Miljøutbygging0508

Utbygging og miljøkostnader. Krutilla etter 40 år

Petter Andreas Gudding
MSc i Samfunnsøkonomi NTNU
og
Anders Skonhoft
Institutt for Samfunnsøkonomi
NTNU
7491 Dragvoll-Trondheim

Sammendrag

Artikkelen tar utgangspunkt i Krutilla (1967) og ser nærmere på samfunnsøkonomisk lønnsomhet av prosjekter som har negative miljøeffekter under ulike antagelser om utviklings- og miljøverdi. Vi betrakter først et tradisjonelt utbyggingsprosjekt hvor utviklingsverdi og miljøverdi er konstant over tid og hvor prosjektet får en internrente. Vi utvider så modellen og ser på konsekvensene for prosjektvurderingen av at utviklingsverdien avtar/vokser over tid, og/eller at miljøverdien vokser. Dette gir et nåverdiforløp med to internrenter. Vi viser at et slikt nåverdiforløp også kan inntreffe for prosjekter med en endelig teknisk levetid og irreversible miljøkostnader. Til slutt illustreres modellapparatet med et eksempel fra vindkraftutbyggingen på Smøla.

1 Innledning

Utbygging av natur har en alternativkostnad ved at verdien av natur i uberørt tilstand går tapt. Slike kostnader kan være av spesielt stor betydning dersom konsekvensene av et utviklingsprosjekt er irreversibelt og hvis samtidig etterspørselen etter uberørt natur vokser over tiden. En av de første økonomene som påpeke dette var John Vasil Krutilla i sin berømte artikkel 'Conservation Reconsidered' publisert i *American Economic Review* i 1967 (Krutilla 1967). Krutilla argumenterte her for at uberørte naturressurser har verdi *i seg selv* ('intrinsic value') og at personer dermed er villig til å betale for å ivareta en slik ressurs i sin opprinnelige tilstand, selv om de aldri har opplevd eller sett området, og ikke vil gjøre det i framtiden helller. Han inkluderte også begrepet opsjonsverdi som en verdikategori i naturens ikke-bruksverdi. Dette er en verdi som knyttes til at uberørt natur gir mulighet for alternativ anvendelse i fremtiden og at denne verdien går tapt hvis utbygging finner sted.

Krutilla's tanker om verdier og verdsetting av naturen som et kollektivt gode sto i sterk kontrast til datidens (men ikke bare datidens!) verditenkning, hvor fokuset først og fremst var rettet mot de verdier som kunne realiseres ved å bygge ut, eller nedbygge, naturen, dvs. bruksverdi og konsumverdi for privat tilegnelse (for en oversikt over ulike verdikategorier, se for eksempel Freeman 2003). Nye momenter ble dermed trukket inn i kostnads-nytte analysen når uberørt natur utsettes for utbyggingspress og Krutilla's analyse utfordret politikerne til å ta stilling til nye avveininger mellom vern og utbygging (Smith 2004). Nobelprisvinner Robert Solow karakteriserte analysen til Krutilla som et arbeid gjort av en person 'who understood economics deeply, and loved nature deeply' (sitert etter Smith 2004, s. 1167)[1].

En rekke artikler om utbygging og miljøkostnader ble publisert i kjølvannet av 'Conservation Reconsidered'. Arrow og Fisher (1974) viser i en to-periodemodell at optimal grad av

---

[1] John KrutiIla arbeidet i en årrekke ved forskningsinstitusjonen Resources For the Future (*RFF*), og institusjonen markerte ved et seminar sist høst at det er 40 år siden Krutilla's artikkel ble publisert. Krutilla fikk sin doktorgrad i økonomi fra Harvard og var en av grunnleggerne av *RFF* i 1952. Gjennom en over 30 år lang karriere ved institusjonen skrev han 10 bøker og publisert en lang rekke artikler. I 1990 mottok Krutilla, sammen med Allen Kneese, miljøprisen Inagural Volvo Environmental Prize for sitt arbeid. Krutilla var engasjert i arbeidet til flere innenlandske og internasjonale organisasjoner inkludert National Academy of Sciences, U.S. Forest Service, U.S. Environmental Protection Agency og Department of Interior. Les mer om Krutilla og hans arbeider på http://www.rff.org.

investering/utbygging av uberørt natur under usikkerhet skal være lavere enn ved full sikkerhet dersom prosjektet innbefatter irreversible miljøkonsekvenser samtidig som beslutningstaker får mer informasjon over tiden. Dette resultatet svarer til 'verdien av å vente' eller kvasiopsjonsverdi. Modellen predikerer at det å *ikke* vente typisk vil lede til overinvestering hvis verdien av uberørt natur stiger over tid. Se også Henry (1974) mens Perman et al. (2003, kap. 13) gir en meget god lærebokframstilling av dette spørsmålet. I et annet arbeid av Anthony Fisher, denne gangen sammen med Krutilla (Fisher og Krutilla 1975), analyseres effekten på den optimale bruken av naturressurser hvor det antas at den nytten, eller verdien, utviklingsprosjektet genererer avtar over tiden, mens verdien av uberørt natur motsatt øker. Argumentet for redusert nytte av utbygging over tid er at *menneskeskapte* produkter er underlagt teknologisk framgang og økt effektivitet, mens *ikke-menneskeskapte* verdier, som uberørt natur, er gjenstand for tiltagende knapphet og økt etterspørsel som følge av høy inntektselastisitet for denne type goder. Dermed vris forholdet mellom naturverdi og utbyggingsverdi over tiden. Tilnærmingen til Fisher og Krutilla (1975) innebærer dermed at utviklingsverdi diskonteres med en *høyere* effektiv rente mens bevaringsverdi diskonteres med en *lavere* effektiv rente. Fisher og Krutilla argumenterer for at denne tilnærmingen, med en eksplisitt oppfattning av framtidig verdiutvikling, er en bedre og riktigere tilnærming en den tradisjonelle metoden med mer tilfeldig differensiering av den faktiske diskonteringsrenten for de ulike typer goder.

Porter (1982) bygger videre på disse arbeidene og kommer med ytterligere bidrag til diskusjonen omkring utbygging av uberørt natur og miljøkostnader. Porter starter med å se på egenskapene til en tradisjonell investeringsmodell hvor miljøkostnader neglisjeres. Modelleringen innebærer at nåverdibanen er fallende for enhver diskonteringsrente og at det dermed vil eksistere *en* (unik) internrente for prosjektet. Modellen utvides så med alternativverdien av området og dermed miljøkostnader, og viser først hva om skjer når miljøverdien holdes fast over tiden. I et neste steg antar Porter, som Fisher og Krutilla (1975), at utviklingsverdien avtar over tiden mens miljøverdien øker. For et evigvarende prosjekt betyr dette at prosjektets nåverdibane radikalt endrer form og hvor prosjektet typisk får to internrenter. Dette innebærer at et prosjekt kan være samfunnsøkonomisk ulønnsomt *både* for høye og lave verdier på kalkulasjonsrenten. Prosjektet har dermed endret seg til å bli et såkalt *ikke-konvensjonelt prosjekt*. Mens et konvensjonelt prosjekt er karakterisert ved at en negativ kontantstrøm (typisk investeringskostnaden) etterfølges kun av positive strømmer (typisk positiv årlig profitt), er et ikke-konvensjonelt prosjekt karakterisert ved at negative strømmer etterfølger positive strømmer (se for eksempel Sandvik 2003). Som vi skal se er det nettopp det som skjer i modellen til Porter (1982), men det skjer på den spesielle måten at fortegnet på kontantstrømmen skifter som følge av *relativ* verdivridning over tid.

Så langt noen bidrag fra litteraturen som bygger nokså direkte på Krutilla (1967). Det vi skal gjøre i denne artikkelen er å analysere ulike formuleringer for utbyggingsverdi og miljøverdi basert på denne litteraturen. Utgangspunktet er en tradisjonell modell hvor miljøkostnadene antas å være konstante over tiden. Ved å se på konsekvensene for prosjektvurderingen av avtakende verdi av utbyggingsgodet og økende verdi for uberørt natur, utvides modellen i samsvar med teoriene til Krutilla (1967) og Porter (1982). Men i motsetning til Porter ser vi også på denne modellen hvor verdien av utbyggingsgodet *øker* over tiden. I begge disse tilfellene leder prosjektvurderingen fram til et ikke-konvensjonelt prosjekt. Vi argumenterer videre for at den tradisjonelle modelleringen av irreversible miljøkostnader i mange tilfeller ikke gir et realistisk bilde av virkeligheten og det vises at en eksplisitt modellering av irreversible miljøkostnader, hvor verdien av ubebygd natur antas å være evigvarende mens verdien av utbyggingsgodet har endelig levetid, også kan lede frem til at prosjektet blir ikke-konvensjonelt. Dette er et forhold som vi ikke kjenner til er tatt opp før. Til slutt viser vi anvendelsen av betraktningene på et konkret prosjekt, nemlig en *ex post* analyse av vindkraftutbyggingen på Smøla på Nord-Møre som fant sted 2001-2005. Denne beregningen diskuteres også i lys av gjeldende kostnads nytte praksis gjort av Norges Vassdrags og Energidirektorat (NVE) som behandler energiselskapenes konsesjonssøknader om vindkraftutbygging i Norge.

