



Statens vegvesen

Miljøvennlige vegdekker Konsekvensanalyse: resultater fra regneark- modell med usikkerhets- / følsomhetsanalyse

RAPPORT

Teknologiavdelingen

Nr. 2548



Vegteknologiseksjonen
Dato: 2009-01-26



Statens vegvesen

TEKNOLOGIRAPPORT nr. 2548

Tittel

**Miljøvennlige vegdekker
Konsekvensanalyse: resultater fra regnearkmodell med
usikkerhets- / følsomhetsanalyse**

Vegdirektoratet
Teknologiavdelingen

Postadr.: Postboks 8142 Dep
0033 Oslo

Telefon: (+47 915) 02030

www.vegvesen.no

Utarbeidet av

Dato:

2009-01-26

Saksbehandler

Knut Veisten og Juned Akhtar

Prosjektnr:

Kontrollert av

Jostein Aksnes

Antall sider og vedlegg:

37

Sammendrag

Transportøkonomisk institutt har på oppdrag fra prosjektet gjennomført en konsekvensanalyse, nærmere bestemt en nytte-kostnadsanalyse, som gir en tallfestet vurdering av hvorvidt omlegging til støysvake vegdekker vil være samfunnsøkonomisk lønnsomt. I analysen er det tatt hensyn både til vegdekkenes støyreducerende egenskaper og til forskjeller i slitestyrke som har betydning for generering av svevestøv. Referanse-alternativet for analysen er skjellettasfalt, SKA11.

Resultatene indikerer at dekketyper som har kostnader og levetid som skiller seg relativt lite fra referansen, og som samtidig gir en begrenset støyreduksjon uten å forverre partikkel-utslippene, representerer den mest robuste løsningen mht å oppnå positiv netto nytte og nytte-kostnadsbrøk større eller lik 2. Tynndekker, T8 og T8x (beste potensial), kommer dermed best ut i analysen. Videre viser resultatene at drengasfalt kan være økonomisk lønnsomt på tofelts veger med relativt mange støyutsatte boliger (fra ca. 125), forutsatt at gode slitasjeegenskaper er ivarettatt.

Generelt indikerer denne analysen, i sterkere grad enn tidligere, at ulike støysvake vegdekkealternativer kan være "de optimale" under ulike forhold. Det er også gitt en sterk indikasjon på at det nå finnes støysvake vegdekker med relativt gode slitasjeegenskaper som kan benyttes lønnsomt på utvalgte vegstrekninger i norske byer og tettsteder, spesielt i de største byene der partikkelutslippsproblematikken er mest alvorlig. En kan dermed med dekkeomlegging bidra til å oppnå både etatsmålet om redusert støyplage og etatsmålet om forbedret luftkvalitet - med samfunnsøkonomisk lønnsomhet.

Summary

Emneord:

Konsekvensanalyse: resultater fra regnearkmodell med usikkerhets-/følsomhetsanalyse

Bakgrunn	2
Grunnleggende forutsetninger i regnearkmodellen.....	4
Støyreducerende effekt og teknisk levetid	4
Ulike vegdekkers effekt på partikkelutslipp	6
Investerings- og driftskostnader	9
Følsomhetsanalyse / risikoanalyse	10
Resultater fra nytte-kostnadsanalysen.....	15
Punktestimater – fart 70 km/t, ÅDT=7500, 100 boliger per km.....	15
Risikoanalyse – fart 70 km/t, ÅDT=7500, 100 boliger per km	16
Punktestimater – fart 70 km/t, ÅDT=7500, 300 boliger per km.....	30
Punktestimater – fart 70 km/t, ÅDT=12500, 300 boliger per km.....	31
Minimum antall berørte boliger for robuste nyttekostnadsbrøker	33
Oppsummeringer	34
Referanser	35

*Dette materialet er ikke offentliggjort. Det kan brukes kun i den saklige sammenheng det er gitt.
Det skal ikke tas noen form for kopier til annen bruk eller spredning.
Unntak må klareres med TØI.*

Bakgrunn

Dette dokumentet presenterer en konsekvensanalyse, nærmere bestemt en nytte-kostnadsanalyse, som gir en vurdering av tradisjonelt vektlagte fysiske og finansielle egenskaper av ulike vegdekker opp mot miljømessige og helsemessige forhold. Dette er en del av Arbeidspakke 8 i SVV/VDs prosjekt ”Miljøvennlige vegdekker” (SVV 2006a).

Dette dokumentet følger opp og justerer/utvider en foreløpig nytte-kostnadsanalyse presentert av Veisten (2008). Justeringa omfatter endringer i utvalget av støysvake vegdekker og kvalitetssikring av inputdata. Utvidelsen omfatter en usikkerhets-/følsomhetsanalyse, som vil klargjøre/synliggjøre sannsynligheten av samfunnsøkonomisk lønnsomhet ved omlegging fra standard tett vegdekke (SKA 11) til et annet mer støysvakt vegdekke.

Innenfor rammen av en nytte-kostnadsanalyse vil en få en tallfestet vurdering av hvorvidt omlegging til støysvake vegdekker vil være samfunnsøkonomisk lønnsomt. En vil altså se om en verdsatt støyreduksjon i kroner og øre (mer enn) oppveier evt. kostnadsøkninger som slike vegdekker kan medføre (i forbindelse med investerings-, drifts-, eller levetidsendringer).

I konsekvensanalysen (Arbeidspakke 8) var det opprinnelig en målsetting å få tallfestet noen slike andre miljø- og helseeffekter enn for støy, primært ulikhetene mellom (mer eller mindre støysvake) vegdekker mht utslipp av partikler/støv (Veisten og Skedsmo 2007).¹ Det er gjort et forsøk på å få med slike støvutslippseffekter i den nytte-kostnadsanalysen som presenteres her. Basert på mål av massetap fra ulike asfalttyper (Lerfald 2008), blir det lagt inn en relativ korreksjonsfaktor for utslipp av partikler. Dette vil igjen påvirke den estimerte miljøøkonomiske kostnaden pga partikkelutslipp.

I dette arbeidsnotatet blir det først gitt en kort presentasjon av inputdata benyttet i den oppdaterte regnearkbaserte nytte-kostnadsanalysen av omlegging til mer

¹ Det er ønskelig (prinsipielt påkrevd) å få tatt hensyn til alle effekter av et tiltak i en nytte-kostnadsanalyse, fortrinnsvis med verdsetting (prising) av effektene. Hvorvidt det er mulig å trekke inn alle effekter vil primært avhenge av om det foreligger fysiske tall på forskjeller mellom asfalttyper, for eksempel utslippseffekter (støv), i tillegg til støy. I Veisten (2006d) er det indikert at en stort sett mangler empirisk grunnlag, også internasjonalt, mht å kunne operere med forskjeller mellom asfalttyper hva gjelder de nevnte effektene.

støysvake vegdekker.² Beregningene er gjort med hensyn til referansealternativet ”skjellettasfalt med 11 mm steinstørrelse” (SKA11). Selv om flere elementer i regnearket ligger fast fra tidligere analyser (Veisten m.fl. 2007), så omfatter denne analysen flere konkrete vegdekker som har vært testet i løpet av de siste par årene. Videre er det altså blitt inkludert hensyntaken til at ulike vegdekker gir ulike partikkelutslipp – og derigjennom ulike lokale forurensingskostnader.

Følgende vegdekker vurderes:

- skjellettasfalt med maksimal steinstørrelse lik 11 mm (SKA11) – referansealternativ, Alt 0
- asfaltbetong med maksimal steinstørrelse lik 11 mm (AB11) – Alt 1a
- asfaltbetong med maksimal steinstørrelse lik 8 mm (AB8) – Alt 1b
- asfaltbetong med maksimal steinstørrelse lik 6 mm (AB6) – Alt 1c
- tynndekke med maksimal steinstørrelse lik 8 mm (T8) – Alt 1d
- tynndekke med maksimal steinstørrelse lik 8 mm – beste potensial (T8x) – Alt 1e
- ett lags drengasfalt med maksimal steinstørrelse lik 11 mm (DA11) – Alt 1f
- tolags drengasfalt med maksimal steinstørrelse lik 11 mm i det øverste laget og maksimal steinstørrelse lik 16 mm i det nederste laget (DA11/16) – Alt 1g
- tolags drengasfalt med maksimal steinstørrelse lik 8 mm i det øverste laget og maksimal steinstørrelse lik 16 mm i det nederste laget (DA8/16) – Alt 1h
- tolags drengasfalt med maksimal steinstørrelse lik 11 mm i det øverste laget og maksimal steinstørrelse lik 16 mm i det nederste laget – beste potensial (DA11/16x) – Alt 1i
- tynndekke med gummitilsetning og med maksimal steinstørrelse lik 8 mm (T8g) – Alt 1j

Først presenteres de grunnleggende forutsetningene i regnearkmodellen. Deretter gis resultater både med punktestimater og usikkerhets-/følsomhetsanalyse basert på bruk av programmet @RISK (Palisade 2002) som ligger inne i regnearket.

² Regnearket ble utviklet under NFR-prosjektet ”TORNADO”/PROFO (Veisten m.fl. 2007) og EU-prosjektet SILVIA (Sælensminde og Veisten 2005). Senere er det videreutviklet og anvendt med norske data i prosjektet ”Samfunnsmessige konsekvenser og nytte-kostnadsberegninger for støysvake vegdekker” (Arnevik og Veisten 2005, Arnevik 2005, 2006a, 2006b, Veisten 2006a, 2006b, 2006c).

Grunnleggende forutsetninger i regnearkmodellen

Støyreducerende effekt og teknisk levetid

Støyutslipp vil variere ved ulike hastigheter, som vist i Tabell 1a (Whitelegg 1993).

Tabell 1a. Støy fra kjøretøy ved ulik fart – $dB(A)$.

Fart	Lette kjøretøy	Tunge kjøretøy
30	67	79
40	69	80,5
50	71	82
60	73	83,5
70	75	85
80	77	86,5
90	78,5	88
100	80	89,5
110	81,5	91

* Basert på Whitelegg (1993).

Det absolutte støynivået i et område vil avhenge av flere andre forhold, og tabellen kan vise for lave verdier for vanlige norske forhold (Berge og Ustad 2004). Berge (2008b) gir følgende tall fra målinger av støy (fra lett kjøretøy) og ulike asfaltdekker lagt på Østlandet (Tabell 1b og 1c):

Tabell 1b. Støy fra lette kjøretøy – $L_A dB(A) - 50 km/t$.

Asfalttype	Nylagt asfalt	1-årig asfalt	2-årig asfalt	3-årig asfalt
SKA11	90,6	92,3	93,1	93,7
AB11	88,9	92,2	93,2	93,9
AB8	87,4	91,0	91,5	92,1
AB6	85,3	90,4	90,9	91,6
T8s	89,4	92,2	92,3	
DA8/16	86,4	88,9	91,4	
DA11/16	88,4	88,3	90,8	
Da11	89,4	89,8	92,6	

* Basert på Berge (2008b); CPX-målinger, Rv715 Trolla, Rv20 Elverum og Rv170 Bjørkelangen. Tallene for SKA11, T8s og DA8/16 er gjennomsnitt av målinger fra flere av veistrekningene.

Tabell 1c. Støy fra lette kjøretøy – L_A dB(A) – 80 km/t.

Asfalttype	Nylagt asfalt	1-årig asfalt	2-årig asfalt	3-årig asfalt
SKA11	98,4	99,3	100,7	
AB6	92,8	96,9	96,8	98,5
T8g	95,1	97,3	97,5	
DA8/16	92,2	95,7	98,7	
DA11/16	94,8	94,9	98,3	
DA11	95,1	96,4	98,0	99,3

* Basert på Berge (2008b); CPX-målinger, Rv170 Bjørkelangen og E6 Stange. Tallene for DA8/16 og DA11 er gjennomsnitt av målinger fra begge veistrekningene.

Det vil uansett være *relative* endringer ved omlegging til mer støysvake vegdekker, i forhold til referansen (SKA11), som blir lagt til grunn. Og disse endringene vil særlig bli basert på de *målte/estimerte utslippsverdier under norske forhold*, som referert i tabell 1b. Referansealternativet er altså skjellestasfaltvegdekke med steinstørrelse lik 11 mm (SKA11).

Det er fortsatt et relativt spedt erfaringsgrunnlag mht ulike støysvake vegdekkers faktiske støyreduserende virkning over levetida, og hva som kan regnes som forventet teknisk levetid i et gitt område i Norge (Arnevik 2006a). Imidlertid er det de siste par årene prøvd ut flere nye støysvake vegdekker (Berge 2008a, 2008b), og vi har lagt inn disse i regnearket med anslag på teknisk levetid og en enkel avtakende lineær funksjon for støyreduksjon over levetida.³ I tabellene 2a og 2b gis oppdaterte verdier basert på disse nye dataene sammenstilt med tidligere forutsetninger (Arnevik 2006a).

