

Harald Minken
Geir Dahl
Christian Steinsland
TØI rapport 957/2008

tøi | Transportøkonomisk institutt
Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning



Samfunnsøkonomisk vurdering av
vedlikeholdsstrategier,
oppgradering og standardutforming
i vegnettet



Samfunnsøkonomisk vurdering av vedlikeholdsstrategier, oppgradering og standardutforming i vegnettet

Harald Minken
Geir Dahl
Christian Steinsland

ISSN 0808-1190

ISBN 978-82-480-0876-7 Papirversjon

ISBN 978-82-480-0877-4 Elektronisk versjon

Oslo, mai 2008

Tittel: Samfunnsøkonomisk vurdering av vedlikeholdsstrategier, oppgradering og standardutforming i vegnettet

Forfatter(e): Harald Minken; Geir Dahl; Christian Steinsland

TØI rapport 957/2008

Oslo, 2008-05

48 sider

ISBN 978-82-480-0876-7 Papirversjon

ISBN 978-82-480-0877-4 Elektronisk versjon

ISSN 0808-1190

Finansieringskilde:

Samferdselsdepartementet

Prosjekt: 3104 Vedlikeholdsstrategier

Prosjektleder: Harald Minken

Kvalitetsansvarlig: Kjell Werner Johansen

Emneord:

Vegvedlikehold; nyttekostnadsanalyse

Sammendrag:

Vi har laget et program som finner optimale strategier for vedlikehold av et sett likeartede objekter (veger, i vårt tilfelle) som må dele felles årlige vedlikeholdsbudsjetter. Objektene kan ha ulik initiell tilstand og ulike nedbrytings-funksjoner og kostnadsfunksjoner, og vedlikeholdstiltakene kan ha ulik intensitet. Dette problemet er i virkeligheten meget komplisert, og ingen nåværende vedlikeholdsplanleggingssystemer i praktisk bruk har løst det riktig. Basert på dette programmet er det mulig å finne samfunnsøkonomisk nytte av en marginal økning av de årlige budsjettene. Det er også mulig å finne beste måte å ta inn et vedlikeholdsetterslep på eller å vurdere den samfunnsøkonomiske nytten av å øke vegstandarden. Rapporten gir også prinsipper og eksplisitte formler for optimalt vedlikehold, størrelsen på et vedlikeholdsetterslep og verdien av å endre vegstandarden under mer spesielle, stiliserte forutsetninger.

Title: Cost-benefit analysis of road maintenance and standard improvement strategies for the road network

Author(s): Harald Minken; Geir Dahl; Christian Steinsland

TØI report 957/2008

Oslo: 2008-05

48 pages

ISBN 978-82-480-0876-7 Paper version

ISBN 978-82-480-0877-4 Electronic version

ISSN 0808-1190

Financed by:

Ministry of Transport and Communications

Project: 3104 Road rehabilitation strategies

Project manager: Harald Minken

Quality manager: Kjell Werner Johansen

Key words:

Road maintenance; cost-benefit analysis

Summary:

We have programmed an algorithm to find optimal rehabilitation strategies for a set of similar objects (road pavements, in our case) that will have to share common annual maintenance budgets. The objects may differ with respect to initial states, rates of degradation, and cost functions, and a range of rehabilitation measures of varying intensity may be available. This problem is inherently complex, and to our knowledge, none of the currently used maintenance planning systems solve it correctly. Based on this program, cost benefit analysis of increasing the annual budgets may be performed. It would also be possible to find optimal ways of reducing a maintenance backlog or to perform cost benefit analysis of improving the road standard. The report also provides principles and explicit formulas for optimal maintenance, the size of the maintenance backlog, and the value of improved road standards under more specialised, stylised assumptions.

Language of report: Norwegian

Rapporten kan bestilles fra:
Transportøkonomisk institutt, Biblioteket
Gautstadalleen 21, 0349 Oslo
Telefon 22 57 38 00 - www.toi.no

The report can be ordered from:
Institute of Transport Economics, The library
Gautstadalleen 21, NO 0349 Oslo, Norway
Telephone +47 22 57 38 00 - www.toi.no

Forord

Dette er sluttrapporten fra forskningsprosjektet "Vedlikeholdsstrategier", som TØI har gjennomført for Samferdselsdepartementet under programmet for overordnet transportforskning, POT. Hovedmålet med prosjektet har vært å finne sunne metoder for nyttekostnadsberegning av å bruke mer midler på vedlikehold.

Hovedresultatet fra prosjektet er de matematiske resultatene i Dahl og Minken (2008) og dataprogrammet for å finne optimale vedlikeholdsstrategier for vegdekker, som det også er gjort rede for der. De som er interessert i en strengt vitenskapelig framstilling vises dit (se litteraturlista). Den foreliggende rapporten gir en mer populær framstilling av hovedresultatene, samtidig som den gir en breiere drøfting av økonomiske prinsipper for planlegging av vedlikehold av samferdselsinfrastruktur.

I månedene etter at sluttrapporten var ferdigskrevet har vi brukt gjenstående prosjektmidler til å generalisere dataprogrammet, slik at det også skal kunne brukes på andre typer av vedlikehold enn vegdekker. Vi håper å kunne fullføre og dokumentere dette arbeidet i et seinere prosjekt.

Prosjektleder har vært forskningsleder Harald Minken, og medarbeidere har vært professor Geir Dahl, UiO og TØI, og siv. ing. Christian Steinsland. Kvalitetsansvarlig har vært avdelingsleder Kjell Werner Johansen. Avdelingssekretær Laila Aastorp Andersen har stått for den avsluttende tekstbehandlingen.

Oslo, mai 2008

Transportøkonomisk institutt

Lasse Fridstrøm
instituttssjef

Kjell Werner Johansen
avdelingsleder

Innhold

Sammendrag	I
Summary	i
1 Innledning	1
2 Levetid, utbedringer og fastsettelse av standarder	3
2.1 Begrepet levetid	3
2.2 Optimal levetid.....	4
2.3 Optimal rehabiliteringssyklus	7
2.3.1 Eksistensverdi og kapitalverdi.....	9
2.4 Optimal rehabilitering av mange objekter under en budsjettrestriksjon	10
2.4.1 Avskrivning	12
2.4.2 Vedlikeholdsetterslepet	13
2.5 Nyttekostnadsanalyse av utbedringer	15
2.5.1 Funksjonssammenhenger.....	15
2.5.2 Nyttekostnadsanalyse	17
2.6 Optimal standard	20
2.7 Drøfting.....	21
3 Optimal strategier for rehabilitering av vegdekke	22
3.1 Problemstillingen	22
3.2 Eksisterende strategiske vedlikeholdsplanleggingssystemer	25
3.3 Løsning av RS-problemet i det generelle tilfellet	27
3.3.1 Algoritme	28
3.3.2 Program og testresultater	28
3.4 Anvendelser.....	30
3.4.1 Strategisk planlegging av vedlikehold og rehabilitering	30
3.4.2 Optimal fordeling mellom vedlikehold og investering og mellom vedlikeholdsoppgaver av ulikt slag	31
3.4.3 Utforming av et løft for å ta igjen vedlikeholdsetterslepet	31
3.4.4 Nyttekostnadsanalyse av omfattende forsterkninger av bæreevne og av økte vegbredder	32
3.4.5 Analyser av vegnormalenes krav	32
3.4.6 Systematisk sammenlikning med andre programmer og modeller	33
3.5 Drøfting.....	33
4 Vegkapital	35
4.1 Vegkapitalprosjektet	35
4.2 Trenger vi begrepet vegkapital?	37
4.3 Evaluering av norsk vegbyggingspolitikk	38
4.4 Vurdering av sårbarheten i vegsystemet.....	39
4.5 Effektivitetsreduksjon ved stengning av tre veier i Oslo.....	40
4.5.1 Transportmodell for Oslo og Akershus	41
4.5.2 Resultater	42
4.5.3 Eksistensverdien av de tre veglenkene	43
4.6 Vurdering av hensiktsmessigheten av å satse på oppgradering av en av to parallelle veger	43
Litteraturliste	45
Vedlegg 1	47
Diagram 1	47
Diagram 2.....	47

Sammendrag:

Samfunnsøkonomisk vurdering av vedlikeholdsstrategier, oppgradering og standardutforming i vegnettet

Vedlikeholdet av samferdselsinfrastrukturen har vært forsømt. I denne rapporten anlegger vi et økonomisk synspunkt på vedlikeholdsproblemene. Vi har utviklet et verktøy til å finne beste vedlikeholdsstrategi når vegene i utgangspunktet er nedslitt i ulik grad, men må dele på et felles årlig budsjett. På det grunnlaget kan vi måle lønnsomheten av å øke vedlikeholdsbudsjettene.

Bakgrunn og oversikt

Det har blitt stadig klarere i de siste åra at det i lang tid har vært brukt for lite midler på vedlikehold av samferdselsinfrastrukturen i Norge. Det har ført til et vedlikeholdsetterslep som har påført brukerne av infrastrukturen unødig høye kostnader. Vedlikeholdsetterslepet på riksvegene har vært estimert til 11 milliarder kroner (SVV 2003). I tillegg er det et etterslep av tilsvarende størrelse på fylkesvegene (SVV 2005). Nylig har en serie av mindre hendelser med store konsekvenser for brukerne vist at det finnes et tilsvarende problem på jernbanen. Flere kortsiktige tiltak er iverksatt for å bøte på dette, samtidig som Jernbaneverket har foreslått å konsentrere mye mer av innsatsen i neste nasjonale transportplan om vedlikehold og rehabilitering.

Vi kan vel trygt anta at det er samfunnsøkonomisk lønnsomt å øke vedlikeholdsbudsjettene. Men hvor mye bør de økes med? Hva er egentlig det samfunnsøkonomisk riktige nivået på vedlikeholdet? I hvilken takt bør vi redusere vedlikeholdsetterslepet? Og hvilken standard bør vi tilstrebe på langt sikt for de ulike typene av infrastruktur, sett fra et samfunnsøkonomisk synspunkt?

I Samferdselsdepartementets program for overordnet transportforskning (POT) har TØI fått et prosjekt som skal utvikle *metoder* for å besvare disse spørsmålene. Vi har kalt prosjektet "Vedlikeholdsstrategier". Denne rapporten er sluttrapporten fra dette prosjektet. I kapittel 2 tar vi for oss prinsipper og utvikler formler som kan brukes til å karakterisere optimalt vedlikehold og vurdere vedlikeholdsstrategier under forenklede forutsetninger. Mange av de samme forenklede forutsetningene ligger også til grunn for våre formler for å vurdere størrelsen på vedlikeholdsetterslepet, gjøre nyttekostnadsanalyser av forbedring av vegstandard og finne det samfunnsøkonomisk riktige nivået på vegstandard.

I kapittel 3 løser vi på de forenklede forutsetningene – spesielt forutsetningen om at alle objektene i utgangspunkt er i den best mulige tilstand, og at det eneste

mulige tiltaket er å rehabilitere objektene til sin opprinnelige tilstand med jevne mellomrom. Det mer generelle problemet som da framkommer, er å finne en optimal rehabiliteringsstrategi når objektene har ulik initialtilstand, ulik nedbrytingsgrad osv., men må dele på felles årlige budsjetter. Dette problemet er grunnleggende ekstremt vanskelig. En formulering av problemet og en heuristisk algoritme for å løse det er gitt i Dahl og Minken (2008), og dette må regnes som hovedresultatet i vårt prosjekt. Algoritmen er inkludert i et dataprogram som er programmert for tilfellet med vedlikehold av vegdekker. Artikkelen viser at programmet finner gode løsninger og øvre og nedre grenser for den sanne optimale løsningen i løpet av få sekunder. Kapittel 3 forklarer prinsippene bak problemformuleringen og algoritmen, og gir et eksempel på en slik løsning.

Vi trenger å løse problemet med å finne optimale rehabiliteringsstrategier for å få et solid grunnlag for nyttekostnadsanalyse av å overføre mer midler til vedlikehold. For å kunne beregne nytten må vi nemlig vite hvordan midlene kommer til å bli brukt. Den mest fornuftige antakelsen om det er åpenbart å anta at midlene vil bli brukt på aller beste måte. Men når vi engang har en framgangsmåte for å løse rehabiliteringsproblemet, er vi også i stand til å besvare de andre spørsmålene i prosjektet, som den best mulige takten for å redusere et vedlikeholdsetterslep, nytten av å forbedre vegstandarden og hva som er den samfunnsøkonomisk riktige vegstandarden.

Med utgangspunkt i teoretisk sunne metoder, både under de forenklede forutsetningene i kapittel 2 og de mer generelle forutsetningene i kapittel 3, kan vi lettere se manglene i dagens praksis. Således har vi i kapittel 3 foretatt en vurdering av styrken og svakhetene ved optimeringsrutinene og nytteberegningsverktøyene i noen av de mest brukte kommersielle vedlikeholdsplanleggingsverktøyene, og i kapittel 2 identifiserer vi vilkårlige og økonomisk sett ubegrunnede forutsetninger bak beregningene av vedlikeholdsetterslepet på riks- og fylkesvegene.

Spesielt kritiserer vi "vegkapital"-tilnærmingen til vedlikeholdsplanlegging, både i kapittel 2 og i et eget kapittel, kapittel 4. Vi viser at et begrep om vegkapital som tar utgangspunkt i historiske anleggskostnader eller i gjenanskaffelseskostnaden, ikke er meningsfullt fra et økonomisk synspunkt. Den eneste fornuftige definisjonen av vegkapital er den prospektive, dvs. nåverdien av framtidig nytte av vegen, eller nåverdien av det framtidige tapet om den skulle bli stengt. Men, som våre formler viser, ikke engang vegkapital etter den prospektive definisjonen har noen rolle å spille når det gjelder å formulere optimale vedlikeholdsstrategier. En vedlikeholdsstrategi som sikter mot å opprettholde verdien av vegkapitalen vil tvert imot kunne føre helt galt avsted, uansett hvordan vegkapitalen er definert. Når det gjelder den kostnadsbaserte definisjonen av vegkapital, er det opplagt: Hvis vegen er en dårlig investering, vil det å knytte vedlikeholdsomfanget til investeringskostnaden være å kaste gode penger etter dårlige. Når det gjelder det prospektive vegkapitalbegrepet er tingene litt mer innviklet: I det tilfellet vil kapitalverdien være proporsjonal med trafikkmengden, mens trafikkmengden på sin side åpenbart har en nær forbindelse med hvor raskt vegen brytes ned. Men denne forbindelsen er ikke lineær. Dessuten vil den prospektive kapitalverdien avhenge av om det finnes gode alternative ruter som ikke brukes av trafikken på vår veg unntatt hvis vegen blir stengt. En vedlikeholdspolitik basert på den prospektive kapitalverdien vil derfor trolig innebære et for lavt vedlikeholdsnivå i områder med et tett vegnettverk.

På den andre sida viser kapittel 4 også at den prospektive kapitalverdien kan være en god indikator på sårbarheten av nettverket ved hendelser som medfører stengning av en veg (sjøl om det også finnes andre indikatorer). Den prospektive kapitalverdien kan derfor være en rettesnor for allokering av den typen av vedlikehold som kan forhindre at vegen stenges helt (som for eksempel snøbrøyting), eller for planlegging av oppryddingsinnsats i tilfelle av hendelser.

Resten av dette sammendraget vil dreie seg om å se litt nærmere på innholdet i kapittel 3, som framstiller hovedresultatet i prosjektet.

Ny programvare for å finne optimale rehabiliteringsstrategier

Betrakt et sett av infrastrukture objekter som vil måtte dele på felles årlige vedlikeholdsbudsjetter. Nedbrytingstakten for objektene kan variere. Initialtilstandene kan være hva som helst mellom dårligst mulige og best mulige tilstand. Jo verre tilstand, desto større er brukerkostnadene. Myndighetene rår over en rekke mulige rehabiliteringstiltak med ulik intensitet og kostnad. En rehabiliteringsstrategi er en allokering av rehabiliteringstiltak til hvert av objektene i et visst antall år framover. Problemet er å finne en rehabiliteringsstrategi som minimerer summen av brukerkostnader og vedlikeholdskostnader gitt budsjettbetingelsene og eventuelle krav til sluttstanden for objektene.

Dersom dette problemet (anvendt på vegdekker) kan løses på en effektiv måte, vil et begrenset antall eksperimenter med ulike årlige budsjetter og andre parametere kunne gi oss nyttekostnadsbrøken ved å allokere mer midler til vegvedlikehold, den best mulige tidsprofilen på et løft for å ta inn et vedlikeholdsetterslep, samt den samfunnsøkonomisk beste vegstandarden på langt sikt for de ulike typene av veger.

Ingen praktiske strategiske vegvedlikeholdssystemer i bruk løser dette problemet riktig. Det finske HIPS er trolig det beste, ettersom det gir riktig løsning på problemet med å finne en optimal dekkerehabiliteringsstrategi for et sett av veger når det ikke finnes årlige budsjettrestriksjoner. Dessverre finnes det alltid årlige budsjetter i praksis, og det er de som gjør problemet ekstremt vanskelig. Av den grunn tilbyr man ofte enkle, men uriktige metoder i stedet, i håp om at feilene man gjør, ikke skal ha vesentlig betydning. Noen få akademiske artikler løser versjoner av rehabiliteringsstrategiproblemet, men vi kjenner ikke til om de har vært anvendt i praksis.

I en artikkel i tidsskriftet *Computers & Operations Research* (Dahl and Minken 2008) studerer vi rehabiliteringsstrategiproblemet og modellerer det som et heltalls programmeringsproblem med underliggende struktur som i dynamisk programmering. En heuristisk algoritme med øvre og nedre grenser foreslås. Algoritmen er programmert opp for anvendelse på vegdekkevedlikehold og anvendt på det vi antok å være realistiske tilfeller med hensyn til nedbrytingsrater og kostnader. Resultatene er lovende og tyder på at modeller faktisk lar seg bruke til å finne optimale rehabiliteringsstrategier og gjøre nyttekostnadsanalyse av å endre vedlikeholdsbudsjettet.

Om modellen skal brukes i praksis trenger vi fremdeles å validere våre funksjoner og parametere. Vi tar gjerne imot innspill fra andre forskere og praktikere når det gjelder dette. Vi trenger også å teste ut programmet på et breiere sett av tilfeller. Dersom vi skal åpne for et friere valg av funksjonsformer og anvendelser på andre områder enn vegvedlikehold, trengs det litt ny programmering, og dette er noe vi håper å kunne gjøre i framtida.

Summary:

Cost-benefit analysis of road maintenance and standard improvement strategies for the road network

The general problem of finding an optimal rehabilitation strategy when the objects have different initial states, different rates of degradation, and a shared annual budget, is an extremely complex one. In this report, a problem formulation and an algorithm to solve the problem is offered. Our heuristic algorithm is embedded in software that has been programmed for the road rehabilitation case and is shown to produce solutions, complete with upper and lower bounds, in a few seconds' computer time. As a by-product, our algorithm provides a method to measure the economic costs and benefits of allocating more funds to maintenance.

Introduction and overview

There is a growing awareness in Norway that for a long time, the funds allocated to transport infrastructure maintenance and rehabilitation have been insufficient, creating a maintenance backlog and imposing unnecessary high costs on users. The maintenance backlog on national roads has been estimated to NOK 11 billion (SVV 2003), i.e. more than US \$ 2 billion. In addition, there is a backlog of similar size on regional roads (SVV 2005). More recently, a wave of small incidents with large consequences for users has pointed to a similar problem in the railway sector. Some immediate measures have been taken, and proposals have been made, in the coming National Transport Plan, for a major shift of focus and funds from new infrastructure building to maintenance and rehabilitation.

It may rather safely be assumed that increasing the maintenance budgets is a policy with a positive benefit-cost ratio, but by how much should they be increased? What is the economically efficient level of maintenance? What is the optimal pace of reducing the maintenance backlog? And what is the economically efficient long term level of service of the different infrastructure links?

The Institute of Transport Economics has been commissioned by the Norwegian Ministry of Transport and Communications to provide *methods* to answer these questions. This is the Final Report of the project. Chapter 2 provides principles and develops formulas that may be used to characterise optimal maintenance and assess maintenance policies under simplified assumptions. Under much the same simplified assumptions, we also develop formulas to assess the size of the

backlog, to do cost-benefit analysis of improving the road standard, and to find economically efficient road standards.

In chapter 3 we drop the simplifying assumptions – in particular, the assumption that initially, all objects are in the best possible condition, and that the only possible rehabilitation measure is to restore the objects to their initial conditions at fixed intervals. The ensuing general problem to find an optimal rehabilitation strategy when the objects have different initial states, different rates of degradation etc., is inherently extremely complex. A problem formulation and an algorithm to solve the problem are formulated in Dahl and Minken (2008), which must be considered the main output of the project. The heuristic algorithm is embedded in software that has been programmed for the road rehabilitation case, and is shown in the article to produce solutions, complete with upper and lower bounds, in a few seconds. Chapter 3 explains the principles of the problem formulation and the algorithm and provides an example of a solution.

We need to solve the problem of finding optimal rehabilitation strategies to provide a solid foundation for cost-benefit analysis of transferring marginally more funds to maintenance. This is obvious: To compute the benefits, we need to know how the funds are going to be spent, and what better assumption to make than that they are spent in the best possible way? Once we are able to solve the rehabilitation problem, however, we are also in a position to answer the other questions posed in the project, such as the optimal pace of reducing a backlog, the benefits of improving the road standards (the level of service), and the problem of economically optimal standards.

Having formulated theoretically sound methods, both under the simplifying assumptions of chapter 2 and the more general assumptions of chapter 3, we are in a better position to see the shortcomings of current practice. Thus chapter 3 also contains an assessment of the strengths and weaknesses of the optimisation and cost-benefit modules of some of the commercially available maintenance planning tools, while chapter 2 pinpoints the assumptions behind the calculations of the road maintenance backlog (referred to above) that are arbitrary or unwarranted from an economic point of view.