2. Krutilla modellen

2.1 Konstante verdistrømmer

Utgangspunktet for analysen er et investeringsprosjekt hvor beslutningstaker (den sosiale planlegger) står overfor to valgmuligheter for disponering av et gitt område uberørt natur: Enten kan hele området bygges ut i dag, eller så kan området bevares uberørt til evig tid. Altså en enten-eller situasjon slik at muligheten til å foreta en *gradvis* utbygging av området neglisjeres. Dette betyr at redusert usikkerhet grunnet økt kunnskap over tid (og dermed eksistens av kvasiopsjonsverdi) ikke er en aktuell problemstilling her (se ovenfor). Vi tar ikke stilling til hvordan verdien av uberørt natur kan verdsettes (men se for eks, Freeman 2003 og Smith 2004 og referansene her) i det vi ganske enkelt antar at uberørt natur har en verdi. Men som vi skal se, miljøverdien kan avdekkes på en indirekte måte ved å studere sammenhengen mellom rente og prosjektlønnsomhet. Det vi da typisk finner er at 'hvis prosjektet skal være samfunnsøkonomisk lønnsomt, kan ikke miljøverdien være større enn så eller så'.

Med investeringskostnad $I > 0$, konstant verdi av nytten av utbyggingen over tid $D_t = D > 0$ (hvor t angir tiden), konstant verdi av området i form av tapt miljøverdi (alternativverdien) $P_t = P > 0$ og fast diskonteringsrente $r \geq 0$, er prosjektets nåverdi

(1) $$NV = -I + \int_0^\infty De^{-rt}dt - \int_0^\infty Pe^{-rt}dt$$

ved momentan investering og uendelig levetid. Tidspunktet for prosjektstart er gitt og settes konvensjonelt til $t = 0$[2]. Legg ellers merke til at siden nytten fra utbyggingen og den tapte nytten fra bevaring begge påløper i hele prosjektets levertid, gir ikke denne problemformuleringen en eksplisitt fremstilling av irreversibilitet (men se seksjon tre nedenfor). Formuleringen (1) kan imidlertid sies å representere irreversibilitet i spesielle tilfeller. For eksempel kan en tenke seg etablering av et damanlegg i forbindelse med vannkraftutbygging som et prosjekt hvor den tekniske levetiden er såpass lang at verdistrømmen av utbygging, i likhet med kostnadsstrømmen av den uberørte naturen, i prinsippet varer evig.

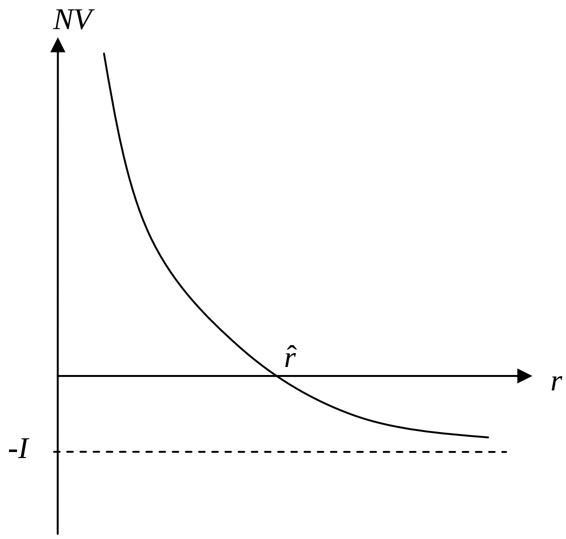
Umiddelbart ser vi at det er to hovedmuligheter i prosjektvurderingen. For det første har vi at hvis $(D - P) < 0$ er det åpenbart at utbygging under ingen omstendighet kan være samfunnsøkonomisk lønnsomt og da er det ikke noe mer å si om saken. Vi ser derfor på det motsatte tilfellet $(D - P) > 0$. Løst gir likning (1)

(2) $$NV = -I + \frac{D}{r} - \frac{P}{r},$$

og hvor vi enkelt ser at nåverdien er avtagende i diskonteringsrenten og at prosjektets internrente er lik $\hat{r} = (D - P)/I$. Videre har vi at $\lim_{r \to 0} NV = \infty$ og $\lim_{r \to \infty} NV = -I$ mens $\mathrm{d}^2 NV / dr^2 = 2(D - P)/r^3 > 0$ slik at nåverdien er en avtagende og konveks funksjon i r. Nåverdibanen for prosjektet kan dermed fremstilles som i Figur 1. For en samfunnsøkonomisk kalkulasjonsrente (planleggerens minstekrav til avkastning) lavere enn $\hat{r}$ er følgelig prosjektet akseptabelt og kostnads-nytte vurderingen sier da at området bør

[2] For betraktningen i dette avsnittet spiller denne antagelsen ingen rolle, men betyr åpenbart noe når verdistrømmene endres over tiden. Teorien for optimalt utbyggingstidspunkt når *nytte*strømmen av prosjektet endres over tiden er analysert av Marglin (1963). Denne problemstillingen behandles ikke her.

bygges ut. En høyere verdsetting av uberørt natur gir $\partial NV / dP < 0$ og bidrar naturlig nok til at et samfunnsøkonomisk lønnsomt prosjekt kan bli ulønnsomt, mens økt utbyggingsnytte virker i motsatt retning.



Figur 1. Nåverdifunksjon. Konstant utbyggingsverdi og konstant miljøverdi

Ovenfor har vi antatt uendelig teknisk levetid for prosjektet. Hvis levetiden er *endelig* og lik T år og miljøkostnaden også antas å påløpe kun i endelig tid (men se nedenfor), er prosjektets nåverdi $NV = -I + \int_0^T De^{-rt}dt - \int_0^T Pe^{-rt}dt = -I + (D/r)(1-e^{-rT}) - (P/r)(1-e^{-rT})$. Det antas her 'sudden death' av den installerte kapital, dvs. produksjonskapasiteten opprettholdes fullt ut i T perioder og faller så momentant bort. Det kan enkelt konstateres at denne formuleringen ikke gir noen prinsipielt nytt i forhold til formuleringen ovenfor. Også nå er nåverdikurven fallende og prosjektet har kun en internrente. Men vi finner ved bruk av l'Hopitals regel at $\lim_{r \to 0} NV = (D-P)T$. Nåverdien er derfor endelig og lik den udiskonterte summen av løpende nettonytte når $r = 0$.

2.2 Endrete verdistrømmer

Som nevnt argumenterte Krutilla (1967) og Porter (1982) for at antagelsen om konstante verdistrømmer over tiden er lite realistisk, og spesielt vil det kunne inntre verdivridninger for prosjekter med lang levetid. Det vil da være nødvendig med en modifisering av modellen ovenfor som tar høyde for endret utbyggings- og miljøverdi. En nokså generell måte å gjøre dette på og som får fram de prinsippielle overveielsene, er som i Porter (1982) å anta en fast årlig (eksogen) vekstrate for begge verdistrømmer. Vi har dermed $D_t = De^{-\alpha t}$ og $P_t = Pe^{\gamma t}$ slik at α og γ indikerer verdiutviklingen i h.h.v. utbygging og miljø. Uttykket for nåverdien endres da til:

$$(3) \qquad NV = -I + \int_0^\infty De^{-(r+\alpha)t}dt - \int_0^\infty Pe^{-(r-\gamma)t}dt .$$

I tråd med Krutilla (1967) og Fisher og Krutilla (1975) forutsatte Porter (1982) at verdien av uberørt natur vokser over tid, dvs $\gamma > 0$. Som nevnt er argumentet for dette tiltakende knapphet av uberørt natur og økt etterspørsel som følge av høy inntektselastisitet for denne type gode. På den annen side kan α både være positiv og negativ, avhengig av type utbyggingsprosjekt. Porter begrenset seg til å analysere tilfellet $\alpha \geq 0$, dvs. den situasjonen hvor utbyggingsverdien, eller mer generelt verdien av materielle goder, ikke vokser over tiden. Vi skal imidlertid også se på den motsatte situasjonen med vekst. Fortsatt antar vi $(D - P) > 0$.