³ Dette materialet inkluderer målinger over opptil tre år på ulike veger på Østlandet, dvs. Rv170 Bjørkelangen, E6 Stange, Rv715 Trolla, Rv20 Elverum, E16 Hønefoss og E18 Mastemyr (Berge 2008a, 2008b). Den støyreduserende virkningen kan kanskje tilpasses bedre med en polynomisk eller en annen ikke-lineær funksjonsform, men en lineær tilnærming vil neppe ha særlig innvirkning på resultatene fra nytte-kostnadsanalysen, spesielt pga at en med lav diskonteringsrente ikke vil ha store effekter av om "støyntjen" kommer i år 1 eller senere i prosjektperioden. Forutsetningen om den tekniske levetida og om den gjennomsnittlig støyreduksjon over levetida er langt mer avgjørende.

Tabell 2a. Antatte støyendringer (dB) ved omlegging fra standard tett dekke (Alt 0) til mer støysvake alternativer (Alt 1a – Alt 1e) – fart ca 70 km/t.

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1a – standard asfaltbetong AB11	Alt 1b – standard asfaltbetong AB8	Alt 1c – standard asfaltbetong AB6	Alt 1d – støysvakt tynndekke T8	Alt 1e – støysvakt tynndekke T8x*
Initialreduksjon fra referanse	1 dB	3 dB	4 dB	2 dB	4 dB
Antatt teknisk levetid - ÅDT≈7500 (ref=8,5 år)	8 år	7,5 år	7 år	8 år	8 år
Antatt teknisk levetid - ÅDT≈12500 (ref=6,5 år)	6 år	5,5 år	5 år	6 år	6 år
Gjennomsnittreduksjon av støy over levetida	1 dB	1,5 dB	2,5 dB	1 dB	2,5 dB

* Beste potensial – støysvakt tynndekke.

Kilder: Arnevik (2006a), Berge (2008a, 2008b), Kropp m.fl. (2007), Aksnes (2008), Bakløkk (2008), Nørbech (2008).

Tabell 2b. Antatte støyendringer (dB) ved omlegging fra standard tett dekke (Alt 0) til mer støysvake alternativer (Alt 1f – Alt 1j) – fart ca 70 km/t.

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1f – ettlags drensasfalt DA11	Alt 1g – tolags drensasfalt DA11/16	Alt 1h – tolags drensasfalt DA8/16	Alt 1i – tolags drensasfalt DA11/16x*	Alt 1j – støysvakt tynndekke T8g
Initialreduksjon fra referanse	4 dB	5 dB	7 dB	6 dB	5 dB
Antatt teknisk levetid - ÅDT≈7500 (ref=8,5 år)	5 år	5 år	4 år	5 år	4 år
Antatt teknisk levetid - ÅDT≈12500 (ref=6,5 år)	4 år	4 år	3 år	4 år	3 år
Gjennomsnittreduksjon av støy over levetida	3 dB	3,5 dB	4,5 dB	4,5 dB	3 dB

* Beste potensial – tolags drensasfalt 11/16.

Kilder: Arnevik (2006a), Berge (2008a, 2008b), Kropp m.fl. (2007), Aksnes (2008), Bakløkk (2008), Nørbech (2008).

Støykostnaden blir satt til 238 kr per (støyplaget) person per dB-ending (dB-reduksjon) per år (SVV 2006b).⁴

Ulike vegdekkers effekt på partikkelutslipp

Et nytt element i den regnearkbaserte nyttekostnadsanalysen er hensyntaken til at ulike vegdekker (med ulike overflateegenskaper) har ulike egenskaper mht utslipp

⁴ Eller 476 kr per dB-ending per år per husholdning/bolig, om vi ganske enkelt multiplisert med 2 (antatt husholdningsstørrelse / antall personer i bolig).

av partikler pga overflateslitasje. Basert på nye mål av massetap fra (slitasjeegenskaper for) ulike asfalttyper (Lerfald 2008), er det lagt inn en relativ korreksjonsfaktor for utslipp av partikler pga slitasje. Korreksjonsfaktoren er i utgangspunktet basert på målte Trøgerverdier (D_k), som er definert ved:

$$D_k = \frac{\Delta m}{\rho_d}$$

Der Δm er totalt massetap over et tidsrom (fra en periode til en annen) og ρ_d er densiteten. For tette vegdekker er det også en sammenheng mellom vegdekkets slitasjeegenskaper og dekkets steinkvalitet og steinmengden som er større enn 2 mm. En kan definere følgende sliteparameter (Uthus 2008, Aksnes 2008):

$$\text{Sliteparameter} = (\text{Steinkvalitet KM} / \text{Steinmengde} > 2\text{mm}) * 100$$

Her står KM for *kulemølleverdi*. Vi har følgende relative verdier (korreksjonsfaktorer) for ulike vegdekker (basert på KM=10 for tette vegdekker) i forhold til referansen SKA11. Denne korreksjonsfaktoren gjelder bare for utslipp av partikler (PM_{10}) pga vegslitasje (piggedekkslitasje), ikke for PM_{10} -utslipp pga eksos (tabell 3a og 3b):

Tabell 3a. Antatte partikkelutslippsendringer (PM_{10}) ved omlegging fra standard tett dekke (Alt 0) til mer støysvake alternativer (Alt 1a – Alt 1e).

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1a – AB11	Alt 1b – AB8	Alt 1c – AB6	Alt 1d – T8	Alt 1e – T8x
Korreksjonsfaktor	1,05	1,2	1,4	1	1

Kilder: Lerfald (2008), Nørbech (2008), Uthus (2008), Aksnes (2008).

Tabell 3b. Antatte partikkelutslippsendringer (PM_{10}) ved omlegging fra standard tett dekke (Alt 0) til mer støysvake alternativer (Alt 1f – Alt 1j).

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1f – DA11	Alt 1g – DA11/16	Alt 1h – DA8/16	Alt 1i – DA11/16x	Alt 1j – T8g
Korreksjonsfaktor	1	1	0,85	0,75	1,2

Kilder: Lerfald (2008), Nørbech (2008), Uthus (2008), Aksnes (2008)..

Det er for øvrig bare for NO_x , i tillegg til PM_{10} , som det regnes utslippskostnader for, men NO_x -utslipp varierer altså ikke med vegdekketype. Følgende PM_{10} og NO_x -utslipp er antatt (tabell 4):

Tabell 4. Utslipp av forurensing (lokal) til luft per kjøretøykilometer.

Fart	Lette kjøretøy			Tunge kjøretøy		
	PM ₁₀ g/km vegslitasje (piggdekk)	PM ₁₀ g/km totalt (inkl. eksos)*	NO _x g/km	PM ₁₀ g/km vegslitasje (piggdekk)	PM ₁₀ g/km totalt (inkl. eksos)*	NO _x g/km
30	0,008	0,058	0,81	0,034	1,034	17,5
40	0,012	0,064	0,85	0,061	0,861	14,0
50	0,019	0,073	0,89	0,095	0,795	11,0
60	0,025	0,080	0,93	0,137	0,737	8,4
70	0,037	0,095	1,01	0,187	0,737	7,8
80	0,045	0,105	1,09	0,244	0,744	7,3
90	0,062	0,123	1,16	0,308	0,808	7,2
100	0,076	0,138	1,23	0,381	0,881	7,0
110	0,090	0,153	1,32	0,450	0,950	7,0

* I ”PM₁₀ g/km totalt” inngår både utslipp fra eksos og piggdekkslitasje.

Kilde: SFT (1999), Amundsen m.fl. (2000), Eriksen m.fl. (1999).

PM₁₀ g/km vegslitasje vil altså variere noe med vegdekketypen (med bruk av korreksjonsfaktorene), men den største andelen PM₁₀-utslipp kommer (om enn med store variasjoner gjennom året) fra eksos – som ikke varierer mellom vegdekketyperne.

De samfunnsøkonomiske forurensingskostnadene er satt til 3680 kr per kg PM₁₀-utslipp og 43 kr per kg NO_x-utslipp. Den nevnte forurensingskostnaden per kg PM₁₀-utslipp gjelder for Oslo, og er omtrent lik den kostnaden som gjelder for Trondheim (3730 kr). For Bergen er kostnaden satt til 2750 kr, og for Stavanger 1560 kr, mens en kostnad lik 410 kr gjelder for norske tettsteder og småbyer (SVV 2006). Omlegging til støysvake vegdekker er mest relevant for de mest befolkningstette områdene, der antallet som påvirkes av en støyreduksjon, for en gitt vegstrekning, vil være størst. Total lokal forurensingskostnad vil også avhenge av ÅDT, av fart, og av fordelinga mellom lette og tunge kjøretøy. Alt dette blir det tatt hensyn for i regnearket. Effekten av ÅDT, fart, og fordelinga mellom lette og tunge kjøretøy ganges opp direkte fra tabell 4 (med korreksjonsfaktor for PM₁₀ pga vegslitasje). Etterpå justeres lokalforurensingskostnaden for boligantall per km.⁵

⁵ I regnearket beregnes også utslipp av VOC og SO₂, men disse er ikke tillagt kostnad i de oppdaterte retningslinjene fra Statens vegvesen, Vegdirektoratet (SVV 2006b). CO₂-utslipp beregnes også, og disse er prissatt til 210 kr per tonn, men CO₂-utslipp varierer ikke mellom vegdekkene. Det er heller ikke forskjeller mellom vegdekkene mht trafikksikkerhetseffekter eller kjøretøykostnader, disse blir bare påvirket av fartsendringer, så disse effektene kommer ikke med i nytte-kostnadsanalysen.

Investerings- og driftskostnader

Tabellene 5a og 5b viser kostnader for de ulike vegdekkene som er lagt inn i regnearket.

Tabell 5a. Antatte investerings- og driftskostnader for ulike vegdekker (Alt 1a – Alt 1e).

	Alt 0 – SKA11	Alt 1a – AB11	Alt 1b – AB8	Alt 1c – AB6	Alt 1d – T8	Alt 1e – T8x
Kostnad per m ² lagt vegdekke (inkl. fresing, transport og klebing)	81 kr	75 kr	72 kr	68 kr	77 kr	77 kr
Forsinkelse og varsling per m ² – ÅDT≈7500 [†]	6,30 kr	6,30 kr	5,90 kr	5,90 kr	1,50 kr	1,50 kr
Forsinkelse og varsling per m ² – ÅDT≈12500 [†]	3,10 kr	3,10 kr	2,70 kr	2,70 kr	2,30 kr	2,30 kr
Driftskostnader per m ² per år [‡]	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr

[†] For ÅDT≈7500 er det forutsatt en tofeltsveg med total kjørefeltbredde lik 7 m, mens det for ÅDT≈12500 er forutsatt en firefeltsveg med total kjørefeltbredde lik 14 m.

Tabell 5. Antatte investerings- og driftskostnader for ulike vegdekker (Alt 1f – Alt 1j).

	Alt 0 – SKA11	Alt 1f – DA11	Alt 1g – DA11/16	Alt 1h – DA8/16	Alt 1i – DA11/16x	Alt 1j – T8g
Kostnad per m² lagt vegdekke (inkl. fresing, transport og klebing)	81 kr	103 kr	200 kr	200 kr	174 kr	130 kr
Forsinkelse og varsling per m² – ÅDT≈7500[†]	6,30 kr	2,70 kr	4,40 kr	4,40 kr	4,40 kr	1,50 kr
Forsinkelse og varsling per m² – ÅDT≈12500[†]	3,10 kr	3,70 kr	6,10 kr	6,10 kr	6,10 kr	2,30 kr
Driftskostnader per m² per år[‡]	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr	ca 5,70 kr

[†] For ÅDT≈7500 er det forutsatt en tofeltsveg med total kjørefeltbredde lik 7 m, mens det for ÅDT≈12500 er forutsatt en firefeltsveg med total kjørefeltbredde lik 14 m.

I tillegg til kostnadsforutsetningene gitt i tabellene 5a og 5b, så er det spesielt den antatte levetida som vil påvirke kostnadene (se tabellene 2a og 2b). Kortere teknisk levetid tvinger fram hyppigere omaskalinger og økte samlede investeringskostnader over prosjektperioden – som er satt til 25 år.

Driftskostnaden (saltingsbehovet) er antatt å være lik(t) for alle vegdekkene, og vi har også utelatt evt. rensing av drengsfalttypene (Nørbech 2008, Berge 2008a).⁶

I nyttekostnadsanalysen av omlegging til mer støysvake vegdekker er det *ekstrakostnadene* (investering + drift) for de støysvake alternativene Alt1a-Alt1j sammenliknet med referansealternativet Alt 0 som har relevans. Det er disse som sammenholdes mot (*ekstra*)nyten av redusert støy, og evt. endring partikkelutslipp til luft (som gir positivt nyttebidrag hvis korreksjonsfaktoren er mindre enn 1).

