individuelle elbilerer imødekommes, dvs. vedrørende opladningsudgift, CO₂-udledning og vindandel.

Til gengæld ville opladning alene i regulerkraftmarkedet grundet udbuddets ustadighed ikke kunne garantere, at elbilen altid ville blive opladet til næste dags kørsel.

2.1.4 Opgradering med V2G

Tilføjelse af V2G i opladningsstrategien Vindoptimeret opladning vedrører som illustreret i figur ovenfor den del af batteriet, der defineres som ledig kapacitet. Under opladningen vil den del optræde som henholdsvis "opladet ledig kapacitet" og "ikke-opladet ledig kapacitet".

Under effektueringen af opladningsstrategien, som illustreret i figur ovenfor, vedrører V2G primært trin 3, hvor der beregnes og afgives købsbud på regulerkraft. Opgraderet med V2G består dette beslutningstrin nu i at beregne og afgive både købs- og salgsbud på regulerkraft, henholdsvis ned- og opregulering.

V2G-tilføjelser til opladningsstrategiens 3 trin:

1. Opdel ledig batterikapacitet i yderligere to dele:
 - a. Lagret regulerkraft til senere kørsel og afladning (opregulering)
 - b. Ledig batterikapacitet til opladning med regulerkraft (nedregulering)
2. Beregn og prognosticer markedsbud vedrørende:
 - a. Salgsbud på regulerkraft (opregulering)
 - b. Købsbud på regulerkraft (nedregulering)

Opladet regulerkraft overføres beregningsteknisk forud for hver ny rådighedsperiode til den del af batteriet, der vedrører opladning til næste kørsel. Eftersom aktiveringspriserne i regulerkraftmarkedet forventelig vil være lavere end i spotmarkedet, gør denne "konverteringsløkke", at opladning i spotmarkedet minimeres, og opladning i regulerkraftmarkedet maksimeres. Vekslingen bidrager yderligere til at reducere opladningsudgiften og CO₂-udledning per kørt km samt øge vindandelen.

I indeværende udgave af opladningsstrategien defineres V2G som op- og afladning med regulerkraft, dvs. ned- og opregulering. I senere udgaver af opladningsstrategien vil V2G også omfatte andre markedspladser, eventuelt spotmarkedet, manuel reserve og frekvensregulering.

2.1.5 V2G energi-arbitrage

V2G eller Vehicle-to-Grid betegner, at elbilen har installeret teknologisk udstyr til at aflade fra batteriet tilbage til elnettet. Med V2G kan elbilen oplade med mere vindproduktion, end den forbruger til kørsel. Vindproduktionen lagres på batteriet i en periode og aflades tilbage til elnettet i timer, hvor andre ikke-fleksible elapparater vil kunne udnytte den som erstatning for elproduktion fra fossile brændselsværker.

Energiarbitrage er en betegnelse for køb og salg af energi på kontinuerlig basis med henblik på at generere profit. Princippet er at købe, når elprisen er lav, lagre midlertidig, og sælge, når elprisen er høj. Uden V2G, deltager elbilen alene i elmarkedet som køber af vindproduktion. Med V2G deltager den både som køber og sælger af vindproduktion. Som køber af overskydende og ineffektiv vindproduktion på spotmarkedet og regulerkraftmarkedet, og som sælger af lagret vindproduktion på regulerkraftmarkedet.

2.1.6 Marginale V2G gevinster

Marginale V2G gevinster er de yderligere gevinster, der opnås ved at udvide opladningsstrategien Vindoptimeret opladning med V2G. Marginale gevinster vedrører dels de individuelle elbilejere dels vindproducenterne og samfundsøkonomien generelt.

2.1.6.1 Elbilejernes marginale gevinster med V2G

Elbilejernes marginale gevinster med Vindoptimeret opladning V2G består i endnu lavere opladningsudgift, lavere CO₂-udledning og højere vindandel, end der kan opnås med Vindoptimeret opladning uden V2G. Opladningsudgiften reduceres med overskuddet fra energi-arbitrage, som illustreret i figur 9.

I eksemplet forbruger en elbil 3000 kWh til et års kørsel. Vindoptimeret opladning uden V2G giver en opladningsudgift på 300 kr. til køb af 3000 kWh. Med V2G giver en udgift på 1.350 kr. til køb af 9000 kWh. Heraf aflades 6000 kWh tilbage til elnettet til en total salgspris på 1.200 kr. Dermed bliver opladningsudgiften med fradrag af afladningsindtægten 150 kr. til kørsel (i eksemplet ses bort fra ladetab, batterislitage mv.).

Elbilejerens V2G mergevinster vedrørende CO₂ og vindandel består i, at det forudsættes, at elbilens miljøregnskab godskrives de afledte nytteeffekter i det samlede elsystem, der genereres som følge af V2G-bidrag til effektivisering og udnyttelse af vindkraft.

Figur 9: Elbilejers opladningsudgift uden og med V2G

Vindoptimeret opladning uden V2G			Vindoptimeret opladning med V2G		
Køb af el til opladning	3000 kWh	300 kr.	Køb af el til opladning	9000 kWh	1.350 kr.
Opladningsudgift (kørsel)	3000 kWh	300 kr.	Salg af el fra afladning	6000 kWh	1.200 kr.
			Opladningsudgift (kørsel)	3000 kWh	150 kr.

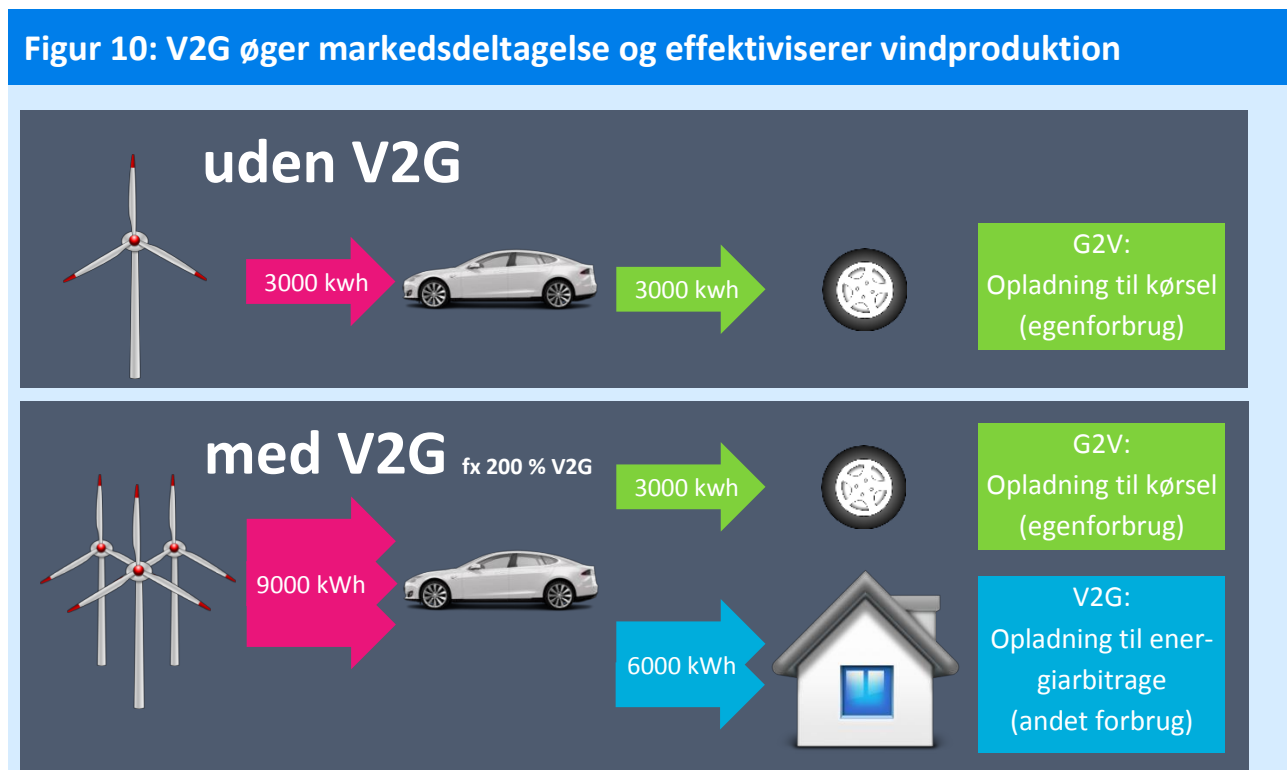
2.1.6.2 Afledte marginale samfundsøkonomiske gevinster med V2G

De marginale samfundsøkonomiske gevinster ved at opgradere og udbrede opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G, i stedet for uden V2G, vedrører særligt to forhold:

1. V2G øger nytteeffekt
2. V2G gør vindproduktion fleksibel

Ad 1. V2G øger nytteeffekt

Samfundsøkonomisk vedrører mergevinsterne med V2G, at et givet antal elbiler vil kunne bidrage med en betydeligt større energimængde til at influere på markedsdannelsen samt effektivisere udnyttelsen af vindkraft og driften af elsystemet. Uden V2G, vil en elbil maksimalt kunne bidrage med dens egenforbrug,



Figur 11: Vindoptimeret opladning uden og med V2G – W2V og W2V2G

Envejs-ladning				Tovejs-ladning			
Vindoptimeret opladning G2V				Vindoptimeret opladning V2G			
W2V Wind-to-Vehicle				W2V2G Wind-to-Vehicle-to-Grid			
udnytter forbrugsfleksibilitet				udnytter forbrugsfleksibilitet og lagerkapacitet			
Elbilens egenforbrug	flyttes	fra periode med Mangel på vindproduktion	til periode med Overskydende vindproduktion	Elbilens egenforbrug	flyttes	fra periode med Mangel på vindproduktion	til periode med Overskydende vindproduktion
		<ul style="list-style-type: none"> • lav vindandel • høj CO2-udledning 	<ul style="list-style-type: none"> • 100 %+ vindandel • 0 g/kWh CO2 			<ul style="list-style-type: none"> • lav vindandel • høj CO2-udledning 	<ul style="list-style-type: none"> • 100 % vindandel • 0 g/kWh CO2
Vindproduktion til andet forbrug	flyttes	fra periode med Overskydende vindproduktion	til periode med Mangel på vindproduktion	Vindproduktion til andet forbrug	flyttes	fra periode med Overskydende vindproduktion	til periode med Mangel på vindproduktion
		<ul style="list-style-type: none"> • 100 %+ vindandel • 0 g/kWh CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • lav vindandel • høj CO2-udledning 			<ul style="list-style-type: none"> • 100 %+ vindandel • 0 g/kWh CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • lav vindandel • høj CO2-udledning

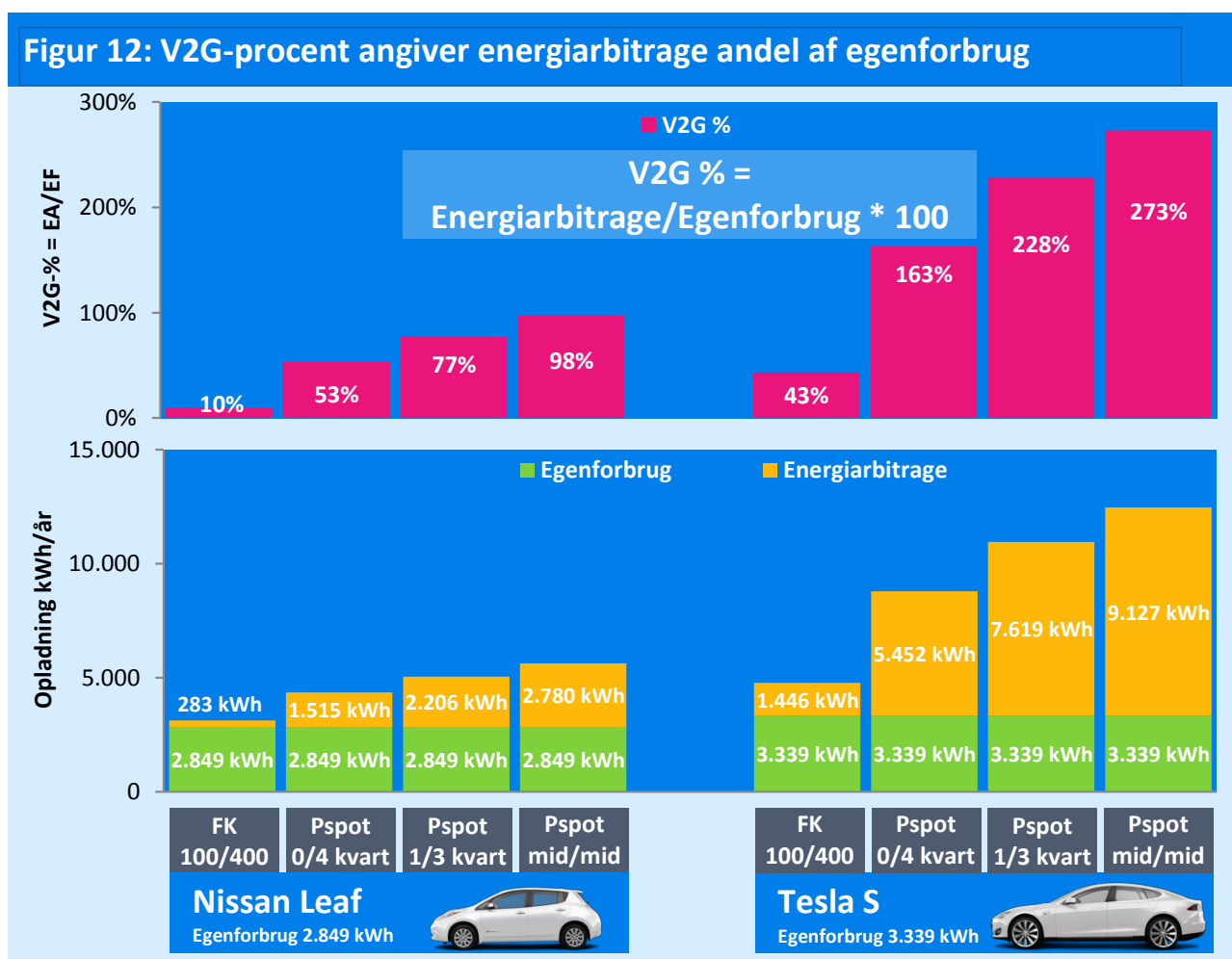
fx 3000 kWh. Med V2G, vil den samme elbil fx kunne aftage 9000 kWh, eller tre gange dens egenforbrug, overskydende og ineffektiv vindproduktion, og to tredjedel heraf ville blive afladet tilbage til elnettet til brug for andre elapparater, der ikke er forbrugsfleksible. Se figur 10.

Ad 2. V2G gør vindproduktion fleksibel

Vindoptimeret opladning uden V2G handler alene om at tidsforskyde elbilens egenforbrug. V2G handler også om at tidsforskyde vindproduktion, som illustreret i figur 11 ovenfor. En elbil er typisk parkeret ca. 22 timer i døgnet. Heraf vil den være optaget med at oplade til næste kørsel i cirka 2 timer (under forudsætning af en hurtig ladeforbindelse). Ideen med V2G er at udnytte de resterende ca. 20 ledige timer og den overskydende batterikapacitet til energiarbejde med regulerkraft. Midlertidig lagring af overskydende og ineffektivt udnyttet vindproduktion til efterfølgende afladning til andre elapparaters forbrug.

2.1.7 V2G-procent og alternative budstrategier

V2G betegnes i analysen med en procentsats, fx 50 % V2G. Betegnelsen udtrykker forholdet mellem, hvor meget energi der anvendes til afladning, og hvor meget der anvendes til elbilens kørsel. Dvs. afladning eller energiarbejde i procent af elforbruget til kørsel, også benævnt med betegnelsen Energiarbejde/egenforbrug eller forkortet EA/EF. Hvis en elbil fx oplades med 3.000 kWh til dækning af kørslen og yderligere 1.500 kWh til senere afladning, dvs. energiarbejde, bliver forholdet EA/EF 1.500/3.000 kWh eller svarende til 50 % V2G. I figur 12 vises alternative budstrategier og de resulterende varierende mængder V2G.



Der er i nærværende analyseprojekt eksperimenteret med en række alternative prisbud strategier for Vindoptimeret opladning V2G, som hver især giver forskellige omfang af V2G og resultater vedrørende opladningsudgift, CO₂-udledning og vindandel. Nogle af disse er illustreret i figur 12 ovenfor med deres respektive EA/EF forhold, hvor egenforbrug EF er en konstant for de to elbiler. Den røde del af søjlerne, Energiarbitrage (EA), også lig med afladningen, udtrykker det nominelle omfang af V2G, ved de alternative prisbudstrategier, og V2G procentsatsen EA/EF udtrykker det forholdsmæssige omfang af V2G.

Betegnelserne Pspot (spotprisen) og FK (Fast Konstant) udtrykker strategien for fastsættelse af prisbuddene i regulerkraftmarkedet. Pspot betyder, at prisbuddet fastsættes dynamisk variabelt i forhold til spotprisen i den pågældende time, og den efterfølgende brøk benævner spotpris niveauet for henholdsvis prisbud på nedregulering (dvs. køb af el til opladning) og opregulering (dvs. salg af el ved afladning). Fx betyder 1/3 kvartil, at prisbuddet for køb af el fastsættes til driftsdøgnet 1. kvartil spotpris, og prisbuddet for salg af el fastsættes til driftsdøgnet 3. kvartil spotpris.

Prisbud strategien FK 100/400 betyder, at købsprisen for el til opladning (nedregulering) fastsættes til samme faste konstant i alle årets timer, fx 100 kr per MWh, svarende til den højeste pris, som elbilen vil acceptere at købe til, og 400 kr per MWh er den laveste pris, som elbilen vil acceptere af sælge til, dvs. aflade til. Således udtrykker både Pspot- og FK-brøkerne, hvor meget der tilstræbes tjent på elbilens energi-arbitrage.