In particular, the “road capital” approach to maintenance planning is singled out for criticism, in chapter 2 as well as in a chapter of its own, chapter 4. It is shown that a concept of road capital based on historic cost or current investment cost has no economic sense. The only sensible definition of road capital is the prospective definition, i.e., the net present value of future benefits derived from the road, or the net present value of future losses if it were to be closed. However, as shown by our formulas, not even road capital in the prospective sense has any role to play in the formulation of optimal maintenance strategies. On the contrary, a maintenance strategy aiming at upholding the capital value of the road, however defined, may be seriously misleading. In the case of a cost-based concept of capital, this is obvious: If the investment was a bad one, relating the amount of maintenance to the investment cost may be throwing good money after bad. In the case of a prospective concept of road capital, the argument is slightly more complex: In this case, the capital value will be proportional to the traffic flow, which in turn obviously has a close relationship to the wear and tear of the road. However, this latter relationship is not linear. Furthermore, the prospective capital

value depends on the availability of alternative routes that are not actually used by the traffic on the road in question unless it closes down. Thus a maintenance policy based on the prospective capital value will probably mean too low a level of maintenance in districts with a dense road network.

On the other hand, chapter 4 also shows that, even if other indicators exist, the prospective capital value of a road may be a good indicator of the vulnerability of the road network with respect to incidents that close this road. Thus the prospective capital value may be a guide to the allocation of forms of maintenance (such as snow clearance) or incident management that keeps the road from closing down altogether.

The rest of this summary is devoted to a closer look at the contents of chapter 3, which contains the main results of the project.

New software to find optimal rehabilitation strategies

Consider a set of infrastructure objects that will have to share the same annual maintenance budgets. Their rates of deterioration may differ. Their initial states may be anything between the best possible and the worst possible. The worse the state, the higher the user costs. The agency in charge has at its disposal a number of rehabilitation activities of different intensity and cost. A rehabilitation strategy consists in the allocation of rehabilitation activities to the different objects for a number of future years, subject to annual budgets. The problem is to find a rehabilitation strategy which minimises the sum of user costs and agency cost subject to the budget constraints and constraints on end states.

If this problem – applied to road pavements – could be solved efficiently, a limited number of experiments with the annual budgets and other parameters could establish the benefit-cost ratio of allocating more money to maintenance, the best time profile for the budgets as well as the long-run average states to be aimed at for the different classes of road.

All practical strategic road maintenance systems at present fail to solve this problem. The Finnish HIPS is probably the best, as it solves correctly the problem of finding welfare optimal pavement rehabilitation strategies for a set of roads when there are no annual budget constraints. Unfortunately, annual budget constraints do exist and are known to make the problem extremely complex. Therefore, simple but incorrect methods are often offered instead, in the hope of not getting too far off the mark. A few articles in the academic literature solve versions of the rehabilitation strategy problem, but we do not know if they have been put to practical use.

In a recent article in the journal *Computers & Operations Research* (Dahl and Minken 2008), we study the rehabilitation strategy problem and model it as an integer programming problem with underlying dynamic programming structure. A heuristic algorithm with upper and lower bounds for the solution is proposed. The algorithm has been programmed for the road pavement application and applied to what we thought were realistic cases with respect to deterioration rates and costs. The results are promising and indicate that the model might indeed be applied to

find optimal pavement rehabilitation strategies and do cost-benefit analysis of maintenance budget changes.

For practical applications we still need to validate our functions and parameters. Suggestions from other researchers and practitioners are welcomed. We also need to test the software on a wider range of cases. A wider choice of functional forms and applications to other types of infrastructure will require some reprogramming, which we hope to be able to do in the future.

1 Innledning

I Norge er det 92 000 kilometer offentlig veg av ulikt slag (riksveg, fylkesveg, kommunal veg) og av ulik standard, fra motorveg til smale grusveger. I tillegg finns andre infrastrukturelementer i vegnettet, som bruer og ferjekaier. *Vedlikehold* av dette vegsystemet er en stor og komplisert oppgave av største betydning for framkommelighet, sikkerhet og kjørekomfort i hele landet. Likevel er vegenes tilstand mange steder ganske dårlig. I følge vegvesenet og andre som har studert dette, har det i de seinere åra bygd seg opp et vedlikeholdsetterslep på 11 milliarder kroner i riksvegnettet (SVV 2003) og like mye i fylkesvegnettet (SVV 2005). Det er derfor sannsynlig at det vil være samfunnsøkonomisk lønnsomt å øke vedlikeholdsbudsjettet, hva enten det skjer ved å overføre midler fra nybygging eller ved å øke de samlede bevilgningene til vegformål.

Det må være riktig å si at vi mangler et strategisk planleggingsverktøy som kan sikre at vedlikeholdsmidler i riktig mengde allokeres dit hvor de gir størst samfunnsøkonomisk utbytte. Riktignok er det her i landet, som i andre land, bygd opp systemer for å registrere vegenes tilstand og planlegge vedlikeholdet av den enkelte veg. Men disse systemene tar ikke systematisk hensyn til at det samlede budsjettet er begrenset, og kan heller ikke si oss hva vi kan vinne på å øke budsjettet.

Likeledes er det et stort gap mellom den *standard* vegene burde ha i følge vegvesenets såkalte vegnormaler, og den standarden de faktisk har. Dette skyldes delvis at mange veier er bygd før vegnormalene blei utformet, delvis at vegnormalene har blitt skjerpet i takt med trafikkmengdene og samfunnets krav til akseltrykk, fart, og trafiksikkerhet, og delvis at noen veger har forfalt. Det er beregnet at det vil koste hele 200 milliarder å bringe alle veger opp til fullgod standard, dvs. at de tilfredstiller vegnormalenes krav til vegbredde, bæreevne, kurvatur osv.

Det man imidlertid ikke veit, er om det ville være samfunnsøkonomisk lønnsomt å gjøre det, dvs. om vegnormalene er utformet *samfunnsøkonomisk optimalt*. En enkel samfunnsøkonomisk betraktning skulle tilsi at man økte standarden inntil det punkt hvor kostnaden ved å øke den ytterligere var lik gevinstene for brukerne (tidsgevinster, ulykkesreduksjoner m.m.). Men kostnaden avhenger av hvilke metoder som kan utvikles for å gjennomføre oppgraderingsarbeidene, og det er for øyeblikket et felt under utvikling. Heller ikke gevinstene er alltid så lette å tallfeste.

Det må være riktig å si at når det gjelder spørsmålet om utforming av samfunnsøkonomisk begrunnede standarder og allokering av midler til standardforbedring, mangler det ikke bare et strategisk planleggingsverktøy, men også en del kunnskaper og erfaringer på mer detaljert nivå.

I prosjektet "Vedlikeholdsstrategier" som gjennomføres på TØI for samferdselsdepartementet under programmet for overordnet transportforskning (POT), har vi utviklet et verktøy som vil kunne brukes ved strategisk planlegging av vedlike-

hold og rehabilitering av vegdekker. Et hovedformål er å avgjøre om det vil være samfunnsøkonomisk lønnsomt å øke budsjettet som er avsatt til slike formål. Med visse tilpasninger kan det samme programmet også løse tilsvarende oppgaver i de andre samferdselsetatene, ja, på nær sagt et hvilket som helst område hvor oppgava er å ta vare på funksjonaliteten til en samling av likeartede objekter, gitt felles årlige budsjetter. I kapittel 3 i denne rapporten gjør vi greie for dette programmet, bruksområder, begrensninger og utviklingsmuligheter.

Men først vil vi i kapittel 2 klarlegge begrepene og problemstillingene. Vi gjør dette ved hjelp av et sett av stiliserte modeller som vi kan trekke noen allmenne konklusjoner fra. På et grovt, strategisk nivå kan disse modellene også gi oppskrift på hvordan en skal nyttekostnadsberegne utbedringstiltak på det eksisterende vegnettet, og hvordan en skal foreta en samfunnsøkonomisk vurdering av de eksisterende vegnormalene.

Et statsprosjekt i vegvesenet har studert begrepet vegkapital, hvordan vegkapitalen skal beregnes og hvilken bruk en kan gjøre av dette begrepet i strategisk planlegging av vedlikehold og utbedring (se <http://www.vegkapital.net>). I avsnitt 2.3.1 og kapittel 4 argumenterer vi mot at begrepet vegkapital, slik det nå operasjonaliseres, kan spille noen positiv rolle i planleggingen.

Det er en god tanke at målet om å opprettholde vegkapitalen skal kunne lede oss til å sette riktige mål for vedlikeholdspolitikken, og det er liten tvil om at en på en eller annen måte må gjøre noe med det nåværende vedlikeholdsetterslepet og med vegstandarden. Men en riktig politikk på disse områdene må i første rekke ta sikte på et samfunnsøkonomisk godt resultat for den *framtidige* trafikken. I den forbindelsen spiller det liten rolle hvor mye penger som *historisk* sett er nedlagt i vegsystemet (Pritchett 1996, 2000).

I dette landet bygges det veger med mange slags begrunnelser som ikke har med samfunnsøkonomi å gjøre. Det innebærer at investeringsbeløpet bare i begrenset grad blir omdannet til samfunnskapital. Anta at det finnes to veger med samme standard, en med stor og en med liten trafikk i framtida, og at de to vegene er bygd samtidig. Å vedlikeholde og oppgradere den sistnevnte vegen på samme måte som den førstnevnte, bare fordi standarden og det investerte beløpet pr. kilometer i utgangspunktet var det samme, innebærer et samfunnsøkonomisk tap.

Et fornuftig begrep om hva vegkapital er, vil måtte få fram dette. Å beregne vegkapitalen med utgangspunkt i det investerte beløpet er i virkeligheten å late som om alle veger som har blitt bygd, hadde samme netto nytte pr. budsjettkrone da de blei bygd (nemlig 0). I tillegg må alle trafikk tall og anleggskostnader på planleggingsstadiet vise seg i etterkant å være riktige. Å bygge på slike feilaktige forutsetninger i vedlikeholdspolitikken er dårlig samfunnsøkonomi, og må i tilfelle begrunnes med fordelingspolitiske og distriktspolitiske argumenter, ikke med argumenter som tilsynelatende er samfunnsøkonomiske.

Å beregne behovet for oppgradering med utgangspunkt i gjeldende vegnormaler er på samme måte å anta at disse standardene kan begrunnes samfunnsøkonomisk. Det kan de jo ikke (Lerfald m.fl. 2004). Det er trolig at vegnormaler i et land som Norge bør utformes som et kompromiss mellom samfunnsøkonomi og fordelingshensyn, men det bør gjøres åpent. Argumenter som utgir seg for å være samfunnsøkonomiske uten å være det, kan dekke over ikke bare legitime fordelingspolitiske interesser, men også mindre forsvarlige partsinteresser.

2 Levetid, utbedringer og fastsettelse av standarder

I dette kapitlet skal vi diskutere om – og i tilfelle hvordan – begrepet levetid lar seg anvende på infrastruktur. Vi skal bruke en stilisert modell til å finne et kriterium på optimal levetid for objekter som regelmessig må anskaffes på nytt. Deretter skal vi forandre modellen slik at den passer for tilfellet der vesentlige deler av konstruksjonen kan være ”evig”, forutsatt at andre deler byttes ut eller rehabiliteres jevnlig. Denne modellen passer bedre for infrastruktur, men forutsetningene vil fremdeles være urealistisk enkle. Når vi har utledet en regel for hvor ofte rehabiliteringen bør skje under de forenklete forutsetningene, skal vi se hvordan vi på dette grunnlaget kan nyttekostnadsberegne standardforbedringer. Til slutt skal vi se hva som kjennetegner økonomisk sett riktig standard på infrastrukturen.

2.1 Begrepet levetid

Med den tekniske levetida til et objekt vil vi mene det antall år objektet kan forventes å tjene sin hensikt på en kostnadseffektiv måte. Med den økonomiske levetida til et objekt mener vi den minste av to størrelser, den tekniske levetida og det forventede antall år til behovet for – eller etterspørselen etter – objektet faller vekk. Når vi snakker om levetida, rett og slett, antar vi at behovet for objektet ikke vil falle vekk før den tekniske levetida er utløpt.

Enkeltkomponenter i systemer eller konstruksjoner kan ofte fungere perfekt helt til de plutselig bryter sammen. Det gjelder for eksempel lyspærer, harddisker og automatgir. Levetida er da en stokastisk variabel med en viss sannsynlighetsfordeling. Hvis sammenbruddet medfører store forstyrrelser eller kostnader, vil det lønne seg å bytte ut komponenten mens sannsynligheten for sammenbrudd enda er lav. Den tekniske levetida til komponenten er da den alderen hvor det lønner seg å bytte den ut.

De fleste typer av infrastruktur inneholder ingen slike komponenter. Derimot vil de enkelte elementene av infrastrukturen gradvis brytes ned og miste sin funksjonalitet. Dette avspeiler seg enten som økte (og økende) kostnader for de som bruker infrastrukturen, eller som økte vedlikeholdskostnader for å bevare en gitt funksjonalitet, eller en kombinasjon av dette. Når det gjelder veier, tunneler og jernbanespor, vil det være visse elementer som har en for alle praktiske formål uendelig levetid. Andre deler vil bare være utsatt for nedbryting dersom bruken eller miljøet utsetter dem for kraftigere påvirkning enn de er konstruert for. Atter andre deler brytes gradvis ned ved ordinær bruk og vanlige miljøbelastninger, og må fornyes med jevne mellomrom. Det som skjer er nedbryting, ikke sammenbrudd. Problemstillingen er å finne ut når de nedbrytbare elementene i konstruksjonen ikke lenger fungerer kostnadseffektivt.

Derfor er det ikke særlig meningsfullt å snakke om levetida til en veg, en tunnel eller et jernbanespor. I stedet kan og bør vi snakke om levetida til de enkelte elementene av infrastrukturen.

For de fleste objektene av typen transportinfrastruktur har vi ingen grunn til å tru at behovet for objektet noensinne faller vekk. Det vil for eksempel være tilfelle for de fleste veger. For de fleste transportformål er det ikke noe som i dag tyder på at vi kan komme til å klare oss uten bilen – eller i det minste et eller annet redskap som har bruk for veg.

Beslutningssituasjonen vi skal behandle i dette kapitlet, har derfor følgende kjennetegn:

1. Det er gjennomført – eller skal gjennomføres – en investering i et objekt som det vil være behov for eller etterspørsel etter i all framtid, så langt vi nå kan se.
2. Visse elementer av denne investeringen har uendelig levetid.
3. Andre elementer må fornyes i en uendelig kjede av gjentatte investeringer. Dette kaller vi rehabilitering.
4. Tida mellom hver slik investering kan vi kalle levetida til dette elementet. I løpet av levetida vil elementet gradvis brytes ned og kostnaden ved bruken av infrastrukturen og/eller vedlikeholdet øke på en forutsigelig måte.

For enkelhets skyld vil vi i tillegg forutsette følgende:

5. Etterspørselen etter å bruke objektet er konstant, og det skjer ingen teknologiske endringer som påvirker nedbrytingsrater, vedlikeholdskostnader, brukerkostnader eller rehabiliteringskostnader.
6. Etter den opprinnelige investeringen har objektet den best oppnåelige tilstand. Seinere gjenanskaffelser eller rehabilitering vil bringe oss tilbake til denne tilstanden, men kan ikke forbedre den.
7. Når det gjelder gjenanskaffelser, er den eneste valgmuligheten å anskaffe samme type objekt om igjen til samme pris. Når det gjelder rehabilitering, er eneste valgmulighet å rehabilitere til opprinnelig standard og funksjonsdugelighet. Dette vil koste mer jo lengre tid som er gått.

Det er de siste tre forutsetningene som vil bli opphevet i kapittel 3. Der vil vi også oppheve forutsetningen om at tida mellom to rehabiliteringstiltak skal være konstant, samt at rehabiliteringstiltakene skal gjentas i en uendelig kjede.

2.2 Optimal levetid

En modell for optimal levetid er som nevnt lite aktuell for infrastruktur. Den egner seg derimot for å beregne optimal utskiftingstakt og årlig kapitalkostnad for rullende materiell. Modellen er tidligere skissert i Minken et al (2001), side 151-152. Vi tar den med og utdypet den her for å vise likhet og forskjeller mellom dette tilfellet og tilfellet med rehabilitering av infrastruktur.

La c_0 være kostnaden ved å anskaffe objektet. E er den konstante inntekten eller nytten pr. år ved å bruke objektet, og $g(t)$ er kostnaden ved å bruke objektet som funksjon av tida siden anskaffelsen. I en bedriftsøkonomisk sammenheng er $g(t)$ drifts- og vedlikeholdskostnadene, som vil øke med alderen.¹ I en samfunnsøkonomisk sammenheng omfatter det i tillegg brukernes ekstrakostnader som følge av at objektet brytes ned med alderen, til tross for det rutinemessige vedlikeholdet. I tilfellet med rehabilitering av vegdekke vil for eksempel ujammheter, spordannelse og oppsprekking medføre redusert fart, økte kostnader til vedlikehold av kjøretøyene og økt ulykkesrisiko.² Under enhver omstendighet kan vi regne med at $g(t)$ er tiltakende og konveks i det området av t som er av interesse.

Vi vil videre regne med en skrapverdi $s(t)$, som er en inntekt eller kostnad som påløper ved utløpet av levetida. Hvis det finns et annenhåndsmarked for objektet, er $s(t)$ bruktpriisen. I dette tilfellet er det rimelig å anta at den deriverte av $s(t)$ er negativ. Det er også sannsynlig at den dobbeltderiverte er positiv, dvs. at $s(t)$ er konveks, slik det for eksempel er tilfelle for bruktbilpriser. Men $s(t)$ kan også godt være negativ, som kostnaden ved å hogge opp skip, eller generelt kostnaden ved å demontere og frakte vekk den gamle maskinen eller det gamle anlegget og rydde opp der det sto. Hvis $s(t)$ er en slik oppryddingskostnad, kan den være tilnærmet konstant.

Vi regner tida som kontinuerlig, og regner med kontinuerlig forrentning med rentefot ρ . Alderen på objektet ved utskifting kaller vi n . Oppgava er å bestemme n slik at samfunnsøkonomisk eller bedriftsøkonomisk nytte av en uendelig kjede av gjenanskaffelser hvert n -te år blir størst mulig. Nytte og kostnader i en enkelt periode på n år vil være $V(n)$:

$$(2.1) \quad V(n) = -c_0 + \int_0^n (E - g(t)) e^{-\rho t} dt + s(n) e^{-\rho n}$$

Vi ser at netto nytte i hvert driftsår, $E - g(t)$, neddiskonteres til anskaffelsesåret (år 0) ved hjelp av diskonteringsfaktoren $e^{-\rho t}$. Likeledes er skrapverdien neddiskontert til år 0. Nåverdien av en uendelig kjede av bruksperioder, der all nytte og alle kostnader er neddiskontert til begynnelsen av perioden, kan vi enten finne ved det prinsippet for dynamisk programmering som er brukt i Minken et al (2001), eller ved å anvende formelen for summen av en uendelig geometrisk rekke. Vi kaller denne nåverdien $W(n)$, og har altså:

$$(2.2) \quad \begin{aligned} W(n) &= \sum_{i=0}^{\infty} V(n) e^{-i\rho n} = V(n) (1 - e^{-\rho n})^{-1} \\ &= (1 - e^{-\rho n})^{-1} \left\{ -c_0 + \int_0^n (E - g(t)) e^{-\rho t} dt + s(n) e^{-\rho n} \right\} \end{aligned}$$

¹ Eventuelle økte drifts- og vedlikeholdskostnader i startfasen som følge av barnesjukdommer må vi tenke oss er inkludert i anskaffelseskostnaden c_0 .

² Eventuelle ulemper for brukerne i forbindelse med sjølve reasfalteringen må vi tenke oss inkludert i anskaffelseskostnaden c_0 .

Den verdi av n som maksimerer $W(n)$ kaller vi den optimale levetida, n^* . Vi finner n^* ved å derivere $W(n)$ og sette den deriverte til 0. Etter litt regning kan vi skrive den deriverte $W'(n)$ slik:

$$\begin{aligned} W'(n) &= \frac{e^{-\rho n}}{1 - e^{-\rho n}} \left[\frac{\rho}{1 - e^{-\rho n}} \left(c_0 + \int_0^n g(t) e^{-\rho t} dt - s(n) \right) - (g(n) - s'(n)) \right] \\ &= \frac{e^{-\rho n}}{1 - e^{-\rho n}} [A(n) - B(n)] \end{aligned}$$

(2.3) der

$$\begin{aligned} A(n) &= \frac{\rho}{1 - e^{-\rho n}} \left(c_0 + \int_0^n g(t) e^{-\rho t} dt - s(n) \right) \\ B(n) &= g(n) - s'(n) \end{aligned}$$

Følgelig er n^* løsningen av likningen

$$(2.4) \quad \frac{\rho}{1 - e^{-\rho n}} \left(c_0 + \int_0^n g(t) e^{-\rho t} dt - s(n) \right) = g(n) - s'(n)$$

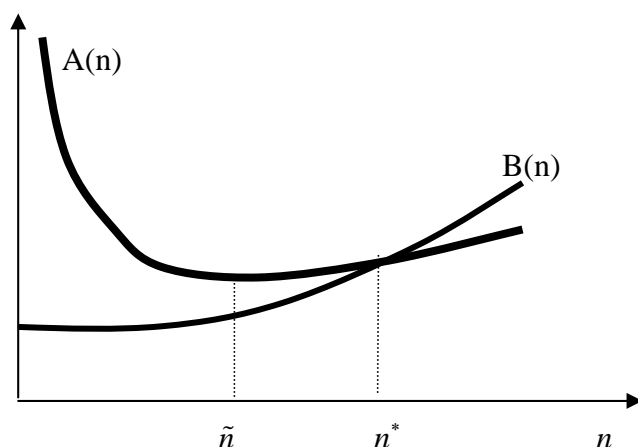
Den økonomiske tolkninga av likning (2.4) er slik: Betrakt problemstillingen som oppstår når vi skal anskaffe vårt objekt for andre gang. Hvis vi velger å gjøre det i år n (og deretter hvert n -te år), er venstresida i (2.4) annuiteten av strømmen av nytte og kostnader i alle påfølgende år. Høyresida er det det koster oss å beholde objektet i ytterligere ett år, dvs. drifts-, vedlikeholds- og brukskostnadene $g(n)$ pluss tapet av skrapverdi ved å vente ett år med å selge objektet, $-s'(n)$. I siste leveår i perioden skal altså den marginale kostnaden ved å forlenge perioden med ett år være lik den "gjennomsnittlige" årlige kostnaden ved å følge en tilsvarende politikk i all framtid (hvis vi kan kalle annuiteten det). Som vi viser nedafor, vil en for rask utskifting kjennetegnes ved at høyresida er mindre enn venstresida, men hvis vi venter for lenge, vil høyresida bli større enn venstresida.