Følsomhetsanalyse / risikoanalyse

Vi vil anta en viss usikkerhet i inputdataene (vegdekkkostnad, levetid, støyreduksjon over levetida, relativ PM₁₀-utslippsendring pga piggdekkslitasje), og vi vil analysere denne usikkerheten i en mer generell følsomhetsanalyse basert på bruk av sannsynlighetsfordelinger. Generelt kan en for alle de ulike inputkomponentene i nytte-kostnadsanalysen benytte Monte Carlo-simuleringer, der en gjennom tilfeldige trekninger fra de ulike fordelingene, får fram en fordeling for den totale usikkerheten i analysen. Hvis en har begrenset kjennskap til den faktiske bakenforliggende fordelingen, kan simuleringer gi et utfyllende bidrag til risikohåndteringen. En slik simulering, som vil gi et estimat på (og et bilde av) hvor sannsynlig estimatet er og hvordan denne sannsynligheten fordeler seg rundt punkttestimatet, gir også en bedre håndtering av risiko/usikkerhet enn tradisjonelle følsomhetsanalyser (der det er relativt stor vekt på ekstremutfall som inntreffer med liten sannsynlighet).⁷

Vi vil benytte det regnearkbaserte programmet @RISK til risikoanalysen (Palisade 2002). Analysen med @RISK gir også en følsomhetsanalyse. Det gis en rangering av de viktigste inputkomponentene som påvirker resultatet (nettonytten av støytiltaket), med et sett av koeffisienter (rangeringskoeffisienter), ut fra en lineær regresjonsanalyse. Generelt vil vi ha at ett standardavviks økning i en input gir en effekt på nettonytten lik rangeringskoeffisienten ganger med standardavviket til nettonytten.

⁶ I tillegg kan det være snakk om ekstrakostnader ved evt. omlegging til ny vedlikeholdsstrategi, men slike vurderinger er utelatt her (Arnevik 2006b).

⁷ I (både) norske (og engelske) ordbøker vil en finne at *risiko* er knyttet til en betydning om mulig fare/tap, mens *usikkerhet* også har en betydning om noe en ikke kan vite noe om. I økonomisk terminologi knyttes *risiko* til begivenheter/utfall en kan beregne sannsynligheten for, mens *usikkerhet* er knyttet til begivenheter/utfall en ikke kan beregne sannsynligheten for (Knight 1921). Vi kan kanskje antyde at noe av det vi forsøker å beregne her ligger mellom risiko og usikkerhet, siden vi ikke har full kjennskap til (alle) sannsynlighetsfordelingene.

Den effekten som rangeringskoeffisienten (b_i) har på den estimerte nettonytten kan regnes ut fra følgende formel:

$$b_i = \frac{\frac{\text{endring nettonytte}}{sd(\text{nettonytte})}}{\frac{\text{endring input } i}{sd(\text{input } i)}}$$

Divideringen med standardavviket gjøres for å jevne ut (normaliserer/standardiserer) effekten av ulike inputenheter. Fra denne formelen får vi følgende forhold:

$$\text{endring nettonytte} = sd(\text{nettonytte}) \frac{b_i \cdot \text{endring input } i}{sd(\text{input } i)}$$

Denne kan regnes ut for alle (de viktigste) inputvariablene, og gir dermed en komplett følsomhetsanalyse (O'Brien m.fl. 1994).

Simuleringene vil gi estimater på de forventede verdiene. Jo flere iterasjoner, jo nærmere kommer vi de forventede verdiene; dvs. feilen er proporsjonal med antall integrasjoner brukt i simuleringa. En formel for å regne ut minimum antall simuleringer er:

$$\varepsilon = \frac{3\sigma}{\sqrt{N}}$$

Der ε = total feil, σ = standard avvik, og N = antall iterasjoner. Med $N=1000$ ser vi at $\varepsilon < 10\%$.⁸

Vi kjenner ikke den bakenforliggende fordelinga til inputvariablene i nytte-kostnadsanalysen av omlegging til støysvakere vegdekker. Vi vil anta normalfordeling for alle inputvariable, og sette standardavvik som prosent av gjennomsnitt (se tabell 6).

⁸ Vi bruker simuleringemetoden *Latin Hypercube*, som er standard for @RISK. Mens en generell simulering metode som Monte Carlo trekker tilfeldig mellom 0 og 1, så trekker Latin Hypercube mellom 0 og 1 på ei fordeling, og fordrer dermed færre iterasjoner.

Tabell 6. Forutsatte standardavvik for inputvariable til nytte-kostnadsanalyse av støysvake vegdekker – normalfordeling.

Variabel	Standardavvik (prosent av punkttestimat)
Asfaltkostnader, Alt 0, Alt 1a – Alt 1e	10 %
Asfaltkostnad, Alt 1f – Alt 1j	20 %
Teknisk levetid	20 %
Støyendring over levetida	40 %
Partikkelutslippsendring	10 %

Tabellene 7a og 7b viser simulerte gjennomsnitt, standardavvik og, henholdsvis, 5 og 95 percentilene i den simulerte fordelinga av inputvariablene (med 1.000 iterasjoner). Verdiene er basert på veger med fart(sgrense) ca 70 km/t og ÅDT lik ca 7500.

Tabell 7a. Forutsatte standardavvik for inputvariable til nytte-kostnadsanalyse av støysvake vegdekker, ÅDT=7500, 70 km/t – normalfordeling – (Alt 1a – Alt 1e).

	kostnad	levetid	dB-reduksjon	utslippsendring
Alt 1a				
Snitt	81,29	8,00	1,00	1,10
standardavvik	8,82	1,60	0,40	0,11
5 percentil	66,76	5,37	0,34	0,92
95 percentil	95,71	10,62	1,66	1,28
Alt 1b				
Snitt	77,87	7,50	1,50	1,20
standardavvik	7,81	1,50	0,66	0,12
5 percentil	65,03	5,02	0,40	1,00
95 percentil	90,63	9,96	2,58	1,40
Alt 1c				
Snitt	73,87	7,00	2,50	1,40
standardavvik	7,42	1,40	1,04	0,14
5 percentil	61,69	4,69	0,81	1,17
95 percentil	85,99	9,30	4,21	1,63
Alt 1d				
Snitt	78,51	8,00	1,00	1,00
standardavvik	7,84	1,60	0,44	0,10
5 percentil	65,56	5,36	0,26	0,83
95 percentil	91,35	10,63	1,71	1,16
Alt 1e				
Snitt	78,51	8,00	2,50	1,00
standardavvik	7,87	1,60	1,03	0,10
5 percentil	65,59	5,36	0,83	0,83
95 percentil	91,39	10,62	4,22	1,16

Tabell 7b. Forutsatte standardavvik for inputvariable til nytte-kostnadsanalyse av støysvake vegdekker, ÅDT=7500, 70 km/t – normalfordeling – (Alt 1f – Alt 1j).

	kostnad	levetid	dB-reduksjon	utslippsendring
Alt 1f				
snitt	105,48	5,00	2,80	1,00
standardavvik	21,09	1,00	1,15	0,10
5 percentil	70,66	3,35	0,94	0,84
95 percentil	140,10	6,64	4,61	1,16
Alt 1g				
snitt	204,50	5,00	3,50	1,00
standardavvik	40,86	1,00	1,43	0,10
5 percentil	136,90	3,35	1,19	0,83
95 percentil	271,61	6,64	5,89	1,16
Alt 1h				
snitt	204,69	4,00	4,50	0,85
standardavvik	40,92	0,80	1,85	0,09
5 percentil	137,15	2,68	1,44	0,71
95 percentil	271,72	5,31	7,46	0,99
Alt 1i				
snitt	178,12	5,00	4,50	0,75
standardavvik	35,70	1,00	1,84	0,08
5 percentil	119,29	3,35	1,37	0,63
95 percentil	236,54	6,64	7,48	0,87
Alt 1j				
snitt	132,66	4,00	3,75	1,20
standardavvik	26,55	0,80	1,51	0,12
5 percentil	88,80	2,68	1,22	1,00
95 percentil	176,09	5,31	6,34	1,40

Resultater fra nytte-kostnadsanalysen

Punkttestimater – fart 70 km/t, ÅDT=7500, 100 boliger per km

Her presenteres først punkttestimater (uten risikovurdering) for veger med fart ca 70 km/t og ÅDT lik ca 7500.⁹ Antall berørte boliger settes først til 100 per km (tabellene 8a og 8b).

Tabell 8a. Estimert netto nytte og nyttekostnadsbrøk ved omlegging til mer støysvakt vegdekke – 1 km strekning, fart ca 70 km/t, ÅDT≈7500, tofeltsveg, 100 boliger per km (Alt 1a – Alt 1e).

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1a – standard asfaltbetong AB11	Alt 1b – standard asfaltbetong AB8	Alt 1c – standard asfaltbetong AB6	Alt 1d – støysvakt tynndekke T8	Alt 1e – støysvakt tynndekke T8x*
Nytte, årlig, pga støyreduksjon	47.600	71.489	119.000	47.541	119.071
Nytte, årlig, pga utslippsreduksjon	-47.804	-98.744	-210.355	0	0
Ekstra investeringskostnad (annuitet)	-9.645	-7.873	-5.323	-6.447	-6.447
Skattekostnad av investering (20 %)	-1.929	-1.575	-1.065	-1.289	-1.289
Nettonytte per år	-11.778	-36.703	-97.742	39.805	111.335
Nytte-kostnadsbrøk	-0,02	-2,88	-14,3	6,15	15,4
Netto nytte-kostnadsbrøk	-1,02	-3,88	-15,3	5,15	14,4
Prosjektkostnad per bolig per år	116	94	64	77	77
Prosjektkostnad per dB-reduksjon per bolig per år	116	10	26	77	31

⁹ En mer generell klassifisering av vegkategorier er presentert av Arnevik (2005), dvs. flere farts- og ÅDT-kombinasjoner som dekker hele den ”støybelastete” delen av riksvegnettet (dvs. der det er flere enn 8 personer som er plaget per km). Imidlertid kan det være mest relevant å fokusere kombinasjonene med relativt høy ÅDT og relativt mange berørte. Veger med skiltet hastighet 60 km/t og lavere er normalt knyttet til tettbygd strøk, og således interessante ut fra et støysynspunkt, men ved lavere hastigheter vil støy pga vegdekket ha relativt mindre betydning, spesielt for tunge kjøretøy. Det er funnet naturlig å bruke 70 km/t i eksemplene. Fra tidligere undersøkelser vet en at majoriteten av de støyplagete er bosatt langs veger med 60 km/t eller lavere, men det har også vært en økning i antallet støyplagete langs veger med 70 og 80 km/t (Arnevik 2005). Resultatene basert på fart 70 km/t vil i betydelig grad indikere hva en kan forvente som resultat i tilfeller med både noe lavere og høyere fart (for eksempel 60 km/t og 80 km/t) – gitt samme antallet berørte boliger.

Tabell 8b. Estimert nettonytte og nyttekostnadsbrøk ved omlegging til mer støysvakt vegdekke – 1 km strekning, fart ca 70 km/t, ÅDT≈7500, tofeltsveg, 100 boliger per km (Alt 1f – Alt 1j).

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1f – ettlags drensfalt DA11	Alt 1g – tolags drensfalt DA11/16	Alt 1h – tolags drensfalt DA8/16	Alt 1i – tolags drensfalt DA11/16x*	Alt 1j – støysvakt tynndekke T8g
Nytte, årlig, pga støyreduksjon	147.805	166.600	214.200	214.200	178.500
Nytte, årlig, pga utslippsreduksjon	0	0	89.130	148.550	-113.597
Ekstra investeringskostnad (annuitet)	-77.119	-228.215	-321.903	-187.903	-68.708
Skattekostnad av investering (20 %)	-15.424	-45.643	-64.381	-37.581	-13.742
Nettonytte per år	55.262	-107.258	-82.954	137.267	-17.546
Nyttekostnadsbrøk	1,6	0,61	0,79	1,61	0,79
Nettonyttekostnadsbrøk	0,6	-0,39	-0,21	0,61	-0,21
Prosjektkostnad per bolig per år	925	2.739	3.863	2.255	824
Prosjektkostnad per dB-reduksjon per bolig per år	331	782	858	501	220

Fra tabellene 8a og 8b ser vi at endringer i PM₁₀-utslipp veier nesten like mye som støyendringer, når PM₁₀-utslipp verdsettes etter offisiell verdsetting i storbyer (Oslo, og likeens for Trondheim). Det er det negative nyttebidraget pga forventet økning i partikkelutslipp som gjør endring fra skjellettasfalt til asfaltbetong ulønnsom (men som ville vist god lønnsomhet om en ikke hadde med effekten av partikkelutslippsendringer). Det er bare støysvake tynndekker (Alt 1d og Alt 1e) som oppnår robuste nytte-kostnadsbrøker, dvs. netto nytte-kostnadsbrøk høyere enn 1. Vi vil, lenger ute i resultatkapitlet, se på effekten av å øke antallet berørte boliger fra 100 til 300 per km.

Risikoanalyse – fart 70 km/t, ÅDT=7500, 100 boliger per km

Vi vil her vise resultater for den generelle følsomhetsanalysen for omlegging til støysvake vegdekker på vegkategorier med fart(sgrense) ca 70 km/t, ÅDT lik ca 7500, og med 100 berørte boliger per km.

Tabell 9a. Statistisk oversikt – RISK. Årlig nettonytte ved omlegging til støysvakt vegdekke, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km – normalfordelte input – Alt 1a – Alt 1e.