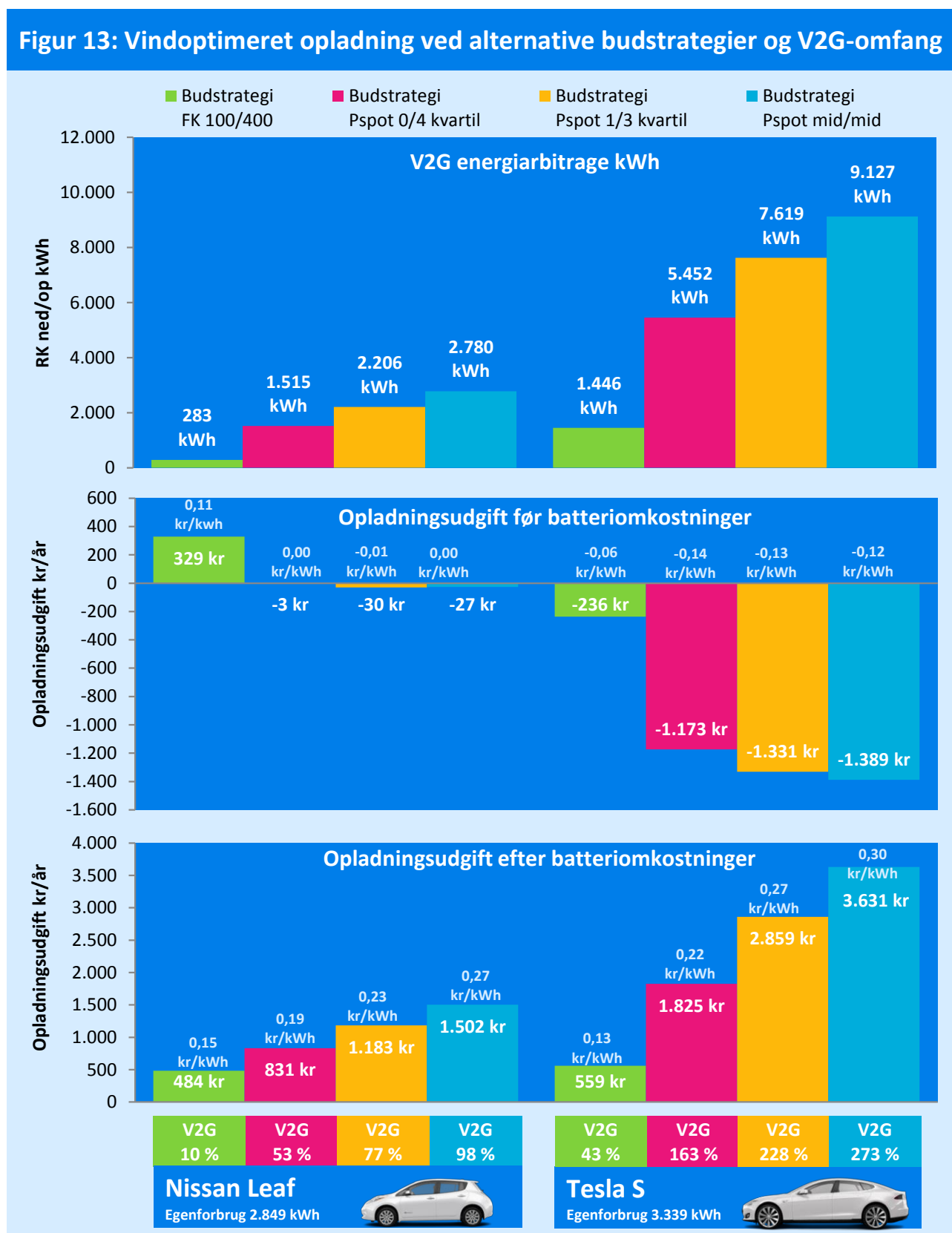
Figurens søjler viser, at omfanget af energi-arbitrage falder, med højere differencer mellem den højest acceptable købspris og den lavest acceptable salgspris, dvs. brøkens forhold. Dermed vil elbilen kun oplade med den ellers mest ineffektivt udnyttede vindproduktion, og den vil kun aflade, når den lagrede vindproduktion vil kunne udnyttes mest effektivt af andre forbrugsapparater (og fortrænge kulraft).

I den høje ende af V2G-profitmargin skalaen indebærer budstrategien FastKonstant 100/400 et profit-minimum krav på $(400-100) 300$ kr., hvor elbilens V2G-energiarbitrage agent afgiver og accepterer prisbud på højest 100 kr. for nedregulering, elkøb til opladning, og mindst 400 kr. for opregulering, elsalg for afladning.

den lave ende er mindstekravet til V2G-profit nul kr. Budstrategien Pspot middel/middel, der svarer til spotprisens andet kvartil, afgiver samme prisbud, spotprisens middelværdi, på ned- og opregulering. Højest spotprisens middelværdi for nedregulering, og mindst spotprisens middelværdi for opregulering.

Derimellem Pspot 0/4 kvartil, dvs. købsbud til spotprisens laveste (nul'te) kvartil og salgsbud til højeste (fjerde) kvartil, samt Pspot 1/3 kvartil, dvs. købsbud til maksimum første og salg til minimum tredje kvartil.

I øverste del af figur 13 ses, hvordan omfanget af V2G i kWh øges med prisbud strategiernes faldende krav til V2G-profit. I figurens midterste del ses den resulterende opladningsudgift før V2G-batterislitage omkostninger for hver af de fire prisbud strategier. Nederst ses opladningsudgift efter V2G-batterislitage omkostninger.



2.2 Datagrundlag og forudsætninger

Analysens datagrundlag består af elmarkedsdata vedrørende fx elpris, vindproduktion, energimix og CO₂-udledning, samt konstruerede kørsels- og opladningsprofiler for alternative elbilmodeller. Hovedpunkterne i analysens datagrundlag og forudsætninger er overskueliggjort i figur 14.

Figur 14: Analysens datagrundlag og forudsætninger		
Datagrundlag	Beskrivelse	Datakilder
Elmarkedsdata	<ul style="list-style-type: none"> Historiske elmarkedsdata for Danmark Vest for kalenderåret 2012 Fx timeværdier for elpris, elforbrug, vindproduktion og CO₂-udledning Prisområdet DK-Vest har høj vindkraftandel og er derfor velegnet som rollemodel for det fremtidige samlede elsystem (vest og øst) 	<ul style="list-style-type: none"> Energinet.dk's webtjeneste "Udtræk af markedsdata" Energinet.dk's FTP server Nord Pool elbørsens webtjeneste
Elmarkedspladser	<ul style="list-style-type: none"> Opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G oplader på spotmarkedet og regulerkraftmarkedet (nedregulering), og den aflader på regulerkraftmarkedet (opregulering) 	<ul style="list-style-type: none"> Energinet.dk's webtjeneste "Udtræk af markedsdata"
Opladningsstrategier	<ul style="list-style-type: none"> Ikke-styret opladning Vindoptimeret opladning G2V Vindoptimeret opladning V2G 	<ul style="list-style-type: none"> Defineret forudsætning
Kørselsprofil	<ul style="list-style-type: none"> Konstrueret, forenklet brugermodel for en elbilejer med et typisk kørselsforbrug til rutinemæssig daglig job-pendling 	<ul style="list-style-type: none"> DTU's Danmarks Transportvaneundersøgelse Danmarks Statistik
Elbil specifikationer	<ul style="list-style-type: none"> Konstruerede, forenklede modeller for elbilers specifikationer og energiforbrug Fx batterikapacitet, rækkevidde, energiforbrug til kørsel, elforbrug til opladning og opladningstid Illustreres som eksisterende elbil-modeller med cirka tilsvarende specifikationer 	<ul style="list-style-type: none"> Konstrueret og modificeret delvist ud fra elbilproducenters oplyste specifikationer for eksisterende elbil-modeller
Ladehastighed	<ul style="list-style-type: none"> Konstruerede, forenklede modeller for opladningsforløb med givne ladested/ladeboks specifikationer 	<ul style="list-style-type: none"> Konstrueret og modificeret delvist ud fra elbil-producenters oplyste specifikationer for eksisterende elbil-modeller
Ladetab	<ul style="list-style-type: none"> 7,5 pct. og 7,5 pct. ved op- og afladning 	<ul style="list-style-type: none"> Defineret forudsætning
Ladeprocess	<ul style="list-style-type: none"> Op- og afladning forløber tidsmæssigt lineært med konstant effekt i hele ladevinduet SoC 	<ul style="list-style-type: none"> Defineret forudsætning
Ladevindue	<ul style="list-style-type: none"> Afgrænsning af brugbar ladevindue til slitageskånsomt interval 10-90 % SoC 	<ul style="list-style-type: none"> Defineret forudsætning



2.3 Batteri kostpris og slitage

I bilag II beskrives den omkostningsmodel for batteri slitage, der konstrueres til at analysere gevinsterne ved Vindoptimeret opladning V2G. Batteri slitage omkostningerne er afgørende for, om V2G vil kunne betale sig, eller om besparelserne bliver lavere end med Vindoptimeret opladning uden V2G. Indledningsvis estimeres kostprisen for batterier, og den fremtidige prisudvikling vurderes. Dernæst beskrives eksisterende viden om batteri slitage for Vindoptimeret opladning V2G. Til sidst beskrives analysens konstruerede omkostningsmodel, og hvordan den anvendes til at beregne gevinsterne ved Vindoptimeret opladning V2G.

Udgangspunktet for at vurdere omkostninger til batterislitage er at kende batteriets kostpris. Fastsættelse af batteriets kostpris og beslutning om, hvilke omkostningselementer, der bør indgå i slitage omkostningsmodellen er i sig selv både usikker og kompleks, og det bliver desto mere vanskeligt, når kostprisen skal fremskrives under givne forudsætninger vedrørende produktionsmæssige stordriftsfordele.

Det forudsættes, at V2G slitageomkostningen per kWh energiflow er 0,6 kr., og at batteriets levetid er 1.500 fulde cyklinger inden slitage har reduceret kapaciteten til 80 pct. Der vil imidlertid være forhold, som gør, at det højst opnåelige antal kWh energiflow vil være højere, således at slitage omkostningen per kWh vil blive lavere. Dermed vil slitageomkostningen per kWh til V2G og til kørsel ikke være ens, som antaget i beregningen, hvilket yderligere øger det højst opnåelige antal kWh energiflow. Specielt tre forhold øger det maksimalt opnåelige antal kWh energiflow og nedbringer slitageomkostning: 1) Ladedybden afkortes med nedre og øvre SoC grænseværdier, 2) Ladning i slitage-følsomme SoC yder-intervaller undgås, og 3) Uens slitage for V2G- og kørsel-cykling. Tilpasningerne er specificeret i figur 15.

Figur 15: V2G batteri slitage omkostninger

Elbilmodel	 Nissan Leaf 24/160	 Tesla S 90/186
Batterikapacitet	24 kWh	85 kWh
Kostpris per kWh batteri ^{*) **) ***)}	300 USD = 1.800 DKK	300 USD = 1.800 DKK
Kostpris per elbil batteri	43.200 DKK	153.000 DKK
Levetid (dybe cyklinger, 100 % DoD)	1.500	1.500
Opnåeligt antal kWh energiflow	72.000 kWh	255.000 kWh
Batterislitage omkostning per kWh energiflow (kørsel- og V2G cykling)	0,60 kr/kWh	0,60 kr/kWh
Tilpasning: Afkortet afladningsdybde DoD og ingen cykling i slitage-følsomme SoC yderintervaller	79.200 kWh 0,55 kr/kWh	280.500 kWh 0,55 kr/kWh

^{*)} System; ^{**) EV Everywhere 2014-målsætning ifølge EV Everywhere Progress of Battery Development Project, Plug-In Battery Cost (per kWh Useable Energy), U.S. Battery R&D Progress and Plans, David Howell, US DOE, 2010; ^{***) Omregningskurs 6 DKK/USD}}

2.4 Beregningsmetoder for output-variable

Simuleringerne beregner de output-variable, der danner basis for at analysere elbilejernes potentielle gevinster med Vindoptimeret opladning V2G. De tre primære output-variable er:

- Opladningsudgift (kr. per år)
- CO₂-udledning (g CO₂ per kørt km)
- Vindandel (pct. af forbrugt energimix)

Output-variablene baseres på opladningens elforbrug, dvs. målt i forbrugsmåleren. På det punkt i forsyningskæden fra kilde til hjul, Well-to-Wheel, opgøres elforbruget inklusiv ladetab, men eksklusiv nettab i fx distributions- og transmissionsnettet. Derfor korrigeres beregningerne, så værdierne er opgjort for elproduktionen (ab værk), der har forsynet elforbruget, fx:

- Produktionens energimix, herunder el/varme-fordeling
- Korrigeres for nettab
- Korrigeres for udveksling, import/eksport

I figur 16 vises nøgletal for CO₂-udledning på centrale og decentrale værker samt estimatet for et marginalt værk, der benyttes i nærværende analyse. Fordelingen mellem el og kraftvarme er beregnet med 125%-metoden. Endvidere vises eksempler på CO₂-udledning for import fra nabolande. Nøgletallene er indhentet fra Energinet.dk's årlige udgivelse af retningslinjer for miljødeklaration for el, der beskriver brændselsforbruget og miljøpåvirkningen ved forbrug af én kWh el som en gennemsnitsværdi for det foregående år. Energinet.dk publicerer desuden en årlig livscyklusbaseret varedeklaration for el, der også medtager miljøforhold ved udvinding og transport af brændsler til kraftværket og bygning, vedligehold og skrotning af de enkelte produktionsanlæg. Disse forhold er ikke medtaget analysens beregninger.

Figur 16: CO₂-udledning for elværker og udveksling 2012

CO ₂ -udledning fra centrale værker ^{*)} :	581 g/kWh
CO ₂ -udledning fra decentrale værker:	335 g/kWh
CO ₂ -udledning fra marginalt værk:	750 g/kWh
CO ₂ -udledning fra svensk el:	50 g/kWh
CO ₂ -udledning fra tysk el:	488 g/kWh
CO ₂ -udledning fra vindkraft og norsk el:	0 g/kWh

*) Deklarationerne for el er ab værk, 125 %-metoden. Kilder: Eget estimat for marginalt værk; Retningslinjer for udarbejdelsen af miljødeklarationen for el; Energinet.dk; 2013; og Nettab på udlandsforbindelse; Energinet.dk

Nettab forudsættes som angivet i Energinet.dk's retningslinjer for udarbejdelsen af miljødeklaration, som vist i figur 17 nedenfor. Derudover kan specifikke efterberegninger inkludere korrektioner for nettab i op-samlingsnet, udenlandske net mv. Beregningerne korrigeres for tab i transmissions- og distributionsnet. I analysens datagrundlag, dvs. Energinet.dk's Udtræk af markedsdato og FTP-server, er energitabet i transmissionsnettet allerede indregnet. Det er tab i distributionsnettet ikke, og det kan variere kraftigt geografisk. I analysen anvendes Energinet.dk's anbefaling om en gennemsnitsværdi på 5 pct., jævnfør figur 17.

Figur 17: Nettab

Tab i distributionsnet:	5 %
Tab i transmissionsnet:	2,9 %
Tab i udlandsforbindelser:	5-10 %

Kilder: Retningslinjer for udarbejdelsen af miljødeklarationen for el; Energinet.dk; 2013; og Nettab på udlandsforbindelse; Energinet.dk; Tilpasset eget estimat for nettab på eksport transmissionsforbindelse Jylland-Norge

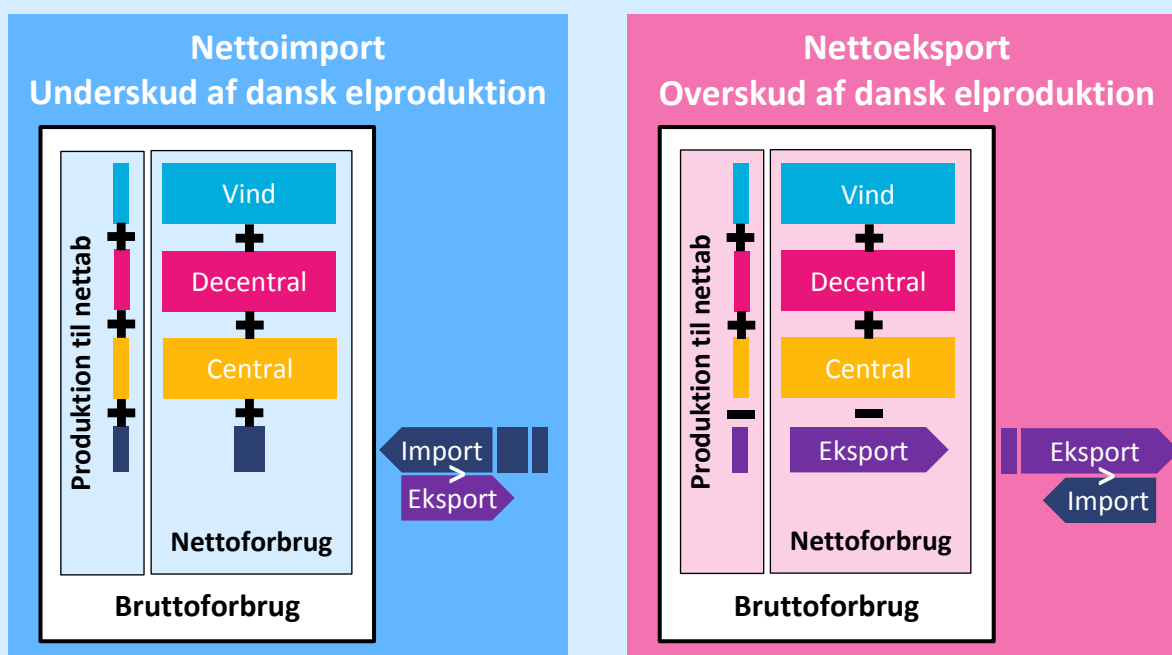
Beregningerne baseres på output-variablenes individuelle timeværdier for alle årets opladninger. Tidsopløsning gør det muligt at identificere konkrete forhold vedrørende driften af elsystemet, så det bliver muligt at estimere det konkrete opladningsforbrugs marginale indflydelse. Fx om opladning af en bestemt kWh el, i en bestemt time, på en bestemt elmarkedsplads, forsynes med

- Marginal produktion fra et kulfyret centralt værk,
- Vindproduktion, der ellers ikke ville blive produceret,
- Vindproduktion, der ellers ville blive eksporteret med højt nettab og ingen fortjeneste

For at opnå en fyldestgørende og retvisende angivelse af opladningsstrategiens miljøpåvirkning og brændselsammensætning baseres beregningerne på de individuelle, faktiske forhold i elsystemet vedrørende henholdsvis CO₂-udledningen og vindandelen i den elproduktion, der forsyner elbilens opladning,

- i de timer, hvor opladningen har fundet sted, og
- på den elmarkedsplads, hvor opladningens elforbrug er aktiveret (handlet), samt
- godskrevet for afledte gevinster i elsystemet, der genereres som en konsekvens af elbilerens aktive tilvalg af Vindoptimeret opladning fremfor en anden, mindre hensigtsmæssig opladningsstrategi

Figur 18: Underskud og overskud af dansk elproduktion – nettoimport/-eksport



2.4.1 Beregning af opladningsudgift

Opladningsudgift er summen af årets timeopløste opladninger, opgjort til individuelle timepriser, dvs. el-grossistpriser. Forbruger elprisen består af tre delelementer, energipris, nettariffer og afgifter, hvor opladningsudgiften er elgrossistpris-delen af energiprisen. De andre dele er ikke indregnet i opladningsudgiften.

Vindoptimeret opladning V2G op- og aflader på spotmarkedet og regulerkraftmarkedet, hvor elgrossistprisen er henholdsvis spotprisen og regulerkraftprisen for henholdsvis ned- og opregulering. Elbilerens brutto opladningsudgift beregnes som den samlede udgift til opladning minus indtægterne fra salget af el, der aflades tilbage til elnettet. Netto opladningsudgiften betegner det beløb, der fremkommer, når V2G batteri slitage omkostningerne modregnes i brutto opladningsudgiften, som vist i figur 19.

Opladningsudgift beregnes an forbruger, dvs. som målt i forbrugsmål, hvor elforbruget er inklusiv ladetab mellem netstik, batteri og hjul. Dermed er opladningsudgift eksklusiv nettab tilbage i forsyningskæden til værk og vindmøller. I modsætning til CO₂-udledning og vindandel, som baseres på den elproduktion, der forsyner elforbruget, dvs. af værk og inklusiv nettab. Udeladelse af værdier for elproduktion til nettab i beregning af opladningsudgift skyldes, at de inkluderes i de øvrige forbrugerpris-elementer, fx nettariffer.