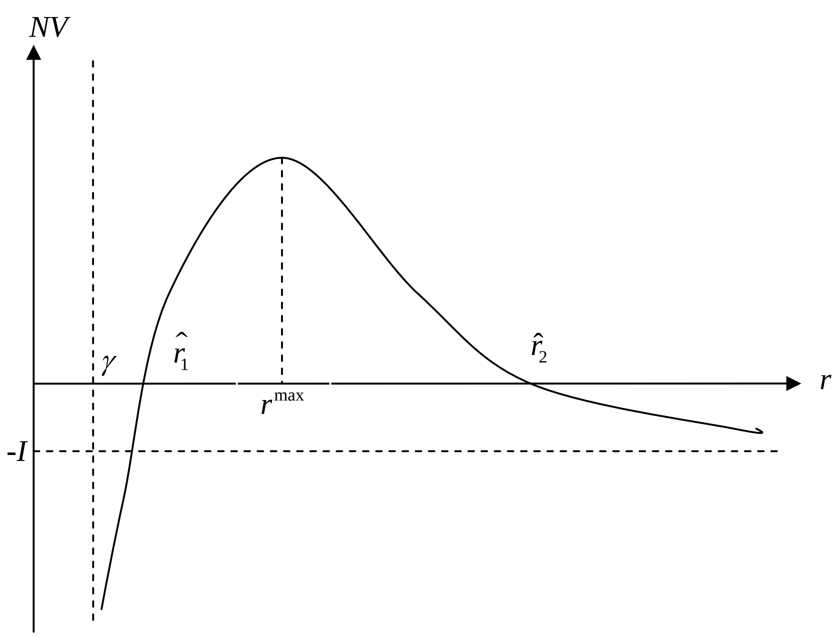
2.2.1 Ikke-økende utbyggingsverdi

Vi ser først på den situasjonen hvor verdien av utbyggingsgodet ikke øker, dvs. likning (3) holder med $\alpha \geq 0$ mens altså $\gamma > 0$. Igjen er det to hovedmuligheter vi må forholde oss til. Hvis $\gamma > r$ vil den neddiskonterte verdien av uberørt natur vokse over alle grenser slik at utbygging ikke under noen omstendighet kan være samfunnsøkonomisk lønnsom. Det interessante tilfellet er derfor $r > \gamma > 0$. I denne situasjonen konvergerer begge integralene i (3) og løsningen av uttrykket kan skrives som:

$$(4) \qquad NV = -I + \frac{D}{r+\alpha} - \frac{P}{r-\gamma} .$$

Av (4) sees at verdien av utbygging blir diskontert med en effektiv rente $r+\alpha$ mens miljøgodet blir diskontert med en effektive rente $r-\gamma$. Dette betyr naturlig nok at miljøverdien tillegges større vekt av beslutningstaker enn i modellen ovenfor med det resultat at det skal ’mer til’ for at utbyggingsprosjektet blir samfunnsøkonomisk lønnsomt. Men det er langt fra opplagt hvordan det skjer.

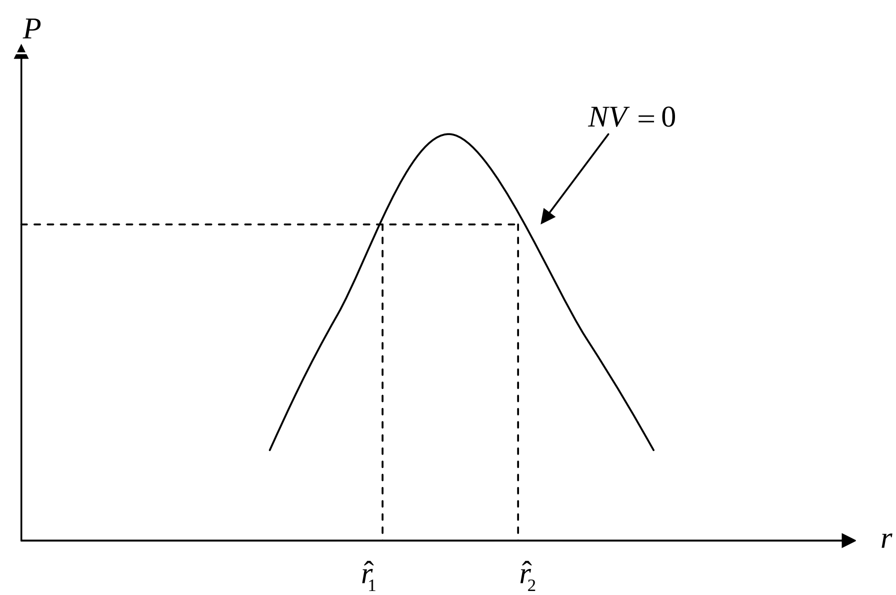
Vi ser først at $\lim_{r\to\infty} NV = -I$ som tidligere, mens vi nå har $\lim_{r\to\gamma} NV = -\infty$. Nåverdifunksjonen har derfor fortsatt to asymptoter. Vi finner videre at $dNV/dr \; = -D/\left(r+\alpha\right)^2 + P/\left(r-\gamma\right)^2$ slik at $dNV/dr < 0$ når $[(r+\alpha)/(r-\gamma)]^2 < (D/P)$. For gitte verdier på D og P må dette åpenbart holde når diskonteringsrenten er forholdsvis høy. Motsatt vil nåverdien øke for lave verdier av r. Nåverdifunksjonen har dermed en maksimalverdi for en rente høyere enn γ. Gitt at denne maksimumsverdien er positiv (men se nedenfor) følger det dermed at det vil være to positive verdier for internrenten. Disse verdiene finner vi ved å sette likning (4) lik null og løse ut . Nåverdien som funksjon av diskonteringsrenten kan derfor framstilles som i Figur 2, og hvor prosjektet har en positiv nåverdi for en kalkulasjonsrente $\hat{r}_1 < r < \hat{r}_2$. Matematikken i dette problemet er vist mer detaljert i Appendikset.



Figur 2. Nåverdifunksjonen. Ikke-økende utbyggingsverdi og økende miljøverdi

Porter (1982) viser med denne fremstillingen at forslaget til Krutilla (1967) om å inkludere alternativverdien av utbyggingsområdet kan ha stor betydning for prosjektvurderingen. Et utbyggingsprosjekt er ikke lenger samfunnsøkonomisk ulønnsomt *bare* på grunn av at nytten det genererer er høyt diskontert. Det er også ulønnsomt for lave verdier på diskonteringsrenten. Dette skyldes at den eksponentielt voksende bevaringsverdien P er så lavt diskontert at tapet av nytten fra bevaring av naturen blir en for stor kostnad å bære til at prosjektet vil være lønnsomt. Og før eller senere vil denne verdien overstige den løpende nytten av utbyggingen. Som nevnt i innledningsavsnittet, er det denne mekanismen som gjør at prosjektet får to internrenter og blir ikke-konvensjonelt. Alt i alt betyr dette at en ikke uten videre kan predikere hvilken innvirkning en endring i den samfunnsøkonomiske kalkulasjonsrenten har for prosjektvurderingen.

En annen måte å se dette på er å plotte sammenhørende verdier av internrentene og miljøverdien P. Det kan enkelt vises at en høyere initial verdsetting av uberørt natur gir lavere nåverdi, $\partial PV / \partial P < 0$. Ikke overraskende bidrar dette til at $\hat{r}_1$ øker mens $\hat{r}_2$ reduseres slik at området for en kalkulasjonsrente som gir samfunnsøkonomisk lønnsomhet reduseres. De kombinasjoner av kalkulasjonsrenten og den initiale miljøverdien som ligger innenfor kurven i Figur 3 gir derfor positiv nåverdi, mens kombinasjoner utenfor kurven gir negativ verdi. For den antydete miljøverdi gitt ved horisontale stiplete linjen betyr dette følgelig at hvis kravet til avkastning ligger i intervallet $\hat{r}_1 < r < \hat{r}_2$, er prosjektet samfunnsøkonomisk lønnsomt. På den annen side vil det lavere avkastningskravet $r < \hat{r}_1$ *ikke* gi samfunnsøkonomisk lønnsomhet. En numerisk illustrasjon av denne modellen med avtakende utbyggingsverdi og voksende miljøverdi er gitt i Appendikset.



Figur 3. Miljøverdi og internrente

La oss også kort se på denne modellen med endelig teknisk levetid og hvor miljøkostnadene påløper kun over prosjektets levetid. Denne situasjonen svarer til det første beregningssettet vi ser på i vindkrafteksemplet i avsnitt 4. Vi har da $NV = -I + \int_0^T De^{-(r+\alpha)t}dt - \int_0^T Pe^{-(r-\gamma)t}dt$. Løst gir dette:

(5) $$PV = -I + \frac{D(1-e^{-(r+\alpha)T})}{(r+\alpha)} - \frac{P(1-e^{-(r-\gamma)T})}{(r-\gamma)}.$$

Igjen har vi $\lim_{r\to\infty} NV = -I$. Ved bruk av l'Hopitals regel finner vi videre $\lim_{r\to\gamma} NV = -I + D(1-e^{-(\gamma+\alpha)T})/(\gamma+\alpha) - PT$. Nåverdien har dermed en endelig verdi når $r=\gamma$ og er positiv hvis $I + PT < D(1-e^{-(\gamma+\alpha)T})/(\gamma+\alpha)$. Dette kan også skrives som $I + PT < \int_0^T De^{-(\gamma+\alpha)t}dt$ og svarer til at den udiskonterte verdien av totalkostnadene er lavere enn utbyggingsverdien diskontert med den effektive rente $(\gamma+\alpha)$. Dette vil typisk holde når levetiden T er lav eller moderat. Det kan videre vises at NV hele tiden da er fallende slik at prosjektet typisk kun har en internrente (se også avsnitt 4). For denne typen prosjekt vil T da simpelthen være for kort til at en kombinasjon av redusert utbyggingsverdi og voksende miljøverdi leder til negative betalingsstrømmer over tid. Men ved lengre teknisk levetid og høyere vekst miljøverdien kan det oppnås et nåverdiforløp som i Figur 2.