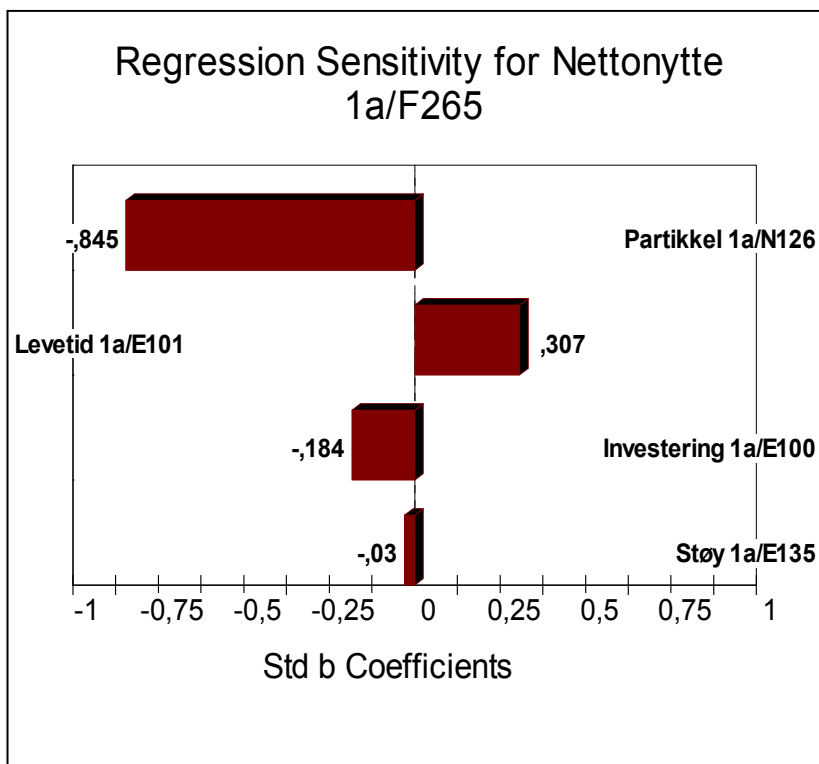
Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1a – standard asfaltbetong AB11	Alt 1b – standard asfaltbetong AB8	Alt 1c – standard asfaltbetong AB6	Alt 1d – støysvakt tynndekke T8	Alt 1e – støysvakt tynndekke T8x*
Nettonytte per år	-10.390	-38.551	-102.167	41.698	111.748
Standardavvik	62.495	67.058	91.239	57.152	72.801

Tabell 9b. Statistisk oversikt – RISK. Årlig nettonytte ved omlegging til støysvakt vegdekke, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km – normalfordelte input – Alt 1f – Alt 1j.

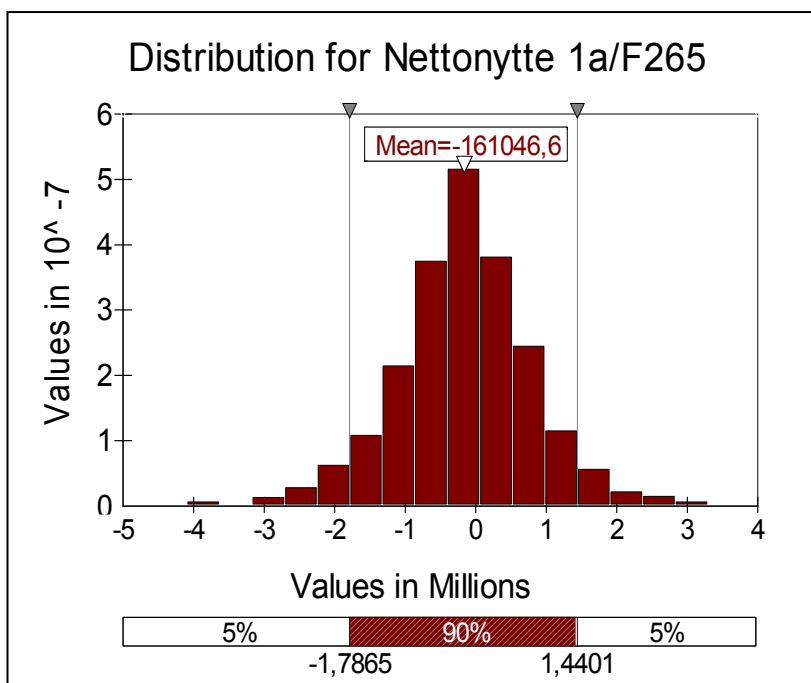
Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1f – ettlags drengasfalt DA11	Alt 1g – tolags drengasfalt DA11/16	Alt 1h – tolags drengasfalt DA8/16	Alt 1i – tolags drengasfalt DA11/16x*	Alt 1j – støysvakt tynndekke T8g
Nettonytte per år	36.812	-17.641	-93.204	136.035	-16.783
Standardavvik	85.739	17.537	182.209	166.907	84.838

For alle alternativene, unntatt Alt 1f og Alt 1g, er det simulerte gjennomsnittet nær det deterministiske (fra tabellene 8a og 8b). Standardavvikene er gjennomgående relativt høye, som indikerer at usikkerhet i ulike input hoper seg opp (svake utjevningseffekter). Imidlertid er det betydelige forskjeller mellom alternativene; alternativene med høyest n/k-brøk, de støysvake tynndekkene (Alt 1e og Alt 1d), har også de relativt laveste standardavvikene for nettonytten. For tolags drengasfalt er den simulerte nettonytten svært ustabil (med 1000 iterasjoner); estimatet ligger langt under det deterministiske gjennomsnittet, og absoluttverdien på standardavviket for nettonytten er mer enn fem ganger så høy som nettonytten.

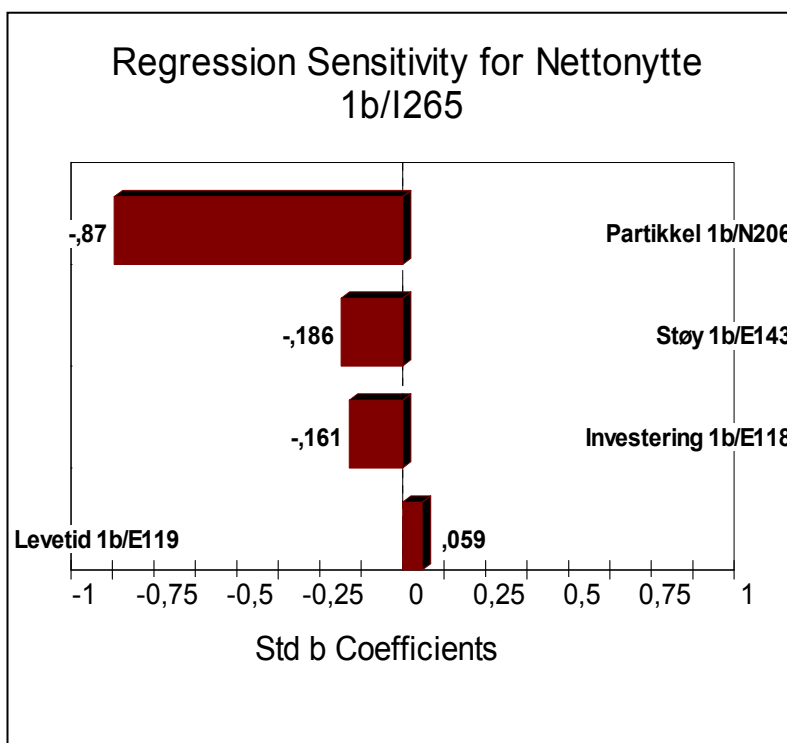
For å visualisere usikkerheten i nettonytten for alle alternativene, samt rangeringskoeffisientene (b_i) for inputvariablene (følsomhetsanalysen – effekten på den estimerte nettonytten), så er dette gitt i følgende figurer:



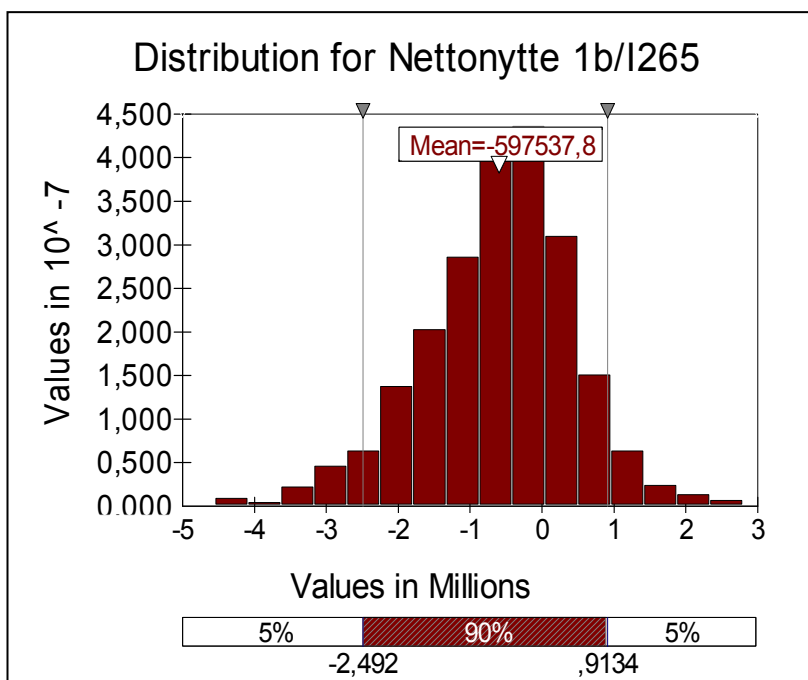
Figur 1. Alt 1a – regresjonstornadograf nettonytte, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



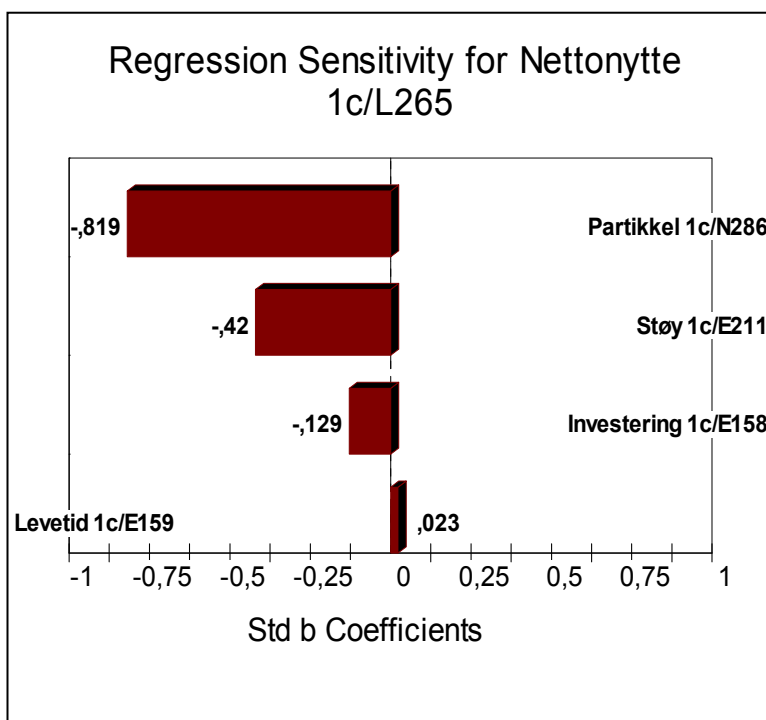
Figur 2. Alt 1a – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



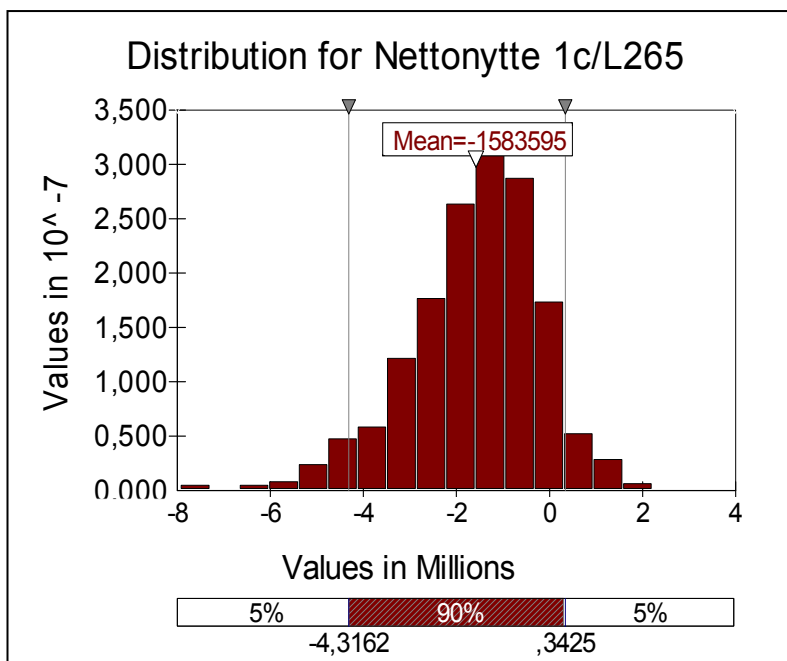
Figur 3. Alt 1b – regresjonstornadograf nettonytte, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