Figur 19: Beregning af opladningsudgift for Vindoptimeret opladning V2G

Udgift til opladning (inkl. konverteringstab)

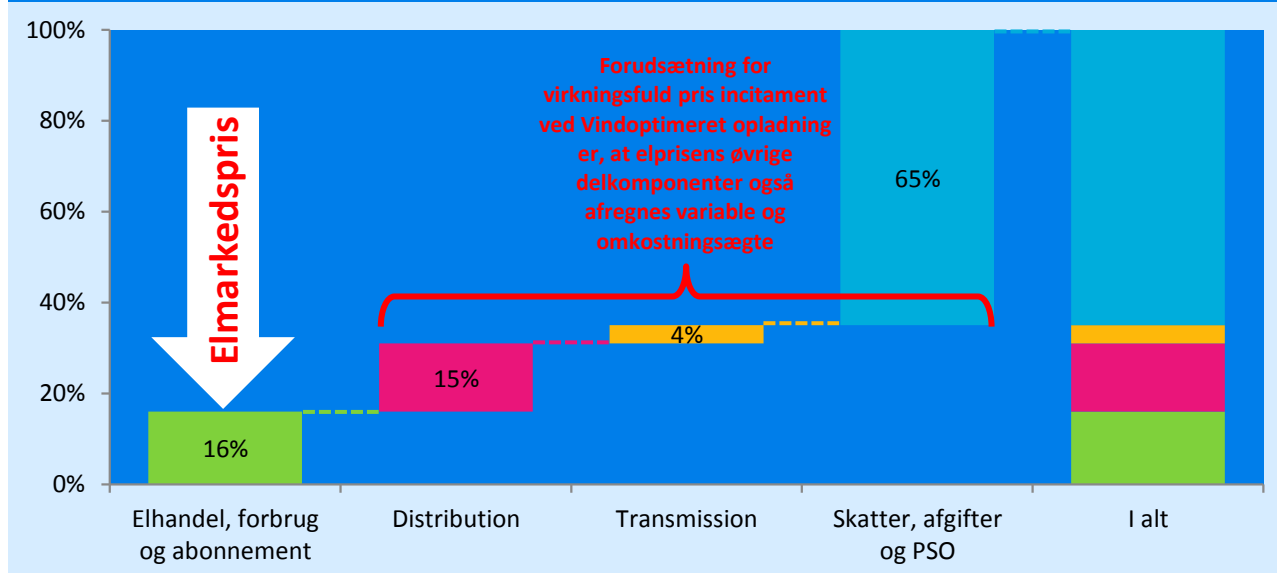
- indtægt fra afladning

= brutto opladningsudgift

- omkostninger til V2G-batteri-slitage

= netto opladningsudgift

Figur 20: Forbrugereleprisen delkomponenter



2.4.2 Beregning af CO₂

Elbilens CO₂-udledning per kørt km beregnes for den elproduktion, der forsyner opladningens elforbrug. Beregningen omfatter hele elforsynings værdikæden fra kilde til hjul, Well-to-Wheel, og det indebærer, at der skal korrigeres for el/varme-forholdet, energimix, eksport/import-udveksling, nettab og ladetab.

Elforbrugets CO₂-indhold beregnes timeopløst per kWh, så det er muligt at estimere produktionstimens konkrete energimix og detaljeret karakterisere effekten på elsystemets driftsprocesser og elmarkedets mekanismer. Den høje tidsopløsning og detaljeringsgrad skal gøre det muligt at bestemme, fx

- opladningsstrategiens konkrete CO₂-effekter, fx om opladningens elforbrug udløser forsyning med marginal vind, marginal kulkraft eller et gennemsnitligt, generelt produktionsmix
- opladningsstrategiens afledte samfundsøkonomiske gevinster, fx effektivisering af elsystemdrift, sparede omkostninger til indpasning af ny vindkapacitet, bidrag til styrkelse af vindproduktionens markedsværdi, sænkning af elkunders PSO-betaling osv.

Princippet er, at elbilens CO₂-regnskab godskrives alle positive CO₂-effekter, der forårsages af elbilerens aktive tilvalg om at benytte Vindoptimeret opladning V2G i stedet for Ikke-styret opladning. Fx de nytteeffekter der skabes, når Vindoptimeret opladning V2G målrettet tidsforskyder opladning for på kort varsel at aftage overskydende vindproduktion på regulerkraftmarkedet, når elprisen er nul eller negativ. Energi-mix'et består af 100 pct. vindproduktion, hvilket som udgangspunkt betyder, at opladningens elforbrug indeholder 0 g CO₂. Men hvis elbilens også godskrives de CO₂-reduktioner, opladningen forårsager i den overordnede elforsyning, bliver CO₂-indholdet endnu lavere, dvs. negativ.

Det skyldes for det første, at elbilen aftager vindproduktion, som ellers ikke ville blive produceret, og som genereres med eksisterende vindkraft kapacitet. Dermed afværger opladningen, at den pågældende vindproduktion bliver frakoblet. Opladningen vil med nul eller negativ marginalomkostning have aftaget den mest ineffektive, "problematisk" produktionsmarginal fra eksisterende vindkapacitet. En produktion, som det samfundsøkonomisk ville være omkostningsfyldt at transportere og forbruge andetsteds. Opladningen vil have åbnet rum for, at den pågældende, eksisterende vindkapacitet med forbedret driftsøkonomi vil kunne afsætte dens øvrige produktion til andet forbrug, hvor den vil have erstattet elproduktion, sandsynligvis fra et af de mest ineffektive, højest CO₂-udledende kulfyrede kraftværker.

For det andet vil tidsforskydningen have flyttet elforbrug fra timer med spidslast til timer, hvor det ville være blevet forsynet med marginal kulkraft. Flytningen vil have reduceret CO₂-udledning fra et marginalt, kulfyret kraftværk. For det tredje vil tidsforskydningen styrke markedsværdien for den øvrige vindproduktion, hvilket vil fremme udbredelsen af vindkraft, øge vindproduktionen og energimixets vindandel.

Tilsvarende gælder for tidsforskydning til timer, med positive, særligt lave elpriser, hvor der oplades med vindproduktion, som ellers ville blive eksporteret med nettab og uden fortjeneste. Udbredelsen af elbiler resulterer i, at efterspørgslen efter el vil stige med elforbruget fra en ny forbrugsgruppe, elbiler. Det antages, at en ny forbrugsgruppes elforbrug nødvendiggør, at der etableres tilsvarende ny produktionskapacitet til at forsyne dens elforbrug. Det antages at blive tilfældet, hvis ikke elbilerne tilbydes et incitament til at flytte opladningen til mere hensigtsmæssige timer. Hvis de benytter Vindoptimeret opladning V2G, vil det ikke blive nødvendigt at etablere ny marginal produktionskapacitet.

Beregningsprincip for CO2 nr. 1.

Elbiler betragtes som et nyt forbrugssegment, hvis marginale elforbrug alt andet lige vil blive forsynet med øget elproduktion, på kort sigt fra et eksisterende marginalt produktionsanlæg, og på langt sigt fra et nyopført marginalt produktionsanlæg.

Beregningsprincip for CO2 nr. 2.

Hvis ikke jobpendlere, med den kørselsprofil der er defineret i nærværende analyse, tilbydes incitament til at udnytte deres forbrugsfleksibilitet, vil de rutinemæssigt påbegynde opladning straks efter ankomst hjemme, og det vil være i en spidslastperiode, hvor opladningens elforbrug vil blive forsynet med øget elproduktion fra et eksisterende marginalt produktionsanlæg.

Beregningsprincip for CO2 nr. 3.

Hvis jobpendlere alternativt vælger at udnytte deres forbrugsfleksibilitet og overskydende lagerkapacitet som defineret i opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G, antages opladningens elforbrug at blive forsynet med elproduktion inden for tre kategorier, overskydende vindproduktion, ineffektiv udnyttet vindproduktion og energimix med rådighedsperiodens højeste vindandel. Når der benyttes Vindoptimeret opladning V2G, beregnes opladningens CO2-indhold individuelt på basis af disse tre kategorier af elproduktion.

Beregningsprincip for CO2 nr. 4

Hovedprincippet er, at elbilejere, der aktivt vælger at benytte opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G, godskrives for samtlige de CO2-effekter i det samlede elsystem, tilvalget resulterer i. Det gælder også de afledte effekter på det overordnede elsystems CO2-udledning. Fx

Beregningsprincip for CO2. nr. 5

Når en elbil oplades med Vindoptimeret opladning V2G, oplades den med flere kWh, end den anvendes til kørsel. En del af opladningen aflades igen på et senere tidspunkt, hvor den fortrænger anden produktion, og hvor afladningen bliver anvendt til at forsyne andre elapparaters elforbrug. Den fortrængte produktions CO2-udledning modregnes i elbilens CO2-udledning efter metoden i figur.

Figur 21: Beregningsgrundlag for CO2-indhold i Vindoptimeret opladning V2G

CO2 i elforbrug til opladning
 - CO2 i afladnings fortrængte elproduktion
 = CO2 i opladning til egenforbrug

Hvor:

- Opladningens CO2-indhold beregnes på basis af CO2-udledningen for den elproduktion, hvor med opladningens elforbrug forsynes
- Afladningens CO2-indhold beregnes på basis af CO2-udledningen for den elproduktion, afladningen fortrænger

Følgende beregningsregler benyttes til elbilens CO2-udledning i forhold til elmarkedsplads og elpris:

CO2 for Vindoptimeret opladning i spotmarkedet

- Opladning i timer med nul/negativ spotpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med vindproduktion, der ellers ikke ville blive produceret
 - Beregning: 0 g CO2 per kWh – fortrængt marginal kraftværks CO2-udledning per kWh
 - Korrigering: Nettab og udveksling
- Opladning i timer med rådighedsperiodens laveste, positive spotpris, særlig lav spotpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med vindproduktion, der ellers ville blive eksporteret
 - Beregning: 0 g CO2 per kWh – (20% eksport nettab*fortrængt marginal kraftværks CO2 kWh)
 - Korrigering: Nettab og udveksling
- Opladning i timer med rådighedsperiodens laveste, positive spotpris, høj spotpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med timens gennemsnitlige energimix
 - Beregning: Energimix'ets gennemsnitlige CO2-udledning per kWh
 - Korrigering: Nettab og udveksling

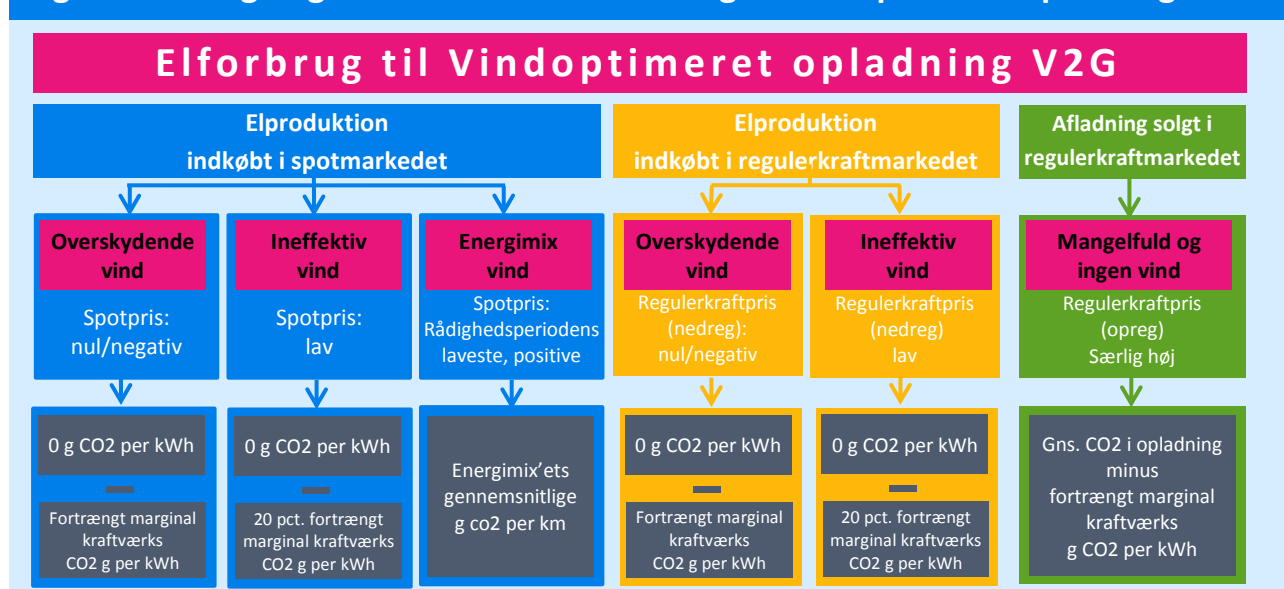
CO2 for Vindoptimeret opladning i regulerkraftmarkedet (nedregulering)

- Opladning i timer med nul/negativ spotpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med vindproduktion, der ellers ikke ville blive produceret
 - Beregning: 0 g CO2 per kWh – fortrængt marginal kraftværks CO2-udledning per kWh
 - Korrigering: Nettab og udveksling
- Opladning i timer med særlig lav, positiv regulerkraftpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med vindproduktion, der ellers ville blive eksporteret
 - Beregning: 0 g CO2 per kWh – (20% eksport nettab*fortrængt marginal kraftværks CO2 kWh)
 - Korrigering: Nettab og udveksling

CO2 for Vindoptimeret afladning i regulerkraftmarkedet (opregulering)

- Afladning i timer med særlig høj regulerkraftpris
 - Antagelse: Lagret energi aflades i timer, hvor den fortrænger marginal kraftværks elproduktion
 - Beregning: CO2 i opladning - fortrængt marginal kraftværks CO2-udledning per kWh
 - Korrigering: Nettab og udveksling

Figur 22: Beregning af CO2-indhold i elforbrug til Vindoptimeret opladning V2G



2.4.3 Beregning af vindandel

Opladningens vindandel beregnes på basis af den elproduktion, der forsyner opladningens elforbrug. Lige som ovenfor under beregningen af CO₂-indhold, omfatter beregningen af vindandel hele elforsynings værdikæden fra kilde til hjul, Well-to-Wheel. Det indebærer, at der korrigeres for el/varme-forhold, energimix, eksport/import-udveksling, nettab og ladetab. Hovedprincippet er, at elbilens miljøregnskab godskrives alle positive effekter, der forårsages af elbilejerens valg om at benytte Vindoptimeret opladning V2G i stedet for alternativet Ikke-styret opladning. Beregningen af CO₂-udledning varieres i forhold til elmarkedsplads og elpris. Der anvendes følgende beregningsregler:

Vindandel for Vindoptimeret opladning i spotmarkedet

- Opladning i timer med nul/negativ spotpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med vindproduktion, der ellers ikke ville blive produceret
 - Beregning: $2 * 100 \%$ vindproduktion
 - Korrigering: Nettab og udveksling
- Opladning i timer med rådighedsperiodens laveste, positive spotpris, særlig lav spotpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med vindproduktion, der ellers ville blive eksporteret
 - Beregning: $1 * 100 \%$ vindproduktion
 - Korrigering: Nettab og udveksling
- Opladning i timer med rådighedsperiodens laveste, positive spotpris, høj spotpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med timens gennemsnitlige energimix
 - Beregning: Energimix'ets vindandel
 - Korrigering: Nettab og udveksling

Vindandel for Vindoptimeret opladning i regulerkraftmarkedet (nedregulering)

- Opladning i timer med nul/negativ spotpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med vindproduktion, der ellers ikke ville blive produceret
 - Beregning: $2 * 100 \%$ vindproduktion
 - Korrigering: Nettab og udveksling
- Opladning i timer med særlig lav, positiv regulerkraftpris
 - Antagelse: Elforbruget forsynes med vindproduktion, der ellers ville blive eksporteret
 - Beregning: $1 * 100 \%$ vindproduktion
 - Korrigering: Nettab og udveksling

Vindandel for Vindoptimeret afladning i regulerkraftmarkedet (opregulering)

- Afladning i timer med særlig høj regulerkraftpris
 - Antagelse: Lagret vindproduktion aflades i timer, hvor den fortrænger marginal kraftværks elproduktion
 - Beregning: Vindandel batteri = vindandel elnet
 - Korrigering: Nettab og udveksling

3 Analyse

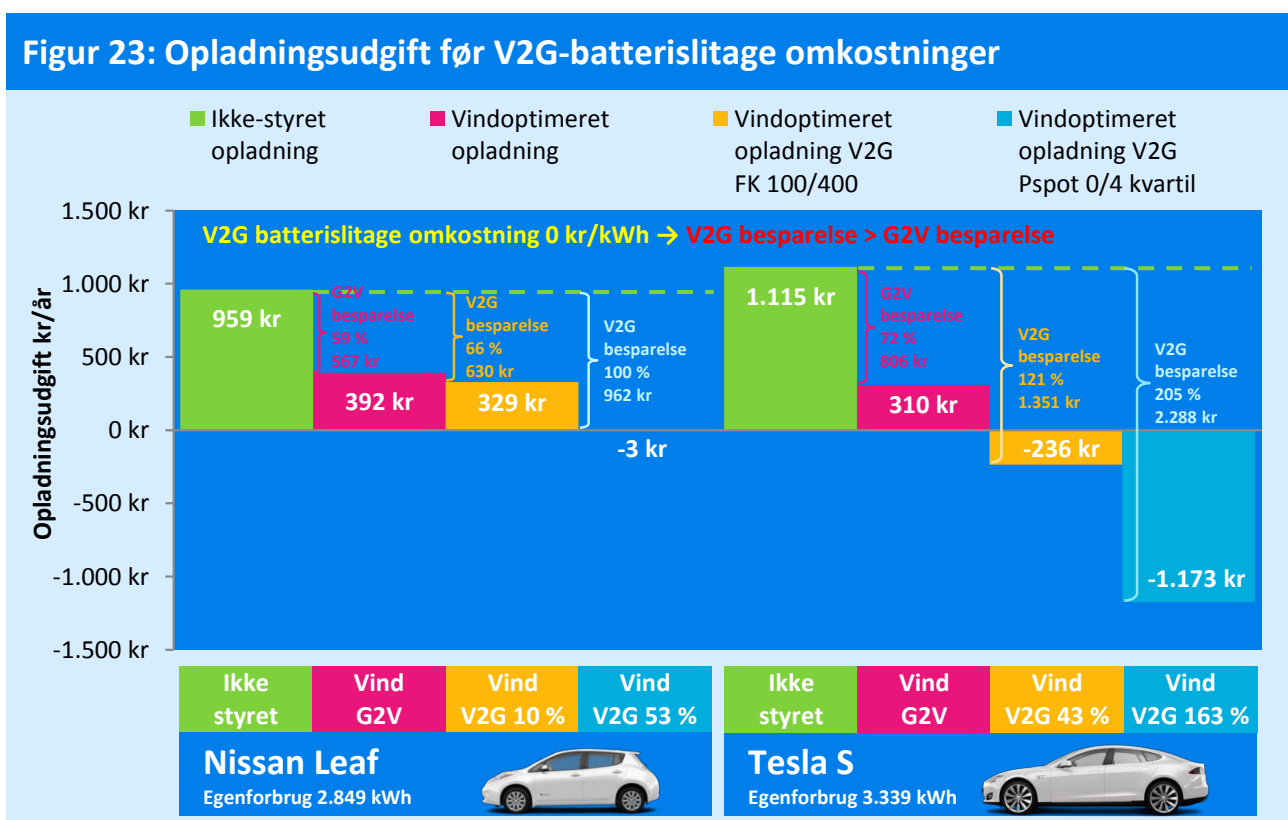
Analysen af gevinstpotentialet for Vindoptimeret opladning V2G baseres på simuleringer af en elbilers kørsel og opladning. En elbil med V2G ville kunne deltage i elmarkedet og bidrage til at effektivisere udnyttelsen af vindkraft med en energimængde flere gange dens egenforbrug samt en afladningsvolumen, der kunne forsyne andre elbiler og husstandes uflexible elforbrug med høj vindandel.

3.1 En elbil: Direkte gevinster for elbilejere

Gevinstpotentialet vedrørende opladningsudgift, CO₂-udledning og vindandel analyseres for elbilejere, der benytter opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G. Gevinsterne omfatter. Vindoptimeret opladning V2G sammenholdes med Ikke-styret og Vindoptimeret opladning (uden V2G). Først beregnes elbilejernes opladningsudgift før V2G-batterislitage omkostninger.