Dette skulle gi gode muligheter for å anslå n^* i et konkret tilfelle ved å spesifisere c_0 og funksjonene g og s .

Det er interessant og viktig at den konstante nytten ved bruk, E , ikke har noen betydning ved fastsettelse av levetida. Det skal vi komme tilbake til i neste avsnitt. Men alle andre parametre vil påvirke levetida. Spesielt merker vi oss at levetida er avhengig av renta. Vi har kalt det den tekniske levetida, men det er ingen størrelse som kan beregnes med bare tekniske data.

Det framgår av (2.3) og (2.4) at W når sitt maksimum der $A(n) = B(n)$. I Diagram 1 er kurvene $A(n)$ og $B(n)$ framstilt. I Vedlegg 1 er forløpet av de to kurvene begrunnet.

Diagram 1.



TØI-rapport 957/2008

Her er \tilde{n} et minimumspunkt for $A(n)$, og n^* er minimumspunktet for $W(n)$, siden $A(n^*) = B(n^*)$. I minimumspunktet for W vil både $A(n)$ og $B(n)$ være tiltakende, men $B(n)$, kostnaden ved å beholde objektet i et nytt år, stiger sterkere enn $A(n)$, den gjennomsnittlige kostnaden i alle framtidsår.

2.3 Optimal rehabiliteringssyklus

Infrastruktur, som veger, jernbanelinjer, tunneler og flystriper, er ikke gjenstand for gjentatt hel utskifting og gjenanskaffelse slik som objektene i forrige avsnitt. De dypere lag av slike konstruksjoner er i svært liten grad utsatt for nedbryting ved ordinær bruk, og trenger derfor ikke å skiftes ut. Hovedsakelig er det det øverste laget – vegdekket, skinnegangen – som brytes ned med tida og trenger å fornyes. Et nedslitt vegdekke eller en nedslitt skinnegang påfører brukerne ekstra-kostnader i form av større slitasje på kjøretøy, lavere fart og større ulykkesrisiko. Dårlig ordinært vedlikehold og utsatt rehabilitering kan dessuten medføre at større deler av konstruksjonen bli skadet, hvilket igjen vil føre til enda mye større brukerkostnader.

For å modellere denne situasjonen trenger vi å gjøre to endringer i modellen fra forrige avsnitt. For det første vil den opprinnelige anleggskostnaden c_0 bare forekomme en gang. For det andre finns det ingen skrapverdi s . Brukte veger kan ikke omsettes i noe brukmarked, og vil sjelden tas i bruk for andre formål. I stedet opptrer det en rehabiliteringskostnad $r(n)$ – første gang n år etter åpning, og deretter hvert n -te år, skal vi anta. Det er rimelig å anta $r(0) = 0$ og $r'(n) > 0$.

Netto nytte av et slikt infrastrukturobjekt med en uendelig kjede av gjentatte rehabiliteringer er $W(n)$:

$$\begin{aligned}
 (2.5) \quad W(n) &= -c_0 + \sum_{i=0}^{\infty} e^{-i\rho n} \int_0^n (E - g(t)) e^{-\rho t} dt - \sum_{i=1}^{\infty} e^{-i\rho n} r(n) \\
 &= -c_0 + (1 - e^{-\rho n})^{-1} \left\{ \int_0^n (E - g(t)) e^{-\rho t} dt - r(n) e^{-\rho n} \right\}
 \end{aligned}$$

Legg merke til at den andre summen i første linje går fra $i = 1$, ikke $i = 0$. Det er grunnen til at rehabiliteringskostnaden i andre linje er neddiskontert til starten av perioden. Mens skrapverdien var en inntekt som blei mindre med alderen, er rehabiliteringskostnaden en utgift som blir større med alderen.

Den verdi av n som maksimerer $W(n)$ kaller vi den optimale rehabiliteringstakten, n^* . Vi kunne også kalle det vegdekkets optimale levetid. Vi finner n^* ved å derivere $W(n)$ og sette den deriverte til 0. Etter litt regning kan vi skrive den deriverte $W'(n)$ slik:

$$\begin{aligned} W'(n) &= \frac{e^{-\rho n}}{1-e^{-\rho n}} \left[\frac{\rho}{1-e^{-\rho n}} \left(\int_0^n g(t) e^{-\rho t} dt + r(n) \right) - (g(n) + r'(n)) \right] \\ &= \frac{e^{-\rho n}}{1-e^{-\rho n}} [G(n) - H(n)] \end{aligned}$$

(2.6) der

$$\begin{aligned} G(n) &= \frac{\rho}{1-e^{-\rho n}} \left(\int_0^n g(t) e^{-\rho t} dt + r(n) \right) \\ H(n) &= g(n) + r'(n) \end{aligned}$$

Vi finner den optimale rehabiliteringstakten ved å sette $W'(n) = 0$, hvilket gir oss følgende likning til å bestemme n^* :

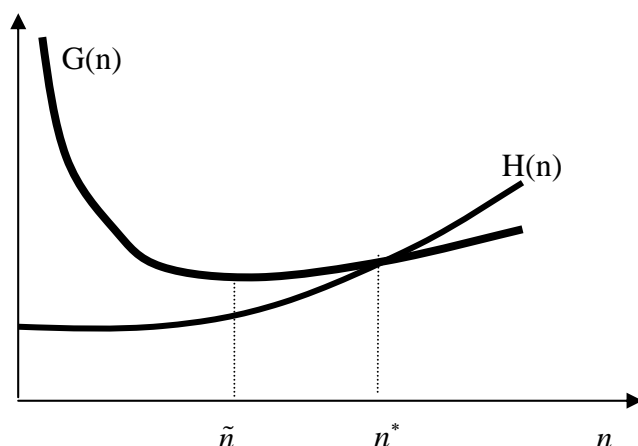
$$(2.7) \quad \frac{\rho}{1-e^{-\rho n}} \left(\int_0^n g(t) e^{-\rho t} dt + r(n) \right) = g(n) + r'(n)$$

Bortsett fra at skrapverdien er erstattet med rehabiliteringskostnaden, er den eneste forandringen i (2.7) i forhold til (2.4) at den opprinnelige investeringskostnaden c_0 ikke spiller noen rolle for den optimale tilpasningen. I denne modellen er c_0 å betrakte som en sunk cost. Vår mulighet til å påvirke W inntreffer seinere, ved første rehabilitering. Siden vi ikke trenger å fornye objektet fullstendig, er funksjonene $g(n)$ og $r(n)$ og renta ρ det eneste vi trenger for å bestemme n^* .

Den økonomiske tolkningen av løsningen er den samme som i forrige tilfelle: Venstresida i (2.7), dvs. annuiteten av strømmen av nytte og kostnader i alle år etter første rehabilitering, skal være lik høyresida, det det koster oss å beholde objektet i ytterligere ett år, dvs. drifts-, vedlikeholds- og brukskostnadene $g(n)$ pluss den marginale økningen i rehabiliteringskostnaden ved å vente ett år med rehabiliteringen, $r'(n)$.

Det framgår av (2.6) og (2.7) at W når sitt maksimum der $G(n) = H(n)$. I Diagram 2 er kurvene $G(n)$ og $H(n)$ framstilt. Vi ser at begge kurvene (begge typer av kostnader) har samme forløp som $A(n)$ og $B(n)$ hadde i forrige avsnitt. I vedlegg 1 er forløpet av de to kurvene begrunnet.

Diagram 2



TØI-rapport 957/2008

2.3.1 Eksistensverdi og kapitalverdi

Som i forrige modell vil den konstante nytten ved bruk, E , ikke ha noen betydning ved fastsettelse av levetida. E kan representere den brutto ulempe eller det brutto tapet som eieren av objektet ville bli påført hvis objektet ikke var tilgjengelig i et år (i det bedriftsøkonomiske tilfellet), eller den brutto ulempe eller det brutto tapet som brukerne av objektet ville bli påført hvis objektet ikke var tilgjengelig i et år (i det samfunnsøkonomiske tilfellet). Ser vi for eksempel på en veg, vil stenging av vegen medføre at brukerne må finne alternative ruter eller transportmåter, eller de må bli hjemme. Forskjellen mellom deres nytte av vegen og nytten av deres nestbeste handlingsalternativ, er E .³

Innledningsvis framholdt vi at dersom begrepet om vegkapital (eller mer generelt, samferdselskapital) skal ha noen fornuftig mening, vil det måtte defineres som nåverdien av det vegen kaster av seg i framtida. I tilfellet med en privat, bomfinansiert veg vil dette være nåverdien av bompengene minus driftskostnadene. I en samfunnsøkonomisk sammenheng må vi ta med nytte og kostnader for alle som blir berørt. Anleggskostnaden inngår derimot ikke i begrepet om vegkapital. Det er kostnaden ved å frambringe kapitalen, dvs. frambringe den framtidige netto nyttestrømmen. Vegkapitalen er altså rett og slett $W(n) - c_0$! Vi kaller denne størrelsen $K(n)$. For å klargjøre hva som bestemmer denne kapitalens størrelse, kan vi splitte opp integralet i (2.5) og sette E utenfor klammeparentesen. Når vi samtidig trekker fra c_0 , får vi:

$$(2.8) \quad K(n) = \rho^{-1}E - (1 - e^{-\rho n})^{-1} \left\{ \int_0^n g(t) e^{-\rho t} dt + r(n) e^{-\rho n} \right\}$$

Vi skal kalle E/ρ for objektets eksistensverdi. Åpenbart vil eksistensverdien inngå som den vesentlige bestanddelen i kapitalverdien av objektet dersom kapital-

³ Strengt tatt hører det med i en samfunnsøkonomisk vurdering av E at vegholderen, som vil spare vedlikeholdsutgifter på vegen, kan bli påført større vedlikeholdskostnader på de alternative vegene. I tilfelle kø vil dessuten brukerne av de andre vegene bli påført en ekstrakostnad.

verdien defineres som nåverdien av den framtidige nyttestrømmen som objektet kan gi. Men utskiftings- og vedlikeholdspolitikken kan bestemmes uten å kjenne E , og omvendt medfører E at det ikke er mulig å slutte fra kapitalverdien av objektet direkte til utskiftings- og vedlikeholdspolitikken. Eksistensen av nytteelementer som ikke avhenger av hvordan objektet vedlikeholdes og utbedres, men bare av at det finns, vil bryte det enkle sambandet mellom kapitalverdi og vedlikeholds- og utskiftingspolitikken.

Den enkle grunnen til at noen vil identifisere c_0 og E/ρ og sette inn c_0 i stedet for E/ρ i formel (2.8), er at i et perfekt og fritt kapitalmarked vil profittmaksimerende produsenter anskaffe kapital inntil kostnaden c_0 ved å gjøre det er lik avkastningen E/ρ som det kan gi. Men når det gjelder offentlig infrastruktur, er det mange grunner til å en slik likhet ikke vil gjelde. For det første tilfaller ikke all nytte det offentlige, og det offentlige bærer ikke alle kostnader. For det andre er det offentlige ingen profittmaksimerer. For det tredje er det offentlige ikke heller maksimerer av samfunnsøkonomisk overskudd. Det veit vi godt – veger bygges uansett samfunnsøkonomisk lønnsomhet. For det fjerde kan både det offentlige og private produsenter gjøre feil i planlegging og prosjektgjennomføring, slik at det som var ment å være kapital, ikke overhode fungerer som kapital (såkalte hvite elefanter), eller bare fungerer som kapital i begrenset utstrekning. I så fall ville private ha måttet nedskrive kapitalen, slik at den ikke lenger tilsvarte anskaffelseskostnaden. Det offentlige kan, om man vil, gjøre noe tilsvarende, men det vil kreve omfattende beregninger av den samfunnsøkonomiske lønnsomheten av alle de veger som allerede er bygd. For vedlikeholdspolitikken vil slike beregninger være overflødige, men de kan ha en funksjon i nasjonalregnskapet og i analyser av vegpolitikkenes virkninger på den økonomiske veksten.

Vi vender tilbake til spørsmålet om vegkapital i et eget kapittel.

2.4 Optimal rehabilitering av mange objekter under en budsjettrestriksjon

Offentlige etater, som for eksempel vegvesenet, er underlagt budsjettrestriksjoner. Vi må nå øke realismen i vår modell ved å ta hensyn til det. Til å begynne med kan vi skille klarere mellom kostnader som bæres av brukerne og kostnader som bæres av det offentlige. Vår funksjon $g(t)$ består av brukerkostnader og vedlikeholdskostnader. I dette avsnittet vil vi derfor dele opp $g(t)$ i de to delene:

$$g(t) = g_b(t) + g_v(t)$$

Siden optimal rehabilitering er et spørsmål om å avveie brukerkostnader og vedlikeholdskostnader mot rehabiliteringskostnader, er det ganske meningsløst å operere med to separate budsjetter for vedlikehold og rehabilitering, uten mulighet for overføring mellom dem. Det gjør man da heller ikke i praksis.

Videre er det klart av infrastruktur som regel består av mange likeartede objekter, som atskiller seg fra hverandre ved bl.a. hvor solid de er bygd og hvor mange som bruker dem. Vi antar derfor nå at det finns L objekter indeksert med j , alle brakt opp til den best mulige tilstand i år 0 ved hjelp av initielle investeringer

$\mathbf{c}_0 = (c_{01}, \dots, c_{0j}, \dots, c_{0L})$. De skal vedlikeholdes og rehabiliteres innenfor et felles gjennomsnittlig budsjett på B kroner pr. år. Budsjettmidler kan overføres fra det ene året til det andre, slik at vi tar hensyn til at omfanget av rehabilitering varierer fra år til annet. Kostnadsfunksjonene kan godt være forskjellige. Det markeres ved å sette indeks på dem. Den optimale rehabiliteringstakten for hvert objekt $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_L)$ skal bestemmes. Budsjettrestriksjonen er:

$$(2.9) \quad \sum_j \frac{1}{1 - e^{-\rho n_j}} \left\{ \int_0^{n_j} g_{vj}(t) e^{-\rho t} dt + r_j(n_j) e^{-\rho n_j} \right\} \leq \frac{B}{\rho}$$

Målfunksjonen som skal optimeres er $W(\mathbf{n})$:

$$(2.10) \quad W(\mathbf{n}) = \sum_j \left\{ \left(\frac{E_j}{\rho} - c_{0j} \right) - \frac{1}{1 - e^{-\rho n_j}} \left[\int_0^{n_j} (g_{bj}(t) + g_{vj}(t)) e^{-\rho t} dt + r_j(n_j) e^{-\rho n_j} \right] \right\}$$

La oss kalle skyggeprisen på budsjettrestriksjonen μ . Den vil være positiv. I tillegg til (2.9) vil det være L førsteordensbetingelser for optimum, en for hvert objekt. For $j = 1, \dots, L$ vil førsteordensbetingelsene kunne skrives slik:

$$(2.11) \quad \begin{aligned} G_j(n_j) - H_j(n_j) &= (-1) \frac{\mu}{1 + \mu} \left[\frac{\rho}{1 - e^{-\rho n_j}} \int_0^{n_j} g_{bj}(t) e^{-\rho t} dt - g_{bj}(n_j) \right] \\ \text{der} \\ G_j(n_j) &= \frac{\rho}{1 - e^{-\rho n_j}} \int_0^{n_j} (g_{bj}(t) + g_{vj}(t)) e^{-\rho t} dt + r_j(n_j) \\ H_j(n_j) &= (g_{bj}(n_j) + g_{vj}(n_j)) + r_j'(n_j) \end{aligned}$$

Ut fra dette finns det tre muligheter:

1. Budsjettbetingelsen er ikke bindende. Løsningen for hver av objektene er da den samme som vi behandlet i forrige avsnitt og viste i Diagram 2.
2. Budsjettbetingelsen er for stram til at det finnes noen mulighet til å bringe de L objektene regelmessig opp til den initielle standarden. I dette tilfelle vil ett eller flere av objektene forfalle mer og mer, og det oppstår et såkalt vedlikeholdsetterslep.
3. Budsjettbetingelsen lar seg tilfredsstillende og er bindende, dvs. skyggeprisen er positiv. Siden klammeparentesen i (2.11) alltid er negativ, vil da kurva G_j ligge over H_j i løsningspunktet, dvs. den optimale rehabiliteringstakten under budsjettrestriksjonen er langsommere enn uten en slik restriksjon (se Diagram 2).⁴

⁴ Siden g_{bj} er tiltakende, er $\int_0^{n_j} g_{bj}(t) e^{-\rho t} dt \leq g_{bj}(n_j) \int_0^{n_j} e^{-\rho t} dt = \frac{1 - e^{-\rho n_j}}{\rho} g_{bj}(n_j)$. Der for er klammeparentesen negativ.

Den beste løsningen for samfunnet får vi naturligvis dersom budsjettet ikke forhindrer den optimale løsningen fra avsnitt 2.3. Et litt strammere budsjett vil fremdeles gi en form for langsiktig likevekt, der alle objektene rehabiliteres sjeldnere, men før eller seinere bringes opp til opprinnelig standard. Et enda strammere budsjett vil ikke kunne gi noen form for likevekt. Objektene, eller en del av dem, vil måtte forfalle til de er ubrukelige.

Denne siste situasjonen ligger utenfor modellens forutsetninger. I dette tilfellet vil eksistensverdiene E_j av objektene erodere og forsvinne, og det er formodentlig dette som har vært i tankene til de som vil knytte vedlikehold og rehabilitering til opprettholdelse av kapitalverdien. Men vi holder fast ved at skadevirkningene ved en slik politikk ikke har noe med det opprinnelige investeringsbeløpet å gjøre.

En enkel form for beregning av vedlikeholdsetterslepet er skissert i avsnitt 2.4.2. Den vil bli supplert i avsnitt 3.1 med en oppskrift på å beregne nyttetapet i den perioden hvor etterslepet skal tas inn igjen. For vår del kan man gjerne kapitalisere disse to størrelsene og kalle det tap av vegkapital, så lenge man har det klart for seg at vegkapitalen i seg sjøl ikke kan beregnes med utgangspunkt i anleggskostnader. Ingen av disse to størrelsene har noe å gjøre med det vi her kaller erodering av eksistensverdien. En metode for å beregne hvordan eksistensverdiene av veger vi utvikle seg under en optimal oppgraderingspolitikk er antydnet i avsnitt 4.5.

2.4.1 Avskrivning

Avskrivning er en regnskapsmetode som i første rekke skal sikre at kommersielle foretak skal ta hensyn til det framtidige behovet for utskifting av varige driftsmidler når de beregner overskuddet for det enkelte år. Ved starten av levetida for et varig driftsmiddel ligger 100 % av verdien av driftsmidlet bundet i driftsmidlet sjøl. Vi kan tenke oss at det settes av et fond fra salgsinntektene til framtidig fornying av driftsmidlet. Halvveis i levetida bør dette fondet ha vokst til 50 % av verdien av driftsmidlet (hvis lineær avskrivning er brukt), dvs. at 50 % av verdien har antatt pengeform. Ved utløpet av levetida har 100 % av verdien antatt pengeform, og bedriften kan kjøpe inn et nytt eksemplar av det samme driftsmidlet og fortsette produksjonen. Det er dette avskrivningene skal sikre.

Offentlige etater skal ikke dekke sine kostnader, verken til investering eller drift, med salgsinntekter. De finansieres over statsbudsjettet. Det er altså opp til staten å finne metoder som sikrer at etatene kan erstatte utslitte driftsmidler i framtida. Det er tenkelig at staten finner det hensiktsmessig at etatene setter av en del av det årlige budsjettet til et fond som skal finansiere framtidige nyanskaffelser av driftsmidler, i stedet for at staten må bevilge til et investeringsbudsjett som skal dekke nyanskaffelsene i det enkelte året. Men for øyeblikket er det ikke slik. Avskrivninger blir da bare en teoretisk øvelse som endrer tall i en balanse, uten økonomiske konsekvenser (men med gode muligheter for manipulasjoner med bestemte politiske siktemål).

Avskrivning av objekter som ikke skal nyanskaffes i framtida, er naturligvis uten reelt grunnlag under enhver omstendighet. Det gjelder store deler av vegkroppen. Dersom veger kunne selges, var det et poeng med av- og oppskrivninger i takt med

markedsverdien, for å finne ut hvordan statens formue utvikler seg. Men vegeer kan ikke selges. Det gjenstår da bare en begrenset rolle som avskrivninger kan spille som styringsinstrument for vegvesenets budsjettdisposisjoner. Den knytter seg til det periodisk tilbakevendende behovet for rehabilitering, dvs. erstatning av det utslitte vegdekket og utbedring av andre skader på vegkonstruksjonen. Dette er elementet $r(n)$ i våre formler. Om man foretrakk det, kunne man bruke annuiteten av $r(n)$ over det optimale n^* år som årlig avskrivning, og dermed sikre at $r(n^*)$ er finansiert når vi kommer til år n^* . (Dette krever vel at budsjettmidler kan overføres fritt til neste år.) Om dette er hensiktsmessig eller ikke, avhenger vel av om rehabiliteringsoppgavene fordeler seg jamt ut over alle år, eller om de har en tendens til å klumpe seg.

Det kan nok argumenteres for at hvis man foretrekker å avskrive vegdekkene, burde man også finansiere vedlikeholdsetterslepet gjennom avskrivninger. Oppgraderinger, derimot, er å betrakte som nyinvestering, og dessuten som investeringer med til dels uendelig levetid.

Men la oss nå utvide perspektivet fra vegvesenets budsjettdisposisjoner til den samfunnsøkonomiske verdien av en veg, slik den er skissert i formel (2.8). Det er klart at en større tid n mellom rehabiliteringene representerer et samfunnsøkonomisk tap i forhold til den optimale løsningen, eller om man vil, en lavere kapitalverdi av vegen. Deler av dette tapet bæres av brukerne. Det er ingenting som tilsier at tapet må motsvares av en like stor fondsavsetning, eller at det må erstattes i sin helhet på et tidspunkt i framtida. Dermed er det vanskelig å se at det kreves noen avskrivning av kapitalen slik den er beregnet i (2.8). Her er det snakk om en *nedskrivning* av kapitalverdien, snarere enn et behov for avskrivning. Det forhindrer slett ikke at tapet kan være en god indikator på tilstanden i vegnettet.