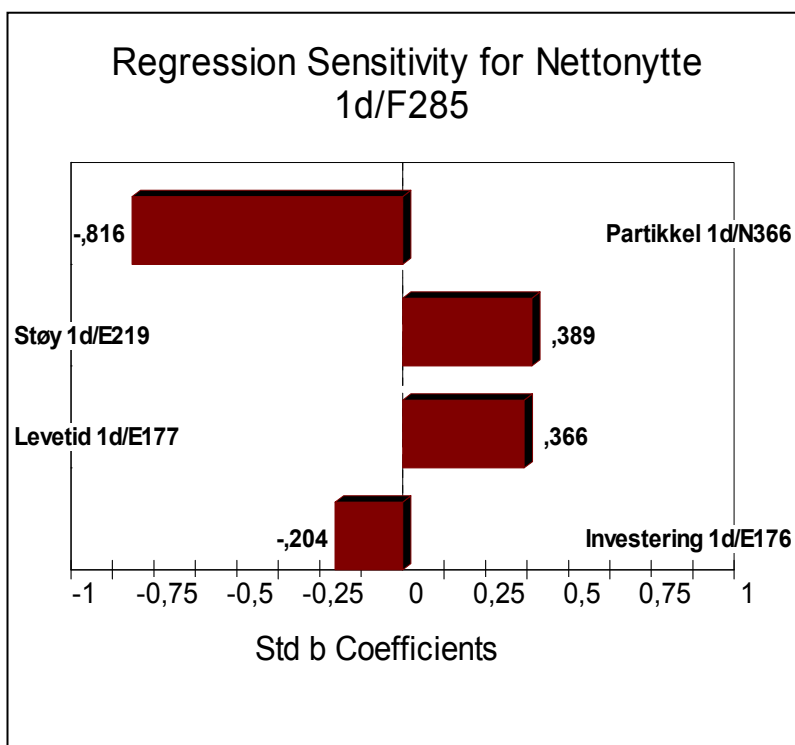
Figur 4. Alt 1b – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



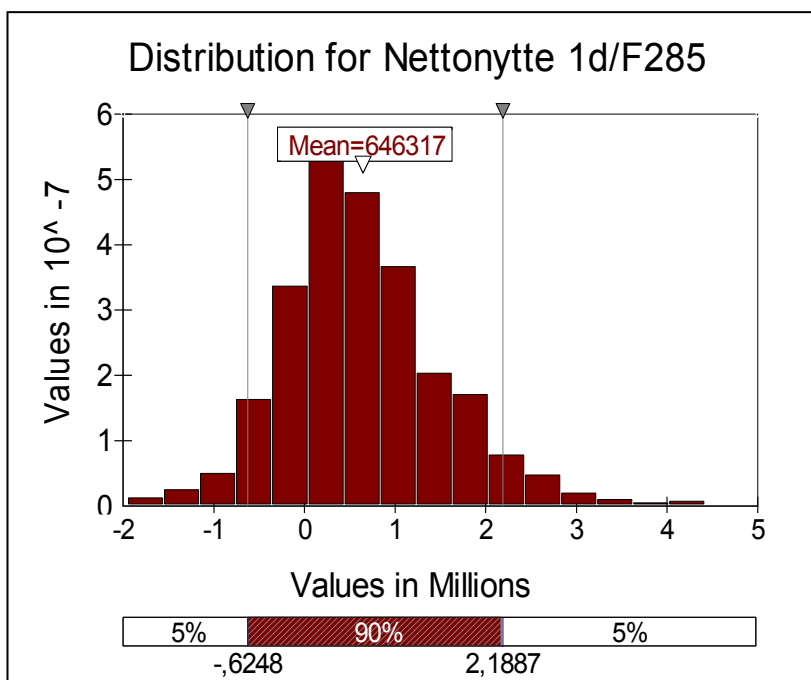
Figur 5. Alt 1c – regresjonstornadograf nettonytte, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



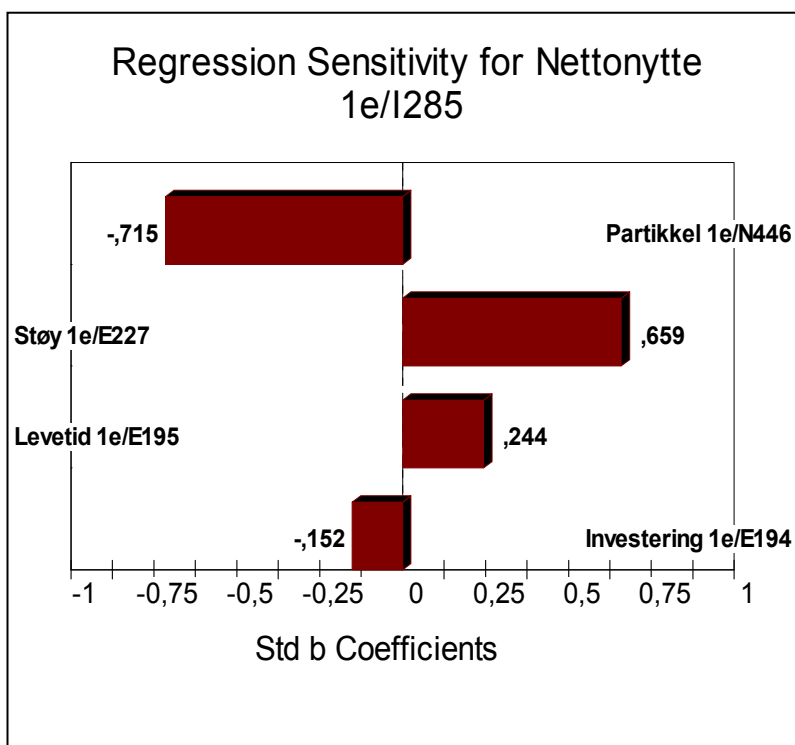
Figur 6. Alt 1c – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



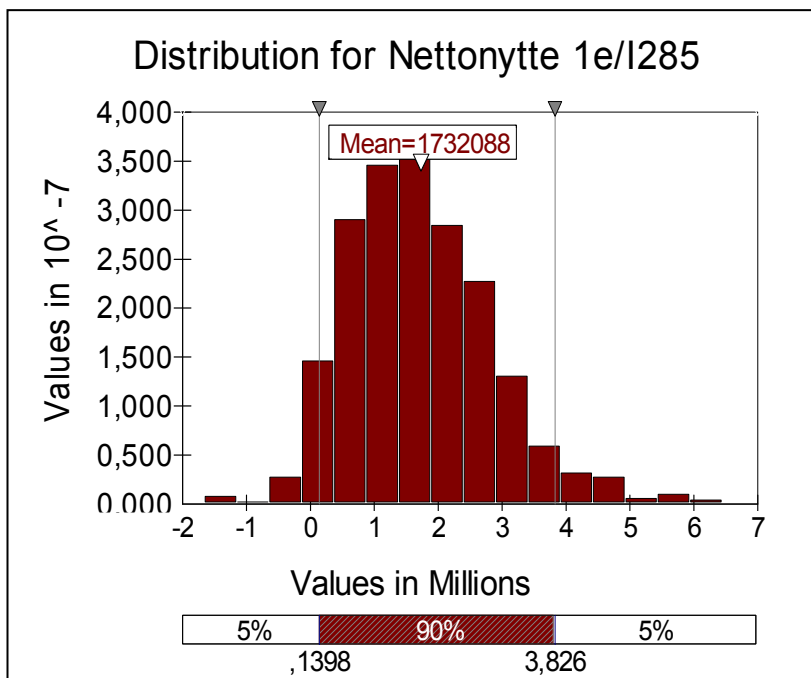
Figur 7. Alt 1d – regresjonstornadograf nettonytte, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



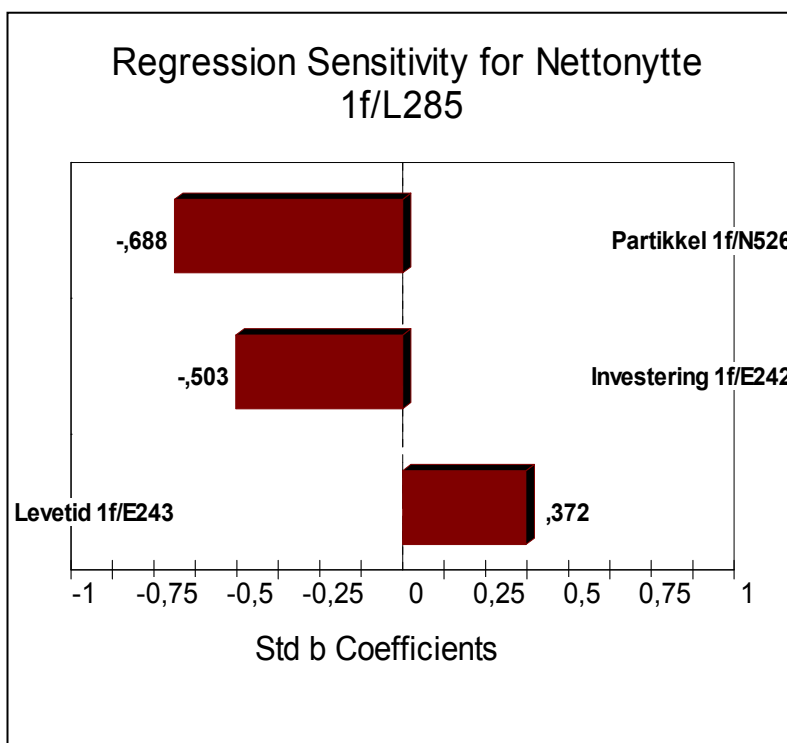
Figur 8. Alt 1d – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



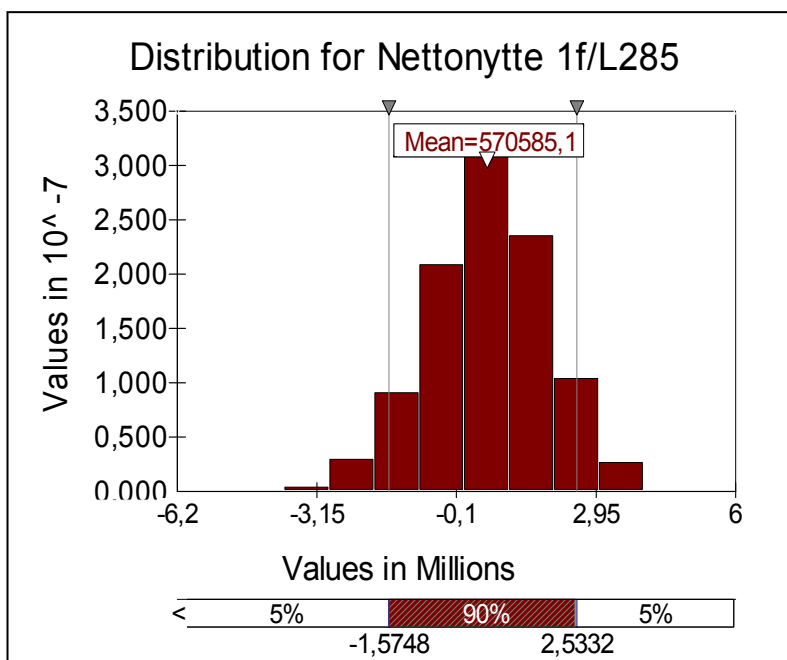
Figur 9. Alt 1e – regresjonstornadograf nettonytte, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



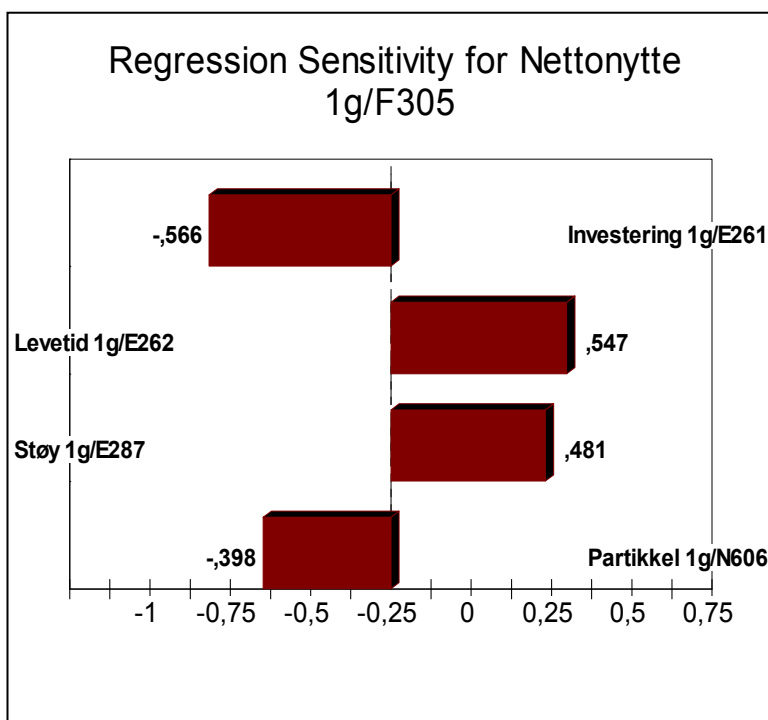
Figur 10. Alt 1e – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