3.1.1 Opladningsudgift før V2G-batterislitage

Figur 23 viser de to elbilers, Nissan Leaf og Tesla S, årlige opladningsudgift for fire alternative opladningsstrategier, Ikke-styret opladning, Vindoptimeret opladning G2V og Vindoptimeret opladning med henholdsvis "lidt" og "meget" V2G. Hvis der i første omgang ses bort fra batterislitage, vil der kunne opnås betydelige besparelser med Vindoptimeret opladning V2G sammenlignet med at benytte en opladningsstrategi uden tidsstyring. En elbil kan oplades til et års kørselsforbrug for under nul kr., og det gælder både elbiler med kort og lang rækkevidde, Nissan Leaf og Tesla S.



Elbiler vil kunne spare i størrelsesordenen 66-205 pct. af opladningsudgiften, ca. 1.000-2.000 kr. per år, ved at benytte Vindoptimeret opladning V2G. Nissan Leaf vil med Vindoptimeret opladning og 53 pct. V2G kunne oplades for minus 3 kr. per år, og Tesla S for minus 236 kr. per år med 43 pct. V2G. Opladningsudgiften er elgrossistprisen på elmarkedet, dvs. eksklusiv nettatariffer, PSO, afgifter og moms.

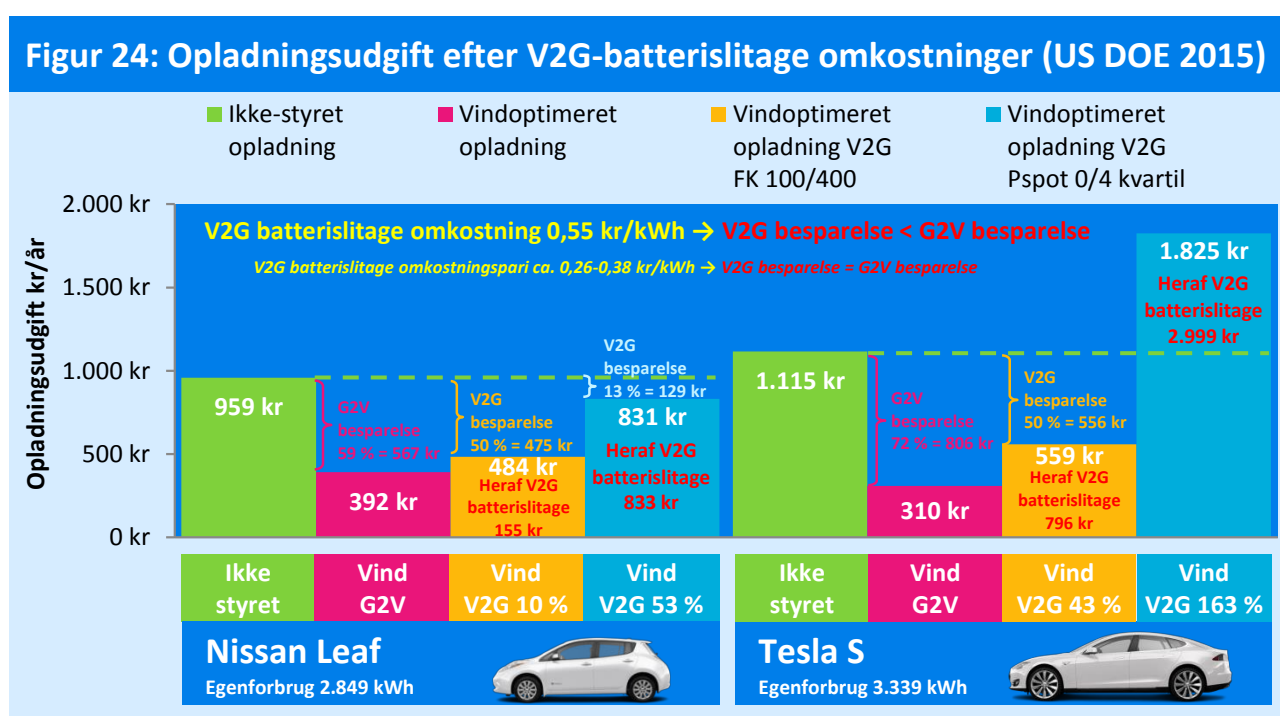
Dermed overstiger V2G besparelserne hvad, der ville kunne opnås uden V2G. Nissan Leaf opnår med Vindoptimeret opladning uden V2G en opladningsudgift på 392 kr. per år, svarende ca. 59 pct. besparelse i forhold til Ikke-styret opladning. Tesla S koster 310 kr. uden V2G, en besparelse på 72 pct.

Dermed konkluderes, at besparelserne er højere med Vindoptimeret opladning V2G end besparelserne uden V2G, som vist i de grønne og pink søjler i figur 23. Beregningen inkluderer ikke omkostninger til V2G-batterislitage, som forudsættes afholdt af elbilejerne. Når omkostninger til V2G-batterislitage modregnes i opladningsudgiften, er V2G ikke længere billigere end G2V, der ikke belastes af ekstra batterislitage.

3.1.2 Opladningsudgift efter V2G-batterislitage (2015 batteri scenarie)

Analysen anvender en simpel batterislitage model, der estimerer V2G-batterislitage omkostningen som en variabel enhedsomkostning. Det amerikanske energiministerium US DOE (Department of Energy) estimerer batteriets kostpris til 300 USD (1.800 kr) i 2015. På den baggrund fastsættes V2G-batterislitage omkostningen til i gennemsnit 0,55 kr. per kWh energiflow. Hver kWh V2G-energiarbitrage der cykles, dvs. op- og aflades, fremskynder batteriets forældelse og reducerer dets værdi med 0,55 kr.

Når V2G-batterislitage omkostningen medregnes reduceres besparelserne, så opladningsudgiften som vist i figur 24 lander på 831 kr. per år for Nissan Leaf med 53 pct. V2G og 559 kr. for Tesla S med 43 pct. V2G. Dermed bliver opladningsudgiften højere med Vindoptimeret opladning V2G end med G2V, hvor den for Nissan Leaf bliver 392 kr. og for Tesla S minus 310 kr. Det konkluderes, at Vindoptimeret opladning V2G ikke er prisdygtig i forhold til G2V under de opstillede forudsætninger vedrørende batteriets kostpris, V2G-batterislitage og elmarkedets prisvolatilitet. For at kunne konkurrere kræves det, at slitageomkostningen reduceres 31-53 pct. til ca. 0,26-0,38 kr. per kWh.



3.1.3 Opladningsudgift efter V2G-batterislitage (2022 batteri scenarie)

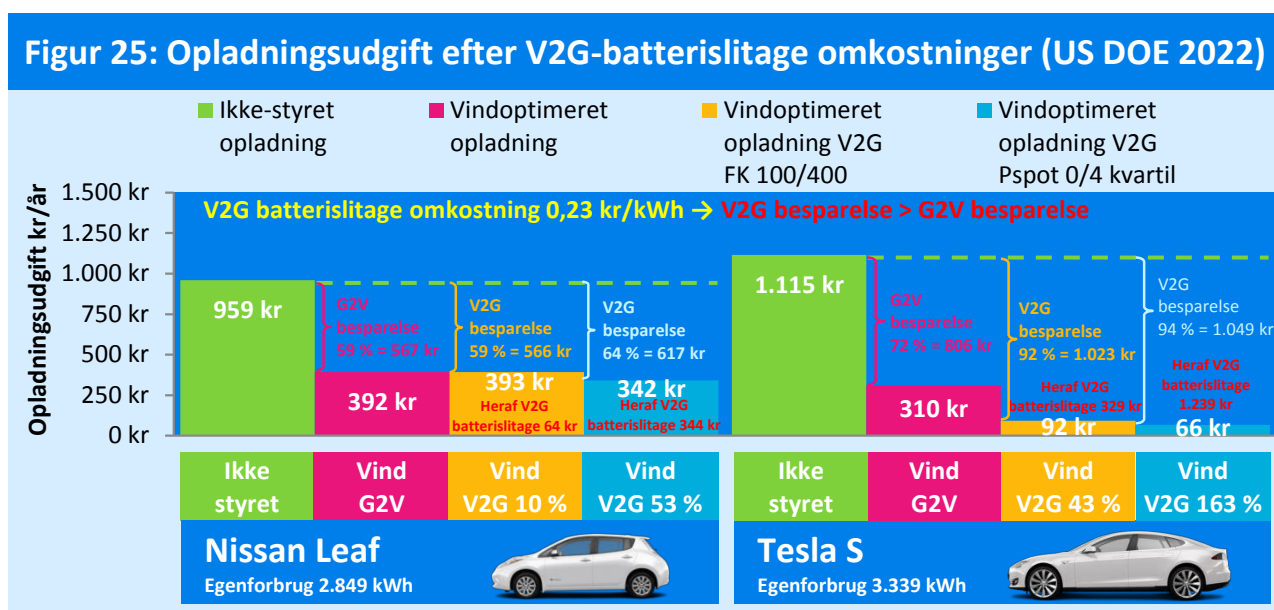
Elbilejere vil under nuværende forhold ikke kunne spare yderligere opladningsudgift med Vindoptimeret opladning V2G i forhold til, hvad der kunne opnås uden V2G. Men det vil ændre sig i fremtiden. Men med de officielle udviklingsplaner for elbilbatterier og forventningen til øget prisvolatilitet på elmarkedet, vil det ske i fremtiden, og måske allerede fra 2022-2025.

Forventningen er, at de faktorer, der bestemmer, om der kan skabes profit med V2G-energiarbitrage, alt andet lige vil udvikle sig til fordel for V2G. Udbredelse af mere vindkraft vil på den ene side at øge elmarkedets prisvolatilitet, og på den anden side, forventes F&U og stordriftsfordele at reducere batteriets kostpris og dermed V2G-batterislitage omkostningen.

Som det fremgår af bilag II, forudser det amerikanske energiministerium US DOE (Department of Energy), at batteriets kostpris vil falde fra det nuværende 2015-prisniveau på 1.800 kr per kWh til 750 kr per kWh i 2022. På den baggrund estimeres V2G-batterislitage omkostningen til 0,23 kr per kWh.

Det vil i givet fald kunne gøre V2G priskonkurrencedygtig i forhold til G2V for både Nissan Leaf med 53 pct. V2G og Tesla S med 43 pct. V2G, som vist i figur 25. Selv Tesla S 163 pct. V2G bliver konkurrencedygtig og billigst, hvad angår opladningsudgift. Dermed kan der med Nissan Leaf og Vindoptimeret opladning V2G spares i størrelsesordenen 59-64 pct. af den årlige opladningsudgift for Ikke-styret opladning, eller hvad der svarer til 566-617 kr. For Tesla S bliver besparelsen ca. 92-94 pct., eller 1.023-1.049 kr. per år. Se figur 25.

Fx for Nissan Leaf med 10 pct. V2G, hvor V2G-batterislitage omkostningen er 64 kr. for cyklung af 283 kWh energi-arbitrage (10 % * 2.849 kWh). Dermed overstiger den marginale V2G besparelse igen G2V besparelsen, og V2G er blevet rentabel og den billigste opladningsstrategi, set fra elbilejerens synspunkt.



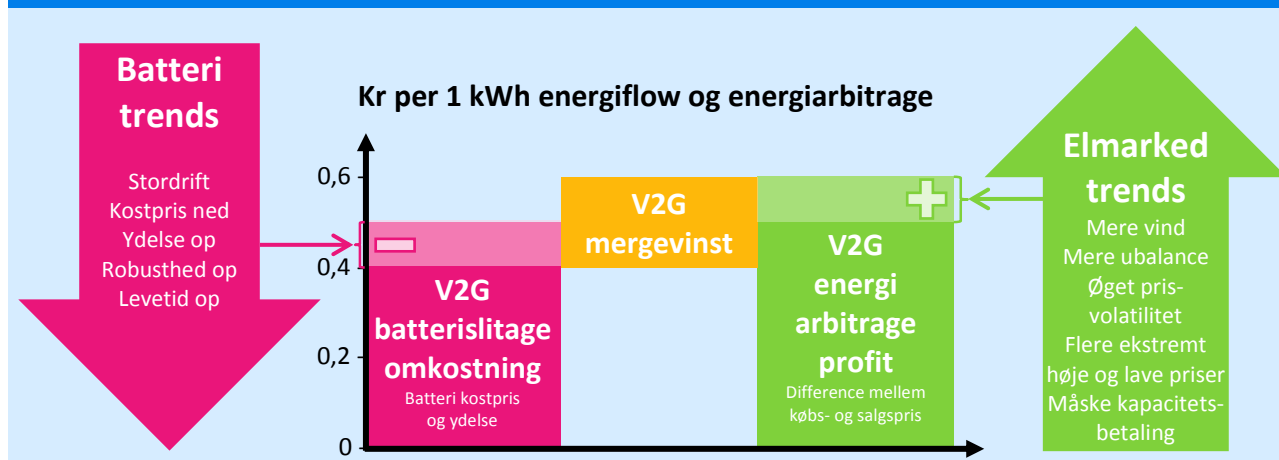
3.1.4 Udviklingstrends vedrørende V2G-energiarbitrage og V2G-batterislitage

Marginale gevinster ved Vindoptimeret opladning V2G bestemmes først og fremmest af to forhold: Profitmulighederne med V2G-energiarbitrage og V2G-batterislitage omkostningen. V2G profitmulighederne afhænger af prisvariationerne på elmarkedet, og de afhænger af den prisvolatilitet på elmarkedet, der forårsages af udbygningen med ny vindkraft, og af de løsninger, der implementeres til at begrænse prisvolatiliteten. V2G-batterislitage omkostningen er i høj grad bestemt af batteriets kostpris.

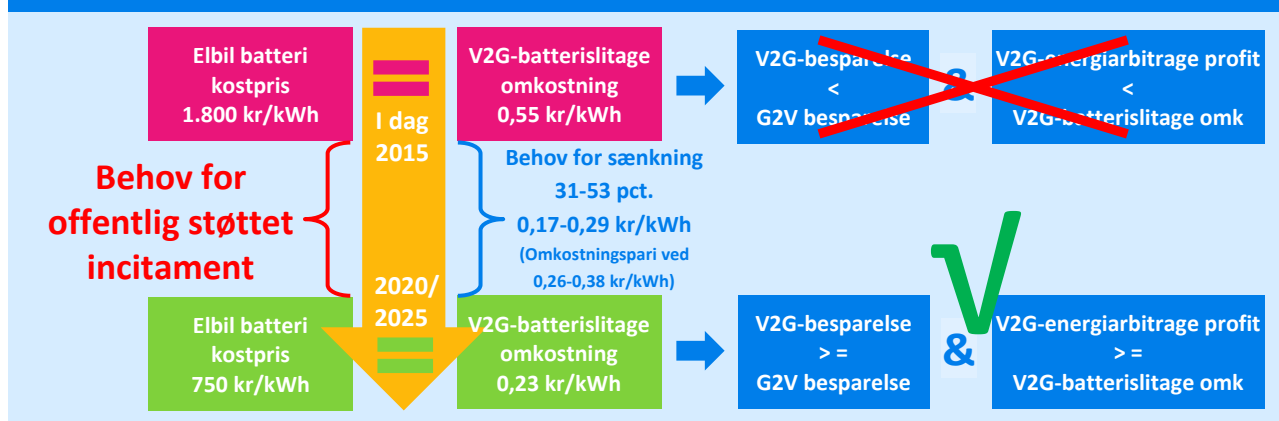
Ekspertforudser, at begge de to forhold vil udvikle sig til fordel for gevinstpotentialet med Vindoptimeret opladning V2G, som illustreret i figur 26 nedenfor vedrørende elmarked og batteri trends. Der forventes stort behov for løsningsbidrag til fremtidens VE-baseret, CO₂-fri energisamfund som det, elbiler, der benytter Vindoptimeret opladning V2G, vil kunne levere, og til den tid, vil ingen løsning kunne levere mere effektivt end elbiler med Vindoptimeret opladning V2G.

Det er afgørende at dette mål sikres med en midlertidig offentlig subsidiering, som kompenserer for de initialt høje batteriomkostninger i elbilens udbredelsesfaser, og som gør det attraktivt for elbilejere at vælge Vindoptimeret opladning V2G, som illustreret i figur 27. I modsat fald vil andre mindre energieffektive løsninger vinde markedet og udvande rentabiliteten med V2G, og det vil givetvis umuliggøre en senere introduktion af Vindoptimeret opladning V2G.

Figur 26: V2G energi-arbitrage profit > V2G batterislitage omk = V2G mergevinst



Figur 27: V2G-batterislitage omkostningsparitet

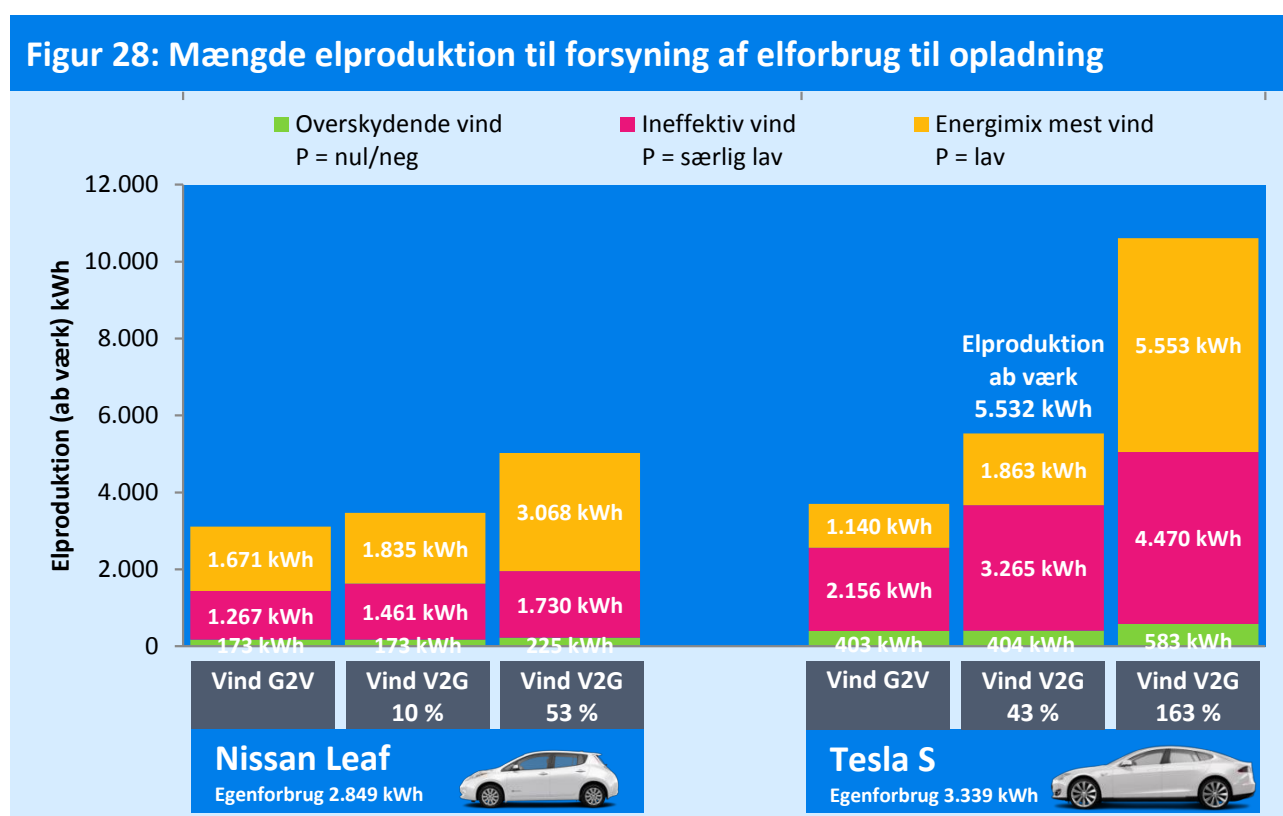


Generelt gælder, at V2G kan betale sig, hvis V2G-energiarbitrage profit overstiger marginalomkostningen til V2G-batterislitage. Differencen mellem købsprisen for en kWh til opladning og salgsprisen for en kWh til afladning (plus ladetab) skal være højere end batterislitage omkostningen for en kWh energiflow. Batterislitage er den dominerende marginalomkostning for midlertidig lagring og energi-arbitrage, og der ses bort fra øvrige omkostninger, fx til datakommunikation. Reglen om at V2G-profit skal være større end V2G-omkostninger er illustreret i figur 26 med tilføjelse af plausible udviklingstrends, der givetvis vil forskyde billedet, så Vindoptimeret opladning V2G bliver økonomisk fordelagtig for elborejere i fremtiden.