2.4.2 Vedlikeholdsetterslepet

I det tilfellet hvor budsjettet er for stramt til at kan finnes noen løsning på problemet i avsnitt 2.4 – dvs. når vegene uvegerlig vil forfalle mer og mer til de er ubrukelige – finnes det på ethvert tidspunkt et vedlikeholdsetterslep, eller egentlig et rehabiliteringssetterslep i vår språkbruk. Det er meningsløst å beregne nåverdien av en slik politikk i vår enkle modell, for $W(n)$ og $K(n)$ vil formodentlig gå mot minus uendelig når n går mot uendelig. Vi må derfor forutsette at politikken rettes opp på et visst tidspunkt, og deretter ligger fast med en n som tillater en løsning på problemet. Vi skal anta at dette er den optimale n når budsjettssranken ikke er bindende.

Anta altså at vegen har den beste oppnåelige tilstand i år 0, og at den deretter forfaller i n år, $n > n^*$, der n^* er den optimale løsningen på rehabiliteringsproblemet uten bindende budsjettssranke. Deretter rehabiliteres den igjen til beste tilstand, og en optimal politikk følges fra da av. Det neddiskonterte tapet ved et slikt etterslep består av de ekstra kostnadene som påføres brukerne og vegmyndigheten i årene fra n^* til n , pluss effekten av at den optimale politikken skyves ut i tid. For å vise dette setter vi $n = n^* + x$ (x er altså forsinkelsen i forhold til optimalt rehabiliteringstidspunkt) og definerer $U(x|n^*)$ som samfunnets nytte i situasjonen med etterslep:

$$U(x|n^*) = \int_0^{n^*+x} (E - g(t)) e^{-\rho t} dt - r(n^* + x) e^{-\rho(n^*+x)} + e^{-\rho(n^*+x)} W(n^*)$$

Det samfunnsøkonomiske tapet ved etterslepet er $\Delta(x|n^*) = W(n^*) - U(x|n^*)$, der $W(n^*)$ er definert ved (2.5). Litt regning gir:

$$(2.12) \quad \Delta(x|n^*) = \left[r(n^* + x) e^{-\rho(n^*+x)} - r(n^*) e^{-\rho n^*} \right] + \int_{n^*}^{n^*+x} g(t) e^{-\rho t} dt - \left(e^{-\rho n^*} - e^{-\rho(n^*+x)} \right) \frac{1}{1 - e^{-\rho n^*}} \left[\int_0^{n^*} g(t) e^{-\rho t} dt + r(n^*) e^{-\rho n^*} \right]$$

Forutsetningen for denne beregningen var at etterslepet blei tatt inn ved første og beste anledning. Li og Madanat (2002) viser at dette faktisk er den optimale politikken når det ikke finnes noen budsjettrestriksjon. Det kan jo også hende at mangelen på folk og maskiner gjør dette umulig, men for øvrig er det ingen grunn til å ta inn etterslepet gradvis. (Hva som er optimalt under årlige budsjettrestriksjoner, er en annen ting. Det kan vi simulere i modellen som vi gjør greie for i kapittel 3.)

Definisjonen av vedlikeholdsetterslepet som vi har brukt, atskiller seg fra den som vegvesenet nå bruker (SVV 2003, 2005). Denne definisjonen lyder:

”Vedlikeholdsetterslep for et vegobjekt er kostnaden ved å bringe objektet fra sin nåværende tilstand til et definert tilstandsnivå slik at objektet oppfyller sin tiltenkte funksjon over en normal levetid.”

Forskjellen er:

1. Vegvesenet tar bare rehabiliteringskostnaden (vår $r(n)$) i betraktning. Perspektivet er altså vegvesenets budsjetter, og brukernes kostnader er utelatt.
2. Vegvesenet tar ikke hensyn til diskontering, dvs. betydningen av at kostnader påløper til ulik tid.
3. Det vegvesenet beregner, er så vidt vi kan skjønne kostnaden ved å bringe *alle* veger opp til ”et definert tilstandsnivå”, inkludert de vegene som ennå ikke har nådd fram til det optimale rehabiliteringstidspunktet. Det er i så fall å overvurdere kostnadene.
4. Det ”definerte tilstandsnivået” er trolig satt realistisk lavt. Det er i tilfelle å undervurdere kostnadene, i alle fall i forhold til våre forutsetninger.
5. ”Objektets normale levetid” er en uklar størrelse.

Å gjennomføre en beregning etter våre forutsetninger krever spesifisering av funksjonene $g(n)$ og $r(n)$ for ulike vegtyper. Bortsett fra det er forutsetningene så enkle at det burde være en realistisk oppgave.

2.5 Nyttekostnadsanalyse av utbedringer

En veg (eller et jernbanespor) har to typer av egenskaper. Vi kan kalle dem henholdsvis standard og kapasitet. Standarden avgjør hvor fort, trygt og komfortabelt vi kan ferdes på vegen, dersom trafikken ikke er for stor. Standarden vil også påvirke vegslitasjen og dermed rehabiliteringskostnadene. Kapasiteten, på den andre sida, avgjør hvor mange som kan ferdes samtidig på vegen uten at farten går ned, og hvor fort den går ned for trafikkbelastninger ut over dette. Men tiltross for at det er hensiktsmessig å skille analytisk mellom kapasitet og standard, er det en sammenheng mellom de to: Tiltak som forbedrer standarden vil som regel også øke kapasiteten, og omvendt.

Begrepet vegstandard har mange aspekter. Vi skal her konsentrere oss om fire – kanskje de viktigste. Den første er *vegbredde*. Breiere filer og vegskuldre vil gjøre det tryggere å holde større fart. Flere filer vil også fungere på samme måte ved lave trafikkbelastninger, sjøl om det i første rekke påvirker kapasiteten. Det andre er *horisontalkurvatur*, og det tredje er *vertikalkurvatur*. Svingete og bakkete veger vil åpenbart kreve lavere fart, være mer utsatt for ulykker og gi høyere kjørekostnader og lavere kjørekomfort. Det fjerde aspektet ved vegstandard er vegens *bæreevne*. Det dreier seg om hvor stor virkning trafikk og miljø vil ha på nedbrytningen av vegen, og følgelig for eksempel hva som skal være øvre tillatte akseltrykk. Bæreevnen avhenger av materialvalg og utforming og av tjukkelsen på vegdekket, bærelaget og andre deler av konstruksjonen. For asfalterte veger uttrykkes den gjerne ved det såkalte strukturallet, som er et veidd gjennomsnitt av tjukkelsen på de forskjellige lagene. (Andre viktige aspekter ved standarden er dreneringsforholdene, som også er viktige for nedbrytningen, og tverrprofilen. Eksistensen av gang- og sykkelveger og støyskjerming regnes også til vegstandard, men har liten sammenheng med analysene vi vil foreta her.)

Infrastrukturens standard fastlegges i det vesentlige ved den opprinnelige investeringen (byggingen), men kan også forbedres seinere. Med *oppgradering* vil vi mene tiltak som forbedrer vegstandard – utvidelser av vegen, fjerning av svinger og bakker, og øking av vegens styrke. Nyttekostnadsanalyse av oppgraderinger krever kjennskap til hva det koster å gjennomføre oppgraderingen, hvordan vi skal måle den standardøkningen som den gir, og hvordan et slikt mål vil påvirke brukerkostnadene, vedlikeholdskostnadene og rehabiliteringskostnadene. Alt dette kan innarbeides i modellen fra avsnitt 2.3 eller 2.4, og vi skal her antyde hvordan. Først trenger vi å spesifisere funksjonssammenhengene nærmere.

2.5.1 Funksjonssammenhenger

Anta at standarden er en firedimensjonal vektor $\mathbf{q} = (q_w, q_{hc}, q_{vc}, q_{sn})$ der q_w er vegbredde, q_{hc} horisontalkurvatur, q_{vc} vertikalkurvatur og q_{sn} strukturallet. Jo høyere standard, jo større vil den initielle investeringen c_0 være. En seinere *utbedring* vil også medføre en initiell investering c_1 , som avhenger av hvilken standard som eksisterte i utgangspunktet og hvor mye standarden skal forbedres. Vi skriver

$$(2.13) \quad c_1 = c_1(\mathbf{q}, d\mathbf{q}, s_1)$$

der \mathbf{q} er initiell standard og $d\mathbf{q}$ forbedringen, og s_l er vegens tilstand umiddelbart før utbedringen.

Vegens tilstand på et gitt tidspunkt kan måles ved flere indikatorer. Vegdekkets ujamnhets måles gjerne med indikatoren IRI. Dessuten vil spesielt spordybden i millimeter ha stor betydning. For enkelhets skyld forutsetter vi både i dette avsnittet og seinere i rapporten at vegens tilstand er en skalar s .⁵

I den modellen vi nå befatter oss med, vil nedbrytingen være en funksjon av tida siden siste rehabilitering, og vi skal anta at det er en eksponentialfunksjon. I denne funksjonen fører vi inn parametre som vil avgjøre takta i nedbrytingen. Noen av disse parametrene vil måtte være forskjellige for veger med ulik styrke (bæreevne) og med ulik trafikkbelastning. Når det gjelder nedbrytingen, er det avgjørende ikke antall kjøretøy, men antall "standardaksekvivalenter" (esals), hvilket innebærer at tunge kjøretøy teller langt mer enn lette. For en gitt fordeling av trafikken på kjøretøy av ulik type vil antall esals pr. tidsenhet være proporsjonal med antall kjøretøy pr. tidsenhet. Kaller vi antall kjøretøy x og proporsjonalitetsfaktoren ϕ , vil antall esals være ϕx . Vår nedbrytingsfunksjon kan da skrives (jfr. Paterson (1990), sitert fra Ouyang og Madanat (2004)):

$$(2.14) \quad s(t, q_{sn}, x) = [s(0) + \alpha(t, q_{sn}, \phi x)] e^{\beta t}$$

For konstant trafikk vil funksjonen α ifølge Paterson være en lineær funksjon av t . Fortegnet på α og den lille konstanten β avgjøres av om tilstanden måles slik at beste tilstand er et lavt tall og verste et høyt (positive α og β) eller omvendt (negative α og β).

Funksjonen $s(t, q_{sn}, x)$ vil bestemme brukerkostnadene og tiltakskostnadene. Brukerkostnadene består av tidskostnader, kjørekostnader og eventuelt ulykkeskostnader. Siden trafikksammensetningen er gitt, og vi også vil anta at bilbelegget er gitt, vil alle disse kostnadene være proporsjonale med x . Vi navngir ikke proporsjonalitetsfaktorene her. Endelig vil brukerkostnadene avhenge av vegstandardens \mathbf{q} .⁶ Vi skriver da brukerkostnadene slik:

$$(2.15) \quad g_b(t, \mathbf{q}, x) = x b(s(t, q_{sn}, x), \mathbf{q})$$

Kostnadene til rutinemessig vedlikehold er åpenbart en funksjon av vegbredden og tilstanden:

$$(2.16) \quad g_v(t, q_w, q_{sn}, x) = v(s(t, q_{sn}, x), q_w)$$

Endelig er vegvesenets rehabiliteringskostnader en funksjon av tilstanden (husk vi skal rehabilitere til fullgod standard) og standarden. Standarden spiller opplagt inn

⁵ Bruken av symbolet s til å betegne skrapverdifunksjonen forekommer bare i avsnitt 2.2, slik at ingen misforståelser vil oppstå.

⁶ Grunnen er at farten og ulykkesfrekvensen påvirkes av vegbredden, horisontal- og vertikal-kurvaturen. Noen kilder regner også at bæreevnen har en direkte innvirkning på brukerkostnadene, men vi vil anta at alle virkninger på brukerkostnadene av bæreevnen går gjennom nedbrytingsfunksjonen.

på grunn av vegbredden. Også andre elementer av standarden kan spille en rolle, men det ser vi bort fra her. Av grunner som straks vil bli klare kaller vi vegvesenets rehabiliteringskostnader r_1 :

$$(2.17) \quad r_1 = r_1(s(t, q_{sn}, x), q_w)$$

I fotnote 2 antydte vi muligheten av å inkludere brukernes kostnad ved omkjøring og lavere fart på grunn av vegarbeidet i den gjentatte investeringskostnaden c_0 . I forbindelse med oppgradering (utbedring) er dette synspunktet svært aktuelt, både når det gjelder kostnadene ved oppgraderingen og de seinere tilbakevendende rehabiliteringskostnadene. Jo mer omfattende tiltaket og seinere rehabilitering er, jo mer langvarig vil arbeidet være, og jo større vil ulempen for bilistene i denne perioden bli. På den andre sida er det også god grunn til å holde anleggskostnader og brukernes kostnader i anleggsperioden fra hverandre, siden anleggskostnadene er underlagt et budsjett eller skal multipliseres med en skattefaktor, noe brukerkostnadene ikke skal. Vi vil derfor *supplere* anleggskostnadene c_1 og r_1 med brukernes kostnader i vegarbeidsperioden, c_2 og r_2 . Dersom vi kan anta at fordelingen av trafikken på kjøretøy og belegget i kjøretøyene er gitt og upåvirket av tiltakene, vil brukernes kostnader i vegarbeidsperioden, c_2 og r_2 , være proporsjonale med antall kjøretøyer pr. tidsenhet x og med varigheten av vegarbeidet. Varigheten på sin side kan kanskje sees som en funksjon $m(\cdot)$ av anleggskostnadene. Følgelig:

$$(2.18) \quad c = c_1 + c_2 = c_1(\mathbf{q}, \mathbf{dq}, s_1) + axm(c_1(\mathbf{q}, \mathbf{dq}, s_1))$$

$$(2.19) \quad r = r_1 + r_2 = r_1(s(t, q_{sn}, x), q_w) + axm(r_1(s(t, q_{sn}, x), q_w))$$

der a er et veidd gjennomsnitt av de forventede forsinkelses- og ulykkeskostnadene for ulike typer av kjøretøy, med andelen av hver kjøretøytype i trafikken som vekter.

De fem funksjonssammenhengene (2.14), (2.15), (2.16), (2.18) og (2.19) er det vi trenger for nyttekostnadsanalyse av oppgradering. (2.14) er fullt spesifisert med unntak av funksjonen $\alpha(\cdot)$ og konstanten β . De øvrige er ikke spesifisert. Vi antar at konkrete funksjonsformer for de aller fleste av disse funksjonene lar seg etablere ved litteraturstudier og konsultasjon med eksperter. Funksjonen $m(\cdot)$ i (2.18) og (2.19) er kanskje et unntak.

2.5.2 Nytttekostnadsanalyse

Hvis man nå som en forenkling er villig til å godta forutsetningene i dette kapitlet, nemlig først og fremst at trafikken er konstant og at rehabilitering alltid skal gjennomføres til fullgod standard, kan et opplegg for å beregne den samfunnsøkonomiske gevinsten ved å oppgradere en enkelt veg eller vegstrekning formuleres. Vi trenger imidlertid også en presis antakelse om vedlikeholdspolitikken i framtida. Innafor rammene i dette kapitlet kan det være en av tre forutsetninger:

1. Vi kan anta optimalt vedlikehold uten bindende budsjettrestriksjon
2. Vi kan anta optimalt vedlikehold under et bindende budsjett
3. Vi kan anta at n er gitt, men ikke optimal

Vår målfunksjon er W fra (2.5). Budsjettbetingelsen det er snakk om, er av samme type som i (2.9). Det betyr at budsjettet gjelder nåverdien av framtidig ordinært vedlikehold og rehabilitering. Men i tillegg kan også oppgraderingskostnadene eventuelt være inkludert i budsjettet.

Legg merke til at budsjettet i (2.9) gjelder mange objekter, mens vi har formulert nyttekostnadsanalysen som et problem som gjelder oppgraderingen av det enkelte objekt. Oppgraderingsplaner for andre objekter, og behovet for vedlikehold og rehabilitering andre steder, berører imidlertid bare vår nyttekostnadsanalyse på én måte, nemlig ved at det oppstår en kamp om budsjettmidlene.⁷ Det kan vi ta hensyn til ved å sette en passelig høy skyggepris på budsjettkroner. La oss kalle skyggeprisen λ , $\lambda \geq 0$. Skyggeprisen skal settes slik at prosjektene som er samfunnsøkonomisk lønnsomme ved denne skyggeprisen, til sammen akkurat så vidt bruker opp budsjettet.

Hvis budsjettet er romslig nok, vil skyggeprisen nærme seg null. I det tilfellet kommer et annet hensyn inn i bildet, nemlig at skatte kroner generelt er dyre, fordi skatter og avgifter gjør at prisene på innsatsfaktorer og andre goder blir høyere enn den samfunnsøkonomiske marginalkostnaden, hvilket innebærer et effektivitetstap. Finansdepartementet har derfor fastsatt en generell skyggepris på offentlige midler på 0.2. Vi kan altså dekke både tilfellet med et bindende budsjett og tilfellet uten et bindende budsjett ved å bruke parameteren λ , $\lambda \geq 0.2$ i tilknytning til vegholderens kostnader.

Etter på denne måten å ha modifisert målfunksjonen, dvs. formelen for de samfunnsøkonomiske kostnadene som kan påvirkes av oppgraderingstiltaket, vil vi ikke lenger kalle den W , men \mathcal{L} . Antar vi at oppgraderingskostnadene inngår i det eventuelle budsjettet, har vi:

$$(2.20) \quad \mathcal{L} = \frac{E}{\rho} - (1 + \lambda) c_1(\mathbf{q}, \mathbf{dq}, s_1) - c_2(\mathbf{q}, \mathbf{dq}, s_1) \\ - \frac{1}{1 - e^{-\rho n}} \left\{ \int_0^n g_b(s(t, q_{sn}), \mathbf{q}) e^{-\rho t} dt + r_2(n, q_w, q_{sn}) e^{-\rho n} \right\} \\ - \frac{1 + \lambda}{1 - e^{-\rho n}} \left\{ \int_0^n g_v(s(t, q_{sn}), q_w) e^{-\rho t} dt + r_1(s(n, q_{sn}), q_w) e^{-\rho n} \right\}$$

I denne formelen har vi forenklet notasjonen litt i forhold til formel (2.14)-(2.19) ved å undertrykke variabelen x og den detaljerte strukturen i c_2 og r_2 .

Et oppgraderingsprosjekt på lenken med den samfunnsøkonomiske kostnadsfunksjonen \mathcal{L} er en marginal endring \mathbf{dq} av (den tilsiktede) standarden \mathbf{q} . Den samfunnsøkonomiske virkningen av dette vil være

$$(2.21) \quad d\mathcal{L} = \sum_{i \in \{w, hc, vc, sn\}} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} dq_i$$

⁷ Vi tar altså ikke hensyn til virkelige nettverkseffekter, som behovet for en gjennomgående standard.

Kriteriet på om et tiltak er samfunnsøkonomisk lønnsomt eller ikke, er $d\mathcal{L} \geq 0$. For å beregne (2.21) trenger vi de partiellderiverte av \mathcal{L} med hensyn på standardindikatorene. Her kan vi påberope oss omhyllingssetningen i matematikken som bevis på at derivasjonen kan gjøres på samme måte enten rehabiliteringspolitikken n er gitt eller bestemt gjennom optimering. For å si det enkelt: Vi trenger ikke ta hensyn til at den optimale tilpasningen av rehabiliteringsperioden endrer seg som følge av (den marginale) endringen i standardindikatorene. Dermed får vi en oppskrift på nyttekostnadsanalyse av standardforbedring som formelt sett er den samme uansett om rehabiliteringsperioden er optimal eller ikke og uansett om vi har en budsjettrestriksjon eller ikke.

Uansett om n er optimal eller ikke, har vi altså i tilfelle 1, 2 og 3:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_{hc}} &= -(1+\lambda) \frac{\partial c_1}{\partial q_{hc}} - \frac{\partial c_2}{\partial q_{hc}} - \frac{1}{1-e^{-\rho n}} \int_0^n \frac{\partial g_b}{\partial q_{hc}} e^{-\rho t} dt \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_{vc}} &= -(1+\lambda) \frac{\partial c_1}{\partial q_{vc}} - \frac{\partial c_2}{\partial q_{vc}} - \frac{1}{1-e^{-\rho n}} \int_0^n \frac{\partial g_b}{\partial q_{vc}} e^{-\rho t} dt \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_w} &= -(1+\lambda) \frac{\partial c_1}{\partial q_w} - \frac{\partial c_2}{\partial q_w} \\ &\quad - \frac{1}{1-e^{-\rho n}} \left[\int_0^n \left(\frac{\partial g_b}{\partial q_w} + (1+\lambda) \frac{\partial g_v}{\partial q_w} \right) e^{-\rho t} dt + \left((1+\lambda) \frac{\partial r_1(n)}{\partial q_w} + \frac{\partial r_2(n)}{\partial q_w} \right) e^{-\rho n} \right] \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_{sn}} &= -(1+\lambda) \frac{\partial c_1}{\partial q_{sn}} - \frac{\partial c_2}{\partial q_{sn}} \\ &\quad - \frac{1}{1-e^{-\rho n}} \left[\int_0^n \left(\frac{\partial g_b}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial q_{sn}} + (1+\lambda) \frac{\partial g_v}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial q_{sn}} \right) e^{-\rho t} dt + \left((1+\lambda) \frac{\partial r_1(n)}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial q_{sn}} + \frac{\partial r_2(n)}{\partial q_{sn}} \right) e^{-\rho n} \right] \end{aligned}$$

Oppgradering i form av bedre horisontal- og vertikalkurvatur berører bare anleggskostnadene og brukerkostnadene, mens oppgradering i form av økt vegbredde også berører vedlikeholds- og rehabiliteringskostnadene. Oppgradering i form av forsterkning berører også alle kostnadselementene, men bare indirekte ved at det berører nedbrytningen. (Alt dette gjelder bare marginale oppgraderinger.)

Nyttekostnadsanalyse av oppgraderinger består i å svare på om tallverdien av brukerkostnadsendringen er stor nok til å forsvare de økte kostnadene for vegholderen. Hvis vi kjenner skyggeprisen på budsjettmidler og godtar forutsetningene angående rehabiliteringspolitikken og budsjettets form (det finnes ikke årlige budsjettskranker, bare en samlet begrensning av nåverdien av vegholderens kostnader), gir (2.9) og kriteriet $d\mathcal{L} \geq 0$ sammen med formlene for de partiellderiverte en oppskrift på hvordan dette spørsmålet kan besvares.