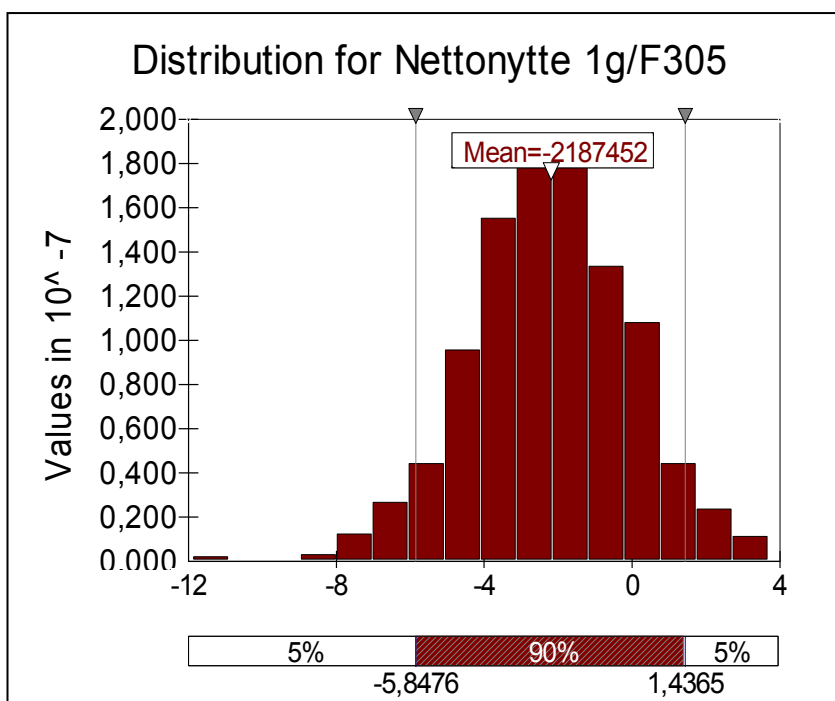
Figur 11. Alt 1f – regresjonstornadograf nettonytte, $\text{ÅDT}=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



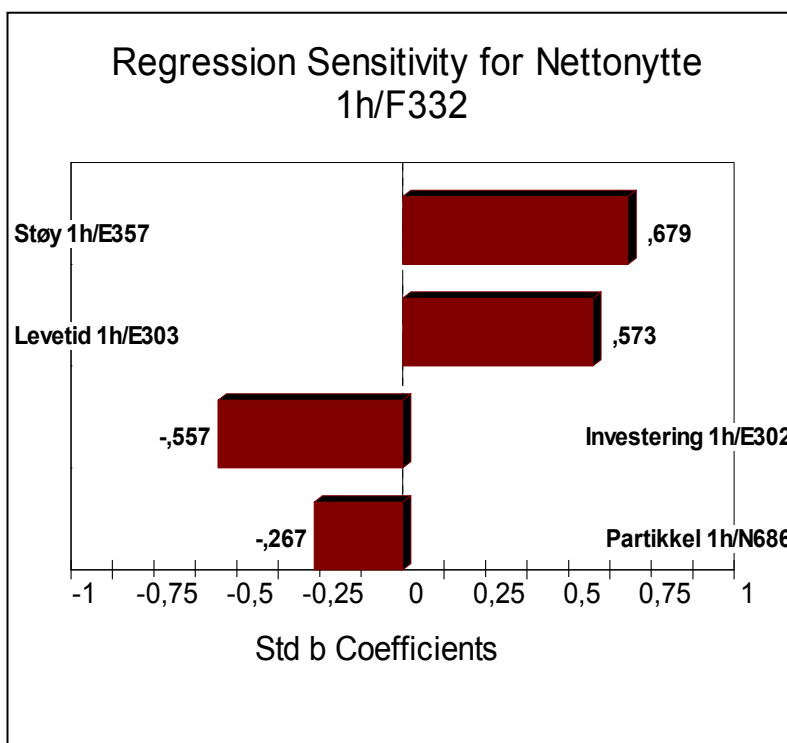
Figur 12. Alt 1f – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, $\text{ÅDT}=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



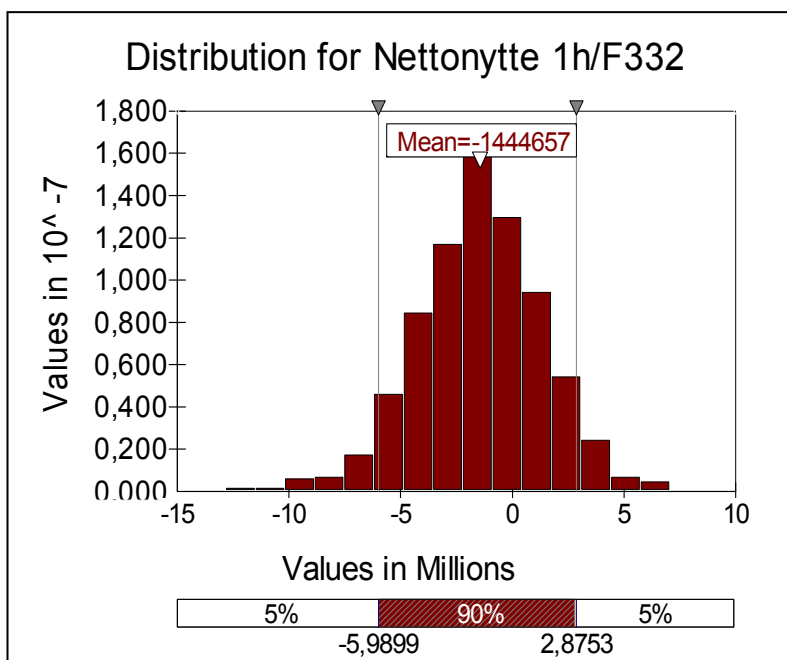
Figur 13. Alt 1g – regresjonstornado graf nettonytte, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



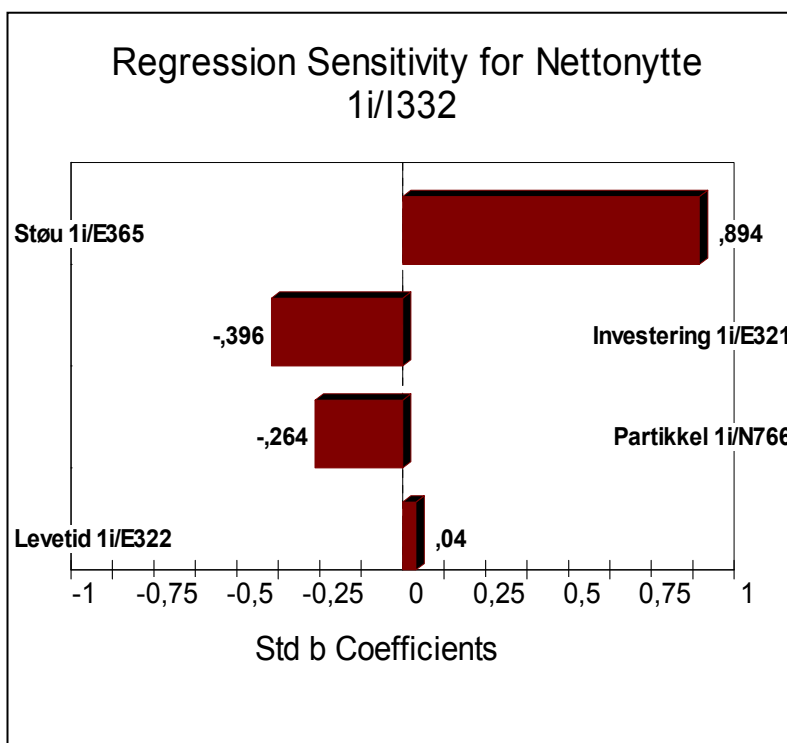
Figur 14. Alt 1g – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



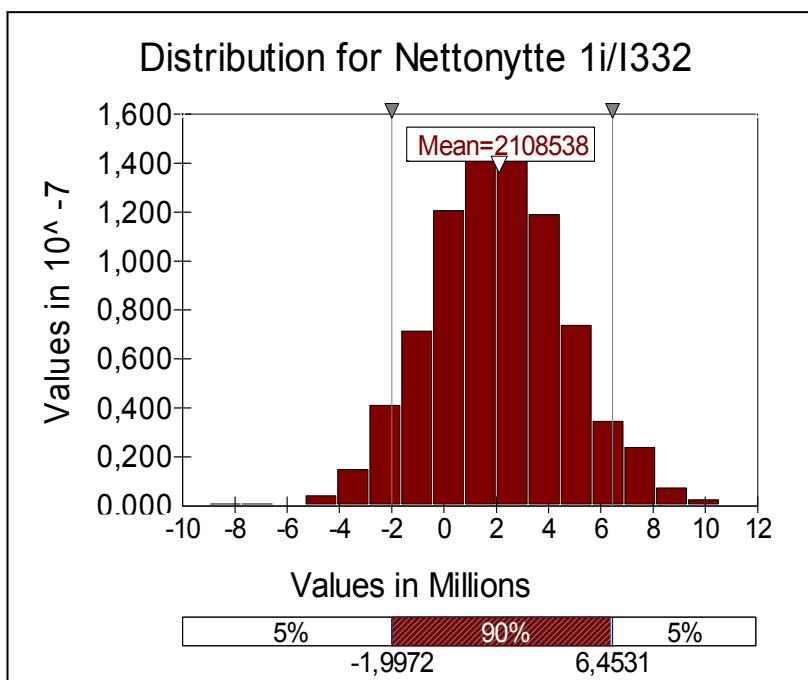
Figur 15. Alt 1h – regresjonsternadograf nettonytte, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



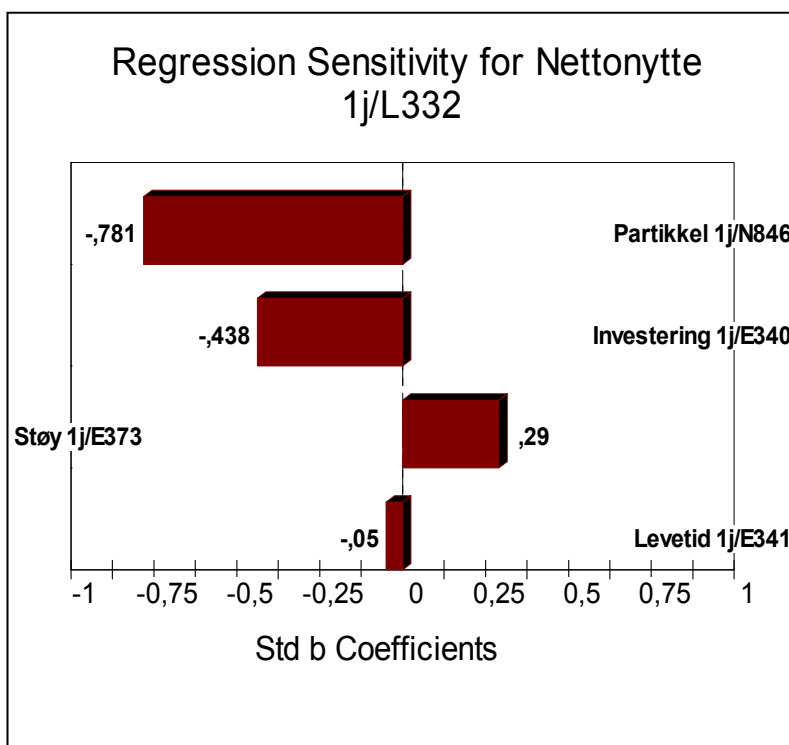
Figur 16. Alt 1h – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



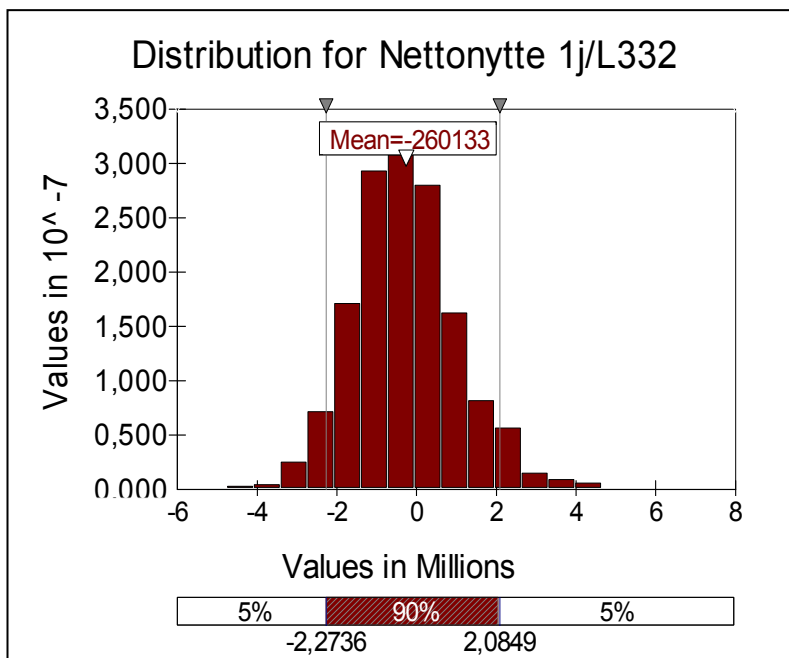
Figur 17. Alt 1i – regresjonstornadograf nettonytte, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



Figur 18. Alt 1i – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, $\dot{A}DT=7500$, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).