Ekspertter forventer faldende kostpriser for batterier til elbiler samt højere ydelse, øget robusthed og længere levetid i takt med ny forskning, øget udbredelse og produktions stordriftsfordele. Tilsvarende forventes øget prisvolatilitet på elmarkedet, især på regulerkraftmarkedet, flere og hyppigere ekstremt høje og ekstremt lave (nul/negative) timeværdier, i takt med vindkraft udbygningen. Begge forudsigelser vil i givet fald medvirke til øget rentabiliteten for Vindoptimeret opladning V2G.

Beregningen af opladningsudgift baseres på elgrossistmarkedets afregningspris for den mængde el, der måles i elborejers forbrugsmålere. Dermed afviger beregningen fra de typisk anbefalede metoder til komparative analyser af bilers energieffektivitet. Afvigelsen forklares med, at nærværende analyse vedrører elbiler med alternative opladningsstrategier, og ikke elbiler i forhold til fx benzin- og dieseldrevne biler, hvor en komparativ analyse af sidstnævnte netop ville forudsætte, at der tages udgangspunkt i elforbruget opgjort på genereringsstedet og inklusiv produktion til transporttab mv., fx ab værk eller ab brønd.

Sammenfattende konkluderes, at uanset om elborejere har en Nissan Leaf eller en Tesla S, og uanset om alternativerne er meget eller lidt V2G, så vil det, når omkostningerne til V2G-batterislitage medtages, bedst kunne betale sig, hvad angår den årlige opladningsudgift, at undlade V2G og i stedet alene fokusere på at benytte Vindoptimeret opladning uden V2G, dvs. Vindoptimeret opladning alene til egenforbrug. Men det vil ændre sig i fremtiden i takt med faldende V2G-batterislitage omkostninger og øget prisvolatilitet.

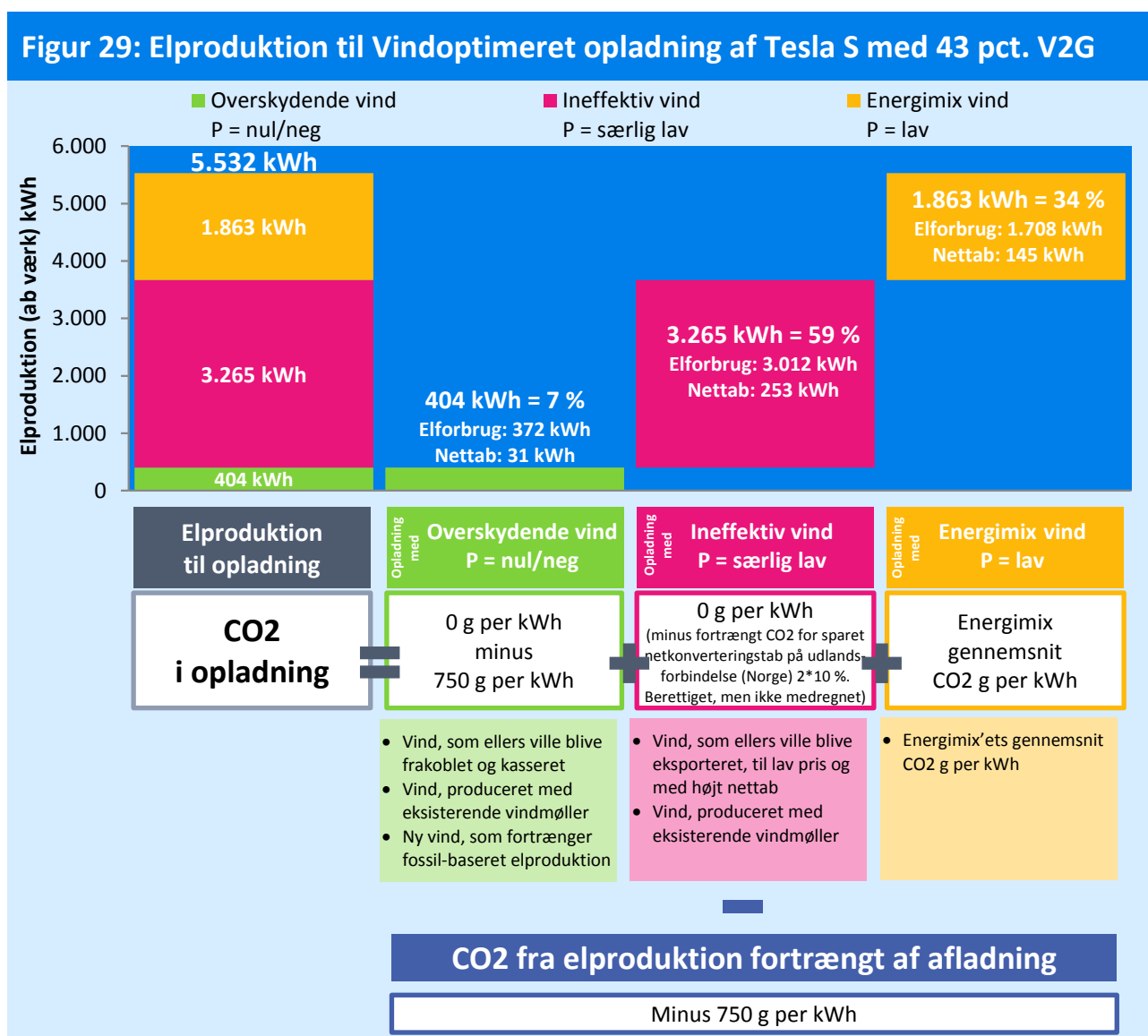


3.1.5 CO2-udledning

Elbilens CO₂-udledning opgøres i gram per kørt km og beregnes på basis af CO₂-udledningen for den elproduktion, der forsyner opladningens elforbrug. Afladningens CO₂-indhold opgøres ud fra CO₂-udledningen for den elproduktion, afladningen fortrænger. Differencen, CO₂ i opladning minus CO₂ i afladning, danner basis for beregning af elbilens CO₂-udledning per kørt km. Elforbruget korrigeres for op- og afladningens konverteringstab, nettab i transmissions- og distributionsnet, udlandsudveksling og produktionsfordeling. Samlet betyder det, at elbilens CO₂-udledning opgøres ud fra en Well-to-Wheel (Kilde-til-hjul) betragtning.

I figur 28 ses elproduktionens mængdemæssige fordeling i de tre vindproduktion kategorier for alternative opladningsstrategier, Vindoptimeret opladning G2V (uden V2G) samt Vindoptimeret opladning af Nissan Leaf med 10 og 53 pct. V2G og af Tesla S med 43 og 163 pct. V2G. Fx viser midterste Tesla S-søjle, at der kræves en elproduktion på 5.532 kWh af værk for at forsyne Vindoptimeret opladning med 43 pct. V2G:

- Egenforbrug: 3.339 kWh an forbrugsmåler
- Energiarbitrage afladning: 1.446 kWh af forbrugsmåler og efter konverteringstab
- Nettab mv.: 429 kWh



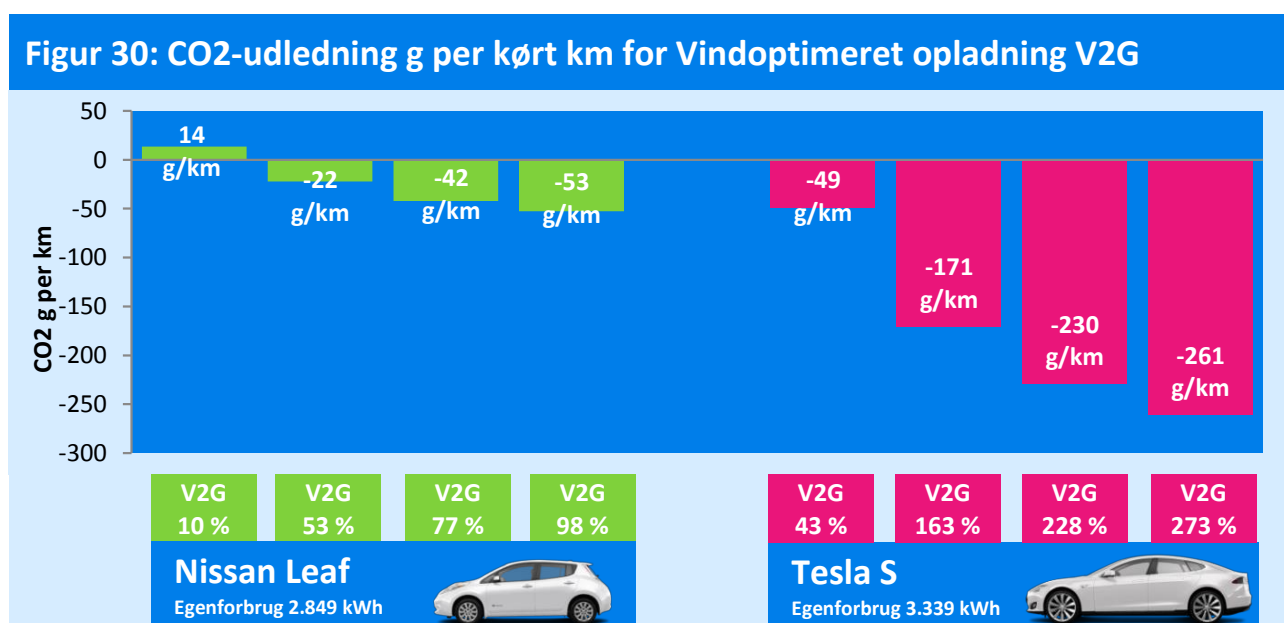
Det bemærkes, at opladning med overskydende og ineffektiv vindproduktion i alt 3.384 kWh (372 + 3.012) vil kunne forsyne hele elbilens egenforbrug og lidt mere til, dvs. også andet forbrug.

I figur 28 er elproduktionen til Vindoptimeret opladning af en Tesla S med 43 pct. V2G udspecificeret på de tre kategorier, overskydende vind, ineffektiv vind og energimix med høj vindandel. CO₂ per kørt km afhænger af elforbrugets fordeling på de tre kategorier elproduktion og af CO₂-udledningen i den elproduktion, der fortrænges af afladning.

Hovedprincippet er, at elforbrugets CO₂-indhold opgøres for den timeopløste, individuelle, marginale elproduktion, der forsyner elforbruget. Derudover er det et hovedprincip, at elbilen godskrives for alle afledte CO₂-effekter i det samlede elsystem, der genereres som en konsekvens af elbilejerens tilvalg af Vindoptimeret opladning V2G. Opladningsstrategiens algoritmer sonder mellem tre kategorier ineffektivt udnyttet vindproduktion med varierende CO₂-effekt. De tre kategoriers CO₂-effekter er illustreret i figur 29.

De kan identificeres mere eller mindre komplekst og præcist. I nærværende analyse defineres Vindoptimeret opladning V2G til at prioritere opladning med overskydende vind, ineffektiv vind og energimix vind. For de elproduktion kategorier, Vindoptimeret opladning V2G prioriterer at oplade med, gælder:

- Overskydende vind til nul/negativ elpris forudsættes at være 100 pct. ellers frakoblet vindproduktion, dvs. vindproduktion, der ellers ikke ville blive produceret, og som produceres med vindmøller, der i forvejen er i drift. Elbilens opladning udløser med andre ord en merproduktion af vind. Elbilen aftager den mest problematiske andel af en given installeret vindkraftkapacitets produktion, den mindst værdifulde del, og som har den absolut højeste integrationsomkostning.
- Ineffektiv vind til særlig lav, positiv elpris, fastsat til lavere end 150 kr/MWh, antages at være vindproduktion, der ellers ville være blevet eksporteret, til lav værdi, og med et højt nettab. Tæller i opladningens elforbrug med nul g CO₂-udledning per kWh. Men det kunne postuleres, at der yderligere burde fradrages 2 * 10 pct. fortrængt CO₂-udledning fra sparet elproduktion til netkonverteringstab i udlandsforbindelsen til Norge, som der i praksis vil være, når en elbil med Vindoptimeret opladning V2G alternativt aftager vindproduktionen i Vestdanmark.
- Energimix vind til elpriser over 150 kr/MWh, men til opladningsperiodens laveste timeværdi, tæller i elbilens CO₂-regnskab med CO₂-udledningen per kWh for timens gennemsnitlige produktionsmix.



Som det fremgår af figur 31, er Vindoptimeret opladning V2G, under de givne beregningsforudsætninger, særdeles effektiv til at reducere elbilernes CO₂-udledning per kørt km. Så effektiv, at elbilerne opnår negativ CO₂-udledning.

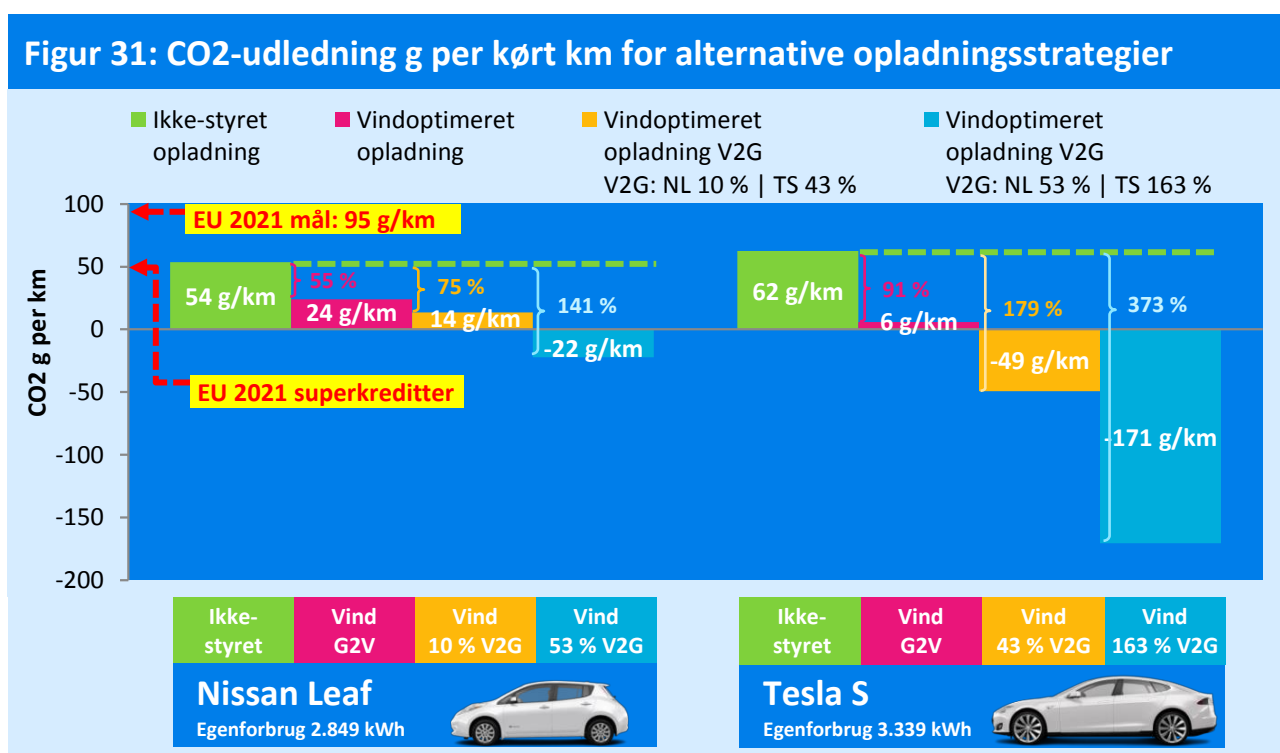
For Nissan Leaf bliver CO₂-udledningen med 53 pct. V2G minus 22 g per km, eller mere end 141 pct. lavere end med Ikke-styret opladning. For Tesla S med 43 pct. V2G bliver den minus 49 g per km, svarende til en reduktion på 179 pct. i forhold til Ikke-styret opladning.

Elbiler, der oplades med Vindoptimeret opladning V2G, godskrives for CO₂-udledningen for den elproduktion, afladningen fortrænger. Generelt vil der være tale om, at elbilen typisk oplades med CO₂-fri vindproduktion, som senere aflades tilbage til elnettet, hvor den fortrænger elproduktion med relativ høj CO₂-udledning. Det forudsættes, at V2G-afladning fortrænger elproduktion fra et marginalt kratværk med en CO₂-udledning på 750 g per kWh.

Vindoptimeret opladning V2G vil potentielt kunne reducere elbilers CO₂-udledning per kørt km i forhold til Ikke-styret opladning. Det gælder både for elbiler med kort og lang rækkevidde, og uanset om de anvender lidt eller meget V2G.

En Tesla S kan med Vindoptimeret opladning og henholdsvis 43 % eller 163 % V2G opnå en CO₂-udledning under nul, nemlig henholdsvis -49 eller -171 g per kørt km. En Nissan Leaf kan med henholdsvis 10 % eller 53 % V2G opnå en CO₂-udledning på 14 g eller -22 g per kørt km. Se figur 31.

Selv uden V2G vil der med Vindoptimeret opladning kunne opnås store reduktioner i elbilers CO₂-udledning, når der sammenlignes med CO₂-udledningen for elbiler der benytter Ikke-styret opladning. Tesla S vil kunne nå helt ned på under en tiendedel CO₂ med Vindoptimeret opladning uden V2G sammenlignet med Ikke-styret opladning. Nemlig 6 g CO₂ per kørt km mod 62 g for Ikke-styret opladning. Nissan Leaf vil med Vindoptimeret opladning uden V2G kunne nå ned på cirka det halve af Ikke-styret opladning, nemlig 24 g CO₂ per km for Vindoptimeret opladning uden V2G, mod 54 g med Ikke-styret opladning.