Men vi kjenner jo ikke skyggeprisen på budsjettet? Nei, men det gjør ikke noe. La oss vise det ved å brukerkostnadsendringen i formlene ovenfor for BK og endringen i vegholderens kostnader for VK. Et tiltak er samfunnsøkonomisk lønnsomt hvis

$$d\mathcal{L} = BK - (1 + \lambda)VK \geq 0 \Leftrightarrow (BK - VK)/VK \geq \lambda$$

Derfor kan vi prioritere mellom oppgraderinger av ulike objekter ved å bruke netto nytte pr. budsjettkrone (nyttekostnadsbrøken). Det siste tiltaket som da får plass i budsjettet, har nyttekostnadsbrøk lik skyggeprisen på budsjettmidler, eller minst 0.2 hvis budsjettet ikke er bindende.

Kapittel 3 vil gjøre rede for en mer generell metode til å nyttekostnadsberegne oppgraderinger, med færre restriktive antakelser. Vi tror likevel metoden ovenfor kan ha praktisk betydning i enkle skissemessige vurderinger om hvor oppgraderingstiltak bør settes inn. Forutsetningen for begge metoder er imidlertid at vi kjenner de funksjonssammenhengene som vi har gjort rede for i dette avsnittet. Hvis vi ikke gjør det, er det her forskningsinnsatsen nå må settes inn.

Et program for oppgraderinger kan ikke bli samfunnsøkonomisk effektivt uten kjennskap til de tekniske sammenhengene. Men vi ser også at det i avgjørende grad vil måtte påvirkes av reinte økonomiske størrelser, som rente og budsjett, foruten hvor kostnadseffektiv rehabiliteringsstrategien er og hvor dårlig den initiale standarden og tilstanden er.

2.6 Optimal standard

Vi vil beregne optimal standard for en enkelt veg. Dette er jo i seg sjøl nokså meningsløst – standarder bør være gjennomgående. Men om vi gjentar beregningen for et utvalg av representative veger, vil vi få et materiale til å fastsette samfunnsøkonomisk optimale standarder. Beregningene gjøres under de forenklete forutsetningene som gjelder i dette kapitlet. En annen innfallsvinkel til samme problem er skissert i kapittel 3.

La oss altså ta utgangspunkt i W fra formel (2.5). Sett inn funksjonene fra (2.14), (2.15), (2.16) og (2.18) og (2.19) i W , og maksimer W med hensyn på \mathbf{q} og n . De fem førsteordensbetingelsene gir da like mange likninger til å bestemme \mathbf{q} og n . Det vil trenge et matematikkprogram for å finne løsningen.

Som i forrige avsnitt er hovedutfordringen i dette opplegget å finne gode funksjonsformer som kan uttrykkes hvordan oppgraderingskostnadene $c(\mathbf{q}, d\mathbf{q})$ og rehabiliteringskostnaden r avhenger av de forskjellige elementene i \mathbf{q} . Det er også et spørsmål om man vil basere standarden på oppgraderingskostnader i det eksisterende vegsystemet eller på ekstrakostnaden ved standardøkning i forbindelse med nyinvesteringer.

Vi kan også optimere standarden for en gruppe av objekter under en budsjettbetingelse.

2.7 Drøfting

Forutsetningene i dette kapitlet er akkurat så strenge at det er mulig å nå fram til lukkede formler for hvordan en skal beregne optimal rehabiliteringssyklus og gjøre nyttekostnadsanalyse av standardforbedringer. Formlene kan for eksempel beregnes i EXCEL. Det er mulig å gjøre disse formlene mer realistiske på ett punkt, nemlig ved å innarbeide faste vekstrater for trafikkutviklingen og den teknologiske utviklingen. Når det ikke er gjort, skyldes det i hovedsak hensynet til oversiktlige formler.

Likningssystemet for optimal utforming av standarder vil trenge et matematikk-program for å løses, men det er ikke noe stort problem i våre dager, verken når det gjelder penger eller kompetanse.

Det som gjør problemene såpass enkle å løse her, er at oppskrifta til dels allerede er gitt i forutsetningene. Det finns bare ett mulig tiltak, og det er å rehabilitere til opprinnelig tilstand, og det eneste vi må ta stilling til, er hvor ofte det skal skje. I neste kapittel åpner vi for at vegene i utgangspunkt kan befinne seg i alle mulige slags tilstander, og at rehabiliteringen kan skje med mange ulike grader av intensitet, slik at vegenes tilstand etter rehabilitering ikke vil være gitt. Der vil vi også innføre årlige budsjetter til erstatning for budsjettforutsetningen i avsnitt 2.4, som forutsetter av budsjettmidlene er helt fritt overførbare mellom år. Problemene blir da fryktelig mye vanskeligere å løse – så vanskelige, faktisk, at de ikke er korrekt løst i noen eksisterende praktiske planleggingssystemer. Den akademiske litteraturen som tar problemstillingen på alvor, har imidlertid gjort framskritt i de aller siste årene, slik at muligheten for bedre planleggingssystemer finnes. I aller fremste rekke, vil vi påstå, står opplegget i Dahl og Minken (2008), som er emnet for kapittel 3. Dette opplegget er programmert opp og har vist seg å gi raske løsninger i våre foreløpige tester.

Det vi har gjort i kapittel 2, er likevel ikke uten teoretisk og praktisk interesse. Vi har understreket at begrepet levetid ikke lar seg anvende på infrastrukturet som helhet, men bare på de delene som er gjenstand for nedbryting. Vi har vist at levetida for disse delene ikke er en fast størrelse, men avhenger av økonomiske parametre som renta. Vi har framhevet at vegkapital, målt som historisk verdi eller gjenanskaffelsesverdi, ikke har noen funksjon, og at avskrivninger neppe heller er noen god ide, i alle fall ikke så lenge statens budsjett- og regnskapsprosedyrer er slik de er i dag.

Endelig har vi angitt praktisk brukbare metoder til å beregne den samfunnsøkonomiske verdien av vedlikeholdsetterslepet, nyttekostnadsberegne oppgraderinger og studere samfunnsøkonomisk optimal standard. Riktignok ligger det forenklete forutsetninger til grunn for disse metodene, men metodene er i alle fall riktige gitt forutsetningene, og forutsetningene er ikke galere enn at de kan brukes til strategiske overveielser.

3 Optimale strategier for rehabilitering av vegdekke

I kapittel 2 fant vi optimale rehabiliteringsstrategier under svært forenklede forutsetninger. Blant annet forutsatte vi at nedbrytingen og kostnadsfunksjonene for brukere og etat ikke endret seg med tida (dvs. at det ikke fantes trafikkøkning eller teknologisk utvikling – forutsetning 5 i avsnitt 2.1). Vi forutsatte også at initialtilstanden for alle objekter var den best mulige tilstand (forutsetning 6), og at det bare fantes én mulighet når en rehabilitering var aktuell, og det var å rehabilitere til opprinnelig tilstand (forutsetning 7). Vi antok også at det skulle være like lang tid mellom alle rehabiliteringer, og vi antok en uendelig tidshorison. Når vi tok hensyn til budsjettet i avsnitt 2.4, antok vi at midler fritt kunne overføres fra et år til et annet.

Alle disse forutsetningene er opphevet i dette kapitlet. Blant annet vil de gitte årlige budsjettene kunne være ulike fra år til år. Det gir en ny grad av realisme. Samtidig går vi over fra kontinuerlig til diskret tid, fordi det faktisk vil gjøre det lettere å løse problemet. I avsnitt 3.1 skal vi skissere den nye problemstillingen og antyde hvordan den kan løses når det bare finnes ett objekt. I avsnitt 3.2 vil vi begrunne at det faktisk er bruk for bedre metoder enn de som finnes i dag når en skal løse problemet med å planlegge rehabilitering og vedlikehold for flere objekter under årlige budsjettskranker, og i avsnitt 3.2 gjør vi greie for et slikt mer avansert planleggingsverktøy, utviklet på TØI, dokumentert i Dahl og Minken (2008) og ferdig utstyrt med brukergrensesnitt og brukervegledning. I avsnitt 3.4 skisserer vi anvendelsesområder for denne modellen.

3.1 Problemstillingen

En etat eller organisasjon har L noenlunde likeartede objekter å ta vare på. Objektene er gjenstand for gradvis nedbryting ved bruk og på grunn av miljøpåvirkning. I dataprogrammet har vi programmert modellen ut fra at det dreier seg om veger, men i prinsippet kan det faktisk være alt mulig rart – jernbanespor, turstier, hoppbakker, flyplasser, bygårder, skoler, kraftstasjoner, kart og hjemmesider på internett.

Objektens tilstand på et tidspunkt t kan måles ved en indikator. Vi har programmert den til å være en skalar, men i prinsipp kunne tilstanden måles i flere dimensjoner. For veger har vi valgt å anta 40 ulike tilstander, fra 1 til 40, med 40 som beste tilstand. Grunnen er at vi må ha mange nok trinn til at nedbrytingen fra en periode til den neste skal gi utslag på skalaen. Analyseperioden består av T diskrete tidsperioder. For veger har vi valgt at hver av de T periodene er på tre år. Grunnen er igjen at nedbrytingen fra den ene til den andre perioden skal være merkbar på skalaen.

Ved starten av hver periode kan vi velge mellom et endelig antall ulike rehabiliteringstiltak, hvorav ett er å ikke gjøre noen ting. Vi definerer tiltakene ut fra hvilken forbedring de kan gi i tilstanden. Tiltakene kan altså for eksempel være 0, 5, 10, 20. Det innebærer at et tiltak kan koste mer eller mindre, alt etter hva tilstan-

den er i utgangspunktet. For å bringe tilstanden fra 5 til 10 vil det jo kanskje kreves mer penger enn for å bringe den fra 35 til 40. Ingen tiltak kan bringe tilstanden over 40. Et tiltak på 10 ved tilstanden 34 vil altså bare bringe oss fra 34 til 40.

Etter tiltaket mot slutten av en periode er tilstanden den samme nesten helt ut neste periode. Deretter faller den plutselig til det nivået som nedbrytingsfunksjonen tilsier, men heves samtidig av eventuelle nye tiltak, hvilket gir tilstanden for neste periode.

Nedbrytingsfunksjonen gir tilstanden i periode $t + 1$ som funksjon av tilstanden i periode t og tiltaket mot slutten av periode t . Den kan dessuten avhenge av trafikkbelastningen og vegstandarden gjennom parametrene i funksjonen. Den kan være forskjellig for de ulike objektene.

Tiltakene koster som sagt penger. Tiltakskostnadene avhenger av tiltakets omfang (et visst antall trinn opp på tilstandsstigen) og av tilstanden etter nedbrytingen ved periodens start. Den andre formen for kostnader i modellen er brukerkostnader, som avhenger av tilstanden. (Rutinemessige vedlikeholdskostnader kan enten inkluderes i modellen som et svakt rehabiliteringstiltak eller regnes som konstante og uavhengig av tilstand, slik at de kan ignoreres.) De to kostnadsfunksjonene kan godt være forskjellige i hver periode, for eksempel pga. flere brukere (trafikkvekst) eller fordi vi vil operere med neddiskonterte kostnader. Naturligvis kan de være forskjellige for hvert objekt.

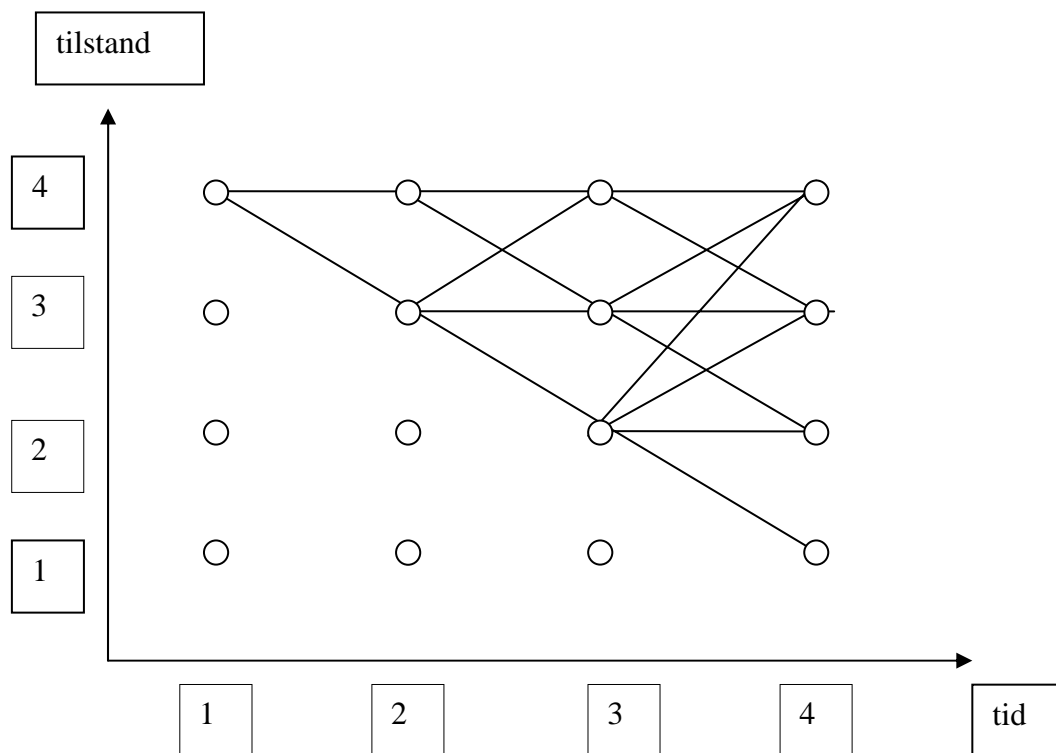
En *rehabiliteringsstrategi* (RS) er en allokering av rehabiliteringstiltak til et antall objekter i et antall framtidige perioder, gitt budsjetter for hver av periodene. Her er det ikke bare "timing" som teller, men også intensiteten, dvs. om det skal velges et mer eller mindre omfattende tiltak.

Problemet er å finne en RS som minimerer summen av brukerkostnadene og tiltakskostnadene under de gitte budsjettbetingelsene. Dette problemet er ikke trivielt, sjøl ikke i tilfellet med bare ett objekt. Diagram 3 kan illustrere dette.

Diagrammet illustrerer problemstillingen når tida og tilstandene er diskrete variable. I diagrammet har vi tida langs den horisontale aksene fra venstre mot høyre. Vi har regnet med fire perioder i analyseperioden. Vi har regnet med fire ulike tilstander ved hvert "tidspunkt" (i hver periode). Uten tiltak brytes objektet ned med en tilstand pr. periode. Tiltakene er 0, 1, 2, og 3, der 0 er ingen tiltak og 1 er litt lapping og liknende som opprettholder tilstanden. I første periode er objektet i tilstand 4, altså i den øverste venstre noden i diagrammet. Derfra går det to "lenker", en til tilstand 3 (ved å velge tiltak 0) og en til tilstand 4 i periode 2 (ved å velge tiltak 1).⁸ Resten av diagrammet forklarer seg sjøl. Jo dårligere tilstanden blir, jo flere av de mulige tiltakene kan være aktuelle.

⁸ Egentlig går det tre lenker fra den første noden, fordi alle tiltak er tilgjengelige, men ingen tiltak gir en bedre tilstand enn 4 i periode 2. De mer omfattende tiltakene er imidlertid åpenbart ikke kostnadseffektive når tilstanden er så god, og er derfor ikke tegnet inn.

Diagram 3



TØI-rapport 957/2008

En "rute" gjennom dette nettverket er en veg langs lenkene fra initialtilstanden i periode 1 til en av de mulige slutttilstandene i periode 4. Siden hver lenke representerer en entydig tiltakskostnad og en resulterende tilstand med en bestemt brukerkostnad, er RS-problemet med en lenke og ingen budsjettrestriksjon identisk med å finne billigste rute ("korteste veg", kalles det ofte) gjennom nettverket fra startnoden til en av tilstandene i siste periode. Vi kan lett inkorporere budsjettrestriksjoner i hver periode ved å plukke vekk lenkene med for høy tiltakskostnad.

I diagram 3 finnes det 14 ruter. Da er det mulig å regne gjennom alle. Men i litt større nettverk finnes det fort tusenvis av ruter, og det er ikke åpenbart hvilken av dem som er korteste veg. Det sier oss at det trenges en algoritme, et dataprogram for å finne løsningen. Dette er ikke fordi vi har formulert RS-problemet på en uhensiktsmessig måte. Tvert imot, det er formulert slik fordi det finnes en meget effektiv algoritme for korteste veg-problemer. Det er problemet sjøl som er såpass innviklet.

Langt mer innviklet blir det imidlertid om vi har flere objekter. Hver av dem vil ha et korteste veg-problem av denne typen, men de skal tilpasses til hverandre for å passe innfor felles årlige budsjetter.

3.2 Eksisterende strategiske vedlikeholdsplanleggingssystemer

Akademiske artikler fra de seinere åra har stilt og løst problemet med å finne optimale rehabiliteringsstrategier for vegnettverk. Vi viser særlig til Ouyang og Madanat (2004) og til litteraturgjennomgangen i Li og Madanat (2002). Men disse modellene har ikke fått noen praktisk anvendelse ennå, så vidt vi kan se. Vårt inntrykk er at praktikerne anser det som urealistisk å anvende så kompliserte modeller. Det er også mulig at modellene ikke er tilstrekkelig raske når de brukes på problemer av realistisk størrelse. Vi vil tru at slike problemer kan være løst i dataprogrammet som presenteres i Dahl og Minken (2008), og at det nå er på tide å gjenetablere forbindelsen mellom forskning og anvendelse på dette området. I avsnitt 3.3 vil vi kort gjøre greie for modellen og noen av resultatene i Dahl og Minken. For å motivere behovet for en modell av denne typen vil vi først vurdere gjeldende praksis. Denne gjennomgangen er ikke basert på noe inngående og systematisk studium av eksisterende planleggingsverktøy for vegvedlikehold, men er bare ment å peke på noen hovedproblemer.

Å løse et beregningsteknisk svært komplisert problem ved hjelp av rutiner programmert i EXCEL eller liknende er rett og slett ikke mulig. Av den grunn alene kan vi si at optimeringsrutinene i eksisterende strategiske vedlikeholdsplanleggingssystemer må inneholde forenklinger som i visse situasjoner vil føre til feil. Hvilke situasjoner det er, og hvor alvorlige feilene kan bli, er et empirisk spørsmål som bare kan besvares ved å sammenlikne løsningene i slike systemer med løsninger i et program som er teoretisk korrekt og kan angi øvre og nedre grenser som den optimale løsningen må befinne seg innafor, og som finner en konkret løsning i dette intervallet som det går an å sammenlikne med. Det er en av grunnene til at vi har utviklet et slikt program, og vi håper det kan bli brukt til nettopp dette.

Vi har sett nærmere på tre eksisterende vedlikeholdsplanleggingssystemer (pavement management systems, PMS) for å identifisere og bedømme de forenklingene som er gjort. Det dreier seg om det finske systemet HIPS (Sund 2004 og andre kilder på nett), det amerikanske HERS-ST versjon 2.0 (US DOT 2002), og en svensk vegleder i drift og vedlikehold (Vägverket 2001). Vi har ikke sett nærmere på det utbredte systemet HDM-4.

HIPS har en sunn optimeringsrutine (dynamisk programmering) for å løse PS-problemet i det tilfellet hvor det ikke er budsjettrestriksjoner. I det tilfellet kan en finne kostnadsminimum for hvert objekt for seg, og gå fram som forklart i forrige avsnitt eller bruke dynamisk programmering. Dette gir en idealtilstand som kan fungere som et langsiktig mål. HIPS supplerer denne "langsiktige" optimeringen med en prosedyre for å nærme seg det langsiktige målet under forskjellige budsjetter. Den har vi ikke kunnet vurdere. De to delene utgjør utvilsomt nyttige redskaper for mange formål, men de løser ikke PS-problemet slik vi har definert det.

HERS deler opp hele analyseperioden i såkalte budsjettperioder (fortrinnsvis fem år). Nytttekostnadsbrøken brukes til å velge ut de beste tiltakene på det enkelte objekt i den enkelte budsjettperiode, og til å prioritere mellom objektene i denne perioden. HERS lager for så vidt en handlingsplan for hele analyseperioden, men den gjør det ved å gå fram trinnvis, slik at den først lager en plan for budsjettperiode 1, deretter 2 osv. For å se at det kan bli galt, trenger vi ikke blande inn

budsjettene eller flere objekter. Det holder å vurdere handlingsalternativene for det enkelte objekt, slik de kan gjenfinnes som ruter gjennom nettverket i Diagram 3. Det er rett og slett ikke riktig at vi kan finne korteste veg (dvs. billigste veg) gjennom nettverket ved på hvert tidspunkt å velge den lenka som har høyest nyttekostnadsbrøk. Årsaka er at mens prioritering etter nyttekostnadsbrøken er løsinga på problemet å maksimere netto nytte ved å velge mellom uavhengige prosjekter under en budsjettrestriksjon, er tiltakene til den enkelte objekt til ulik tid slett ikke uavhengige prosjekter. Tilstanden ved et gitt tidspunkt er jo avhengig av hvilke tiltak som er gjennomført til da. Tiltak til ulik tid er heller ikke underlagt samme budsjett.⁹

HERS genererer automatisk forslag til tiltak på lenker som har eller nærmer seg en uakseptabel tilstand. Brukerne kan også generere tiltaksalternativer, men i den grad HERS oppnår gode resultater i praksis, er dette sannsynligvis mye på grunn av sunt skjønn som er lagt inn i den automatiske genereringen av tiltakskandidater. HERS gjør nemlig også bruk av andre unøyaktige og vilkårlige metoder i optimeringen. En av dem er den utstrakte bruken av nyttekostnadsanalyser med avkortet tidsperspektiv (bare én budsjettperiode). Riktignok tar man da med en restverdi ved utløpet av budsjettperioden, men den er beregnet under forutsetning av at det er gitt hva som må gjøres med objektet i periode 2 hvis ingenting gjøres i periode 1. Nettopp slike ting var jo en del av det man skulle finne ut, ikke ta for gitt. Igjen stoler man på ingeniørerfaring for å redusere et notorisk komplisert problem til et problem som lar seg håndtere med enkle metoder.