Figur 19. Alt 1j – regresjonstornadograf nettonytte, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km.



Figur 20. Alt 1j – sannsynlighetsfordeling av nettonytten, ÅDT=7500, 70 km/t, 100 berørte boliger per km (nåverdi av nettonytte, annuitetsfaktor lik 15,5).

Ser vi først på sannsynlighetsfordelinga av nettonytten, så er det bare Alt 1e (støysvakt tynndekke T8x – ”beste potensial”) som har det aller meste av sannsynlighetsmassen over 0. Alt 1d (støysvakt tynndekke T8) og Alt 1i (tolags drensasfalt DA11/16x – ”beste potensial”) har også en stor del av sannsynlighetsmassen over 0. Alt 1f (ett lags drensasfalt DA11), Alt 1g (tolags drensasfalt DA11/16), Alt 1j (støysvakt tynndekke T8g – gummitilsetning) og, for så vidt, Alt 1a (standard asfaltbetong AB11), har sannsynlighetsmassen noenlunde jevnt fordelt mellom positiv og negativ nettonytte.

Vi ser av regresjonstornadografen at det er (endringer i) relative partikkelutslipp (korreksjonsfaktorer) som har størst effekt på den beregnede nettonytten av omlegging fra SKA11 til asfaltbetongdekker, støysvake tynndekker eller ettlags drensasfalt (Alt 1a – Alt 1f og Alt 1j). For omlegging til tolags drensasfalt (Alt 1g – Alt 1i) er det (endringer i) dB-endring (støyreduksjon) som har størst effekt på den beregnede nettonytten.¹⁰ Med bruk av den omskrevne formelen basert på rangeringskoeffisientene (b_i), kan vi gjennomføre spesifikke følsomhetsberegninger. Vi vil gjøre dette for noen av de støysvake vegdekkealternativene som har positiv nytte-kostnadsbrøk, dvs. støysvakt tynndekke T8 (Alt 1d), ett lags drensasfalt DA11 (Alt 1f), og tolags drensasfalt DA11/16x (Alt 1i).

La oss først anta ei endring i input i , der i =partikkelutslipp (korreksjonsfaktor), og at denne endringa er lik 0,05 (dvs. ei forverring i forhold til forutsetningene). Vi har fra tabellene 7a og 7b at de simulerte standardavvikene for partikkelutslipp (korreksjonsfaktorene) er henholdsvis, 0,1 (Alt 1d og Alt 1f) og 0,08 (Alt 1i). De simulerte standardavvikene til nettonytten, fra tabellene 9a og 9b er henholdsvis, 57.152 (Alt 1d), 85.739 (Alt 1f) og 166.907 (Alt 1i). Da kan vi gjennomføre følgende følsomhetsanalyse mht forverret relativ partikkelutslippskvalitet (forverrede relative slitasjeegenskaper mht piggdekkbruk) lik 0,05:

$$\text{endring nettonytte Alt 1d} = 57.152 \frac{-0,816 \cdot 0,05}{0,1} = -23.318$$

$$\text{endring nettonytte Alt 1f} = 85.739 \frac{-0,688 \cdot 0,05}{0,1} = -29.494$$

$$\text{endring nettonytte Alt 1i} = 166.907 \frac{-0,264 \cdot 0,05}{0,08} = -27.540$$

¹⁰ RISK gir også korrelasjonstornadografen, som stort sett vil gi samme rangering og ganske like koeffisientverdier som regresjonstornadografen. I korrelasjonstornadografen er det ikke implisitt antatt at én variabel er lineært avhengig av andre uavhengige.

Dette ville gi følgende nye nettonytteestimer (og nytte-kostnadsbrøker, med bruk av summene av ekstra investeringskostnader og skattekostnader, fra tabellene 8a og 8b):

$$\text{Alt 1d: } 41.698 - 23.318 = 18.380 \text{ (dvs. n/k} = 26.116 / 7.736 = 3.38)$$

$$\text{Alt 1f: } 36.698 - 29.494 = 7.204 \text{ (dvs. n/k} = 99.747 / 92.543 = 1.08)$$

$$\text{Alt 1i: } 136.035 - 27.540 = 108.495 \text{ (dvs. n/k} = 333.979 / 225.484 = 1.48)$$

Som indikert fra rangeringskoeffisientene for partikkelutslipp, så er her nettonytten (og n/k-brøken) for tolags drengsfalt (Alt 1i) relativt minst påvirket av ei forverring i partikkelutslippskvalitet lik 0,05.

La oss så vurdere Alt 1d og Alt 1i, og anta ei endring i input i , der i =støy, og at denne er lik -0,5 dB (dvs. ei forverring i forhold til forutsetningene). Vi har fra tabellene 7a og 7b at de simulerte standardavvikene for dB-reduksjonen (støyendringa) er henholdsvis, 0,44 (Alt 1d) og 1,84 (Alt 1i). Da kan vi gjennomføre følgende følsomhetsanalyse mht forverret støyreduksjon over levetida lik 0,5 dB:

$$\text{endring nettonytte Alt 1d} = 57.152 \frac{0,389 \cdot (-0.5)}{0,44} = -25.264$$

$$\text{endring nettonytte Alt 1i} = 166.907 \frac{0,894 \cdot (-0.5)}{1,84} = -40.548$$

Dette ville gi følgende nye nettonytteestimer (og nytte-kostnadsbrøker, med bruk av summene av ekstra investeringskostnader og skattekostnader, fra tabellene 8a og 8b):

$$\text{Alt 1d: } 41.698 - 25.264 = 16.434 \text{ (dvs. n/k} = 24.170 / 7.736 = 3.12)$$

$$\text{Alt 1i: } 136.035 - 40.548 = 95.487 \text{ (dvs. n/k} = 320.971 / 225.484 = 1.42)$$

Nettonytten (og n/k-brøken) for begge vegdekkene er relativt mer påvirket av ei forverring i støyreduksjonen lik 0,5 enn av ei forverring i partikkelutslippskvalitet lik 0,05; men forskjellene er mindre for det støysvake tynndekket (Alt 1d) enn for tolags drengsfalt (Alt 1i).

En ser lett at en forbedret støyreduksjon, lik 0,5 dB, vil øke nettonytten tilsvarende som forverringen lik -0,5 dB, altså:

$$\text{endring nettonytte Alt 1d} = 57.152 \frac{0,389 \cdot 0.5}{0,44} = 25.264$$

$$\text{endring nettonytte Alt 1i} = 166.907 \frac{0,894 \cdot 0.5}{1,84} = 40.548$$

En ser også at en forbedret støyreduksjon, lik 1 dB, vil øke nettonytten med det dobbelte, osv. for andre dB-endringer. Med bruk av denne omskrevne formelen basert på rangeringskoeffisientene (b_i), kan en altså lett variere inputendringer og få estimert effekten på nettonytten.

Punktestimater – fart 70 km/t, ÅDT=7500, 300 boliger per km

Med økning i antallet berørte boliger vil endringene i støy og partikkelutslipp bli tillagt mer vekt. Tabellene 10a og 10b oppsummerer resultatene for 300 boliger per km.

Tabell 10a. Estimert nettonytte og nyttekostnadsbrøk ved omlegging til mer støysvakt vegdekke – 1 km strekning, fart ca 70 km/t, ÅDT≈7500, tofeltsveg, 300 boliger per km (Alt 1a – Alt 1e).

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1a – standard asfaltbetong AB11	Alt 1b – standard asfaltbetong AB8	Alt 1c – standard asfaltbetong AB6	Alt 1d – støysvakt tynndekke T8	Alt 1e – støysvakt tynndekke T8x*
Nytte, årlig, pga støyreduksjon	142.800	214.468	357.000	142.622	357.214
Nytte, årlig, pga utslippsreduksjon	-143.111	-296.232	-631.064	0	0
Ekstra investeringskostnad (annuitet)	-9.645	-7.873	-5.323	-6.447	-6.447
Skattekostnad av investering (20 %)	-1.929	-1.575	-1.065	-1.289	-1.289
Nettonytte per år	-12.185	-91.212	-280.451	134.886	349.478
Nytte-kostnadsbrøk	-0,05	-8,65	-42,9	18,4	46,2
Netto nytte-kostnadsbrøk	-1,05	-9,65	-43,9	17,4	45,2
Prosjektkostnad per bolig per år	39	31	21	26	26
Prosjektkostnad per dB-reduksjon per bolig per år	39	3	9	26	10

Tabell 10b. Estimert nettonytte og nyttekostnadsbrøk ved omlegging til mer støysvakt vegdekke – 1 km strekning, fart ca 70 km/t, ÅDT≈7500, tofeltsveg, 300 boliger per km (Alt 1f – Alt 1j).

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1f – ettlags drensasfalt DA11	Alt 1g – tolags drensasfalt DA11/16	Alt 1h – tolags drensasfalt DA8/16	Alt 1i – tolags drensasfalt DA11/16x*	Alt 1j – støysvakt tynndekke T8g
Nytte, årlig, pga støyreduksjon	443.415	499.800	642.600	642.600	535.500
Nytte, årlig, pga utslippsreduksjon	0	0	267.389	445.649	-340.790
Ekstra investeringskostnad (annuitet)	-77.119	-228.215	-321.903	-187.903	-68.708
Skattekostnad av investering (20 %)	-15.424	-45.643	-64.381	-37.581	-13.742
Nettonytte per år	350.872	225.942	523.706	862.766	112.261
Nyttekostnadsbrøk	4,79	1,83	2,36	4,83	2,36
Nettonyttetekostnadsbrøk	3,79	0,83	1,36	3,83	1,36
Prosjektkostnad per bolig per år	308	913	1.288	752	275
Prosjektkostnad per dB-reduksjon per bolig per år	110	261	286	167	73

Sammenliknet med resultatene basert på 100 berørte boliger (fra tabellene 8a og 8b) gir 300 berørte boliger ca tredobling av støyntytte og utslippsnytte – positiv så vel som negativ (og prosjektkostnader per bolig blir redusert til en tredjedel). Med dette blir alle vegdekkealternativene lønnsomme, bortsett fra asfaltbetongdekkene (som ville vist god lønnsomhet om en ikke hadde med effekten av partikkelutslippsendringer). Fortsatt er det de støysvake tynndekkene (Alt 1d og Alt 1e) som oppnår de høyeste nytte-kostnadsbrøkene.

Punktestimater – fart 70 km/t, ÅDT=12500, 300 boliger per km

Vi vil til slutt ta med kjøring for firefelts veger med ÅDT ≈ 12500.

Sammenliknet med tofelts veg med ÅDT ≈ 7500 vil vi her ha høyere investering per berørte bolig (antar 300 berørte boliger per km) og kortere teknisk levetid. Tabellene 11a og 11b oppsummerer resultatene for 300 boliger per km og ÅDT lik 12500.

Tabell 11a. Estimert nettonytte og nyttekostnadsbrøk ved omlegging til mer støysvakt vegdekke – 1 km strekning, fart ca 70 km/t, ÅDT≈12500, tofeltsveg, 300 boliger per km (Alt 1a – Alt 1e).

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1a – standard asfaltbetong AB11	Alt 1b – standard asfaltbetong AB8	Alt 1c – standard asfaltbetong AB6	Alt 1d – støysvakt tynndekke T8	Alt 1e – støysvakt tynndekke T8x*
Nytte, årlig, pga støyreduksjon	142.800	264.805	410.550	174.395	404.767
Nytte, årlig, pga utslippsreduksjon	-143.111	-302.959	-645.965	0	0
Ekstra investeringskostnad (annuitet)	-19.815	-17.411	-12.582	-23.372	-23.372
Skattekostnad av investering (20 %)	-3.963	-3.482	-2.570	-4.674	-4.674
Nettonytte per år	-24.389	-59.047	-250.837	146.348	376.720
Nytte-kostnadsbrøk	-0,03	-1,83	-15,3	6,22	14,4
Netto nytte-kostnadsbrøk	-1,03	-2,83	-16,3	5,22	13,4
Prosjektkostnad per bolig per år	79	70	51	93	93
Prosjektkostnad per dB-reduksjon per bolig per år	79	8	18	77	33

Tabell 11b. Estimert nettonytte og nyttekostnadsbrøk ved omlegging til mer støysvakt vegdekke – 1 km strekning, fart ca 70 km/t, ÅDT≈12500, tofeltsveg, 300 boliger per km (Alt 1f – Alt 1j).