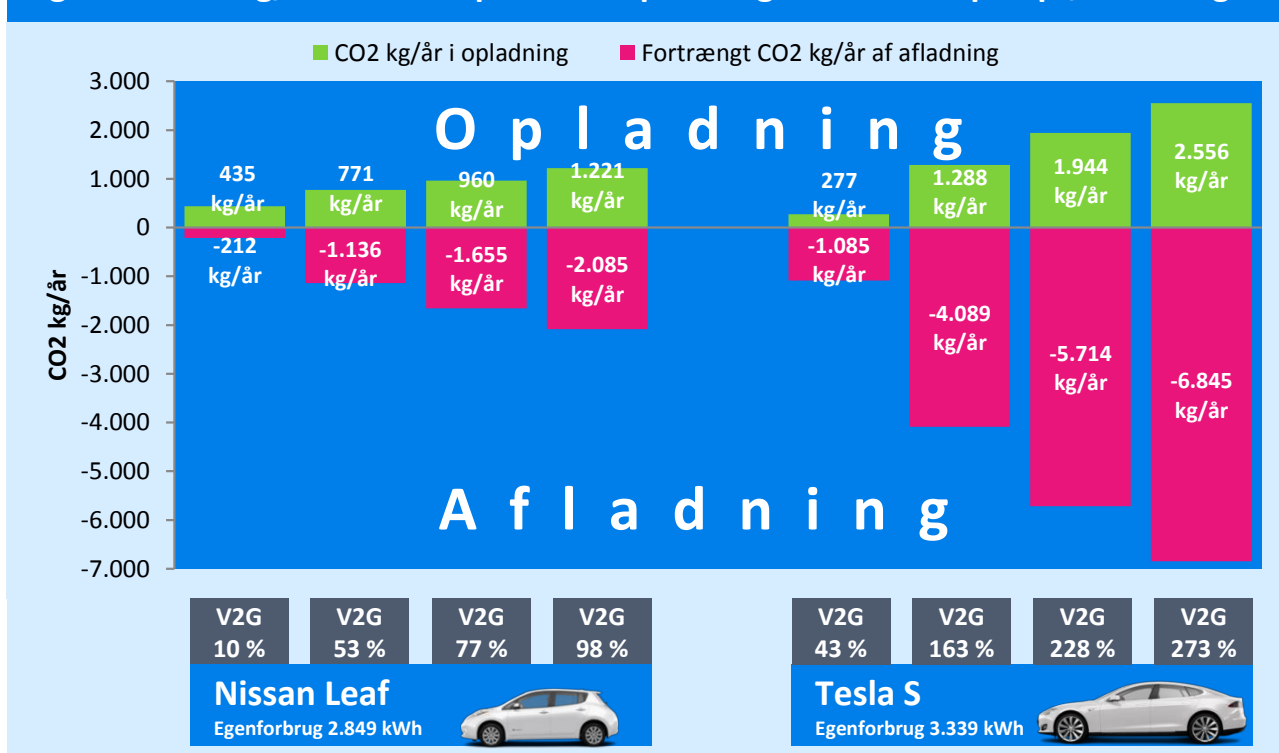
Årsagerne til de lave værdier for elbilers CO₂ per km, når de benytter Vindoptimeret opladning V2G, kan opdeles i to kategorier: reduktionsgevinster ved opladning, og reduktionsgevinster ved afladning. Begge kategorier kan henføres til gevinsterne ved de afledte samfundsøkonomiske effekter, der genereres som et resultat af elbilejerens valg af Vindoptimeret opladning V2G fremfor en anden mindre hensigtsmæssig opladningsstrategi, og som godskrives i elbilens CO₂-regnskab.

Som det fremgår af figur 32, skyldes de negative værdier for de to elbilmodellers CO₂-udledning per km i høj grad, at de godskrives for de CO₂-mæssige fortrængningseffekter i det øvrige elsystem, der genereres som følge af elbilernes opladning med overskydende vindproduktion, midlertidig lagring, og efterfølgende afladning tilbage til elnettet i perioder, hvor der er mangel på vindproduktion.

Jævnfør figur 32 er det primært afladningens CO₂-effekt, der trækker elbilens CO₂-udledning ned under nul-linjen. Afladningen fra en Tesla S, der benytter Vindoptimeret opladning med 163 % V2G, reducerer årets totale opladnings CO₂-udledning med cirka 4,1 ton, og det er over tre gange opladningens totale CO₂-udledning på cirka 1,3 ton. Ved 43 % V2G godskrives årets opladning for afladningens cirka 1,1 ton CO₂, dvs. næsten fire gange opladningens cirka 0,28 ton CO₂-udledning. Samme mønster gælder for Nissan Leaf med 53 % V2G, hvor afladningens cirka 1,1 ton CO₂-udledning modregnes i opladningens cirka 0,8 ton CO₂. Først når Nissan Leaf når ned på 10 % V2G, overstiger opladningens CO₂ afladningens CO₂.

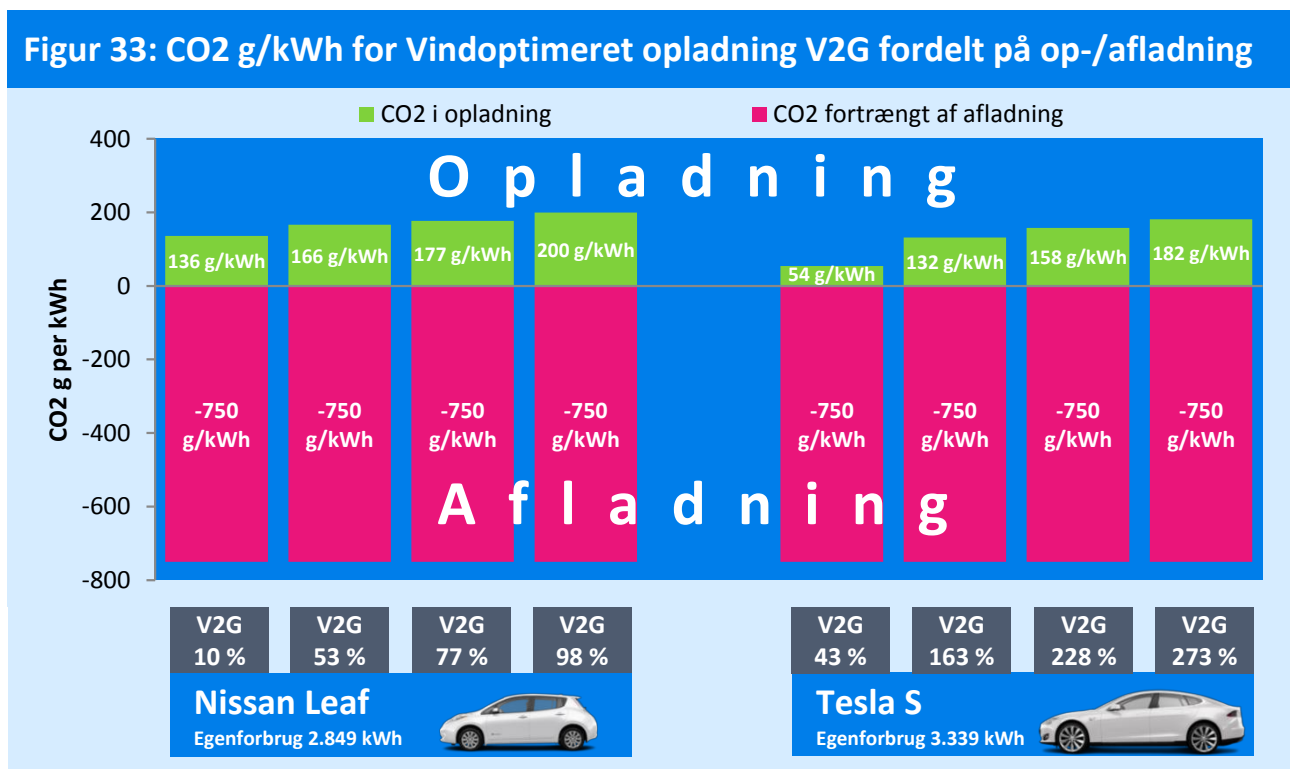
Afladningens høje vægt i CO₂-regnskabet, hvor den typisk trækker årets totale CO₂-udledning under nul, skyldes, at opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G er designet, så afladningen prioriterer at aktivere i højlast-timer, med lav vindproduktion, hvor den vil fortrænge elproduktion fra det marginale og højt-udledende kraftværk. Alle elbilens kWh aflades i sådanne timer, og CO₂-regnskabet godskrives for en tilsvarende mængde kWh CO₂-udledning fra et marginalt kraftværk, og den gennemsnitlige CO₂-udledning for en kWh fra det marginale kraftværk er cirka 750 g, som vist i søjlerne under nul-linjen i figur 32.

Figur 32: CO₂ kg/år for Vindoptimeret opladning V2G fordelt på op-/afladning



Hvad angår opladningens CO₂-udledning, sondres der i beregningen mellem de elmarkedspladser, hvor opladningens elforbrug er indkøbt, og inden for hvilke prisintervaller, opladningen er aktiveret. Når markedsprisen for el er nul/negativ, antages det typisk at resultere i, at vindmølleejere frakobler produktion i disse timer, for at undgå at skulle betale for at få produktionen afsat. Når opladning aktiveres i disse timer, vil det marginale elforbrug øge efterspørgslen og resultere i, at frakoblingen af vindproduktion reduceres med tilsvarende mængde, svarende til en forøgelse af den eksisterende vindkraft kapacitets produktion.

Jævnfør den benyttede beregningsmetode for CO₂ godskrives elbiler for at fortrænge tilsvarende elproduktion fra et margint kraftværk, dvs. 750 g CO₂, når opladning aktiveres i timer med nul/negative priser.



3.1.6 Vindandel

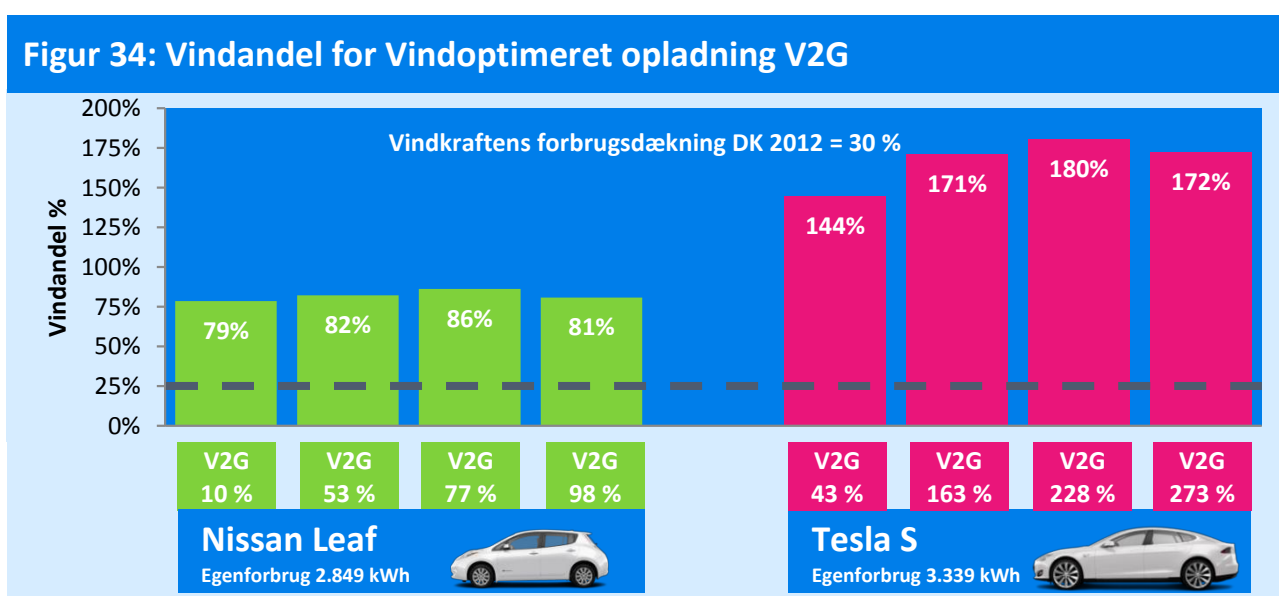
Vindandelen i elforbrugets energimix opgøres principielt på samme måde som CO₂-udledningen, dvs. ud fra den elproduktion, der forsyner opladningens elforbrug. Ligeledes korrigeres for nettab, udveksling og produktionsfordeling, og der sondres mellem de tre kategorier af vindintensiv elproduktion.

- Overskydende vind tæller 200 pct. i beregningen af vindandel
- Ineffektiv vind tæller 100 pct.
- Energimix vind tæller med timernes individuelle vindandele.

Vindandelen i opladningen beregnes som andelen af vindproduktion i det samlede elproduktion mix. En del af den vindproduktion aflades tilbage til elnettet. I beregningen antages, at andelen af vindproduktion i afladningen er den samme, som andelen af vindproduktion i elnettet i den time, hvor afladningen gennemføres. Hvis fx vindandelen i elnettet er 30 pct. i afladningstimen, antages det, at der også er 30 pct. vindproduktion i den afladede energimængde.

Vindproduktionen i afladning fratrækkes i vindproduktionen i opladningen, og nettosummen udgør den vindproduktion, der bruges til at beregne vindandelen i elbilens egenforbrug. Dermed angiver vindandelen, hvor meget vindproduktion der er i den energimængde, elbilen anvender til kørsel. Og ikke, hvor stor vindandelen er i det elforbrug, der forsyner opladningen.

Vindoptimeret opladning af Nissan Leaf med 53 pct. V2G når op på en vindandel på 82 pct. For Tesla S med 43 pct. V2G er vindandelen 144 pct. Se figur 34 og 35. Til sammenligning udgør vindandelen i Ikke-styret opladning 34 pct., og vindandelen i året totale elforbrug var i 2012 cirka 30 pct. Det kan derudfra konkluderes, at Vindoptimeret opladning selv ved et beskedent omfang af V2G vil kunne bidrage betydeligt til at øge udnyttelsen af vindproduktion i den samlede elforsyning. Vindandel angiver, hvor stor en del af opladningens elforbrug, der forsynes med vindproduktion.



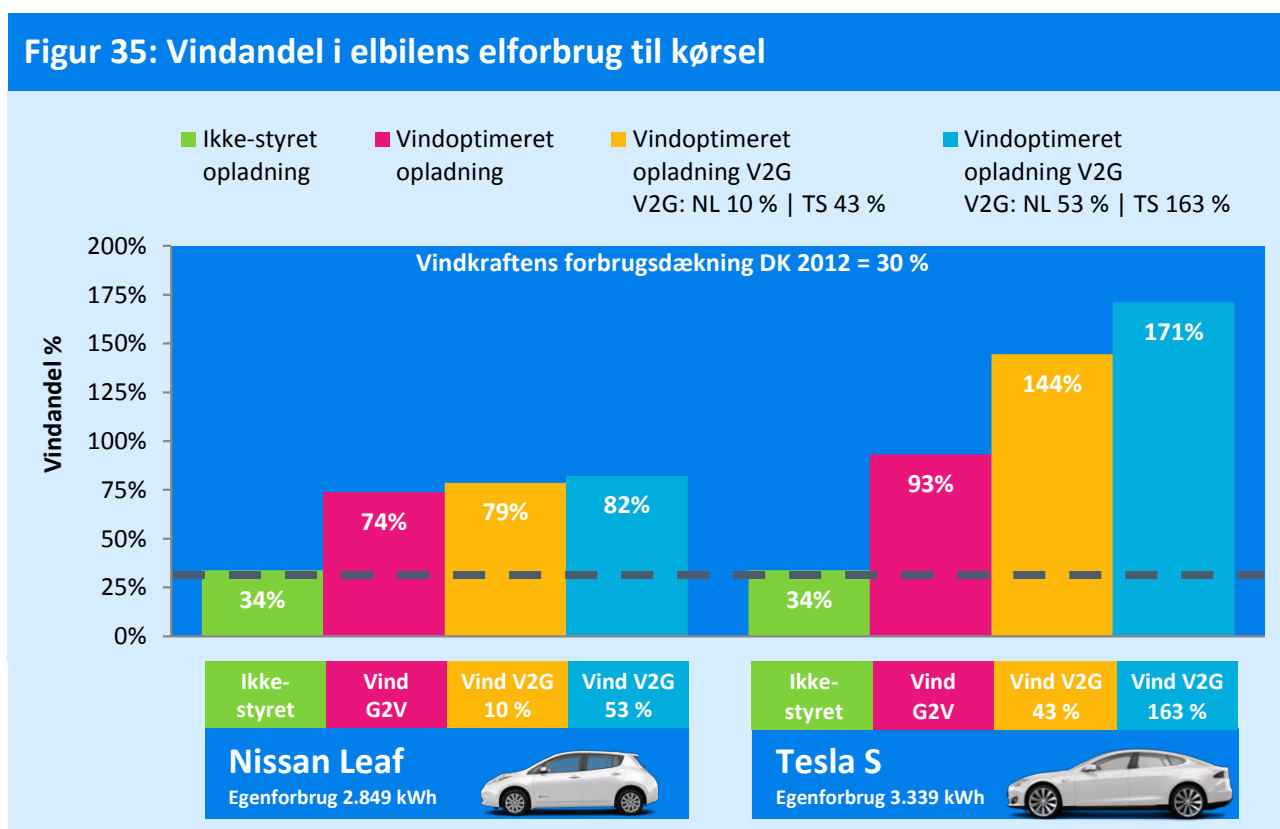
Beregning af opladningens vindandel baseres på de samme grundlæggende principper, som dem der anvendes til CO₂-beregningen, og som er beskrevet nærmere i metode kapitlet ovenfor. Vindandelen beregnes individuelt på basis af vindproduktionens andel af det energimix, der forsyner opladningens elforbrug. Med tillæg af de vindproduktionsmæssige afledte gevinster i det øvrige elsystem, der genereres som følge af elbilerens aktive tilvalg at Vindoptimeret opladning V2G, fremfor en anden opladningsstrategi.

En Tesla S, der benytter Vindoptimeret opladning med henholdsvis 43 % eller 163 % V2G, opnår en vindandel på henholdsvis 144 % eller 171 %. For en Nissan Leaf er vindandelen henholdsvis 79 % og 82 % med Vindoptimeret opladning og henholdsvis 10 % og 53 % V2G.

En vindandel over 100 %, som tilfældet med Tesla S, kan lade sig gøre, fordi elbilens marginale forbrug i timer med nul/negative elpriser, tæller med dobbelt vægt. Elbilen aftager vindproduktion, som ellers ville blive frakoblet, dvs. 100 pct. vind. Dernæst vil der også være tale om, at elbilen aftager en del af den mest ineffektivt udnyttede del af en given vindkraftkapacitets vindproduktion, hvilket fortrænger behovet for reguleringskapacitet, transmissionskapacitet med videre.

Det åbner rum for en mere økonomisk effektiv udnyttelse af den pågældende vindkraftkapacitets øvrige årsproduktion, og derfor godskrives elbilen med yderligere et forbrug af 100 pct. vindproduktion. Og endelig, når elbilen aflader en del af den forbrugte vindproduktion tilbage til elnettet.

Elbiler, der benytter Vindoptimeret opladning uden V2G aftager effektivt vindproduktion, som vist i figur 35. En Tesla S kommer op på at køre på 93 % vindproduktion, og en Nissan Leaf's egenforbrug til kørsel når helt op på 74 % vindandel. Til sammenligning er vindandelen for begge elbiler 34 %, når de benytter reference strategien Ikke-styret opladning.



Når elbiler benytter Vindoptimeret opladning V2G, vil hele eller det meste af elbilens elforbrug til kørsel bestå af ellers ineffektivt udnyttet vindproduktion, som enten slet ikke ville blive produceret, fordi vindproduktionen frakobles, eller som ellers ville blive eksporteret til lav markedsværdi og et højt nettab.

