

Rapport

Optimal inspeksjons- og vedlikeholdskoordinering for stikkrenner

Forfatter(e)

Adrian Werner, Arnt-Gunnar Lium og Pål Buskum



Foto: Jernbaneverket/Øystein Grue

SINTEF Teknologi og samfunn

Postadresse:
Postboks 4760 Sluppen
7465 Trondheim
Sentralbord: 73590300ts@sintef.no
www.sintef.no
Foretaksregister:
NO 948007029 MVA**EMNEORD:**
Stikkrenner,
jernbaneinfrastruktur,
optimering,
vedlikeholdsplanlegging

Rapport

Optimal inspeksjons- og vedlikeholds-koordinering for stikkrenner

VERSJON
1.0**DATO**
20. oktober 2014**FORFATTER(E)**
Adrian Werner, Arnt-Gunnar Lium og Pål Buskum**OPPDRAGSGIVER(E)**
Jernbaneverket**OPPDRAGSGIVERS REFERANSE****PROSJEKT**
102000002 FoU Optimalt stikkrenneved-
likehold**ANTALL SIDER OG VEDLEGG**
19**SAMMENDRAG**

Velfungerende stikkrenner er avgjørende for å unngå utvasking og utglidning av masser ved regn og snøsmelting. Jernbaneverket har flere tiltak for å forhindre at dette skjer. Hvert av disse tiltakene har ulike effekter, egenskaper, varighet, kostnader og ressursbehov.

Denne rapporten beskriver en modell som balanserer kostnadene av å gjennomføre ulike tiltak med de forventede kostnader knyttet til skader på jernbaneinfrastrukturen som følge av utilstrekkelig kapasitet på stikkrennene i situasjoner med store nedbørsmengder. Rapporten beskriver også databasestrukturen for prototypen som har blitt utviklet med utgangspunkt i den matematiske modellen.

Modellen gir råd om optimalt valg av tiltak på ulike deler av infrastrukturen for ulike tidspunkt over planhorisonten. Dette gjøres samtidig som en tar hensyn til nedbørsusikkerhet. Rådene som gis tar blant annet hensyn til:

- Kapasiteten til og degraderingen av stikkrennenes kapasitet og funksjonsevne.
- Begrensninger i personell, utstyr og budsjett på ulike tidspunkter og samlet over planhorisonten.
- Værscenarier, gitt ved IVF-data.

UTARBEIDET AV
Adrian Werner, Arnt-Gunnar Lium**SIGNATUR****KONTROLLERT AV**
Thor Bjørkvoll**SIGNATUR****GODKJENT AV**
Frode Rømo**SIGNATUR****RAPPORTNUMMER**
SINTEF A26341**ISBN**
978-82-14-05700-3**GRADERING**
Åpen**GRADERING DENNE SIDE**
Åpen

Innhold

1	Introduksjon	3
2	Hva gjør optimeringsmodellen?	4
2.1	Minimering av kostnader	5
3	Innfasing i Jernbaneverkets driftsorganisasjon og alternative utvidelser av modellen	6
3.1	Enkel optimeringsmodell for geoteknikere	6
3.2	Modell til bruk i taktisk og operativ planlegging	6
3.3	Koordinering av tiltak mot andre disipliner i Jernbaneverket	7
3.4	Koordinering av tiltak mot andre etater	8
3.4.1	Statens vegvesen	8
3.4.2	Kommunesektoren	8
4	Matematisk modellformulering	9
4.1	Notasjon	9
4.2	Matematisk modell	11
4.2.1	Beskrankninger	11
4.2.2	Målfunksjon	15
5	Prototypens databasestruktur (MS Access-database "SRO.accdb")	16
5.1	Tabell 'Avsnitt'	16
5.2	Tabell 'NedbScenarier'	16
5.3	Tabell 'Parametre'	16
5.4	Tabell 'PerBudsjett'	16
5.5	Tabell 'Personale'	17
5.6	Tabell 'SRKlasser'	17
5.7	Tabell 'StikkNedb'	17
5.8	Tabell 'Stikkrenner'	17
5.9	Tabell 'StikkTiltak'	17
5.10	Tabell 'Tiltak'	18
5.11	Tabell 'TiltakPers'	18
5.12	Tabell 'TiltakUtstyr'	18
5.13	Tabell 'Utstyr'	18
5.14	Tabell 'XPressParametre'	19

1 Introduksjon

Dette er en oppsummerende rapport for prosjektet *Optimal inspeksjons- og vedlikeholdskoordinerings for stikkrenner* som har blitt gjennomført som en del av Jernbaneverkets forskningsaktivitet i forbindelse med Jernbaneverkets rammeavtale med SINTEF. Prosjektets mål har vært å utvikle bedre beslutningsstøtteverktøy og metodikk som kan bidra til å redusere de betydelige kostnadene som er knyttet til svikt i stikkrenner i forbindelse med store nedbørmengder samtidig som en minimerer kostnader av tiltak på stikkrenner.