2.2.2 Økende utbyggingsverdi

Som nevnt vil det for enkelte typer prosjekter være urealistisk å anta verdifall av utbyggingsverdien over tid. Dette vil for eksempel kunne tenkes å gjelde hvis utbyggingsprosjektet gir ny kapasitet for energiproduksjon (se også avsnitt 4). Vi utvider derfor nå modellen til Porter (1982) til også å se på denne situasjonen. Dette gjøres ved å omforme uttrykket (3) til $NV = -I + \int_0^\infty De^{-(r-\alpha)t}dt - \int_0^\infty Pe^{-(r-\gamma)t}dt$ og hvor $D_t = De^{\alpha t}$ slik at $\alpha > 0$ nå betyr *vekst* i ubyggingsverdien. Analogt med begrensningen av veksten i miljøverdien må også utbyggingsverdien være begrenset hvis vi ikke skal få en triviell løsning på investeringsproblemet. $r > \alpha > 0$ er derfor antatt å holde i det etterfølgende. Gitt denne vekstbegrensningen og fortsatt $r > \gamma > 0$ slik at begge integralene konvergerer, er det hensiktmessig å sondre mellom tilfellet der miljøverdien vokser raskere enn utbyggingsverdien, og motsatt.

I det første tilfellet med $r > \gamma > \alpha > 0$ blir nåverdien

$$NV = -I + \frac{D}{r-\alpha} - \frac{P}{r-\gamma} \tag{6}$$

og hvor vi igjen ser at $\lim_{r\to\infty} NV = -I$ og $\lim_{r\to\gamma} NV = -\infty$ slik at $-I$ og γ igjen er asymptoter for nåverdifunksjonen. Tilsvarende som ovenfor finner vi videre at $dNV/dr < 0$ når $[(r-\alpha)/(r-\gamma)]^2 < (D/P)$ som igjen holder for høye verdier på r. Nåverdien har dermed også nå en maksimalverdi som igjen leder til to positive verdier for internrenten (gitt at miljøverdien ikke er for høy). Ved å sette likning (6) lik null og løse ut for r, kan vi igjen finne verdiene. Resultatet blir svært lik som ovenfor, men ikke overraskende blir nå intervallet for en kalkulasjonsrente som gir positiv nåverdi større.

Vi har så det andre tilfellet hvor veksten i utbyggingsverdien er høyere enn miljøverdien, $r > \alpha > \gamma > 0$. Løsningen blir som tidligere $NV = -I + \frac{D}{r-\alpha} - \frac{P}{r-\gamma}$, men vi har nå $\lim_{r\to\alpha} NV = \infty$. Igjen finner vi $dNV/dr < 0$ når $[(r-\alpha)/(r-\gamma)]^2 < (D/P)$ som alltid nå holder fordi $D > P$. Konklusjonen er derfor at nåverdifunksjonen er fallende i hele definisjonsområdet slik som i den tradisjonelle analysen gitt av Figur 1. Den eneste forskjell er at $r = \alpha$ erstatter $r = 0$ som vertikal asymptote.

3. Endelig økonomisk levetid og irreversibilitet

3.1 Irreversibel miljøverdi

Som diskutert tidligere vil formuleringene i avsnitt 2 bare kunne sies å representere irreversibilitet for den type prosjekter hvor den tekniske levetiden er så lang at prosjektnytten tilnærmet påløper over en uendelig lang tidshorisont. Dette vil eksempelvis kunne gjelde for et damanlegg ved elektrisitetsutbygging. For øvrig har de aller fleste utbyggingsprosjekter en begrenset teknisk levetid. Betrakter man for eksempel utbygging av et vindkraftverk, vil den tekniske levetiden, med dagens teknologi, kanskje være rundt 20 år (avsnitt 4 nedenfor). Dersom prosjektet allikevel påfører naturen irreversible konsekvenser ved at miljøinngrepene er uopprettelige eller at det skjer varig skade på fugleliv og fauna, vil miljøkostnadene påløpe over en uendelig tidshorisont. I en slik situasjon vil følgelig utbyggingsverdien påløpe over en endelig tidshorisont mens miljøkostnadene påløper over en uendelig horisont. Dette tilfellet studeres nå. Men vi kan også ha en situasjon hvor deler av miljøkostnadene opphører i og med nedriggingen av anlegget. Denne modellen ser vi litt på i avsnitt 3.2. I begge disse modellene neglisjeres nå mulige verdiendringer over tiden, dvs. vi setter $\gamma = \alpha = 0$.

Når hele miljøkostnaden er irreversibel blir nåverdien av utbyggingsprosjektet $NV = -I + \int_0^T De^{-rt}dt - \int_0^\infty Pe^{-rt}dt$. T er igjen er den installerte realkapitals tekniske levetid og antagelsen er fortsatt 'sudden death' (avsnitt 2.1). Løst gir dette:

(7) $$NV = -I + \frac{D}{r}\left(1 - e^{-rT}\right) - \frac{P}{r}$$

Fortsatt har vi $\lim_{r\to\infty} NV = -I$, mens vi igjen ved bruk av l'Hopitals regel finner $\lim_{r\to 0} NV = -\infty$. Dette gir følgelig nå asymptotene til nåverdifunksjonen. Derivasjon gir videre $dNV / dr = (1/r^2)[De^{-rT}\left(1+Tr\right) - D + P]$ som er positivt for lave og negativ for høye verdier på diskonteringsrenten. $NV = 0$ gir $-Ir + D\left(1-e^{-rT}\right) - P = 0$. Denne likningen lar seg ikke løse, men har åpenbart to røtter hvis I er tilstrekkelig lav i verdi hvilket enkelt kan konstateres ved å omformulere uttrykket til $D\left(1-e^{-rT}\right) = P + Ir$. Her vil venstresiden være en stigende konkav funksjon i r med startverdi null og som asymptotisk går mot D . Den deriverte av dette uttrykket for $r = 0$ er DT . En nødvendig betingelse for to internrenter er dermed $DT > I$ og $P > 0$. Også dette prosjektet kan følgelig være ikke-konvensjonelt fordi kontantstrømmen etter perioder med positiv verdi, blir negativ for alle $t > T$. Et numerisk eksempel i Appendikset klargjør implikasjonene av irreversibilitet for prosjektvurderingen.

Ovenfor antok vi at verdistrømmen av utbyggingen stoppet helt opp etter den tekniske levetiden på T år. Nå kan en imidlertid tenke seg en situasjon med reinvesteringer slik at den utslitte realkapital erstattes med en ny dose I etter T år, som igjen erstattes etter $2T$ år, og så videre. En utledning av dette problemet for et tilfelle med uendelig antall reinvesteringer er gjengitt i Appendikset. Det viser seg da at prosjektet enten kan ha en positiv rot eller ingen positiv rot, men ikke to røtter. Et prosjekt av denne typen vil derfor ikke kunne ha et nåverdiforløp som prosjektet i Figur 2.

3.2 To miljøverdier

I modellen diskutert i avsnitt 3.1 er det forutsatt at hele miljøkostnaden er irreversibel og dermed påløper over en uendelig tidshorisont. Utbyggingsprosjekter kan imidlertid forårsake en *kombinasjon* av både reversible og irreversible miljøkonsekvenser, noe som medfører at modellen må modifiseres. Eksempelvis vil et vindkraftprosjekt kunne ha reversible miljøkonsekvenser i den forstand at turbinene kan demonteres og fjernes fra produksjonsområdet når konsesjonstiden er løpt ut. Dette gjør at den visuelle forurensingen fra utbyggingen forårsaket av selve turbinene opphører i det produksjonsanlegget fjernes. På den annen side vil spor etter infrastruktur som veier og oppstillingsplasser vanskelig la seg fjerne fullt (se også avsnitt 4).

Under bla forutsetningen om at investeringskostnaden ikke er for høy vil denne type prosjekt også kunne gi to verdier på internrenten. Det vil også være situasjonen hvis det inkluderes stigende miljøverdi over tid. I det etterfølgende eksempelet kommer vi tilbake til dette. I Appendikset er et forslag til modellering av denne type prosjekt vist.