Referanse: Alt 0 – standard tett dekke SKA11	Alt 1f – ettlags drengasfalt DA11	Alt 1g – tolags drengasfalt DA11/16	Alt 1h – tolags drengasfalt DA8/16	Alt 1i – tolags drengasfalt DA11/16x*	Alt 1j – støysvakt tynndekke T8g
Nytte, årlig, pga støyreduksjon	483.352	535.500	714.000	678.300	571.200
Nytte, årlig, pga utslippsreduksjon	0	0	275.432	452.322	-345.985
Ekstra investeringskostnad (annuitet)	-219.172	-614.825	-845.369	-510.081	-178.399
Skattekostnad av investering (20 %)	-43.834	-122.965	-169.074	-102.016	-35.680
Nettonytte per år	220.346	-202.290	-25.011	518.524	11.135
Nytte-kostnadsbrøk	1,84	0,73	0,98	1,85	1,05
Nettonytte-kostnadsbrøk	0,84	-0,27	-0,02	0,85	0,05
Prosjektkostnad per bolig per år	877	2.459	3.381	2.040	714
Prosjektkostnad per dB-reduksjon per bolig per år	292	656	676	430	178

Sammenliknet med resultatene basert på 300 berørte boliger og ÅDT lik 7500 (fra tabellene 10a og 10b) gir ÅDT lik 12500 gjennomgående lavere nettonytteestimer (n/k-brøker). Igjen er det bare de støysvake tynndekkene (Alt

1d og Alt 1e) som oppnår robuste nytte-kostnadsbrøkene. Men, både ett lags drensasfalt DA11 (Alt 1f), og tolags drensasfalt DA11/16x (Alt 1i) har n/k-brøker nær 2.

Minimum antall berørte boliger for robuste nyttekostnadsbrøker

Tabellene 12a og 12b viser kravet til minimum antall berørte boliger for å få robuste nyttekostnadsbrøker, dvs. n/k-brøk ≥ 2 (netto nytte-kostnadsbrøk ≥ 1).

Tabell 12a. Minimum antall berørte boliger per km for å oppnå n/k-brøk ≥ 2 – 70 km/t (Alt 1a – Alt 1e).

	Alt 1a – standard asfaltbetong AB11	Alt 1b – standard asfaltbetong AB8	Alt 1c – standard asfaltbetong AB6	Alt 1d – støysvakt tynndekke T8	Alt 1e – støysvakt tynndekke T8x*
ÅDT = 7500 (to felt)				33	13
ÅDT = 12500 (fire felt)				97	42

Tabell 12b. Minimum antall berørte boliger per km for å oppnå n/k-brøk ≥ 2 – 70 km/t (Alt 1f – Alt 1j).

	Alt 1f – ettlags drensasfalt DA11	Alt 1g – tolags drensasfalt DA11/16	Alt 1h – tolags drensasfalt DA8/16	Alt 1i – tolags drensasfalt DA11/16x*	Alt 1j – støysvakt tynndekke T8g
ÅDT = 7500 (to felt)	125	328	255	125	254
ÅDT = 12500 (fire felt)	326	825	614	325	569

Det kreves mellom to og tre ganger flere berørte boliger per km (berørte av støy og partikkelforurensing) for en firefelts veg med ÅDT lik 12500, sammenliknet med en tofelts veg med ÅDT lik 7500. For asfaltbetongdekkene vil n/k-brøken være lavere enn 2 (og lavere enn 1) uansett boligantall.¹¹

¹¹ Om en ikke hadde med partikkelforurensing, så ville disse dekkene, AB11, AB8, og AB6, kreve boligantall omtrent som for støysvake tynndekker for å oppnå n/k-brøk over 2, dvs. henholdsvis 49, 27 og 11, for ÅDT lik 7500, og 100, 48 og 23 for ÅDT lik 12500.

Oppsummeringer

Disse resultatene indikerer for det første at alternativer som har kostnader og levetid som skiller seg relativt lite fra referansen, og som samtidig gir en begrenset støyreduksjon uten å forverre partikkelutslippene, vil representerer den mest robuste løsningen mht å oppnå positiv nettonytte og nytte-kostnadsbrøk ≥ 2 . Dette er for så vidt opplagt (og det er også konsistent med tidligere resultater fra Veisten 2006b, 2006c, 2008). Dermed er det de støysvake tynnnekkene (T8 og, særlig, T8x) som generelt kommer best ut.

For tilfellet med ÅDT lik 7500 (tofelts veg) og antallet berørte boliger lik 100, så viser risikoanalysen at det bare er støysvakt tynndekke T8x ("beste potensial") som har det aller meste av sannsynlighetsmassen for nettonytte over 0. Støysvakt tynndekke T8 (med verdier basert på norske målinger) og tolags drensasfalt DA11/16x ("beste potensial", dvs. typen med aller beste målinger) har også en stor del av sannsynlighetsmassen over 0.

Risikoanalysen viser for øvrig at en i tilfellet med ÅDT lik 7500 (tofelts veg) og antallet berørte boliger lik 100, så vil begrensede endringer i støyreduksjon (dB-endring lik 0,5 over levetida) og partikkelutslipp (korreksjonsfaktorendring lik 0,05) ikke påvirke de konklusjonene som kunne trekkes fra den deterministiske analysen. Dvs., for støysvakt tynndekke opprettholdes robust lønnsomhet, mens også den beste tolags drensasfalt opprettholder n/k-brøk større enn 1.

Utover dette indikerer resultatene flere mulige avveininger enn i tidligere analyser av støysvake vegdekker, bl.a. pga inkluderinga av partikkelutslippsforskjeller mellom vegdekkene:

- Støysvake tynndekker, som generelt er rimeligere enn drensasfaltdekkene, vil være relativt mer robuste, ut ifra en samfunnsøkonomisk vurdering, på firefelts veger, siden det her kreves mer asfalt for et gitt antall støyutsatte boliger enn en tofelts veg.
- Drensasfalt kan være økonomisk lønnsom på tofelts veger med relativt mange støyutsatte boliger (fra ca 125), og spesielt hvis asfaltoverflaten samtidig har gode slitasjeegenskaper. For firefelts veger kreves det flere (fra ca 325) støyutsatte boliger per km for at de beste drensasfaltalternativene skal bli "robust lønnsomme" (n/k-brøk ≥ 2).

Generelt indikerer denne analysen, i sterkere grad enn tidligere, at ulike støysvake vegdekkealternativer kan være "de optimale" under ulike forhold. Det er også gitt en sterk indikasjon på at det nå finnes støysvake vegdekker med relativt gode

slitasjeegenskaper som kan benyttes lønnsomt på noen veger i norske byer og tettsteder, spesielt i de største byene der partikkelutslippsproblematikken er mest alvorlig. En kan dermed med asfaltomlegging bidra til å oppnå både etatsmålet om redusert støyplage og etatsmålet om forbedret luftkvalitet – med samfunnsøkonomisk lønnsomhet.

Referanser

Aksnes, J. 2008. *Pers. komm.*

Amundsen, A.H., Elvik, R. & Sælensminde, K. 2000. "Fartsgrenser i tettbygd strøk: trygghet, samfunnsøkonomiske analyser og kriterier for fastsetting av fartsgrenser." TØI-rapport 471/2000, Transportøkonomisk institutt, Oslo.

Arnevik, A. 2005. "Kategorisering av vegnettet." Arbeidsnotat, 11/11-05, ViaNova, Sandvika.

Arnevik, A. 2006a. "Potensial for støyreduksjon og anvendbarhet." Arbeidsnotat, 25/01-06, ViaNova, Sandvika.

Arnevik, A. 2006b. "Anslag for kostnader." Arbeidsnotat, 25/01-06, ViaNova, Sandvika.

Arnevik, A. & Veisten, K. 2005. "Samfunnsmessige konsekvenser og nyttekostnadsberegninger for støysvake vegdekker." TØI arbeidsdokument SM-1727/2005, Transportøkonomisk institutt, Oslo.

Bakløkk, L. 2008. *Pers. komm.*

Berge, T. 2008a. "Miljøvennlige veidekker – støy: resultater fra CPX-målinger i 2007, sammenlignet med nivå i 2005 og 2006." SINTEF rapport, 90E238.22/TB, 15/05-08, SINTEF Byggforsk, Veg- og jernbaneteknikk, Trondheim.

Berge, T. 2008b. "Miljøvennlige vegdekker – støy: resultater fra CPX-målinger i 2008, sammenlignet med nivå i 2005, 2006 og 2007." SINTEF rapport, 90E238.22/TB, 08/10-08, SINTEF Byggforsk, Veg- og jernbaneteknikk, Trondheim.

Berge, T. & Ustad, A. 2004. "Tyre/road noise on different road texture." Presentert ved *Inter-noise 2004*, 22.-25. august 2004, Praha, Tsjekkia.

Eriksen, K.S. 2000. "Calculating external costs of transportation in Norway: principles and results." *European Journal of Transportation and Infrastructure Research*, 0: 9-25.

- Eriksen, K.S., Markussen, T.E. & Pütz, K. 1999. "Marginale kostnader ved transportvirksomhet." TØI rapport 464/1999, Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Kropp, W., Kihlman, T., Forssén, J. & Ivarsson, L. 2007. "Reduction potential of road traffic noise: a pilot study." *Applied Acoustics*, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Lerfald, B.O. 2008. "Miljøvennlige vegdekker: testing av slitasjееgenskaper med Trøger for utvalgte forsøksdekker." SINTEF rapport, 27/03-08, SINTEF Byggforsk, Veg- og jernbaneteknikk, Trondheim.
- Nørbech, C. 2008. *Pers. komm.*
- O'Brien, B.J., Drummond, M.F., LaBelle, R.J. & Willan, A. 1994. "In search of power and significance: issues in the design of stochastic cost-effectiveness studies in health care." *Medical Care*, 32: 150-163.
- Palisade. 2002. "@RISK – advanced risk analysis for spreadsheets." Version 4.5, February 2002, Palisade Corporation, Newfield, NY.
- Raitanen, N. 2005. "Measuring of noise and wearing of quiet surfaces." Doctoral Dissertation (TKK Dissertations 7), Laboratory of Highway Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- SFT. 1999. "Utslipp fra veitrafikk i Norge: dokumentasjon av beregningsmetode, data og resultater." SFT rapport 99:04, Statens forurensningstilsyn, Oslo.
- Snilsberg, B. 2008. "Pavement wear and airborne dust pollution in Norway: characterization of the physical and chemical properties of dust particles." Doctoral Theses at NTNU, 2008:133, Thesis for the degree of *Doktor Ingeniør* (Doctor of Engineering), Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Faculty of Engineering Science and Technology, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- SVV. 2006a. "Miljøvennlige vegdekker." Prosjektplan, 19. januar 2006, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Oslo.
- SVV. 2006b. "Håndbok 140, konsekvensanalyser." Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Oslo.
- Sælensminde, K. & Veisten, K. 2005. "Cost-benefit analysis." SILVIA document SILVIA-TOI-004-01-WP3-030505, Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control (SILVIA), TØI.
- Uthus, N. 2008. *Pers. komm.*
- Veisten, K. 2006a. "Verifisering og revisjon av inndata og kostnadstall i regnearkmodell. Deloppgave 4 - Samfunnsmessige konsekvenser og nyttekostnadsberegninger for støysvake vegdekker." TØI arbeidsdokument SM-1746, 07/02-2006, Transportøkonomisk institutt, Oslo.

- Veisten, K. 2006b. "Nyttekostnadsanalyse av støytiltak. Deloppgave 5 - Samfunnsmessige konsekvenser og nyttekostnadsberegninger for støysvake vegdekker." TØI arbeidsdokument SM-1751, 27/02-2006, Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Veisten, K. 2006c. "Følsomhetsanalyse for nyttekostnadsanalyse av støytiltak. Deloppgave 6 - Samfunnsmessige konsekvenser og nyttekostnadsberegninger for støysvake vegdekker." TØI arbeidsdokument SM-1759, 28/02-2006, Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Veisten, K. 2006d. "Konsekvensanalyse – miljøvennlige vegdekker: forslag til prosjektinnhold og -struktur." TØI arbeidsdokument SM-1787, 03/11-2006, Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Veisten, K. 2008. "Konsekvensanalyse: resultater fra regnearkmodell." TØI arbeidsdokument SM-1969, 10/09-2008, Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Veisten, K. & Sælensminde, K. 2004. "Summary – net impacts on sustainability from a change to porous asphalt." SILVIA document SILVIA-TOI-002-06-WP3-300304, TØI.
- Veisten, K., Sælensminde, K., Klæboe, R., Nossun, Å., Skedsmo, A. & Arnevik, A. 2007. "'TORNADO' - Prioriteringsverktøy for strategiske nyttekostnadsanalyser av støytiltak og andre miljøtiltak." TØI arbeidsdokument SM-1902, 09/10-2007, Transportøkonomisk institutt, Oslo.
- Whitelegg, J. 1993. *Transport for a Sustainable Future: the Case for Europe*. John Wiley, London.



Statens vegvesen

Statens vegvesen Vegdirektoratet
Postboks 8142 Dep
N - 0033 Oslo

Tlf. (+47 915) 02030
E-post: publvd@vegvesen.no

ISSN 1504-5005