Vägverket (2001, avsnitt 4.1 og 4.4) er helt ærlige på at det er dette de gjør – de erstatter et problem som er ”synnerligen komplekst” med et problem som kan løses med EXCEL eller lommeregner. Man skiller mellom to slags analyser: *hva* man skal gjøre og *hvor ofte* man skal gjøre det. Når det gjelder *hva*, er det opp til planleggeren å formulere enkle strategier for det enkelte objekt som lett kan testes mot hverandre. En slik strategi kan bestå av periodevis gjentakelse av samme type tiltak, eller periodevis gjentakelse av to eller tre ulike tiltak. For hver slik strategi kan man bestemme *hvor ofte*, dvs. lengda av perioden mellom tiltak, ved optimering på samme måte som vi gjorde i kapittel 2. Men siden objektene ikke har den best mulige tilstand ved starten av analyseperioden, må man også bestemme når det er best å sette inn tiltak første gang. Det kan gjøres ved å sammenlikne strategien med første tiltak i første år og den samme strategien utsatt i en budsjettperiode.

Når en har mange objekter og (like store) årlige budsjetter, prioriterer man hvert år blant de objektene som er aktuelle for tiltak det året ved å bruke nyttekostnadsbrøken. I den forbindelsen er det strategiene med høyest nyttekostnadsbrøk på det enkelte objekt som konkurrerer mot hverandre, og disse forutsettes å skulle gjen-

⁹ I stedet for å ta for seg periode for periode, ville det vært bedre å ta for seg objekt for objekt og først finne den kostnadsminimale vegen gjennom nettverket for hvert objekt, uten å ta hensyn til budsjettet i første omgang. Deretter kunne en justere opp lenkekostnadene i de periodene hvor budsjettet blei overskredet og gjenta prosedyren. Dette er mer i tråd med framgangsmåten i Dahl og Minken (2007).

tas regelmessig med optimalt tidsmellomrom og være bedre enn samme strategi utsatt i ett år.¹⁰

Kunsten (om man skal kalle det det) består altså i å vurdere så få strategier som mulig ut over de som tilsies av sunt ingeniørmessig skjønn og har en periodisk gjentakende karakter. Vägverket (2001) inneholder likevel ikke så suspekter framgangsmåter som HERS, og kan antas å gi bedre resultater når de forenklete forutsetningene er tilnærmet gyldige.¹¹

Vi har også sett på dokumenter fra prosjektet PAV-ECO (Lepert m.fl 1999, Larsen m.fl 2002) og på SVV (2002). Disse kildene bekrefter inntrykket av at praktiske vegvedlikeholdssystemer mangler teoretisk korrekte samfunnsøkonomiske optimeringsrutiner når en har budsjetter å ta hensyn til.

3.3 Løsning av RS-problemet i det generelle tilfellet

Mer om problemet

I avsnitt 3.1 definerte vi RS-problemet og forklarte en løsningsmetode i tilfellet med bare ett objekt. I det mer generelle tilfellet med mange objekter er problemet å minimere summen av bruker- og tiltakskostnader over hele analyseperioden og for alle objektene samlet, gitt de årlige budsjettene og det vi kanskje kunne kalle de tekniske forholdene. De tekniske forholdene er uttrykt i form av nettverk av samme type som i diagram 3, ett for hvert objekt. Å bruke en lenke i et av nettverkene medfører brukerkostnader og tiltakskostnader, som vil være forskjellige alt etter hvor lenka befinner seg i nettverket. Vi skal finne ruter gjennom alle nettverkene (fra de gitte initialtilstandene til en av de tillatte slutttilstandene) som minimerer de samlede kostnadene for alle objektene og respekterer alle budsjettene.

Vi gjør det ved å knytte ett-tall og nuller til hver av lenkene – et ett-tall hvis lenka inngår i den ruta vi velger, og en null ellers. I den forbindelsen må vi sikre at lenkene med ett-tall til sammen danner en farbar veg fra start til mål i nettverket. Dette er de såkalte nettverksstrømsbetingelsene i problemet. Bruker vi disse tallene som vektorer når vi summerer opp de totale kostnadene, får vi tatt med de kostnadene vi faktisk har, og unngår å ta med kostnader vi ikke har. Vi har altså like mange variable som vi har lenker i objektenes nettverk, og disse variablene kan anta verdien 0 eller 1. Vi skal så bestemme for hver lenke om det skal stå et ett-tall eller null. Ikke så enkelt når vi har over 38 000 variable i de enkle testeksemplene i Dahl og Minken (2008)!

Dahl og Minken viser at dette optimeringsproblemet er såkalt NP-hardt. Det betyr at når vi øker antall variable, øker regnetida for å finne en løsning raskere enn en hvilken som helst polynomfunksjon av antall variable. I problemer av denne gra-

¹⁰ Framstillingen av framgangsmåten i dette tilfellet er uklar, og det er mulig vi har misforstått.

¹¹ Det svenske planleggingssystemet for vegdekker inneholder moduler for beregninger på strategisk nivå, programnivå og objektnivå. I følge Ihs og Sjøgren (2003) er dette systemer som anvender HIPS på strategisk nivå og elementer fra HDM-4 på programnivå. Ihs og Sjøgren referer ikke til Vägverket (2001), og det er derfor grunn til å anta at Vägverket (2001) ikke er implementert i praksis.

den av kompleksitet vil det være en grense for hvor stor og realistisk vi kan gjøre modellen hvis vi ønsker en eksakt løsning innenfor en tidsramme. RS-problemet deler denne graden av kompleksitet med andre problemer som det er gjort mindre med i praksis enn det vi kunne ønske og vente, for eksempel problemet med å ta hensyn til avhengighet mellom prosjekter ved valg av en optimal investeringsplan, eller problemet med å maksimere nytte ved å innpasse udelelige prosjekter innenfor en budsjettramme (ryggsekkproblemet).

Men Dahl og Minken viser også at det er antall lenker (objekter) vi skal være forsiktig med. Hvis bare *det* er begrenset, vil problemet være løsbart i "polynomial tid". Men, som de sier, det er ikke sikkert at det har særlig praktisk betydning hvis L blir større enn 3.

3.3.1 Algoritme

Må vi da avfinne oss med at RS-problemet ikke kan løses i praksis annet enn for en håndfull objekter? Nei, ikke helt, for sjøl om det kan være upraktisk å finne eksakte løsninger, vil det kunne finnes framgangsmåter (algoritmer) som gir en tilnærmet løsning, og det vil være mulig å angi hvor god denne løsningen er i form av øvre og nedre grenser for den eksakte løsningen. Dahl og Minken (2008) gjør greie for en algoritme som gir "nestenoptimal" løsning på rimelig tid. Denne algoritmen er programmert opp i et dataprogram som vi har utstyrt med et brukergrensesnitt og en brukervegledning.

Tankegangen bak algoritmen er at det er budsjettene som er problemet. De gir oss et ryggsekkproblem i hver tidsperiode. Hvis vi visste skyggeprisen på budsjettene, ville problemet løse seg opp i L separate korteste veg-problemer, som raskt lar seg løse.¹² Vår algoritme går ut på å finne stadig riktigere skyggepriser og løse korteste veg-problemene forbundet med dem, inntil forbedringen i målfunksjonen stopper opp. Som et resultat av algoritmen finner vi samtidig øvre og nedre grenser for den eksakte løsningen.

3.3.2 Program og testresultater

Algoritmen er programmert i MATLAB. Vi har testet programmet blant annet på et case med 10 lenker, 20 tidsperioder (å 3 år) og 40 tilstander, der tilstand 40 er best og tilstand 1 er verst. Kostnads- og nedbrytingsfunksjonene er tatt fra litt forskjellig litteratur og omregnet til vår tilstandsskala. De kan sikkert forbedres, og vil i alle fall trenge å valideres. Løsningen blei funnet på en vanlig PC på 4 sekunder. Gapet mellom øvre og nedre grenser for den optimale løsningen var på bare 1,9 %.

Tabell 1 viser utviklingen av tilstanden på de ti lenkene (radene) over de 20 tidsperiodene (kolonner). To ting er spesielt tydelig: (1) Programmet lar noen vegger forfalle helt. Dette er vegene med lite trafikk. To ting kunne gjøres med det, enten å legge større kostnader på den dårligste tilstanden, eller å bestemme at vedlikeholdet av slike vegger ikke skal prioriteres på et annet grunnlag enn samfunnsøko-

¹² Det den "langsiktige" optimeringsrutinen i HIPS gjør, er å løse L slike raske problemer.

nomi. (2) Tilstanden forfaller i de siste tidsperiodene. Dette er fordi vi ikke har spesifisert noen minstekrav til slutttilstanden i denne kjøringen, til tross for at det lar seg gjøre i programmet.

Tabell 1. Utviklingen av tilstanden over tid for hver av de ti veglenkene

29	23	16	34	28	34	28	34	28	34	28	34	28	34	28	34	28	21	14	7	1
30	25	20	15	35	30	25	35	30	25	35	30	25	35	30	25	20	15	11	7	1
25	20	15	10	36	32	27	22	36	32	27	22	36	32	27	22	23	18	13	7	1
20	15	10	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	1	1
18	12	35	30	25	35	30	25	35	30	25	35	30	35	30	25	20	15	11	7	1
15	10	36	32	27	22	36	32	27	36	32	27	36	32	27	22	23	18	13	7	1
10	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	1	1
15	9	34	29	24	35	30	25	35	30	25	35	30	35	30	25	20	15	11	7	1
12	6	1	1	26	21	36	32	27	36	32	27	36	32	27	22	23	18	13	7	1
11	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16	11	6	1

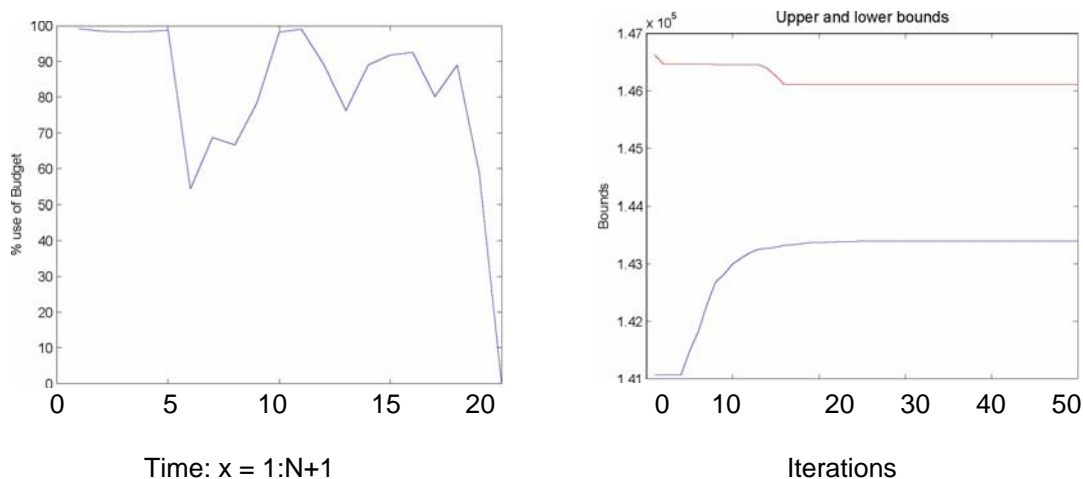
Tabell 2 viser de motsvarende rehabiliteringstiltakene (målt i tilstandsforbedring). Jo høyere tall, jo mer omfattende er rehabiliteringstiltaket, og jo sjeldnere rehabilitering foretas, jo større forskjell blir det mellom tilstanden i de enkelte år. Tabell 2 gir derfor mye av forklaringen på utviklingen over tid i tabell 1.

Tabell 2. Rehabiliteringstiltakene over tid på hver av de ti veglenkene

0	0	24	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	0	0	0	0
0	0	0	25	0	0	15	0	0	15	0	0	15	0	0	0	0	2	2	0
0	0	0	30	0	0	0	18	0	0	0	18	0	0	0	6	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
0	28	0	0	15	0	0	15	0	0	15	0	10	0	0	0	0	2	2	0
0	30	0	0	0	18	0	0	13	0	0	13	0	0	0	6	0	0	0	0
10	0	2	2	0	0	0	0	0	10	2	0	0	10	6	6	10	0	2	0
20	10	5	0	10	5	5	5	5	2	6	7	2	6	0	0	0	0	0	0
0	20	0	0	29	4	4	4	4	0	0	13	4	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Diagram 4 viser utnyttelsen av budsjettet over tidsperioden (til venstre) og konvergensen av øvre og nedre grense over antall iterasjoner. Som en ser, stabiliserer det hele seg nokså raskt – her etter bare 16-17 iterasjoner.

Diagram 4. Budsjettutnyttelsen over tid (venstre) og konvergensen av øvre og nedre grenser over antall iterasjoner i programmet (høyre)



TØI-rapport 957/2008

Dahl og Minken (2008) rapporterer også en del andre tester som ikke er tatt med her. Vi kan konkludere med at RS-problemet er enkelt og raskt løst for problemer av denne størrelsesorden. Som sagt er dette dataprogrammet utstyrt med brukergrensesnitt og brukerhåndbok.

3.4 Anvendelser

Før praktiske anvendelser bør nedbrytingsfunksjonene og kostnadsfunksjonene valideres, og det bør foretas videre uttesting for å avdekke eventuelle programmeringsfeil og mindre forbedringsmuligheter.

3.4.1 Strategisk planlegging av vedlikehold og rehabilitering

Programmet kan brukes til å vurdere den optimale fordelingen av budsjettet på vegger av ulike type når samfunnsøkonomi er målet, og til å finne ut hvordan denne fordelingen og de ulike vegenes tilstand typisk vil utvikle seg over tid gitt den optimale politikken. I den forbindelse er det mest hensiktsmessig å la vegsystemet representeres av *prototypiske lenker*. Dette er teoretisk konstruerte lenker som hver representerer en gruppe av vegger og strekninger med omtrent samme egenskaper, funksjon og tilstand. De prototypiske lenkene vektet ved å gi dem en lengde som tilsvarer den samlede lengden i det virkelige vegsystemet av den klassen av vegger som de representerer. Egenskaper som kan brukes til å definere de prototypiske lenkene er initialtilstand, vegklasse, bredde, trafikk (kanskje delt på lette og tunge biler), trafikkutvikling m.v.

En bør huske på at tilstanden til vegene i programmet nødvendigvis vil være en grov indikator på den gjennomsnittlige tilstanden, og at nedbryting og kostnads-

funksjoner ikke vil være særlig nøyaktige. Følsomhetsanalyser er derfor ønskelig, og fullt mulig så lenge programmet kjører så raskt som det har gjort i de foreløpige testene. En bør også huske på at når samfunnsøkonomi er målet, vil veger med lite trafikk ha en lei tendens til å havne i bakleksa. Det er aktuelt å supplere det en finner med minstekrav til tilstanden for slike veger, satt eksplisitt ut fra fordelingspolitiske eller distriktpolitiske mål.

Den vil være hensiktsmessig å søke å utvikle indikatorer som kan fange opp hovedtrekk i de løsningene man finner. Det kan for eksempel være gjennomsnitt og spredning i tilstanden til ulike typer av veger, gjennomsnittlige budsjettandeler, fordeling på typer av tiltak, og muligens mål på hvor regelmessig samme tiltak opptrer. Nåverdien av den enkelte strategien er også en indikator som må lages, siden kostnadsfunksjonene og budsjettene ikke nå er neddiskontert i utgangspunktet.

Det er i prinsippet ikke noe i vegen for å inkludere helt ulike objekter, som veger og bruer, i samme kostnadsminimering. Det vil imidlertid kreve noe omprogrammering, slik at brukervalg av funksjonsformer blir mulig. Som vi skal se, finns det imidlertid også andre måter å sørge for en samfunnsøkonomisk optimal fordeling av midlene mellom bruer og veger på.

3.4.2 Optimal fordeling mellom vedlikehold og investering og mellom vedlikeholdsoppgaver av ulikt slag

Ved å kjøre programmet to ganger, først med et budsjettnivå og deretter med alle budsjettene økt med for eksempel 1, 2 eller 5 %, vil en kunne finne ut hvor mange kroner den neddiskonterte målfunksjonen vil øke med pr. neddiskontert ekstra budsjettkrone. Dette er nyttekostnadsbrøken for et prosjekt som går ut på å omdisponere budsjettet mellom investeringer og drift. Hvis nyttekostnadsbrøken er større enn de marginale investeringsprosjektene, vil det være samfunnsøkonomisk lønnsomt. En slik sammenlikning blir skjønnsmessig fordi der finnes så mange investeringsprosjekter med lav samfunnsøkonomisk lønnsomhet, men det burde kanskje være mulig å finne fram til de investeringsprosjektene som politikerne virkelig kunne tenke seg å vurdere opp mot økte vedlikeholdsbudsjetter.

Tilsvarende kunne man også beregne og sammenlikne nyttekostnadsbrøken for vedlikehold av ulike objekter, som veger og bruer, og justere budsjettene i tråd med det.

Denne typen anvendelser er bakgrunnen for at hele prosjektet som her rapporteres, blei satt i gang. Det er et høyst aktuelt tema å få beregnet lønnsomheten av å øke vedlikeholdet.

3.4.3 Utforming av et løft for å ta igjen vedlikeholdsetterslepet

I avsnitt 2.4.2 anga vi hvordan vedlikeholdsetterslepet burde beregnes, gitt at det blir tatt inn ved første og beste anledning. Vi anførte at det finnes teoretiske resultater som tilsier at hele etterslepet skal tas inn ved første og beste anledning.

Vi kan også bruke dataprogrammet vi har utviklet til å finne hvordan etterslepet skal behandles. Anta for eksempel at vi kan angi nivået på de årlige budsjettene på langt sikt, og at vi vil undersøke virkningen av en økning i budsjettene i noen få perioder i begynnelsen av analyseperioden (et løft). Løftet kan utformes med ulik profil og størrelse, og en vil da gjennom eksperimentering med programmet kunne finne ut hvilken utforming som lønner seg mest. I den optimale utformingen av løftet vil den marginale kostnaden ved å øke løftet være lik den marginale samfunnsøkonomiske gevinsten. Alternativt kan en beskrive slutttilstanden på langt sikt og eksperimentere med ulike utforminger av et løft som kan føre fram til den.

3.4.4 Nyttekostnadsanalyse av omfattende forsterkninger av bæreevne og av økte vegbredder

Å bygge veger med større bæreevne, eller å forsterke eksisterende veger, innebærer følgende virkninger, som vi så i avsnitt 2.5: En investeringskostnad, en langsommere nedbryting av vegene (og dermed endrede brukerkostnader og vegholderkostnader), og en mulig direkte virkning på rehabiliteringskostnadsfunksjonen. Forutsatt at en er i stand til å spesifisere hvordan investeringene, nedbrytingsfunksjonen og rehabiliteringskostnadsfunksjonen påvirkes av et tiltak, vil programmet vårt være ideelt for å nytteberegne et slikt tiltak, idet det jo fanger opp hvordan drift og vedlikehold kan og bør endre seg på grunn av tiltaket.

Mye av det samme gjelder for tiltak for å utvide vegbredder. Slike tiltak vil ikke påvirke nedbrytingen, men vil påvirke brukerkostnadene direkte i form av høyere fart og (formodentlig) færre ulykker. Samtidig vil rehabiliteringskostnadene øke i takt med vegbredden. Alt dette vil kreve endringer i drifts- og vedlikeholdspolitikken – endringer som kan simuleres med vårt program.

3.4.5 Analyser av vegnormalenes krav

I kampen for å få sine prosjekter inn i investeringsplanene, ser det ut til at lokale og regionale vegmyndigheter er mer enn villige til å renonsere noe på vegnormalenes "ideale fordring". Lerfald m.fl. (2004) har reist det viktige spørsmålet om hvordan samfunnsøkonomisk begrunnede vegnormaler ville se ut. Svaret på det spørsmålet avhenger vesentlig av hva vi kan vente oss på langt sikt når det gjelder drift- og vedlikeholdsbudsjettet, på samme måte som spørsmålet om å akseptere situasjonsbetingede avvik fra vegnormalene avhenger av hva vi kan vente oss om drifts- og vedlikeholdsbudsjettet på kortere sikt.

Vårt program er det eneste som på kort sikt gir utsikt til analyser som tar hensyn til budsjettene på en teoretisk riktig måte. En kan tenke seg at det kan brukes til å analysere disse spørsmålene systematisk. Utgangspunktet er nyttekostnadsanalyser av forsterkning og breddeutvidelse, som i forrige punkt, men gjennomført under ulike budsjettbetingelser. Muligens kan analysene også utvides til å omfatte andre standardkrav.

3.4.6 Systematisk sammenlikning med andre programmer og modeller

Når programmet er etablert med en base av prototypiske lenker og med validerte nedbrytings- og kostnadsfunksjoner, er det på tide å utfordre til en turnering mot andre aktuelle systemer. Dette kan for eksempel skje i form av et internasjonalt prosjekt, og kan gi grunnlag for internasjonal publisering av resultatene.

3.5 Drøfting

I dette kapitlet har vi satt søkelys på problemet å bestemme tidspunkt og intensitet for vedlikehold og rehabilitering av et antall likeartede objekter under felles årlige budsjettskranker. Vi har kalt det RS-problemet (Rehabilitation strategy problem). Alle systemer for forvaltning av vegnettet med respekt for seg sjøl gjør det på en eller annen måte til et mål å løse dette problemet. Det gjelder spesielt på strategisk nivå, dvs. ved allokering av budsjettmidlene til ulike deler av vegsystemet.

Det er da heller ikke vanskelig å løse problemet hvis man bare gjør forutsetningene enkle nok. I kapittel 2 forutsatte vi at alle objekter hadde fullgod tilstand i utgangspunktet, og at vi bare hadde ett virkemiddel, nemlig å rehabiliterer til fullgod standard. Hvis da budsjettet ikke er bindende, får vi løsningen av formel (2.11) med $\mu = 0$. Hvis budsjettet er bindende, har vi egentlig et problem med å anslå μ som vi ikke tok alvorlig på, men en iterativ prosedyre der vi setter løsningene inn i budsjettbetingelsen og justerer μ etter det, skulle føre fram. Vägverket (2001) er et annet opplegg som opererer med en skyggepris på budsjettet (eller i det tilfellet budsjettene) uten å angi en oppskrift på å finne den.