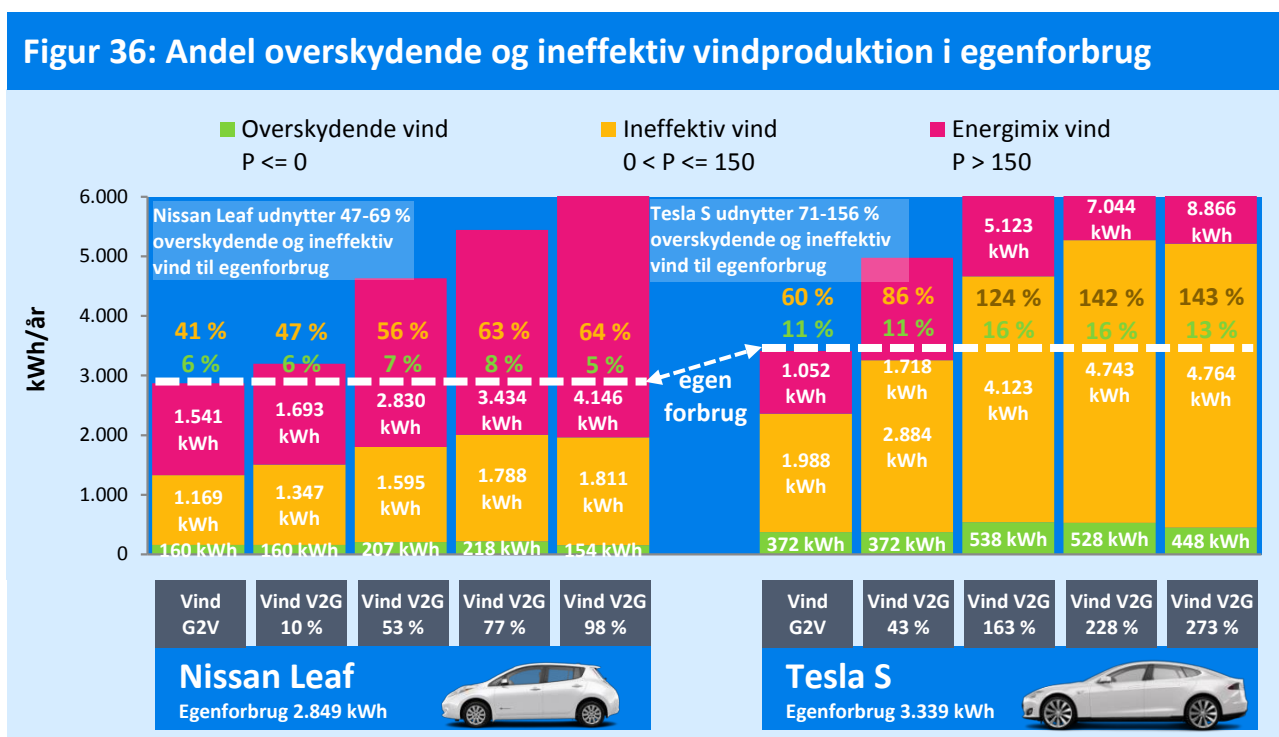
Som det fremgår af figur 36, vil Vindoptimeret opladning af Tesla S med 43 pct. V2G resultere i, at elbilens egenforbrug dækkes næsten udelukkende med 11 pct. ellers frakoblet vindproduktion og 86 pct. ellers eksporteret vindproduktion.

Hvis mængden af V2G øges til fx 163 pct. vil den samlede opladning med 16 pct. ellers frakoblet vindproduktion og 124 pct. ellers eksporteret vindproduktion overstige elbilens opladningsbehov til egenforbrug, således at en del af afladningen også vil være ellers frakoblet eller eksporteret vindproduktion. Det ville betyde, at andre forbrugsapparater, der ikke er forbrugsfleksible, i vindstille perioder vil kunne forsynes med "ny" vindproduktion fra den eksisterende installerede vindkraft kapacitet. Og dermed ville vindproduktionen fortrænge elproduktion fra et marginalt kraftværk med særlig høj CO₂-udledning.

Det bemærkes, at Vindoptimeret opladning med 163 pct. V2G forventes at blive rentabel i fx 2022 på grund af de faldende kostpriser på batterikapacitet, som bestemmer omkostningerne til V2G-batterislitage.

En Nissan Leaf ville med Vindoptimeret opladning uden V2G kunne dække 47 pct. af dens opladningsbehov med ellers kasseret (6 pct.) eller eksporteret (41 pct.). Med tilføjelse af 10 pct. V2G ville en Nissan Leaf kunne nå op på 53 pct. egenforbrug dækning med ellers dels kasseret (6 pct.) dels eksporteret (47 pct.) vindproduktion. Det ville også her gælde, at en relativ stor andel af Nissan Leaf'ens resterende opladningsbehov ville blive forsynet med vindproduktion og bidrage til at effektivisere udnyttelsen.

Vindoptimeret opladning V2G ville gøre, at de allerede eksisterende vindmøller ville producere mere, og den indenlandske forbrugsdækning med vindproduktion fra eksisterende vindmøller ville blive forøget. Og det ville resultere i store samfundsøkonomisk afledte besparelser i form af fx mindre behov for PSO- og balanceringsstøtte, mindske nettab og i øvrigt resultere



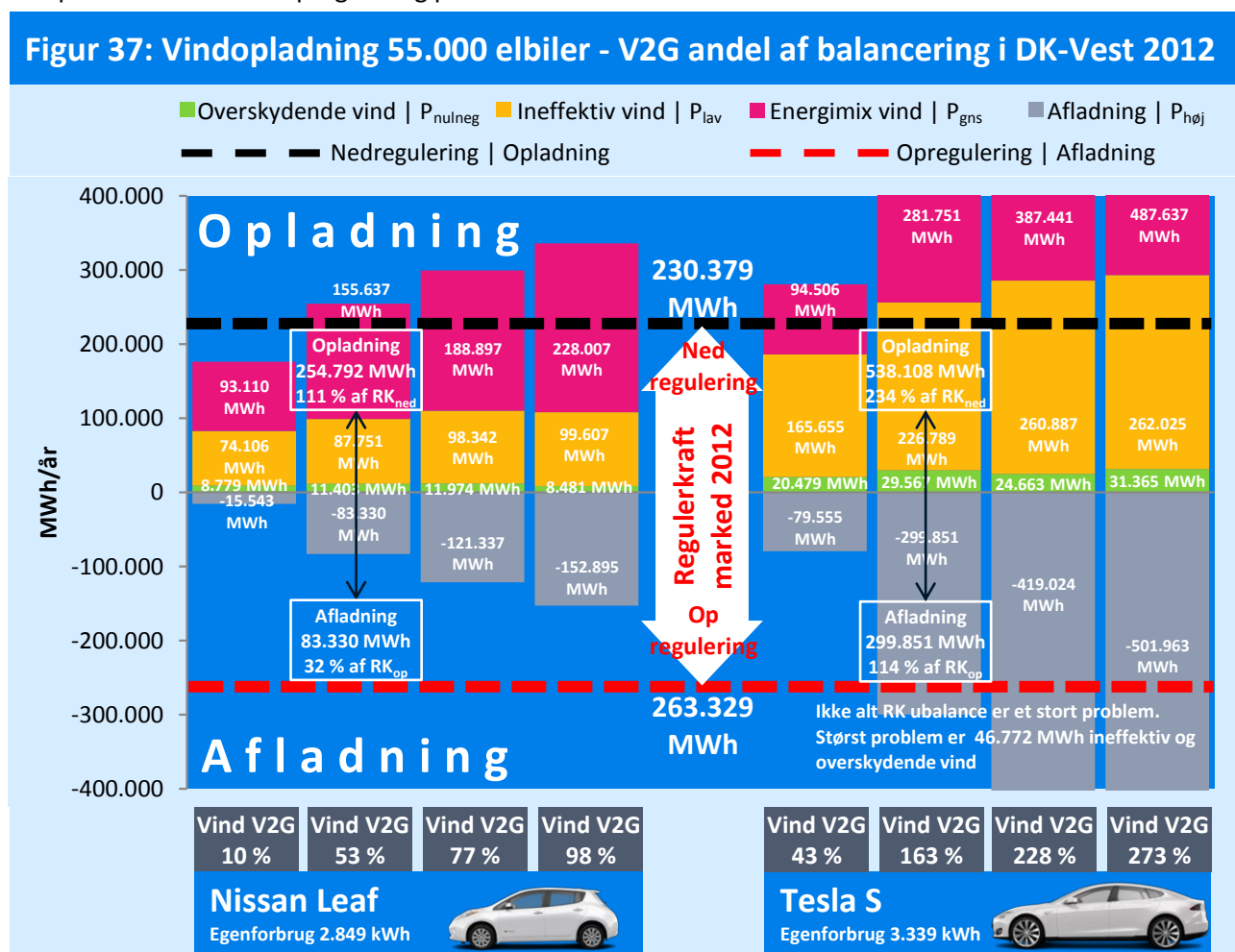
3.2 Mange elbiler: Afledte gevinster for samfundet

Udbredelse af mange elbiler, der benytter Vindoptimeret opladning V2G, vil kunne effektivisere udnyttelsen af vindkraft, øge vindkraftens markedsværdi, reducere integrationsomkostningerne for ny vindkraft osv. Men det vil kræve et vist minimum af elbiler for at kunne gøre en mærkbar samfundsøkonomisk forskel. Spørgsmålet er, om der realistisk vil kunne forventes en tilstrækkelig elbil udbredelse til at berettige en samfundsmæssig satsning på rammevilkår til udbredelse af Vindoptimeret opladning V2G. Blandt aktuelle problemområder og elbilernes mulige løsningsbidrag kunne nævnes:

- Aftage overskydende vindproduktion, som ellers ville blive frakoblet, fordi elprisen er nul/negativ
- Balancering på regulerkraftmarkedet i tilfælde af vindprognosefejl
- Afladning af lagret vindkraft i relativt vindstille højlast timer til erstatning for marginal kraftværk

3.2.1 55.000 elbilers bidrag til vindkraft balancering

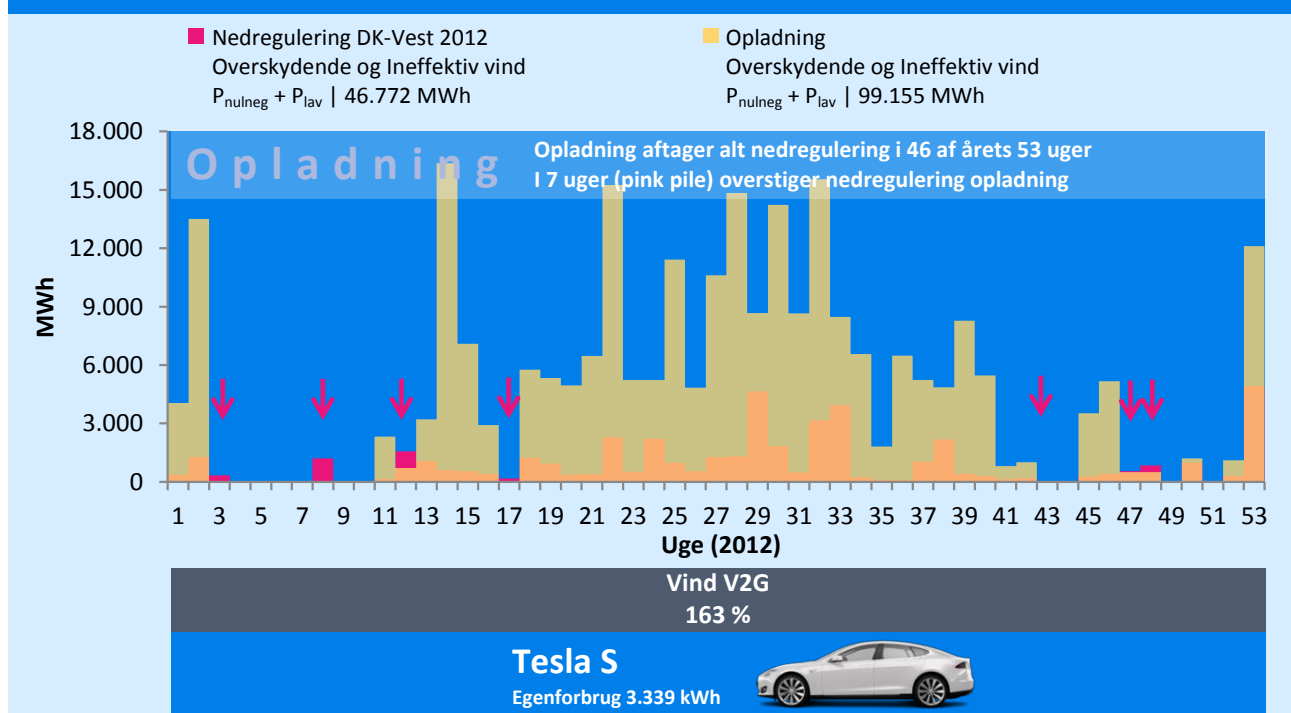
I figur 37 viser op- og nedregulering på regulerkraftmarkedet i Vestdanmark i 2012 og Vindoptimeret opladning V2G af 55.000 elbiler, svarende til en elbil penetration på 2,5 pct. af Danmarks personbil bestand på ca. 2.2 mio. Øverste søjler viser opladning, og nederste viser afladning. Opladning af 55.000 Nissan Leaf elbiler med Vindoptimeret opladning og 53 pct. V2G aftager 254.792 MWh, svarende til 111 pct. af årets nedregulering på 230.379 MWh (sort stipuleret linje). 55.000 Tesla S elbilers afladning ved 163 pct. V2G til 114 pct. af den faktiske opregulering på 263.329 MWh.



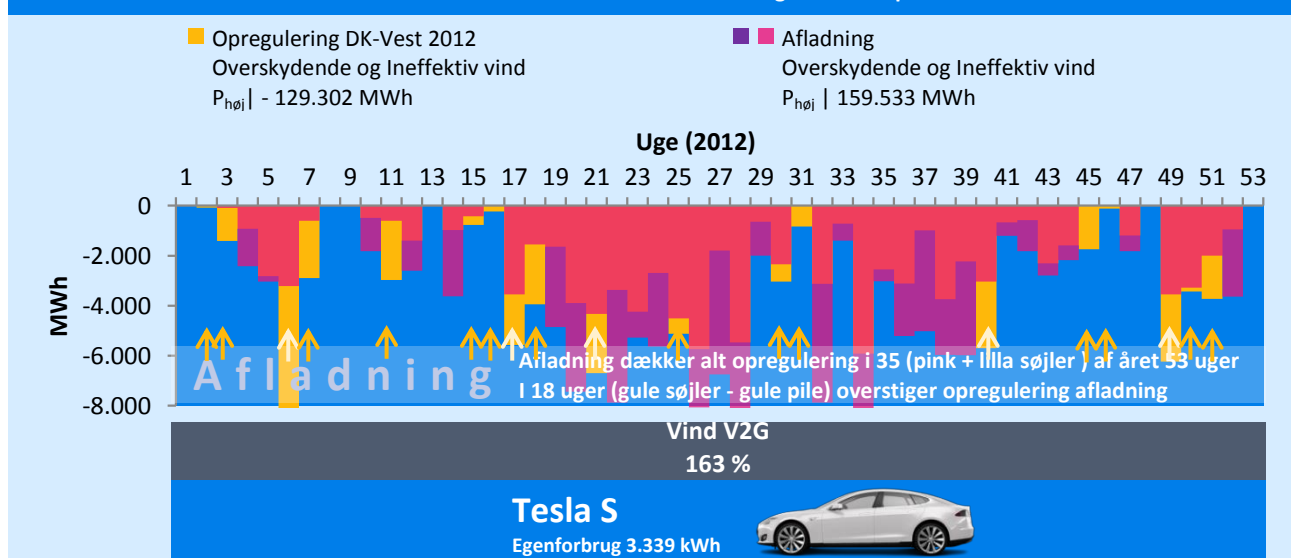
Eksemplerne illustrerer alene mængdeforhold og er ikke udtryk for sammenfaldende timefordeling for opladning/nedregulering og afladning/opregulering.

Det ville i princippet kunne sikres ved lempelse af simuleringernes prisbud kriterie for accepteret op-/afladning. Op- og afladnings månedsfordelte dækning af ned- og opregulering ses i figur 38 og 39. Spørgsmålet er, hvor stor en andel af balancemarkedets ned- og opregulering, der vil kunne dækkes med et givet antal elbilers op- og afladning, ved forskellige grader af Vindoptimeret opladning V2G. Når der udbydes nedregulering på regulerkraftmarkedet, betyder det, at der sælges el, typisk overskydende produktion fra vindmøller, fordi de producerer mere end forventet pga. prognosefejl. Denne overskydende el kunne fx bruges til opladning.

Figur 38: Vindopladning 55.000 Nissan Leaf V2G opladning og RK_{ned} månedsfordelt



Figur 39: Vindopladning 55.000 Tesla S V2G afladning og RK_{op} månedsfordelt



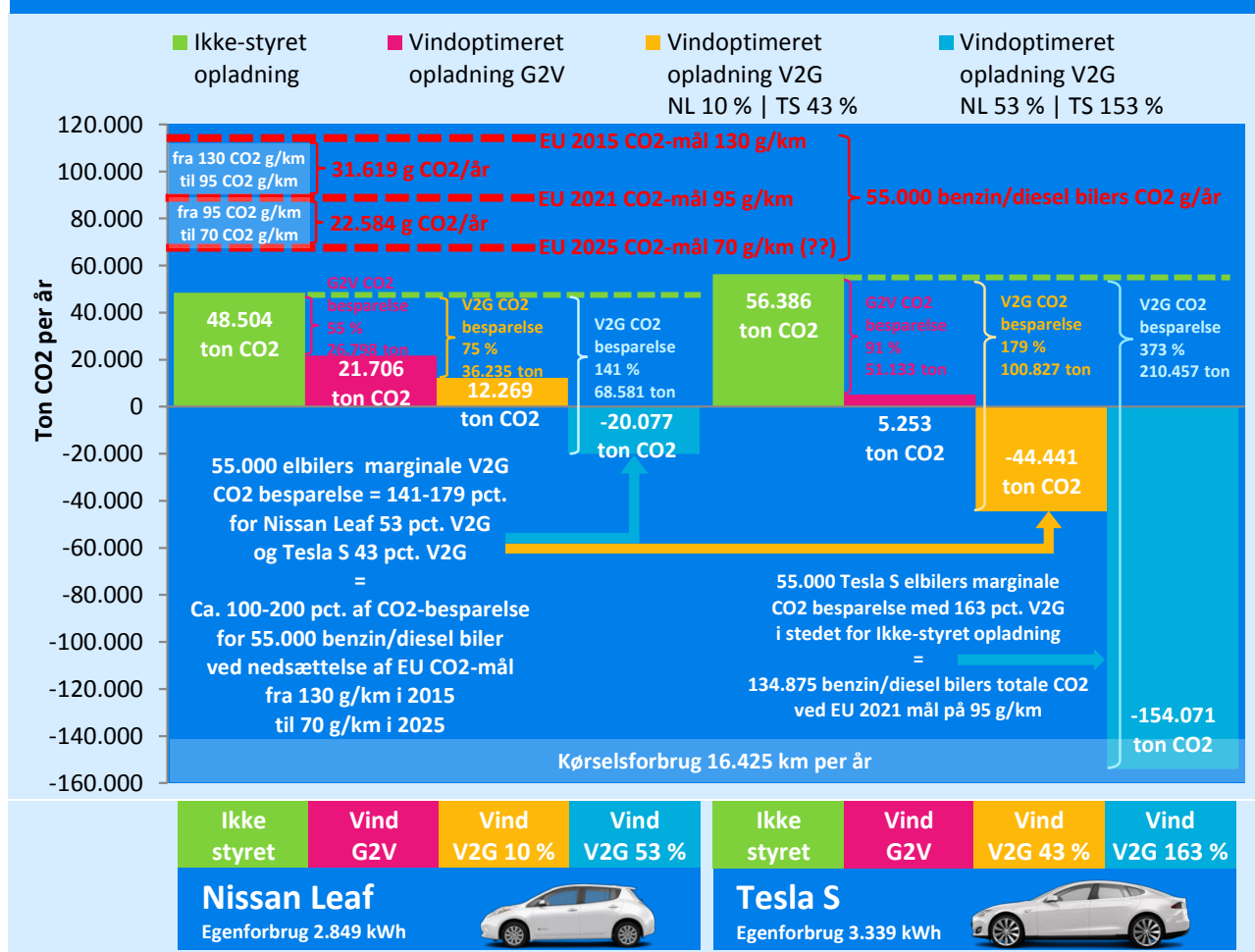
3.2.2 55.000 elbilers bidrag til reducere af elforsynings totale CO2-udledning

Analysens beregninger vedrørende elbilers CO2-udledning vedrører de marginale CO2-besparelser ved at benytte opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G i stedet for Ikke-styret opladning. De vedrører ikke potentialet for CO2-reduktioner med elbiler i stedet for benzin/diesel biler. Elbiler kritiseres typisk i EU undersøgelser for ikke at udlede mindre CO2 per kørt km end benzin/diesel biler, på grund af det relativt høje nettab i elnettet og det relativt høje CO2-indhold i det energimix, der forsyner opladningens elforbrug.