4. Vindkraftutbygging på Smøla

Modellapparatet analysert ovenfor vil nå belyses med et eksempel. I desember 2000 ga Norges Vassdrags og Energidirektorat (NVE) konsesjon til at Statkraft kunne bygge og drive et vindkraftverk med en installert effekt på 150 MW i Smøla kommune på kysten av Nord-Møre. Utbyggingen som ble fordelt på to byggetrinn, startet opp i 2001. Første byggetrinn med 20 turbiner, hver med kapasitet på 2 MW, stod ferdig til oppstart i september 2002. Forventet energiproduksjon er her 110 GWh/år. Investeringskostnaden, inkludert kostnader til oppkobling mot eksisterende overføringsnett, er oppgitt til 280 millioner NOK (i 1999 verdi). Byggetrinn to som omfattet 48 turbiner med en samlet installert kapasitet på 110 MW ble startet opp i september 2005. Forventet produksjon er her 300 GWh/år. Inkludert kostnader til utbygging av overføringsnett er investeringskostnaden 720 millioner NOK (i 1999 verdi). Opplysninger fra den norske turbinprodusenten Scanwind gjør det rimelig å anta at hvert byggetrinn har en teknisk/økonomisk levetid på 20 år. Se Gudding (2007) for mer detaljer.

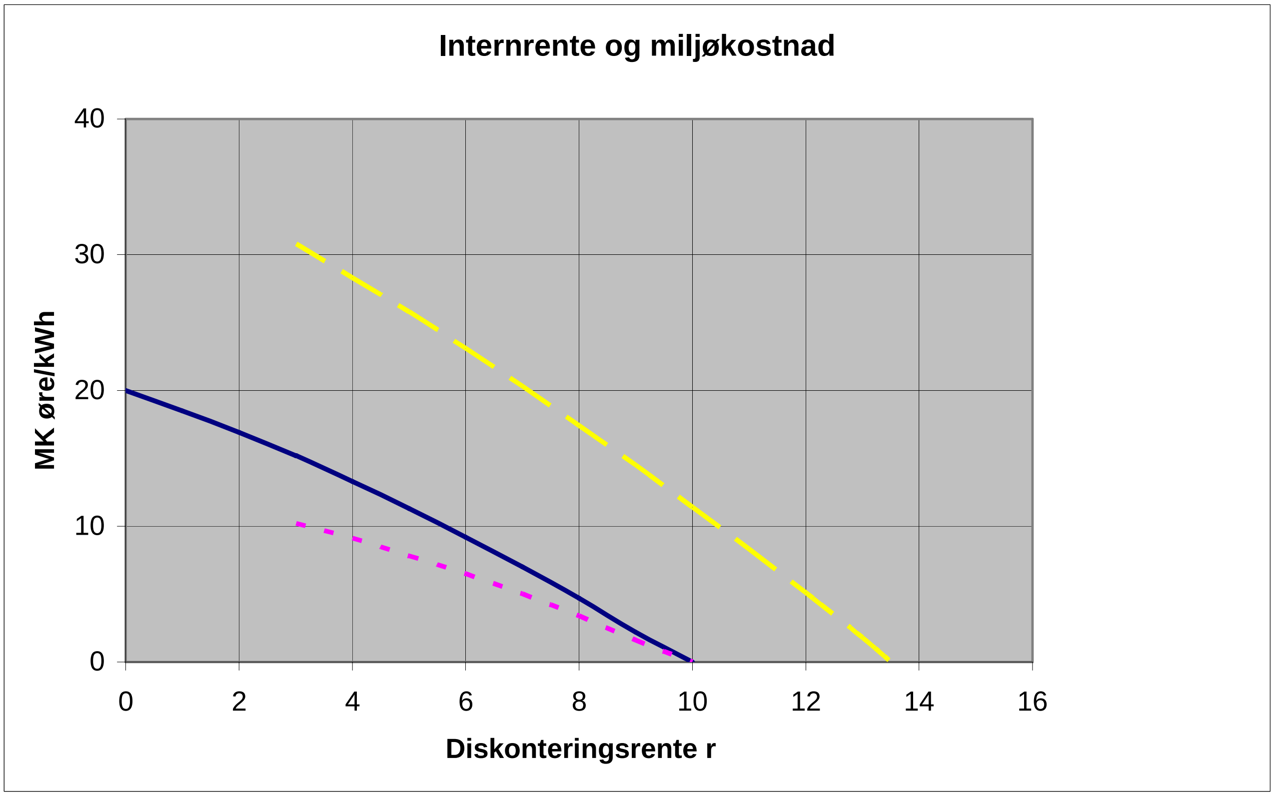
Denne utbyggingen, som er Europas største landbaserte vindkraftverk, har vært svært omdiskutert på grunn av store naturinngrep i tidligere uberørt natur. Det flate Smøla-landet betraktes også som et viktig leveområde for flere fuglearter. De 68 vindturbinene med en høyde på over hundre meter er spredt over et område på om lag 18 kvadratkilometer. I tilknytning til anlegget er det bygget 28 km interne veger, strukket 14,7 kilometer 132 kV kabel i lufta og lagt 15 km med sjø- og jordkabel. Inngrepet har derfor medført at det tidligere urørte området i dag fremstår som et stort produksjonslandskap. Mange oppfatter slike anlegg som visuell forsøpling (se igjen Gudding 2007). Deler av den visuelle forurensingen vil opphøre den dagen produksjonen stanses (om den gjør det!), vindturbinene demonteres og transporteres vekk fra produksjonsområdet. Veier, grøfter, fundamenter og oppstillingsplasser kan man lett se for seg at det vil bli vanskelig eller umulig å fjerne alle spor etter. Inngrepet vil derfor kunne medføre både reversible og irreversible miljøkostnader. De negative konsekvensene for fuglelivet, og spesielt havørna, har også fått stor oppmerksomhet. Problemet består i hovedsak av at vindkraftutbyggingen fortrenger havørna fra et viktig leveområde og at det har forekommet relativt hyppige kollisjoner mellom havørn og vindturbiner. I perioden 2005-2007 ble 13 havørn drept som følge av kollisjoner med rotorvingene. Havørnas lave produksjon av ungfugl og lange livsløp medfører at tap av kun få individer vil kunne være av betydning for bestanden. Norsk Ornitologisk Forening frykter at den omfattende vindkraftutbyggingen der vil kunne påføre havørnbestanden varig skade. Dersom vindkraftutbyggingen påfører havørnbestanden varig skade vil også dette være et argument for å inkludere irreversible miljøkostnader i en nytte- kostnadsanalyse av utbyggingen.

I den etterfølgende *ex post* nytte- kostnadsanalyse av Smøla utbyggingen basert på Gudding (2007) antas det at investeringen i byggetrinn 1 er gjort i starten av år 2001 mens investeringen i trinn 2 antas gjort i starten av år 2004. For perioden 2002 til og med 2005 benyttes faktiske produksjonsdata i beregningene. For perioden 2006 til og med 2021 antas den samlede årlige produksjonen for trinn 1 og 2 å bli 410 GWh. For perioden 2022 til og med 2024 vil det kun være trinn 2 som står i produksjon. Den årlige produksjonen antas for denne perioden å være 300 GWh. Dette innebærer at produksjonsforventningene oppgitt i konsesjonen forutsettes innfridd. Beregningene tar utgangspunkt i en initial strømpris på 40 øre/kWh (Bye og Holmøy 2006). Statkraft (2000) forventer en løpende driftskostnad på 7,6 øre per kWh. Av disse utgjør 3,1 øre/kWh produksjons og nettrelaterte utgifter.

Oppsummert, og med notasjonen brukt ovenfor, bruker vi dermed følgende data. Investeringskostnadene settes til 280 mill.kr for første byggetrinn og 720 mill.kr for annet byggetrinn, til sammen $I = 1000$ millioner NOK. Utbyggingsverdien omfatter kun salgsverdien av elektrisiteten minus driftskostnadene, altså profitten, i og med at dette er et marginalt prosjekt som ikke gir noe konsumentoverskudd. For den antatte produksjonskapasitet har vi dermed $D = (0.40 - 0.076) \bullet 410 = 132,8$ millioner NOK, som altså gjelder i hovedtyngden av prosjektperioden. Levetiden settes til $T = 24$ år. Merk at dette er tilnærmede tall, i og med at utbyggingen ikke er momentan og omfatter to byggetrinn. Men dette er tatt hensyn til i de etterfølgende beregninger (igjen, se Gudding 2007).

I bergningene bringes både *reversible* og *irreversible* miljøkostnader inn. I det første sett av beregninger ser vi først nærmere på hvor høye reversible miljøkostnader Smøla-prosjektet maksimalt kan tåle for å være samfunnsøkonomisk lønnsomt under alternative antakelser om verdiveksten på miljøgodet. Men vi ser også på følsomheten ved å anta verdivekst av utbyggingen, dvs. prisutviklingen på elektrisk energi. I et annet sett av beregninger tar vi for oss de irreversible miljøkostnadene og beregner hvor høye disse maksimalt kan være for at prosjektet skal være samfunnsøkonomisk lønnsomt. Legg derfor igjen merke til at vi ikke gjør noe forsøk på eksplisitt å kalkulere miljøkostnadene ved utbyggingen. De avdekkes indirekte ved å stille ulike krav til prosjektavkastningen.