Straks vi blir mer realistiske og tar hensyn til at objektene har alle slags initialtilstander og at rehabiliteringen kan variere i intensitet og målsetning, blir RS-problemet meget komplisert. Igjen blir det enkelt nok hvis vi bare ser bort fra budsjettene. HIPS har valgt den løsningen, og kan da løse det vi har kalt korteste vegproblemene for hvert objekt ved dynamisk programmering. Problemet er naturligvis at årlige budsjetter ser ut til å være en del av livet som det ikke er mulig å se bort fra. HIPS' langsiktige løsning blir da snarere en regulativ ide, et Soria Moria i det fjerne, enn noe som en kan forholde seg praktisk til. Tilpasningen over mellomlang tid (som ti år) til denne langsiktige løsningen blir en mistilpasning hvis den ikke følges av budsjetter som gjør skyggeprisen til null.

Dette er likevel langt bedre enn systemer som gir inntrykk av å løse RS-problemet, men ikke gjør det (en skal langt inn i den tekniske beskrivelsen for å finne forbehold). Hit hører HERS-ST og kanskje flere systemer vi ikke har satt oss nærmere inn i.

Først i de siste årene har det dukket opp akademisk litteratur som løser det generelle RS-problemet. Til det trenges det en algoritme. Vi veit ikke hvor effektiv de tidligere foreslåtte algoritmene er. Vi har imidlertid tru på at vårt eget opplegg i Dahl og Minken (2008) ikke står tilbake for andre. Fra testene kan vi konkludere at det løser RS-problemet enkelt og raskt for problemer av moderat størrelsesorden.

Om ingen finner på noe enda bedre, har vi her et teoretisk sunt og praktisk brukbart verktøy til å studere optimale vedlikeholdsstrategier. En primær anvendelse

vil være å studere den samfunnsøkonomiske verdien av omallokeringer mellom budsjetter og budsjettposter, hva enten det gjelder mellom investeringsbudsjettet og vedlikeholdsbudsjettet eller mellom budsjettpostene i vedlikeholdsbudsjettet. Vi har også angitt en mengde andre anvendelser.

Det ville glede oss om vedlikeholdsfolk ville være interessert i å delta i videre uttesting og forbedring av programmet, og i å utvikle noen av disse anvendelsene.

4 Vegkapital

4.1 Vegkapitalprosjektet

Det offentlige i mange land var, særlig i 90-åra, opptatt av å anvende styrings-systemer med opprinnelse i privat næringsliv. Dette inngår i den tenkningen om hvordan en skal organisere offentlig styring og kontroll som går under navnet New Public Management (NPM). Pionerene på NPM er land som New Zealand og Australia. OECD har bidratt vesentlig til å spre den nye læra til svært mange land (Ravlum 2003). Interessen for begrepet vegkapital som et redskap til strategisk styring av investeringer i, og vedlikehold og drift av vegsystemet ser ut til å stamme fra disse kildene. En annen kilde til begrepet kan være amerikanske revisorers behov for å føre inn alle offentlige eiendeler med en pengeverdi i et balanseregnskap (jfr. Lerfald og Sund 2003).

Uansett, Nordisk Vegteknisk Forbund gjennomførte i 2000-2004 et prosjekt om begrepet vegkapital og hvordan det kunne måles og brukes. Vegdirektoratet fulgte opp med et etatsprosjekt om begrepet, se <http://www.vegkapital.net>. Det ser ut til at noe av bakgrunnen for det norske prosjektet har vært at begrepet vegkapital allerede langt tidligere hadde vært anvendt både i statsbudsjettet og Nasjonal transportplan, uten at det har vært helt klart hva det betyr og hva det skal brukes til.

Styringssystemet eller styringsfilosofien som i følge NVFs prosjekt og etatsprosjekt "vegkapital" ville kunne integrere de ulike vedlikeholds-, oppgraderings- og investeringsoppgavene i vegvesenet, og der begrepet vegkapital ville spille en vesentlig rolle, kalles avvekslende Asset Management Systems eller Total Asset Management (OECD 2001, Johansen og Thomassen 2004). Vi antar at dette er et system, en arbeidsmåte eller type av konsulenttenester som har sin opprinnelse i det private næringsliv. En definisjon som er funnet på nettet, lyder slik:

"Total Asset Management (TAM) is a holistic, inclusive and coordinated approach to facility asset management. It promotes both a philosophy and a set of best practices intended to overcome limiting conditions by coordinating asset-related business processes across multiple business units, integrating asset-related information systems, and adopting best-in-class practices for maintaining and using the information resource."
(<http://www.graphicsystems.biz/gsi/articles/TAM-INFAEdit-112502.pdf>)

Det er altså snakk om å lage informasjonssystemer for å få oversikt over selskaps eller konsernets fysiske eiendeler på konsernnivå; styre tilgang, avgang og overføringer mellom konsernets divisjoner og datterselskaper i tråd med oppgavene og budsjettene til hver av dem; avklare ansvarsforhold og felles bruk, osv.

En annen definisjon, tilpasset det offentlige, finner vi på hjemmesida til regjeringen i New South Wales (<http://www.treasury.nsw.gov.au/tam/tam-intro.htm>):

"TAM is a strategic approach to physical asset planning and management, including major infrastructure. It provides a structured and systematic approach by which an agency can align its asset planning and management practices with its

service delivery priorities and strategies, within the limits of resources available. This is essential if services are to be delivered efficiently and effectively over the long term.”

Det er et stort behov for at offentlige virksomheter får en bedre og mer enhetlig oversikt over hva de eier, hvem som har ansvaret for den enkelte eiendelen, hva den brukes til og hvilken tilstand den er i. Slik sett kan TAM sikkert være nyttig.

Men hvorfor mente man at dette krevde at vegene ble verdivurdert, og hvilke konsekvenser skulle verdivurderingen ha for vedlikeholdspolitikken, ut over det åpenbare – at det er nyttig å vite hvilken tilstand vegene er i?

Et mulig svar på det ligger i å se at TAM også omfatter prosessene med nyinvesteringer og anskaffelser. På et tidlig stadium er det behov for å forbedre investeringsanalysene, bl.a. gjennom å forbedre anslagene på det framtidige vedlikeholdsbehovet som følger av en infrastrukturinvestering, slik at konseptet som har de laveste kostnadene over hele livsløpet kan bli valgt. I et slikt perspektiv er det de samlede kostnadene ved å anskaffe og beholde objektet som teller. Når investeringen først er gjort, er investeringskostnadene ugjenkallelige kostnader, og perspektivet forskyves til optimal bruk av vedlikeholdsmidlene og eventuelle oppgraderinger. Det er altså intet i TAM i og for seg som krever verdivurdering av allerede eksisterende infrastruktur, derimot kreves det en livsyklusanalyse av *kostnadene* ved *ny* infrastruktur. Kravet om å beregne vegkapitalen og sørge for å opprettholde den, kan ha sitt opphav i et ønske om å behandle all infrastruktur, eksisterende og påtenkt, på samme måte, eller i behovet for å etablere en åpningsbalanse for forvaltningsbedrifter som skal ta over eieransvaret for disse eiendelene.

Et annet motiv for etatsprosjektet var nettopp utredninger initiert på politisk hold om å gå over til regnskapsføring etter regnskapslova i deler eller hele forvaltningen. Åpenbart trenges da en åpningsbalanse og regler for avskrivninger av eiendelene.

Etatsprosjektet har gitt ut fire rapporter. To av dem (SVV 2003 og 2005) handler om beregning av vedlikeholdsetterlepet i riksvegnettet og fylkesvegnettet. Dette er verdifulle empiriske arbeider, men med visse teoretiske svakheter (jfr. avnitt 2.4.2). De gjør i og for seg ikke bruk av vegkapitalbegrepet. Den tredje, en litteraturstudie (Lerfald og Sund 2003), er også et verdifullt arbeid som viser hvor bredt begrepet om vegkapitalen har spredt seg i internasjonale ekspertmiljøer og argumenterer for helhetlige systemer på toppnivå for å integrere investeringer og vedlikehold av alle de ulike infrastrukturobjektene. Problemet er at det aldri blir helt klart hvilken rolle begrepet om vegkapital spiller i en slik sammenheng, og at rapporten ikke er tilstrekkelig kritisk til måling av vegkapitalen ved hjelp av historiske kostnader eller gjenanskaffelseskostnader.

Den siste rapporten er en gjennomført verdivurdering av riksvegnettet. Gjenanskaffelseskost er her brukt som prinsipp, og det sies at vegkapitalprosjektets definisjon av vegkapital *er* gjenanskaffelseskostnaden. Dette arbeidet er etter vår vurdering uten noen praktisk nytteverdi, ettersom gjenanskaffelseskostnaden ikke sier noe om hvilken nytte vegsystemet vil gi i framtida, og heller ikke gir noen riktig vegledning til vedlikeholdsoppgavene.

Tilsynelatende har interessen for begrepet deretter avtatt. Det nordiske prosjektet fortsetter under samme navn, men det har oppstått uenighet om vegkapitalen som begrep har noen praktisk anvendelse, og prosjektet vil nå konsentrere seg om vedlikeholdsplanlegging.

4.2 Trenger vi begrepet vegkapital?

Vi har allerede påvist hvorfor vegkapitalen ikke kan anslås med utgangspunkt i kostnaden ved å bygge vegene, verken historiske kostnader eller gjenanskaffelseskostnader. Det spiller ingen rolle om en bruker avskrivninger eller ikke, uansett blir resultatet ubrukelig for noe hederlig formål. Grunnene er mange. Resultatet kan ikke gi vegledning til vedlikeholds- og oppgraderingspolitikken. Den må styres av framtidig nytte og kostnad. Ugjenkallelige kostnader, dvs. kostnader vi har pådratt oss tidligere, og som vi ikke kan få igjen ved for eksempel å selge det vi den gang kjøpte, har ingen plass i avveininger som gjelder framtida. Historiske kostnader til vegbygging er derfor helt irrelevante i planlegging for framtida. Heller ikke gjenanskaffelseskostnader er relevante, av den enkle grunn at vegene ikke noen gang trenger å gjenanskaffes. Det som kan trenges, er rehabilitering og kanskje i noen tilfeller rekonstruksjon, dvs. regelmessig gjenanskaffelse av de øvre lagene i konstruksjonen, stedvis utbedring av skader dypere ned i konstruksjonen, og forsterkning og forbedring av den eksisterende konstruksjonen dersom trafikkutviklingen tilsier det.

I et perfekt marked vil prisen på å anskaffe kapitalgjenstander være lik nåverdien av det de kan kaste av seg i framtida. Det er absolutt ingen grunn til å anta at det er tilfelle for vegene i Norge. De er ikke anskaffet (i alle fall ikke utelukkende) med sikte på avkastning i framtida, verken om en ser det bedriftsøkonomisk eller samfunnsøkonomisk. I mange tilfeller har også planene om framtidig avkastning i samfunnsøkonomisk forstand vist seg å ikke holde stikk i ettertid. Verken historiske kostnader eller gjenanskaffelseskostnader kan derfor tjene som proxy for hva den enkelte veg er verdt i form av framtidig tilskudd til velferden i Norge.

Vi har anlagt synspunktet at dersom begrepet vegkapital skal gis noen fornuftig mening, må det være som summen av nåverdien av framtidig nytte og kostnader knyttet til den enkelte veg. Heller ikke det synspunktet er uten problemer. For å beregne en slik nåverdi vil vi jo trenge en rente. Men hva om rentenivået avhenger av hvor mye veger vi har, eller hvor mye veger vi planlegger å bygge? Uansett denne teoretiske vanskeligheten er likevel det store spørsmålet hva vi kan bruke et slikt "prospektivt" kapitalbegrep til. Det er dette vi nå vil se nærmere på. Vårt utgangspunkt er definisjonen av kapitalverdien av den enkelte veg i formel (2.8).

Vi har argumentert for at heller ikke kapitalverdien slik den er definert i (2.8) gir noen vegledning til vedlikeholds- og rehabiliteringspolitikken. Grunnen er at den potensielt største delen av $K(n)$ utgjøres av den ubestemte størrelsen E/ρ , slik at størrelsen på $K(n)$ ikke i seg sjøl sier noe om behovet for vedlikehold og rehabilitering. Derimot ser vi at å maksimere $K(n)$ med hensyn på n gir en optimal rehabiliteringspolitikk. I den forstand er det en sammenheng, sjøl om vi ikke trenger kapitalverdien for å gjennomføre maksimeringen.

Vi ser tre nyttige anvendelser av begrepet om vegkapital, slik det er skissert i formel (2.8):

1. Evaluering av norsk vegbyggingspolitikk
2. Vurdering av sårbarheten i vegsystemet
3. Vurdering av hensiktsmessigheten av å satse på oppgradering av en av to parallelle veger.

4.3 Evaluering av norsk vegbyggingspolitikk

For hver lenke i det norske vegsystemet er det mulig å finne ut det samfunnsøkonomiske tapet dersom lenka faller vekk. Vi trenger et transportmodellsystem med tilknyttet modul for nytteberegning. Dette foreligger nå. Fjerner vi lenka fra det modellerte transportnettverket, vil biltrafikken måtte finne alternative ruter – eventuelt alternative reisemåter eller destinasjoner. Antallet reiser vil også kunne gå ned. Noen bussruter må dessuten kodes om, hvilket innebærer et visst skjønn. Beregner vi den årlige nytten av dette tiltaket, inkludert de omlagte bussrutene, og deler på kalkulasjonsrenta, får vi et uttrykk for eksistensverdien av denne veglenka, dvs. E/ρ i formel (2.8). Trekker vi så fra den inflasjonsjusterte historiske anleggskostnaden, så har vi gjennomført en *etteranalyse* av prosjektet som etablerte denne lenka. $E\rho^{-1} - c_0$ er den etteranalyserte nåverdien av prosjektet, vurdert på grunnlag av dagens trafikkmengder.

Hvis lenka ikke har vært bygget i en omgang, må vi enten beregne nåverdien av de samlede anleggskostnadene for prosjektene som inngår i lenka slik den er i dag, eller vi må legge inn en dårligere versjon av lenka til erstatning for den vi tok ut.

Ved å gjennomføre dette for et større antall lenker, bestående av lenker bygd i ulike tiår, i ulike deler av nettet (stamveg, øvrig riksveg, fylkesveg) og i ulike geografiske områder (bynært/ikke bynært, landsdel), vil vi ha et materiale til å bedømme i hvilken grad vegbygging gir opphav til samfunnskapital, hvordan dette har utviklet seg historisk, og hvilke deler av nettet som kaster mest av seg. Den mest hensiktsmessige indikatoren ved en slik mer omfattende analyse vil være den gamle nyttekostnadsbrøken, dvs. $E(\rho c_0)^{-1}$. Den uttrykker hvor stor del av anleggskostnaden som har blitt samfunnskapital. Var andelen større før? Er den større i visse deler av landet? Kan vi identifisere endringene og ulikhetene med endringer i den rådende samferdselspolitikken eller styringssystemene?

I et tidligere prosjekt ved TØI blei det nedlagt betydelige ressurser for å finne ut i hvilken grad offentlig samferdselskapital bidrar til økonomisk vekst i Norge (Eriksen og Christensen 2001). Resultatet var nedslående: Det var ikke mulig å se at samferdselsinvesteringer hadde noen virkning på BNP. Årsaka kan meget vel ha vært det begrepet om samferdselskapital som blei brukt. Både anleggskostnadene og et enkelt fysisk mål (antall kilometer veg) blei forsøkt, men uten resultat. Det kunne være interessant å gjennomføre denne undersøkelsen en gang til, der anleggskostnadene i hver tidsperiode blei vekta med de ovenfor nevnte nyttekostnadsbrøkene. På den måten ville problemstillingen bli klarere. Spørsmålet

ville være om veginvesteringer bidro til økonomisk vekst *i den grad de var samfunnsøkonomisk lønnsomme*, uten å blande inn investeringer som hadde andre siktemål eller ikke hadde tilsiktet effekt.

Dette er å betrakte som et prosjektforslag.

4.4 Vurdering av sårbarheten i vegsystemet

En lenke i vegsystemet kan falle ut for kortere eller lengre tid på grunn av ulykker, ras, flom, uvær, manglende brøyting, vinterstengning osv. Et minimumsanslag på kostnaden ved det kan etableres på samme måte som i forrige punkt, ved å gjennomføre modellberegning og nytteberegning med og uten lenka. Det årlige nyttetapet ved stengning må multipliseres med den antatte varigheten målt i år. Dette er bare et minimumsanslag, siden modellen forutsetter at trafikantene har tilpasset seg endringen. I de første timene og kanskje dagene etter en hendelse vil de ikke ha rukket å gjøre det, og dermed kan de bli påført større kostnader pr. tur i denne tida.

En slik undersøkelse kan ha flere siktemål. Den kan gjennomføres som en nytte-kostnadsanalyse av vinterstengning eller rassikring på enkeltlenker, eller en kan kartlegge nyttetapet på en stor mengde lenker med sikte på å finne ut hvor en skal sette inn innsatsen for å forhindre at vegen stenges i kortere eller lengre tid.

Eksistensverdien av en veg avhenger av ekstrakostnadene pr. reise som må ta en annen veg, multiplisert med antall trafikanter som blir berørt. Så lenge konnektiviteten i nettet ikke berøres, dvs. så lenge det finnes omkjøringsmuligheter, vil eksistensverdien E/ρ av vegen ha en endelig verdi. Men Norges geografi, der vegen går oppover daler eller innover fjorder, gjør likevel at eksistensverdien av ganske sentrale veger kan være stor. Ytterst i nettet vil bortfallet av en lenke medføre at en eller flere noder blir isolert. Formelt sett har slike lenker en uendelig eksistensverdi, fordi transporttettersspørselen ikke kan legges ut i nettet. I et breiere perspektiv og på lengre sikt vil verdien likevel være endelig, fordi nødalternativer som ikke finnes i modellen kan etableres, et sted kan i verste fall fraflyttes, osv. Det vil ha en verdi å kartlegge hvor bortfallet av lenker ødelegger konnektiviteten i nettet, men tapet vil ikke la seg beregne med de modellene vi har.

En sårbarhetsanalyse som gjennomføres ved å fjerne lenker på en systematisk måte, vil kunne legges opp etter mønster av en undersøkelse som er gjort for Nord-Sverige med hjelp av den nasjonale modellen SAMPERS (Jenelius mfl. 2006). Helt nylig har Qiang og Nagurney (2008) foreslått et effektivitetsmål for nettverk som er en generalisering av målet til Jenelius m.fl., slik at trafikken på lenkene teller med når betydningen av dem i sårbarhetssammenheng skal bedømmes. Det blir da mulig å prioritere lenkene (og nodene) med hensyn på tiltak for økt sikkerhet. I neste avsnitt har vi som eksempel brukt Qiang og Nagurneys formel til å gjennomføre en enkel analyse av betydningen av tre veglenker i Oslo.

4.5 Effektivitetsreduksjon ved stengning av tre veier i Oslo

Qiang og Nagurny definerer et mål for ytelsen i et nettverk som forholdet mellom etterspørsel og kostnad summert over alle OD-par dividert på antall OD-par:

$$(4.1) \quad \varepsilon = \varepsilon(G, \mathbf{d}) = \frac{\sum_{\omega \in W} d_{\omega} \lambda_{\omega}}{n_W}$$

der d_{ω} og λ_{ω} er henholdsvis etterspørsel og kostnad mellom OD-par ved likevektsløsning, mens n_W er antall OD-par og G er nettverkets topologi.

Betydningen av et nettverkselement defineres som det relative effektivitetsfallet i nettverket når man fjerner elementet:

$$(4.2) \quad I(g) = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(G, \mathbf{d}) - \varepsilon(G - g, \mathbf{d})}{\varepsilon(G, \mathbf{d})}$$

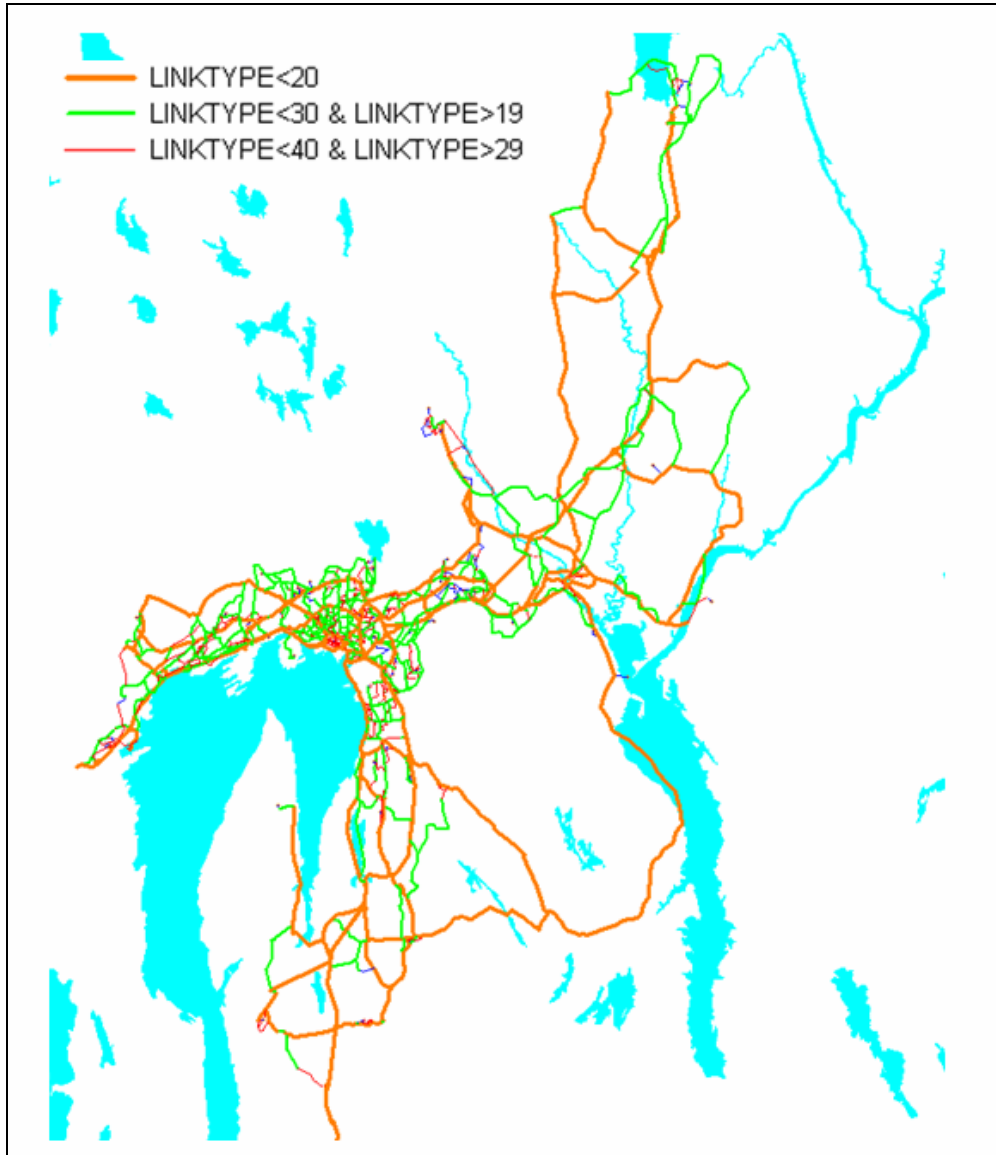
der $G-g$ er det nye reduserte nettverket etter at man fjerner element g fra nettverk G . Betydningen av et nettverkselement er også et mål for sårbarheten i nettverket.