I figur 40 er de potentielle marginale V2G CO2-besparelser Well-to-Wheel for Vindoptimeret opladning V2G af 55.000 elbiler illustreret i relation til de EU's vedtagne målsætninger for CO2-besparelser, beregnet for et tilsvarende antal benzin/diesel biler. Dermed vil investeringen i at opnå de pågældende besparelser med nedsættes af EU's CO2-mål fra 130 g/km i 2015 til fx 70 g/km i 2025, hvor sidstnævnte dog ikke er vedtaget, kunne holdes overfor muligheden for at opnå tilsvarende CO2-reduktioner ved at tilbyde elbilbrugere et incitament til at benytte Vindoptimeret opladning V2G i stedet for Ikke-styret opladning.

55.000 elbilers marginale V2G CO2-udledning vil potentielt kunne reduceres med 141-179 pct. for hhv. Nissan Leaf 53 pct. V2G og Tesla S 43 pct. V2G ved at benytte Vindoptimeret opladning V2G i stedet for Ikke-styret. Tesla S V2G CO2-besparelsen svarer til ca. det dobbelte af, hvad der vil kunne opnås ved at nedsætte EU grænseværdien for benzin/diesel biler fra 130 g/km i 2015 til forventelig 70 g/km i 2025.

Figur 40: 55.000 elbilers totale CO2-udledning per år og CO2-besparelser



4 Konklusion

I tidligere analyse "Vindoptimeret opladning af elbiler" blev det konkluderet, at der vil kunne genereres betydelige gevinster for elbilejere, vindproducenter, samfund og miljø ved at tidsstyre opladning optimalt i forhold til produktionen af vindenergi. I nærværende analyse fokuseres på gevinstpotentialet med Vindoptimeret opladning af elbiler, der er udstyret med Vehicle-to-Grid (V2G) teknologi. V2G er betegnelsen for, at der kan aflades energi fra elbilens batteri tilbage til elnettet.

Vindoptimeret opladning V2G er tidsstyret, optimeret opladning primært med ellers ineffektivt udnyttet vindproduktion og til maksimal kollektiv nytte for elbilejere, vindproducenter, samfundsøkonomi og miljø. Se figur 41. Optimeringens beslutningsheuristik og algoritmer tilstræber at prioritere opladning med:

1. Vindproduktion, der ellers ville blive frakoblet på grund af nul/negative timepriser
2. Vindproduktion, der ellers ville blive eksporteret med lav profit og højt nettab
3. Vindproduktion med ellers laveste markedsværdi og højeste integrationsomkostninger

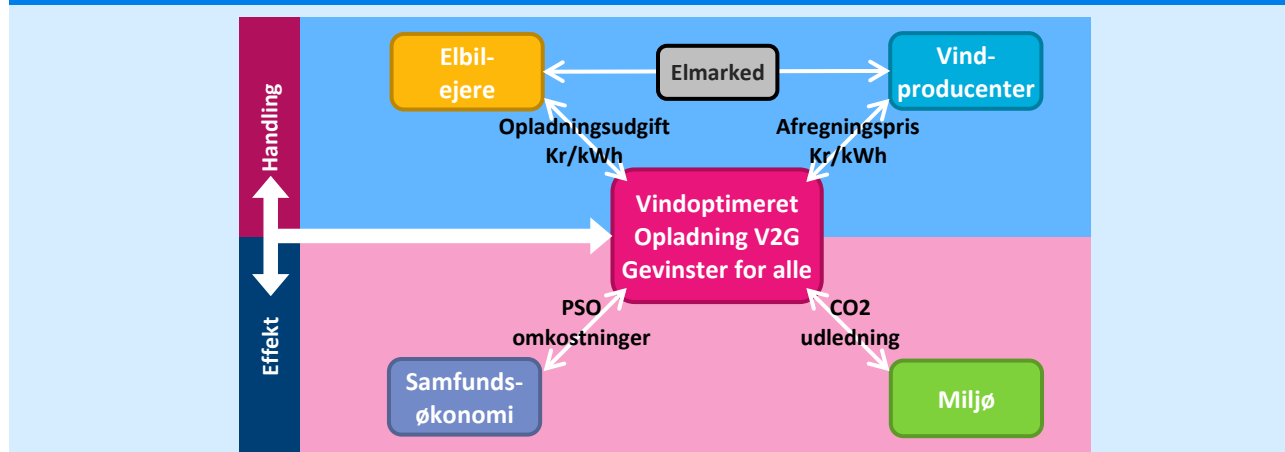
Analysen bekræfter, at Vindoptimeret opladning V2G som tilsigtet bidrager til at effektivisere udnyttelsen af vindkraft og genererer betydelige gevinster.

- Elbilejere opnår laveste opladningsudgift, laveste CO₂-udledning og højeste vindandel
- Vindproducenter opnår driftsøkonomisk højere afregningspriser og lavere balanceomkostninger
- Samfundsøkonomien opnår højere markedsværdi og lavere integrationsomkostninger for vindkraft samt mindre behov for PSO
- Miljøet opnår generelt reduceret CO₂-udledning fra den samlede energiforsyning

V2G muliggør, at batteriet løbende vil kunne oplades med mere energi, end elbilen forbruger til kørsel. Den overskydende energi lagres midlertidig og sælges efter en periode tilbage til elmarkedet, når elprisen er højest. Energiarbitrage er løbende køb og salg af energi efter princippet "køb billigt, sælg dyrt". V2G-energiarbitrage fortjenesten vil kunne modregnes i opladningsudgiften og tilfalde elbilejeren som incitament. Tilsvarende vil afledte CO₂-gevinster i det samlede elsystem kunne godskrives i elbilens miljøregnskab.

I nærværende analyse engageres elbilen i V2G-energiarbitrage handel med vind på regulerkraftmarkedet.

Figur 41: Vindoptimeret opladning V2G gevinstdeling



Elbilen køber og oplader med regulerkraft til nedregulering. Heraf bruger den en del til kørsel, og den resterende del sælger og aflader den tilbage til elmarkedet som regulerkraft til opregulering. Elbilen køber billig vindstrøm, når der er overskudsproduktion, og sælger den dyrt tilbage, når det er vindstille.

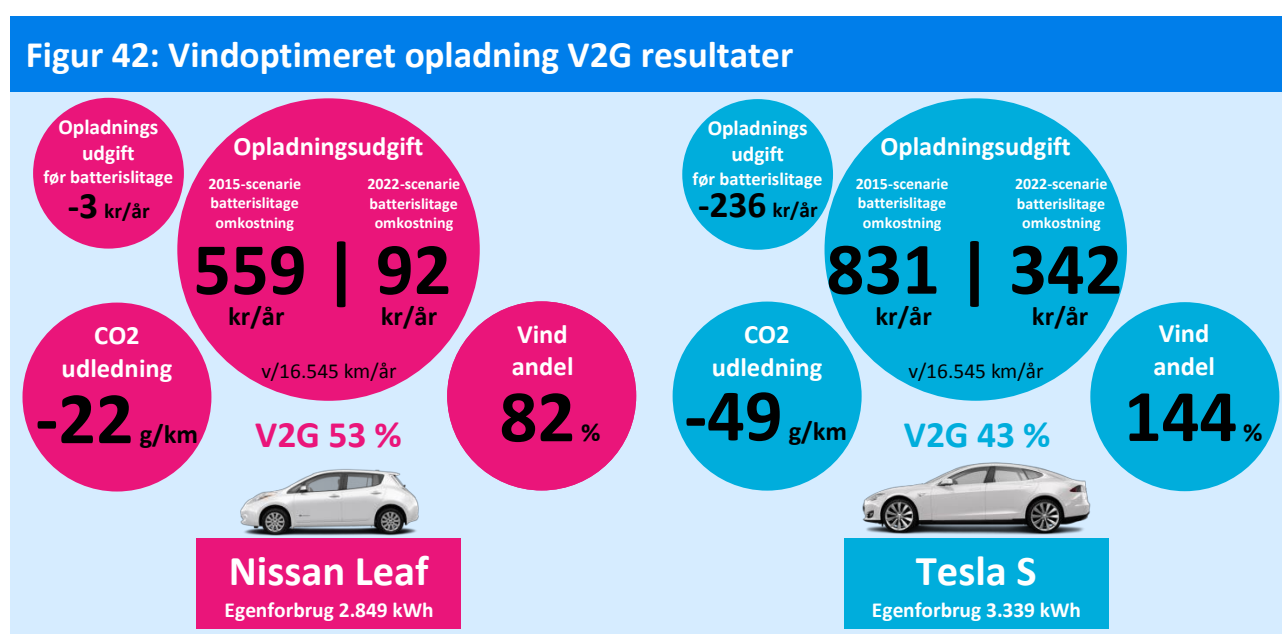
Analysens centrale spørgsmål er, om V2G yderligere vil kunne reducere elbilerens opladningsudgift og CO₂-udledning og skabe merværdi for vindproducenter og samfundet. Udover, hvad der vil kunne opnås med Vindoptimeret opladning uden V2G. Eller om de marginale omkostninger til V2G-batterislitage overstiger fortjenesten ved V2G-energiarbitrage.

En samfundsmæssig indsats for at udbrede Vindoptimeret opladning V2G kan kun berettiges, såfremt der skabes merværdi for de involverede aktører. For elbilere handler det om lavere opladningsudgift, lavere CO₂-udledning og højere vindandel i elforbruget. For vindproducenter handler det om bedre driftsøkonomi. Samfundsmæssigt handler det om afledte gevinster i form af lavere omkostninger til omstilling af elforsyningen med mere vindkraft, udfasning af fossile brændsler, mindre CO₂, energieffektivisering og PSO.

Ifølge analysen vil udbredelse af Vindoptimeret opladning V2G give rigtig god samfundsmæssig mening, og det vil det også for vindproducenternes driftsøkonomi. Umiddelbart gælder det samme for elbilere, når der i første omgang ses bort fra V2G-omkostningerne til øget batterislitage. Selv en beskedent elbil-udbredelse på 2,5 pct. af bilparken, dvs. ca. 55.000 elbiler, vil med Vindoptimeret opladning og V2G kunne dække en overvejende del af behovet for at balancere vindproduktion på regulerkraftmarkedet. En del af opladningen ville ellers være frakoblet vindproduktion fra eksisterende vindmøller og ellers eksporteret, relativt værdiløs vindproduktion med højt nettab.

Midlertidig lagring af ellers frakoblet vindproduktion og efterfølgende afladning tilbage til elnettet, hvor den lagrede vindproduktion fortrænger kulbaseret kraftværksproduktion, så andre ikke-forbrugsfleksible elapparater selv i vindstille perioder vil kunne forsynes med vindproduktion, vil selvsagt generere betydelige samfundsmæssige og miljømæssige gevinster.

Nissan Leaf og Tesla S elbiler vil med Vindoptimeret opladning V2G typisk kunne oplades for under nul kr. til et års kørselsforbrug. Når der i første omgang ses bort fra batterislitage omkostninger. Videre vil elbilens CO₂-udledning typisk være under nul g per kørt km, og elforbrugets vindandel over 100 pct. Se figur 42.



Opladningsudgiften opgøres som den elgrossistpris, dvs. den afregningspris, der benyttes til handel med vindproduktion på elmarkedet. Dermed udgør opladningsudgiften alene en del af den forbruger-elpris, elbilejere totalt kommer til at betale for opladning. Forbruger-elprisens øvrige delkomponenter er nettariffer, PSO, afgifter og moms.

Men når V2G-batterislitage omkostninger indregnes, er Vindoptimeret opladning ikke længere den billigste løsning for elbilejere. Det er derimod Vindoptimeret opladning uden V2G. Batterislitage omkostningen afhænger af batteriets kostpris, og som den er i dag, vil V2G-batterislitage omkostningen ikke kunne dække V2G-energiarbitrage fortjenesten.

Forventningen er dog, at kostprisen vil falde til et niveau i fx 2022, der vil gøre Vindoptimeret opladning V2G til den mest fordelagtige opladningsstrategi, også med hensyn til opladningsudgift. Endvidere forventes øget prisvolatilitet på elmarkedet, som ligeledes kunne øge V2G-energiarbitrage fortjenesten.

Figur 5 illustrerer to batterislitage omkostning scenarier for elbilejeres gevinster med Vindoptimeret opladning V2G vedrørende opladningsudgift, CO₂-udledning og vindandel:

- 2015-scenarie, hvor batterislitage omkostning baseres på en batteri kostpris på USD 300 per kWh
- 2022-scenarie, hvor batterislitage omkostning baseres på en batteri kostpris på USD 125 per kWh

Analysen konkluderer, at det ikke vil kunne betale sig for elbilejere at engagere sig i V2G med den nuværende batteri kostpris. Men det vil det i år 2022 som følge af faldende batteri kostpris og øget energi-arbitrage fortjeneste. Hvis ikke Vindoptimeret opladning V2G vil kunne betale sig for elbilejere, vil strategien ikke slå igennem og vinde udbredelse. Dermed vil der samfundsøkonomisk og miljømæssigt heller ikke kunne høstes de gevinster, som strategien potentielt vil generere, og som ville komme alle tilgode.

Det anses for afgørende, at Vindoptimeret opladning V2G får mulighed for at vinde fodfæste som bidragsyder til at balancere og aftage overskydende vindproduktion i de tidlige faser af behovets opståen. Ellers vil alternative løsninger givetvis vinde og mætte markedet og dermed umuliggøre senere indtrængning med V2G. I givet fald vil samfundet og miljøet aldrig komme til at nyde godt af de betydelige, afledte samfundsøkonomiske og miljømæssige gevinster med V2G.

Det anbefales, at elbilejere i en overgangsperiode tilskyndes til at vælge Vindoptimeret opladning V2G med offentligt finansieret subsidier, der som minimum modsvarer de indledningsvis ekstra høje batterislitage omkostninger, og i tillæg kompenserer for elbilejeres omkostninger til ladetab, komforttab og risikovillighed. En sådan støtte kunne eventuelt følge samme generelle principper og niveau, som de der i dag gælder for tilskud til husstands vindmøller.

Desuden anbefales det, at opladningsstrategier som Vindoptimeret opladning V2G sikres lige vilkår med alternative løsninger vedrørende markedsadgang, markedsregler, energifgiftsregler, omkostningsægte nettarifiering, prioriteret forsknings- og udviklingsstøtte og lignende.

Endelig er der behov for politisk og reguleringsmæssig stillingtagen til, hvordan elforbrug til midlertidig lagring og efterfølgende aflagring tilbage til elnettet tarifferes og afgiftsbelægges.

Litteraturliste

- 4CE Final Report Prepared as part of the ALTENER project Consumer Choice and Carbon Consciousness for Electricity 4CE, Sponsored by the European Commission, Öko-Institut e.V., 2003
- A practical battery wear model for electric vehicle charging applications, Sekyung Han, Sohee Han, Hirohisa Aki, Applied Energy, 2014
- A Profitable Business Model for Electric Vehicle Fleet Owners ERASMUS Wolfgang Ketter
- Alternative drivmidler, Energistyrelsen, Cowi; 2013
- Balancing with Electric Vehicles: A Profitable Business Model; Micha Kahlen, Wolfgang Ketter, Jan van Dalen; Twenty Second European Conference on Information Systems, Tel Aviv 2014
- Battery Calendar Life Estimator Manual, Revision 1, Modeling and Simulation, U.S. Department of Energy, 2012
- Branchedeklaration af elprodukter med klimavalg, Dansk Elhandel, 2011
- CO2 emissions target for passenger cars for 2025: delivering value to consumers; BEUC The European Consumer Organisation, 2013
- CO2-prognoser; Energinet.dk
- CO2-udledning fra fremtidens personbiler i Norden, EA Energianalyse; 2014
- Deklarering af el i Danmark, Energinet.dk, 2014
- Economic Feasibility of V2G Frequency Regulation in Consideration of Battery Wear, Sekyung Han og Sohee Han, Energies, 2013
- Electric vehicle battery test procedure manual, USABC: U.S. Advanced Battery Consortium, Tech. Rep., 1996.
- Electricity Disclosure in Europe, Sponsored by the European Commission, Öko-Institut e.V., 2002
- Electrochemical Studies of Aging in Lithium-Ion Batteries; Matilda Kleett; KTH Royal Institute of Technology
- Energinet.dk's deklARATIONER for el
- EPEX SPOT Flexibilization is a central element of the further enhancement of power markets 2014
- EU Om fremme af anvendelsen af energi fra vedvarende energikilder og om ændring og senere ophævelse af direktiv
- Fiscal Year 2013, Annual Progress Report for Energy Storage R&D, Approved by David Howell, US DOE, 2014
-

Flexible Consumers Reserving Electricity and Offering Profitable Downward Regulation, Nicolas Höning and Han La Poutré, 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, 2012

Li-Ion Battery Charging Basics; Fairchild Semiconductor; 2010

Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilizations; Scott B. Peterson, Jay Apt, J. F. Whitacre, Journal of Power Sources; 2010

Nettab på udlandsforbindelser, Energinet.dk

Plug-in electric vehicles integrating fluctuating renewable electricity; David Dallinger; Fraunhofer; 2012

Projections for Electric Vehicle Load Profiles in Europe Based on Travel Survey Data; G. Pasaoglu, D. Fiorello, L. Zani, A. Martino, A. Zubaryeva, C. Thiel; Jrc Scientific and Policy Reports, 2012

Recent developments and likely advances in lithium-ion batteries; Andrew Ritchie, Wilmont Howard; Elsevier B.V.; 2005

Reliable Disclosure Information for European Electricity Consumers RE-DISS; Supported by the European Commission through the Intelligent Energy Europe; Öko-Institut e.V., 2012

Reliable Disclosure Systems for Europe Phase II Draft RE-DISS Disclosure Guidelines for Electricity Suppliers Draft Version 0.4, 11th August 2014

Retningslinjer for miljødeklarationen for el; Energinet.dk; 2014

Retningslinjer for udarbejdelsen af miljødeklarationen for el; Energinet.dk; 2013

Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle, David Dallinger, Jorchen Link og Markus Büttner, Fraunhofer ISI, 2013

State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries Cycle Life Test Methods; Jens Groot; Chalmers University of Technology; 2012

The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage; Scott B. Peterson, Jay Apt, J. F. Whitacre, Journal of Power Sources; 2010

U.S. Battery R&D Progress and Plans, David Howell, US DOE, 2013

Udvikling i dansk vindenergi siden 2009; Energinet.dk



VINDENERGI

D A N M A R K



VINDENERGI

D A N M A R K

Vindoptimizeret opladning V2G

Delrapport 2 af 4

Rapport

V1.1 web



VINDENERGI

D A N M A R K