Det første beregningssettet presenteres i et basisscenario og to alternative scenarier. I *Basisscenariet* betraktes prosjektet på den tradisjonelle måten som innebærer at både den reversible miljøkostnaden og utbyggingsverdien forutsettes å være konstant over hele levetiden T år. Sett i lys av modellapparatet som ble utviklet i avsnitt 2, innebærer dette at både α og γ settes lik null. I *Scenario 1* inkluderes en årlig vekstrate på 3 % i den reversible miljøkostnaden mens utbyggingsverdien forutsettes fortsatt å være konstant. Vi har her dermed $\alpha = 0$ og $\gamma = 0.03$. Til slutt betraktes *Scenario 2* hvor miljøkostnaden antas å være konstant over tiden, mens verdien utbyggingsgodet (elektrisk energi) forutsettes å vokse med 3 % årlig, altså $\alpha = 0.03$ og $\gamma = 0$. Figur 4 viser resultatene.



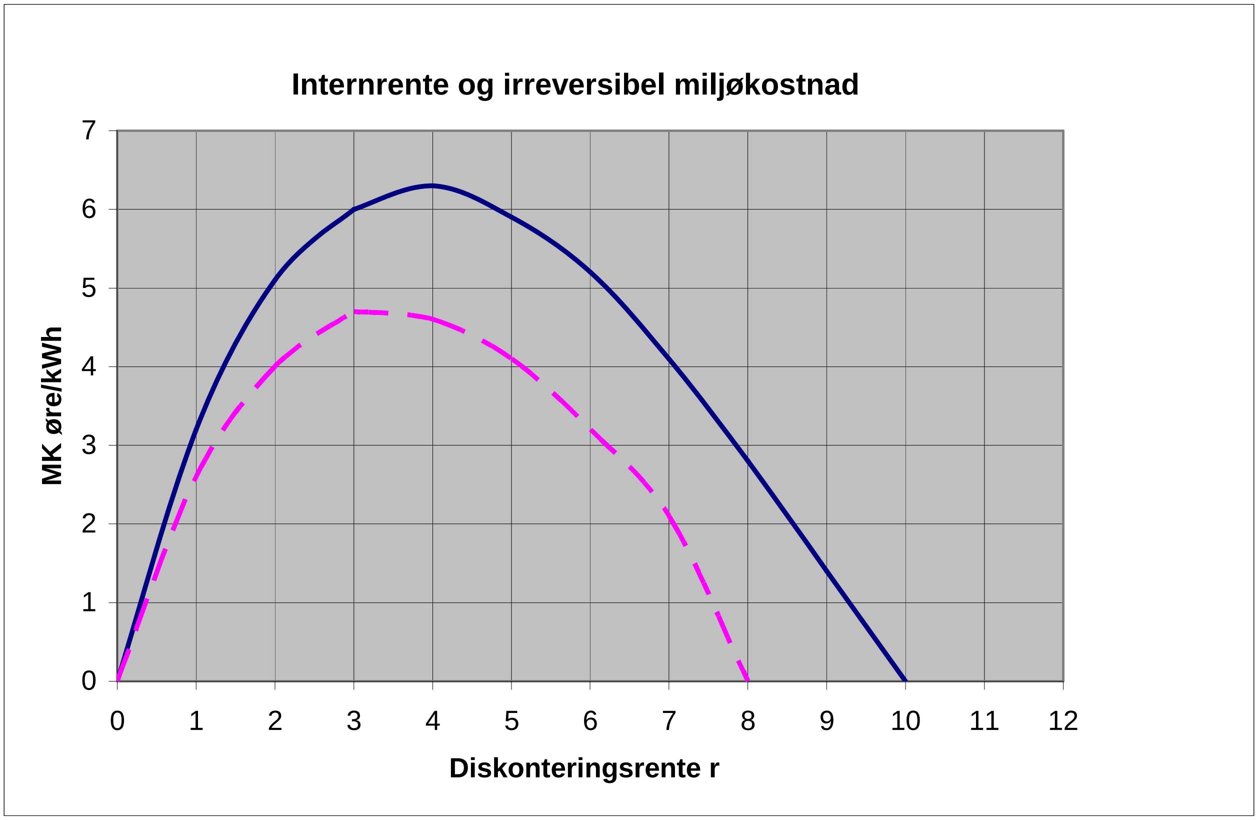
Figur 4. Internrente og miljøkostnader

I figuren representerer den fete grafen Basisscenariet og viser prosjektets internrente for ulik størrelse på miljøverdien (MK), normert per kWh årlig produksjon. De kombinasjoner av rente og miljøkostnader som ligger innenfor (nedenfor) kurven gir dermed positiv nåverdi mens kombinasjoner utenfor gir negativ nåverdi. For en kalkulasjonsrente på 6 % sees det at prosjektet maksimalt tåler en reversibel miljøkostnad på om lag 9 øre/kWh for å gi en positiv nåverdi. 9 øre/kWh betyr en årlig (fast) miljøkostnad på $P = 0.09 \bullet 410 = 36,9$ millioner NOK.

Den finstiplede grafen er Scenario 1 og gir under forutsetning om årlig vekst i miljøkostnaden på 3 %, prosjektets internrente for ulik verdi på den *initiale* miljøkostnaden P. Grafen er derfor bare definert for renter høyere enn 3 % (se avsnitt 2.2.1). 3 % årlig vekst betyr at miljøkostnaden, eller verdsettingen av miljøet, omtrent fordobles i løpet av prosjektets levetid. Årsaken til at vi ikke får to internrenter for dette prosjektscenariet er at både nytte- og kostnadskomponentene påløper like lenge, og over en forholdsvis kort periode (se slutten avsnitt 2.2.1). Scenario 2, gitt ved den grovstiplede kurven, gir til slutt internrenten under forutsetning om årlig vekst i utbyggingsverdien på 3 % for ulik størrelse på den nå konstante miljøkostnaden. Som diskutert i avsnitt 2.2.2 er også dette prosjektet bare definert for diskonteringsrenter høyere enn vekstraten til utbyggingsverdien, altså 3 %.

Arealet mellom ytterpunktene i Figur 3, gitt ved prosjektets minst gunstige (Scenario 1) og mest gunstige scenariet (Scenario 2) kan oppfattes å representere usikkerheten i prosjektet knyttet til den antatte verdiutviklingen. For en diskonteringsrente på 6 % vil prosjektet *minimalt* tåle en initial miljøkostnad i overkant av 6 øre/kWh for å gi positiv nåverdi. For en tilsvarende diskonteringsrente vil prosjektet *maksimalt* tåle en konstant miljøkostnad på om lag 23 øre/kWh. Tilsvarende resonnement kan gjøres for enhver definert diskonteringsrente.

Resultatene presentert i Figur 4 tar kun hensyn til reversible miljøkostnader. Som diskutert ovenfor kan imidlertid også irreversible kostnader påløpe. Figur 5 viser to scenarier for utbyggingen som inkluderer irreversible miljøkostnader, men hvor utbyggingsverdien (elektrisk energi) og miljøkostnaden ligger fast over tiden. Som vist i avsnitt 3.1 kan denne type prosjekt lede til to verdier på internrenten og hvor det avgjørende er forholdet mellom levetid, utgangsinvestering og utviklingsverdien. For de verdier som (tilnærmet) ligger til grunn her; $I = 1000$ millioner, $D = 132,8$ millioner og $T = 24$, oppnås to verdier på internrenten.



Figur 5. Irreversibel miljøkostnad og internrente

Den fete grafen i Figur 5 skisserer først et scenario hvor *hele* miljøkostnaden (MK) er antatt irreversibel. For en miljøkostnad på 3 øre/kWh tåler dermed prosjektet en diskonteringsrente på mellom om lag 1 % og 8 % for å gi positiv nåverdi. Det sees videre at prosjektet maksimalt vil tåle en irreversibel miljøkostnad på noe over 6 øre/kWh. Den stiplede grafen i figuren inkluderer både reversible og irreversible kostnader. Mer presist illustrerer denne grafen hvor høye irreversible kostnader prosjektet maksimalt tåler for ulik størrelse på renten, gitt at det eksisterer en reversibel miljøkostnad per kWh på 3,5 øre. For en irreversibel miljøkostnad på 3 øre/kWh (og en reversibel miljøkostnad på 3,5 øre/kWh) vil prosjektet dermed gi positiv nåverdi i intervallet fra noe over 1 % til noe under 6,5 %. Gitt de reversible kostnadene sees det videre at prosjektet maksimalt tåler irreversible miljøkostnader ca. 4,8 øre/kWh. Vi understreker igjen at beregningen som ligger til grunn i Figur 5 er basert på konstant miljø- så vel som utbyggingsverdi over tiden.