Målene for ytelse og betydning kan i prinsippet benyttes for alle typer nettverk, og nettverkselementer kan være for eksempel lenker eller noder. Målene kan brukes både ved fast og ved elastisk etterspørsel, og dersom nettverksendringer medfører at soner blir utilgjengelige, håndteres dette ved at disse sonerelasjonene gir null bidrag til ytelsen i nettverket.

4.5.1 Transportmodell for Oslo og Akershus

Diagram 5 viser et forenklet transportnettverk for Oslo og Akershus basert på transportmodellen Emma/Fredrik utviklet av Transek.

Diagram 5. Transportnettverk for Oslo og Akershus basert på Emma/Fredrik.



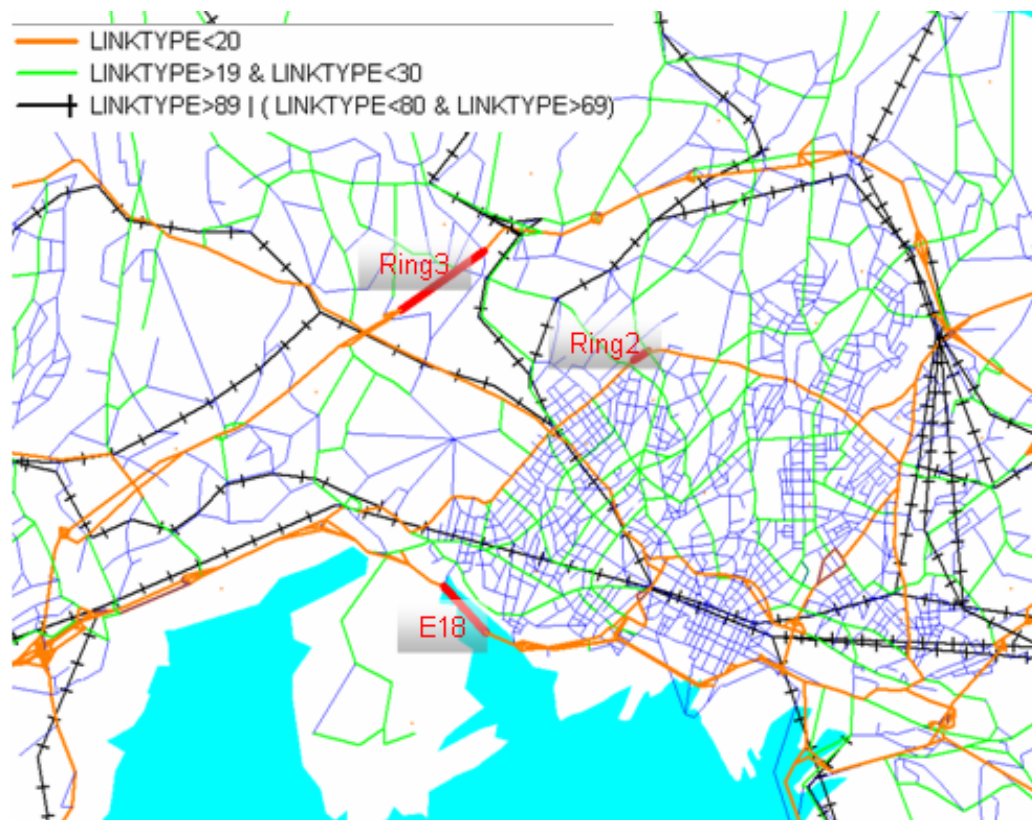
TØI-rapport 957/2008

De oransje lenkene symboliserer europaveier og riksveier, de grønne lenkene symboliserer fylkesveier, mens de røde lenkene symboliserer kommunale veier.

Nettverket består totalt sett av 1974 soner og nær 4 millioner OD-par.

Diagram 6 viser et mer detaljert nettverk zoomet inn på Oslo sentrum.

Diagram 6. Transportnettverk for Oslo sentrum basert på Emma/Fredrik.



TØI-rapport 957/2008

De oransje lenkene symboliserer europaveier og riksveier, de grønne lenkene symboliserer fylkesveier, mens de svarte lenkene symboliserer tog og t-bane.

Tre lenker er markert med rødt. Disse er plassert på europavei 18, på ring 2 og på ring 3. Betydningen av disse lenkene kan beregnes ved likning 4.2. Vi har i det følgende antatt fast etterspørsel gitt ved turmatrise for personbil ved morgenrush, og at lenkekostnaden i nettverket er tiden det tar i passere veilenken. Vi beregner betydningen av lenkene ved å fjerne dem og gjøre en nettutlegging av den faste etterspørselsmatrisen i det reduserte nettverket. Selv om etterspørselen antas utforandret ved redusert nettverk, vil kostnadene mellom de ulike sonerelasjonene øke blant annet på grunn av økt kø, og effektiviteten avta.

4.5.2 Resultater

Tabell 3 viser resultatene av omtalte beregninger:

Tabell 3. Effektivitetsendringer i transportnettet for Oslo og Akershus ved fjerning av lenker på E18, Ring 3 og Ring2.

	BASIS	E18	RING3	RING2
ε	0.0345	0.0338	0.0342	0.0344
I		0.0218	0.0085	0.0040

TØI-rapport 957/2008

Tabellen viser at veglenken på E18 har klart størst betydning for nettverkets ytelse av de tre lenkene som er vurdert. Dette kan forklares med at E18 har størst trafikkmengde og at lenken ligger litt mer isolert enn de øvrige slik at omkjøringsalternativene virker å være noe mer kostbare. I tillegg spiller standard og trafikkmengde på omkjøringsalternativene en avgjørende rolle for lenkenes sårbarhet. Ved å fjerne veglenken på E18 fra nettverket synker effektiviteten med ca 2.2 prosent. For Ring 2 og Ring 3 utgjør effektivitetsfallet henholdsvis ca 0.4 og 0.9 prosent dersom disse lenkene fjernes fra nettverket.

4.5.3 Eksistensverdien av de tre veglenkene

Som et alternativ til å beregne effektivitetstapet $I(g)$ kan vi beregne eksistensverdien av de tre veglenkene. For enkelhets skyld vil vi bare regne med en periode på dagen – dvs. vi inkluderer rushtida, men ikke trafikken utenom rush. La t være antall rushtidstimer i et år. Den årlige ekstrakostnaden for brukerne ved bortfall av nettverkselementene g er da:

$$(4.3) \quad E(g) = t \sum_{\omega \in W} (\lambda_{\omega}^1 d_{\omega}^1 - \lambda_{\omega}^0 d_{\omega}^0)$$

der toppskrift 0 betegner kostnader og etterspørsel i nettverket G og toppskrift 1 kostnader og etterspørsel i nettverket $G - g$.

Nåverdien av $E(g)$ fra nå til uendelig er $E(g)/\rho$. Som formel (2.8) viser, vil $E(g)/\rho$ være vesentlig større enn den prospektive kapitalverdien av de tre veglenkene.

Med $t = 2080$ og $\rho = 0.045$ får vi følgende resultat for $E(g)$ og $E(g)/\rho$:

Tabell 4. Eksistens- og kapitalverdier for lenker på E18, Ring 3 og Ring 2 i millioner.

	E18	RING3	RING2
E	1438	763	191
E/ ρ	31956	16956	4244
K	30881	16380	4170

TØI-rapport 957/2008

Vi ser av tabell 4 og 3 at eksistensverdien og effektivitetsindeksen stemmer overens i den relative betydningen de to indikatorene tilskriver de tre lenkene. Forholdet mellom ring 2 og E 18 er også omtrent det samme for begge indikatorene – ca. 1/5. Forholdet mellom ring 3 og E 18 er imidlertid 0.6 for eksistensverdien og 0.3 for effektivitetsindeksen. Kapitalverdien K i tabell 4 er beregnet på en forenklet måte, men oppfører seg åpenbart ganske likt som eksistensverdien.

4.6 Vurdering av hensiktsmessigheten av å satse på oppgradering av en av to parallelle veger

Størrelsen på eksistensverdien av en veg avhenger av om det finnes gode alternative reiseruter, reisemåter eller destinasjoner. Der hvor to veger går parallelt (for eksempel ny og gammel E18 gjennom Vestfold), vil E/ρ være liten. Anta at vi lar den ene vegen forfalle. Når brukerkostnadene på denne vegen stiger, vil ekstrakostnaden ved å måtte bruke den andre vegen i tilfelle den første var stengt,

bli mindre og mindre. Eksistensverdien vil altså ”erodere”. Dette har vi ikke tatt hensyn til i vår formulering av kapitalverdien i formel (2.8). Samtidig vil eksistensverdien av den andre vegen stige, både fordi noen reisende fra den forfalte vegen vil gå over til å bruke den i stedet, og fordi alternativet å bruke den forfalte vegen framstår som dårligere og dårligere for de som bruker den andre.

Kapitalverdien er altså avhengig av vedlikeholdet på to måter. For det første framgår det av formelen at et forfall i vegens tilstand reduserer kapitalverdien ved at nåverdien av brukerkostnadene og vegvesenets vedlikeholdskostnader øker. For det andre – og det framgår ikke av formelen – reduseres eksistensverdien sammen med vedlikeholdet. Denne siste effekten, og ingenting annet, kunne gi grunnlag for avskrivning, hvis det ikke hadde vært for at vi da også måtte oppskrive den andre vegen. I et konkret tilfelle vil vi kunne beregne disse effektene i en modell, men det er sannsynligvis ingen måte å finne generelle avskrivningsregler på.

Det vi snakker om her, er nettverkseffekter, som skjer ved at trafikantene endrer rute eller andre former for tilpasning. Ingen eksisterende modeller for styring av vedlikehold tar hensyn til nettverkseffekter. Objektene som skal vedlikeholdes, forutsettes alltid å ha en gitt trafikk eller en trafikk som avhenger av hva vi gjør på den aktuelle vegen, men aldri av hva vi gjør på de *andre* objektene. Vårt prospektive vegkapitalbegrep har ledet oss til å se at i enkelte tilfeller kan det være en tvilsom forenkling. Straks vi blir oppmerksom på det, kan vi analysere situasjonen uten begrepet om vegkapital, men vi trengte kanskje begrepet for å definere behovet for en mer sofistisert analyse.

Så hvordan gjennomfører vi en slik analyse? I tilfellet med to parallelle veger er det ganske enkelt. Vi trenger en rutevalgmodell. Gjennomfør nytteberegning av å suksessivt øke brukerkostnadene på den ene vegen, samtidig som de midlene som frigjøres ved å redusere vedlikeholdet der (og eventuelt andre midler i tillegg) overføres til den andre vegen og gir lavere og lavere brukerkostnader. La så den andre vegen forfalle, og gjennomfør samme beregning i det tilfellet. Den optimale fordelingen av midler på de to vegen er det tilfellet som gir lavest samlet kostnad.

I det generelle tilfellet må vi etablere en egen modell for å løse det såkalte *kontinuerlige nettverksdesignproblemet*. Vi lar da brukerkostnadene på lenkene ligge på et høyt nivå i utgangspunktet, og problemet er å allokere midler til forbedring av lenkene fra dette nivået. Disse midlene betegnes i litteraturen alltid som investeringsmidler, men det er ingenting i vegen for å la dem representere bedre vedlikehold og oppgraderinger.

Mekanismene i dette avsnittet er i virkeligheten det som gjør at vegsystemet utvikler seg over tid og at det skapes et hierarki av store og små veger. Bedre standard på en veg trekker til seg trafikk som igjen gjør det påkrevet eller forsvarlig å bedre standarden ytterligere.

Litteraturliste

- Dahl, G. and H. Minken (2008) Methods based on discrete optimization for finding road network rehabilitation strategies. *Computers & Operations Research* **35**(7), 2193-2208.
- Eriksen, K.S. og P. Christensen (2001) *Samfunnsøkonomiske effekter av investering i transportinfrastruktur*. Arbeidsdokument TØ/1327/2001.
- Ihs, A. og L. Sjøgren (2003) *An overview of HDM-4 and the Swedish Pavement Management System (PMS)*. VTI.
- Jenelius, E., T. Petersen and L.-G. Mattsson (2006) Road network vulnerability: Identifying important links and exposed regions. *Transportation Research A* **40**(7), 537-560.
- Johansen, J.M. og T.-S. Thomassen (2004) Vegkapital. Via Nordica 2004, NVF.
- Larsen, H.J.E., G. Hildebrand og R.A. McDonald (2002) *Economic Evaluation of Pavement Maintenance. PAV-ECO*. Danish Road Institute Report 114.
- Lepert, P., G. Hildebrand og J. Christensen (1999) *Development of models for economic evaluation of pavement maintenance: the PAV-ECO project*. Danish Road Institute, Report 96/1999.
- Lerfald, B.O og E.K. Sund (2003) *Vegkapital – litteraturundersøkelse*. Vegdirektoratet, Etatsprosjekt Vegkapital (SINTEF rapport STF22 A03311).
- Lerfald, B.O., I. Hoff, J. Aurstad, T. Lindland, D. Bertelsen, A. Beitnes, R. Bardal, E. Øiseth og A. Straume (2004) *Miljø- og ressurseffektiv oppgradering av veg og bane*. SINTEF rapport STF22 A04355.
- Li, Y. and S. Madanat (2002) A steady-state solution to the optimal pavement resurfacing problem. *Transportation Research A* **36**, 525-535.
- Minken, H., K.S. Eriksen, H. Samstad. og K. Jansson (2001) *Nyttekostnadsanalyse av kollektivtiltak – veileder*. TØI-rapport 526a/2001.
- OECD (2001) Assets management for the roads sector.
- Ouyang, Y. and S. Madanat (2004) Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions. *Transportation Research A* **38**(5), 347-365.
- Paterson, W.D.O. (1990) Quantifying the effectiveness of pavement maintenance and rehabilitation. In: *Proceedings at the 6th REAAA Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Pritchett, L. (1996) Mind Your P's and Q's. The Cost of Public Investment is *Not* the Value of Public Capital. Policy Research Working Paper 1660, The World Bank, Development Research Group.

- Pritchett, L. (2000) *The Tyranny of Concepts: CUDIE (Cumulated, Depreciated Investment Effort) is Not Capital*. Policy Research Working Paper 2341, The World Bank, Development Research Group.
- Qiang, Q. and A. Nagurney (2008) A unified network performance measure with importance identification and the ranking of network components. *Optimization Letters* 2(1), 127-142.
- Ravlum, I.-A. (2003) *Styring og samordning i den reformerte staten*. TØI-rapport 667/2006.
- Small, K.A., C. Winston and C.A. Evans (1989) *Road Work. A New Highway Pricing and Investment Policy*. The Brookings Institution, Washington, D.C.
- Sund, E. (2004) *Strategiske analyser av dekkevedlikehold på riksvegnettet*. SINTEF rapport STF22 A04333.
- SVV (2002) *Samfunnsmessige konsekvenser av forskjellige innsatsnivåer innen drift og vedlikehold*. Intern rapport 2269.
- SVV (2003) *Beregning av vedlikeholdsetterslepet for riksvegnettet*. Vegdirektoratet, Etatsprosjekt Vegkapital.
- SVV (2005) *Beregning av vedlikeholdsetterslepet for fylkesvegnettet*. Vegdirektoratet, Etatsprosjekt Vegkapital.
- US Department of Transport, Federal Highway Administration (2002) HERS-ST v 2.0. Technical Report.
- Vägverket (2001) *Drift och underhåll – handledning*. Publikation 2001:79.

Vedlegg 1

Diagram 1

Vi begrunner her hvorfor kurvene $A(n)$ og $B(n)$ i Diagram 1 har det forløpet som vises i diagrammet.

Ut fra våre (realistiske) forutsetninger er det åpenbart at $B(n)$ er tiltakende og konveks i det området som har interesse. Forløpet av $A(n)$ er ikke like opplagt.

Hvis $s(0)$ er mindre enn c_0 , vil $A(n)$ gå mot uendelig når n går mot null. Dette vil være tilfelle hvis man får mindre enn full pris for objektet, sjøl om man selger det videre straks uten å bruke det, eller hvis det er kostbart å få det solgt. I diagrammet antar vi at dette er tilfelle. Når n går mot uendelig, vil åpenbart $A(n)$ gå mot en endelig grense. Fra $n = 0$ til uendelig vil derfor $A(n)$ enten avta hele tida eller ha ett eller flere minimumspunkter, som kan finnes ved å sette $A'(n) = 0$. Enkel regning gir:

$$A'(n) = (-\rho) \left[\frac{e^{-\rho n}}{1 - e^{-\rho n}} (A(n) - B(n)) - s'(n) \right]$$

Vi har derfor:

$$A'(n) \leq 0 \Leftrightarrow A(n) - B(n) \geq -\frac{1 - e^{-\rho n}}{e^{-\rho n}} s'(n)$$

Der hvor $A(n)$ er avtakende eller 0, vil altså grafen til A ligge over grafen til B . Antar vi at det bare finnes ett minimumspunkt, vil situasjonen være som i Diagram 1.

Diagram 2

Vi begrunner her hvorfor kurvene $G(n)$ og $H(n)$ i Diagram 2 har det forløpet som vises i diagrammet.

Ut fra våre forutsetninger er det åpenbart at $H(n)$ er tiltakende. Vi ser at

$$\lim_{n \rightarrow 0} H(n) = g(0) + r'(0)$$

I et visst område må vi anta at H er konveks, men siden det finns en endelig grense for hvor store bruker-, vedlikeholds- og rehabiliteringskostnadene på en enkelt veg kan bli, gjelder det bare inntil en viss alder. Uansett er det konkave området av H uten interesse for en optimal tilpasning. Dette forklarer forløpet av H i diagrammet.

Når det gjelder G , finner vi først etter litt regning at

$$\lim_{n \rightarrow 0} G(n) = \infty$$

La oss så se på $G'(n)$:

$$\begin{aligned} G'(n) &= -\frac{\rho}{1-e^{-\rho n}} \left\{ \frac{\rho e^{-\rho n}}{1-e^{-\rho n}} \left(\int_0^n g(t) e^{-\rho t} dt + r(n) \right) - (g(n) e^{-\rho n} + r'(n)) \right\} \\ &= (-1) \frac{\rho e^{-\rho n}}{1-e^{-\rho n}} \left\{ (G(n) - H(n)) - \frac{1-e^{-\rho n}}{e^{-\rho n}} r'(n) \right\} \end{aligned}$$

Siden $G(n) = H(n)$ i minimumspunktet for $W(n)$, inntreffer det der hvor $G' > 0$. I minimumspunktet for G , derimot, er $G > H$. Endelig har vi (forutsatt at integralet konvergerer og $r(n)$ er begrenset) at

$$\lim_{n \rightarrow \infty} G(n) = \infty, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} G'(n) = \rho \lim_{n \rightarrow \infty} r'(n)$$

Dette begrunner diagram 2, som altså vil ha samme generelle utseende som diagram 1.

**Sist utgitte TØI publikasjoner under program:
Samfunnsøkonomiske analyser**

Bakgrunn for lønnsomhetsstrategien i Nasjonal Transportplan 2010-2019	931/2007
Følsomhetsberegninger for persontransport basert på grunnprognosene for NTP 2010-2019	924/2007
Nyttekostnadsanalyse for tunnel mellom Horn og Andalsvåg i Sør-Helgeland	917/2007
Godstransport på veg: Lastebilnæringens betydning for vekst, velferd og bosetning. Sammendragsrapport	901b/2007
Godstransport på veg: Lastebilnæringens betydning for vekst, velferd og bosetning	901/2007
Køprising i Bergen og Trondheim - et alternativ på 20 års sikt?	895/2007
Evaluering av OPS i vegsektoren	890/2007
Virkningsberegning av tiltak for raskere og mer pålitelig godstransport - en ny metode	825/2006
Vegprising, kollektivtiltak og sosial ulikhet	815/2005
Nyttekostnadsanalyse av Redningsselskapets arbeid for årene 1999 - 2004	812/2005
Nyttekostnadsanalyser i transportsektoren: Rammeverk for beregningene	798/2005
Nyttekostnadsanalyse i transportsektoren: parametre, enhetskostnader og indekser	797/2005
Nyttekostnadsanalyse i samferdselssektoren: Risikotillegget i kalkulasjonsrenta	796/2005
Bompengeringen i Tønsberg. Inntekter i forhold til finansieringsplanen.	775/2005
Utvikling av regionale modeller for persontransport i Norge	766/2005

Besøks- og postadresse:

Transportøkonomisk institutt
Gaustadalléen 21
NO 0349 Oslo

Telefon: 22 57 38 00
Telefaks: 22 60 92 00
E-post: toi@toi.no

www.toi.no



**Transportøkonomisk institutt
Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning**

- utfører forskning til nytte for samfunn og næringsliv
- har rundt 70 forskere med høy, flerfaglig samferdselskompetanse samarbeider med en rekke samfunnsinstitusjoner, forsknings- og undervisningssteder i Norge og i utlandet
- gjennomfører forsknings- og utredningsoppdrag av høy kvalitet innen områder som trafiksikkerhet, kollektivtransport, miljø, reisevaner, reiseliv, planlegging, beslutningsprosesser, transportøkonomi og næringslivets transporter
- driver aktiv forskningsformidling gjennom TØI-rapporter, Internett, tidsskriftet Samferdsel og andre nasjonale og internasjonale tidsskrifter
- deltar i CIENS, Forskningscenter for miljø og samfunn, i Forskningsparken nær Universitetet i Oslo