Det er Norges Vassdrags og Energidirektorat (NVE) som behandler energiselskapenes konsesjonssøknader om vindkraftutbygging i Norge. Som supplement til kvalitative vurderinger benytter NVE nytte- kostnadsanalyse som grunnlag for konsesjonsbevilgninger. Direktoratet har utarbeidet en håndbok spesielt rettet mot samfunnsøkonomisk analyse av energiprosjekter (NVE 2003). I analysene legger NVE (2003) til grunn en risikofri diskonteringsrente på 3,5 %, hvorpå det for mindre vindkraftprosjekter anbefales å legge til et standardisert risikotillegg på 4,5 %. Tilsvarende benyttes en risikojustert diskonteringsrente på 8 % også for vannkraftprosjekter. For større utbygginger og viktige enkeltprosjekter påpeker imidlertid NVE (2003) at det skal foretas egne anslag.

Foreliggende anslag på miljøkostnader av vindkraftutbyggingen på Smøla er i følge NVE (2003) kun 0,4 til 2 øre/kWh. Verdsettingsstudier tilsier imidlertid at miljøkostnadene av vindkraft kan være langt høyere. I følge Cicero (2004) kan befolkningen i gjennomsnitt være villig til å betale 3-11 øre/kWh for å unngå negative miljøkostnadene av vindkraft dersom alternativet er ny kapasitet som følge av opprusting av eksisterende vannkraftverk. Disse kostnadene er dramatisk høye i forhold til anslaget i NVE (2003). Disse anslagene bidrar i så måte til å reise diskusjon om hvorvidt tallene som ligger til grunn i NVE (2003) er representative, og indikerer samtidig at miljøkostnadene av vindkraft kan være betydelig høyere. Basert på Figur 4 og 5 gir Tabell 1 en sammenfatning av hvor høy (initial) miljøkostnad Smøla-utbyggingen tåler under de ulike scenarier for verdiutvikling og type miljøkostnad. For det gitte avkastningskravet til NVE tilsier derfor beregningene at utbyggingen ikke tåler noen irreversibel miljøkostnad for å være samfunnsøkonomisk lønnsomt dersom prosjektet forårsaker en kombinasjon av reversible og irreversible kostnader når den reversible miljøkostnaden er satt til 3,5 øre/kWh (nederste linje tabellen). Videre har vi at hvis alle miljøkostnadene antas å være irreversible betyr et avkastningskrav på 8% at 2.7 øre/kWh er den maksimale miljøkostnaden prosjektet tåler for ikke å gi negativ nåverdi. Under forutsetninger om årlig vekst i miljøverdien på 3 % vil prosjektet under avkastingskravet til NVE tåle en initial reversibel miljøkostnad på opptil 3,5 øre/kWh.

Antagelse verdiutvikling	**Type miljøkostnad**	**Maksimal miljøkostnad ved 8 % rente**
$\alpha = \gamma = 0$	Reversible	5 øre/kWh
$\alpha = 0,\ \gamma = 0.03$	Reversible	3,5 øre/kWh (initialt)
$\alpha = 0.03,\ \gamma = 0$	Reversible	17,4 øre/kWh
$\alpha = \gamma = 0$	Irreversible	2,7 øre/kWh

$\alpha = \gamma = 0$	Irrev. og reversible	0

Tabell 1. Miljøkostnad og gitt avkastningskrav Smølautbyggingen

Tabellnote: $\alpha =$%-vis årlig vekst utbyggingsverdi, $\gamma =$%-vis årlig vekst miljøverdi

5. Avslutning

I sin berømte artikkel fra 1967 introduserte John Krutilla en alternativverdi ved bruken av uberørt natur til utbyggingsprosjekter. Basert på dette arbeidet har vi her sett på ulike formuleringer av denne typen miljøverdier. I tråd med Porter (1982) har vi vist at vekst i miljøverdien, eller miljøkostnaden, over tid vil kunne medføre at et utbyggingsprosjekt har to internrenter. Videre har vi vist vi at det for prosjekter med relativt kort teknisk/økonomisk levetid og irreversible miljøkostnader også kan eksistere to internrenter. I begge tilfeller er årsaken at positive kontantstrømmer etterfølges av negative strømmer, dvs. at prosjektene er ukonvensjonelle. Konsekvensen av dette er at et utbyggingsprosjekt ikke lenger er samfunnsøkonomisk ulønnsomt *bare* på grunn av at nytten det genererer er høyt diskontert. Det er også ulønnsomt for lave verdier på diskonteringsrenten. Alt i alt betyr dette at en generelt ikke uten videre kan predikere hvilken innvirkning en endring i den samfunnsøkonomiske kalkulasjonsrenten har for prosjektvurderingen.

Et eksempel fra vindkraftutbyggingen på Smøla-utbyggingen har vi vist hvordan disse forholdene kan bringes inn i kostnads-nytte vurderingen av dette prosjektet. I bergningene bringes både reversible og irreversible miljøkostnader inn. I det første sett av beregninger så vi først hvor høye reversible miljøkostnader prosjektet maksimalt kan tåle for å være samfunnsøkonomisk lønnsomt under alternative antakelser om verdiveksten på miljøgodet. I et annet sett av beregninger tok vi for oss irreversible miljøkostnader og beregnet hvor høye disse maksimalt kan være for at prosjektet skal være samfunnsøkonomisk lønnsomt. På denne måten avdekkes miljøkostnadene prosjektet tåler indirekte ved å stille ulike krav til prosjektavkastningen. Hvis miljøkostnadene settes relativt høyt får vi typisk ingen positiv nåverdi for dette prosjektet. Settes de relativ lavt får vi et område med positiv nåverdi, men slik at også et lavt avkastningskrav kan gi negativ nåverdi. I forhold til eksisterende praksis ved kostnads-nytte analyser av energiprosjekter (NVE 2003), kan ulike forutsetninger om verdiutvikling og irreversibilitet potensielt være av stor betydning for lønnsomhetsvurderingen. Beregningene viser at lønnsomheten i Smøla-utbyggingen avhenger kritisk av hvorvidt og i hvilket omfang prosjektet generer irreversible miljøkostnader.

Litteratur

Arrow, K. og A. Fisher 1974: Environmental preservation, uncertainty and irreversibility. Quarterly Journal of Economics 88, 313-319

Bye, T. og E. Holmøy 2006: Hva hvis industrien ikke får billig kraft. SSB økonomiske analyser 4/2006

Cicero 2004: Nordmenn vil betale mer for vindkraft. Cicerone 4, 2004.

Fisher, A.. og J. Krutilla 1975: Resource Conservation, Environmental Preservation and the Rate of Discount. Quarterly Journal of Economics, 358-70.

Freeman III, M. 2003: The measurement of environmental and resource values (2th edition). Resources for the Future, Washington D.C.

Gudding, P. 2007: Vindkraft og miljøkostnader, - en nytte- kostnadsanalyse med eksempel fra Smølautbyggingen, Masteroppgave i samfunnsøkonomi, NTNU

Henry, C. 1974: Investment decisions under uncertainty. American Economic Review 64, 1006-1012

Krutilla. J. 1967: Conservation reconsidered. American Economic Review 57, 777-786

Marglin, S. 1963: Approaches to dynamic investment planning. North-Holland, Amsterdam 1963

NVE 2003: Samfunnsøkonomisk analyse av energiprosjekter. Håndbok 1-2003

Perman, R. Y. Mae, J. McGilray and M Common 2003: Natural resource and environmental economics. Pearson, London.

Porter, R. 1982: The new approach to wilderness preservation through benefit-cost analysis. Journal of Environmental Economics and Management 9, 59-80

Sandvik, Bjørn 2003: Innføring i finansteori. Fagbokforlaget, Oslo

Smith, K. 2004: Krutilla's lecgacy: Twenty-first-century challenge for environmental economics. American Journal of Agricultural Economics 86, 1167-1178

Statkraft 2000: Smøla vindpark, konsesjonssøknad og konsekvensutredning januar 2000.

Appendiks

Økende miljøverdi og ikke-økende utbyggingsverdi

Hvis vi setter $NV = 0$ i likning (4), finner vi de to internrentene som:

$$\text{(A1)} \quad \hat{r} = \frac{\left(D - P + I\gamma - I\alpha\right) \pm \sqrt{\left(D - P + I\gamma - I\alpha\right)^2 - 4I\left(D\gamma + P\alpha - I\alpha\gamma\right)}}{2I}.$$

Røttene betegnes som $\hat{r}_1$ og $\hat{r}_2$ slik at $\hat{r}_2 > \hat{r}_1$ (Figur 2).

Den verdien på renten som girt maksimal nåvedi, finner vi ved å sette $dNV / dr = 0$. Dette gir

$$\text{(A2)} \quad r^{\max} = [\left(2D\gamma + 2P\alpha\right) \pm \sqrt{\left(2D\gamma + 2P\alpha\right)^2 - 4\left(D - P\right)\left(D\gamma^2 - P\alpha^2\right)}] / 2\left(D - P\right).$$

Siden vi har $r > \gamma$ for at integralet i (3) skal konvergere og at $(D - P) > 0$ er antatt å holde, er det kun leddet med positivt fortegn foran rottegnet som her er av interesse. Vi finner nemlig at leddet med negativt fortegn gir en verdi $r < \gamma$. Etter noen omformuleringer viser det seg at den aktuelle verdien kan skrives som (se også Porter 1982):

$$\text{(A3)} \quad r^{\max} = \frac{\alpha\sqrt{P} + \gamma\sqrt{D}}{\sqrt{D} - \sqrt{P}}.$$

Vi finner her enkelt at $\partial r^{\max} / \partial P > 0$ og $\partial r^{\max} / \partial D < 0$, mens effekten av en økning i α og γ også gir en høyere maksimalverdi. Men legg merke til denne verdien ikke er påvirket av investeringskostnaden I.

Setter vi inn i uttrykket for nåverdien (4) finner vi den maksimale nåverdien prosjektet generer som:

$$\text{(A4)} \qquad NV^{\max} = \frac{\left(\sqrt{D}-\sqrt{P}\right)^2 - I(\alpha+\gamma)}{\alpha+\gamma} .$$

Vi ser dermed at $\left(\sqrt{D}-\sqrt{P}\right)^2 / I > (\alpha+\gamma)$ er en nødvendig og tilstrekkelig betingelse for at nåverdien skal være positiv. Relativ netto utviklingsnytte må derfor overstige et visst minimum gitt av $(\alpha+\gamma)$ for at prosjektet skal kunne være samfunnsøkonomisk lønnsomt. Dette gir samtidig også betingelsen for to internrenter.

Modellen belyses med et numeriske eksempel hvor vi setter vi $I = 1$, $D = 0.20$ og $P = 0.05$ og bruker dette som basisverdier. Likning (A3) gir $r^{\max} = (\alpha\sqrt{0,05} + \gamma\sqrt{0.20})/(\sqrt{0.20}-\sqrt{0.05})$. For $\alpha = 0.01$ og $\gamma = 0.02$ finner vi da $r^{\max} = 0.05$ (5 %). Dette gir samtidig $NV^{\max} = 0.666$, mens internrenten følger av (A1) som $\hat{r}_1 = 0.034$ (3,4 %) og $\hat{r}_2 = 0.126$ (12,6 %). Tabell A1 gir en ytterligere illustrasjon og hvor vi ser at området for positiv nåverdi for prosjektet reduseres betydelig når P, alt ellers likt, øker beskjedent fra 0.05 til 0.07 og motsatt øker betydelig når D, alt ellers likt, øker fra 0.20 til 0.25.

Verdi	Basis	$P = 0.07$	$D = 0.25$	$\alpha = 0.015$	$\gamma = 0.03$
$\hat{r}_1$	0.034	0.05	0.029	0.038	0.053
$\hat{r}_2$	0.126	0.090	0.181	0.117	0.117
$r^{\max}$	0.05	0.063	0.044	0.055	0.07
$NV^{\max}$	0.667	0.112	1.546	0.429	0.25

Tabell A1. Numerisk illustrasjon. Avtakende utbyggingsverdi og voksende miljøverdi

Det er interessant også å sammenlikne med modellen uten verdivekst (avsnitt 2.1). Internrenten i denne modellen for verdier som svarer til basisalternativet i Tabell A1 er $(D-P)/I = 0.15$ (15%). Øvre grense for en kalkulasjonsrente som gir positiv nåverdi reduseres derfor nokså beskjedent når verdistrømmene endrer seg som her. Hvis derimot vi setter $P = 0.07$ slik at internrenten uten verdivekst blir 0.13 (13%) og øvre internrente ved verdivekst er 9 %, blir derimot forskjellen betydelig større.

Irreversibel miljøverdi; numerisk eksempel

Tabell A2 gir en illustrasjon av modellen i avsnitt 3.1 hvor basisalternativet igjen er $I = 1$, $D = 0.20$, $P = 0.05$ og hvor den tekniske levetiden settes til $T = 20$ år. Miljøkostnaden påløper over en uendelig horisont. Det er ingen verdivekst verken i miljøverdien eller utbyggingsverdien.

Verdi	Basis	$P = 0.07$	$D = 0.25$	$T = 30$
$\hat{r}_1$	0.022	0.04	0.015	0.012
$\hat{r}_2$	0.137	0.106	0.195	0.148
$r^{\max}$	0.069	0.069	0.08	0.06
$NV^{\max}$	0.0307	0.0107	0.0695	0.0569

Tabell A2. Numerisk illustrasjon. Endelig levetid utviklingsverdi og irreversibel miljøverdi

Resultatet av en økning i miljøkostnaden er i denne modellen som i modellen som ligger ril grunn for Figur 2, som ventet, at både intervallet for en positiv nåverdi og $NV^{\max}$ reduseres. Renten som gir maksimal nåverdi $r^{\max}$ endres beskjedent. En økning i utviklingsnytten virker i motsatt retning slik at intervallet for en positiv nåverdi økes. Det sees også at en økning i prosjektets tekniske levetid naturlig nok bidrar til større lønnsomhetsintervall, lavere $r^{\max}$ og høyere $NV^{\max}$. Sammenliknet med modellen uten verdivekst (avsnitt 2.1.), finner vi igjen at forskjell øvre grense for en kalkulasjonsrente som gir positiv nåverdi er nokså liten. Hvis vi derimot setter $P = 0.07$ slik at internrenten i modellen uten verdivekst er 0.13 (13%), blir igjen forskjellen større.

I dette numeriske eksempelet er det ingen reinvestering eter den tekniske levetiden, T år. Med reinvestering endres nåverdiuttrykket som leder fram til likning (7) til

$NV = -I - Ie^{-rT} - Ie^{-2rT} - ... - Ie^{-nrT} + \int_0^\infty De^{-rt}dt - \int_0^\infty Pe^{-rt}dt$. For et uendelig antall reinvesteringsperioder, $n = \infty$, kan dette skrives som:

(A5) $$NV = \frac{-I}{(1-e^{-rT})} + \frac{D}{r} - \frac{P}{r}.$$

Vi finner igjen $\lim_{r\to\infty} NV = -I$. $NV = 0$ er gitt ved $(D-P)(1-e^{-rT}) = Ir$. Denne likningen kan enten ha en positiv rot eller ingen positiv rot, men ikke to røtter. Denne type prosjekt kan derfor ikke ha et nåverdiforløp som prosjektet i Figur 2. En nødvendig og tilstrekkelig betingelse for en rot er $I < T(D-P)$ som sier at investeringskostnaden er lavere enn den udiskonterte netto løpende verdi over levetiden T . I dette tilfellet vil også den deriverte av nåverdifunksjonen være negativ i hele definisjonsområdet og funksjonen ser dermed ut som i Figur 1. I motsatt fall er nåverdien alltid negativ og nærmer seg asymptotisk $-\infty$ når diskonteringsrenten blir liten. Konklusjonen er derfor at nåverdien til dette prosjektet enten er fallende for alle $r > 0$, eller er stigende for en lav verdi, for så å nå en negativ maksimalverdi for til slutt å falle når renten høynes ytterligere.

Prosjekt med to miljøverdier

Denne type prosjekt er beskrevet i avsnitt 3.2. Ved fortsatt å anta konstant utbyggings- og miljøverdi og ingen reinvesteringer, blir nåverdien av prosjektet

$NV = -I + \int_0^T De^{-rt}dt - \int_0^T P^R e^{-rt}dt - \int_0^\infty P^{NR} e^{-rt}dt$. Her er P^R den reversible miljøkostnaden og P^{NR} den irreversible kostnaden. Dette prosjektet er åpenbart ukonvensjonelt fordi positive kontantstrømmer frem til tidspunkt T igjen blir etterfulgt av negative strømmer grunnet prosjektets irreversible konsekvenser. Nåverdien kan skrives som:

$$\text{(A6)} \qquad NV = -I + \frac{(D-P^R)}{r}\left(1-e^{-rT}\right) - \frac{P^{NR}}{r}$$

$NV = 0$ gir her $(D-P^R)\left(1-e^{-rT}\right) = P^{NR} + Ir$. Nødvendige betingelse for at dette prosjektet gir skal gi to verdier på internrenten er $(D-P^R)T > I$ og $P^{NR} > 0$ slik at investeringskostnaden I fortsatt ikke kan være for høy. Denne modellformuleringen gir derfor ikke noe prinsipiell nytt om hvordan nåverdibanen kan bli seende ut. Det vil også være situasjonen hvis det inkluderes stigende miljøverdi over tid.