Stikkrenner og kulverter er underganger som leder vann gjennom vei og jernbanefyllinger. Stikkrenner har en diameter på under 1 meter, mens kulverter har en diameter på mellom 1 og 2,5 meter. I rapporten skiller vi ikke mellom de to, og bruker betegnelsen stikkrenner for både kulverter og stikkrenner. En stikkrennes viktigste rolle er å forhindre utvasking og utglidning av masser som resultat av klimatiske forhold som regn og snøsmelting. Utilstrekkelig stikkrennekapasitet kan medføre problemer ved nedbør. Dersom mengden nedbør er så stor at den medfører at vannet står over stikkrenna så vil en risikere at togtrafikken må stoppe inntil vannstanden har sunket. Dersom vannstanden er høy lenge og/eller vannet renner over skinnegangen, er risikoen for utvasking og utglidning av masser stor. Utglidning av masser innebærer at deler av infrastrukturen vaskes bort eller glir ned.

Dersom infrastrukturen blir vasket bort eller skadet på andre måter må togtrafikken stanses inntil skaden er utbedret. Et eksempel på slike skader så en i forbindelse med skredet i Soknedalen i 2012, som førte til at Dovrebanen var stengt i åtte uker og påførte Jernbaneverket ekstraavgifter på 43 millioner kroner dette året (<http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/23952/Jernbaneverkets%20%C3%A5rsrapport%202012a.pdf>). De samfunnsøkonomiske kostnadene var vesentlig høyere. Enda mer omfattende problemer så en i Gudbrandsdalen hvor store nedbørmengder førte til samfunnsøkonomiske kostnader estimert til 1,1 milliarder kroner (side 33, http://www.naturfare.no/_attachment/613176/binary/956179). Det er ikke usannsynlig at bedre stikkrennekapasitet kunne bidratt til å forhindre eller redusere de negative effektene i disse to eksemplene.

Inspeksjon, vedlikehold, oppgradering og utskiftning av stikkrenner

Jernbaneverket har ansvaret for vel 15 000 stikkrenner. De eldste av disse er typisk laget av stein og betong, mens nyere stikkrenner ofte er laget av plast. Samtlige stikkrenner blir forsøkt inspisert hvert år (noen stikkrenner blir ikke funnet) og funnene loggføres i Banedata.

Jernbaneverket kan gjennomføre ulike tiltak på stikkrenner med nedsatt funksjonsevne for å forbedre tilstanden. Staking og spyling fjerner sand og vegetasjon i stikkrennen. Dersom selve stikkrennen er av dårlig kvalitet, men at en likevel ønsker å beholde den, kan en velge å oppgradere stikkrennen ved å legge inn en "strømpe" som fører til en glatt overflate og forhindrer sammenrasing (dette er spesielt aktuelt for eldre stikkrenner laget av stein). I noen tilfeller vil det også være aktuelt å skifte ut gamle stikkrenner med nye, dette medfører stengning av baneavsnittet mens tiltaket pågår.

I mange tilfeller er det sammenheng mellom ytre belastninger som påvirker forringelsen av stikkrennekvaliteten i et gitt område. En slik funksjonssvikt i en stikkrenne kan påvirke sannsynligheten for at andre stikkrenner i nærområdet overbelastes ved nedbør, dette er tett koblet til avstanden mellom stikkrennene og topologien i området. Ideelt sett bør dette tas hensyn til når en vurderer hvilke tiltak som skal utføres.

Tiltak på stikkrenner i de ulike områder styres av den enkelte banesjef og hans/hennes stab og gjennomføres innenfor de midler avsatt til dette for den aktuelle banestrekningen. Det er krav om at hver stikkrenne skal inspiseres hvert år, men det er ikke formelle funksjonskrav til den enkelte stikkrenne. Dette betyr at samtlige stikkrenner blir forsøkt inspisert hvert år, uten at dette nødvendigvis garanterer at skadede stikkrenner repareres. I noen tilfeller betyr dette at Jernbaneverket kan velge å bruke ressurser på å konstatere at en stikkrenne fremdeles ikke fungerer, fremfor å reparere allerede kjente feil.

Ulike metodiske prinsipper i Jernbaneverket

Samfunnsøkonomiske analyser står sentralt når Jernbanverket foretar investeringsanalyser knyttet til fremtidig jernbaneinfrastruktur. Per i dag gjennomføres disse analysene slik den er definert i Metodehåndbok JD205, og gjerne ved hjelp av regnearkmodellen Märklin. Imidlertid forventer Jernbanverket å ta i bruk en multistegs-stokastisk optimeringsmodell utviklet av SINTEF som er basert på eksisterende rammeverk. Den nye modellen finner optimale investeringsbeslutninger koordinert i tid, rom og rekkefølge under årlig budsjettusikkerhet, slikt at forventet nytte for en portefølje av prosjekter maksimeres.

For vedlikehold av komponenter benyttes Prifo-modellen som gir en detaljert beskrivelse av den enkelte komponents tilstand. Ut fra komponentens tilstand og kostnaden av å erstatte den enkelte komponent kan en beregne en kost-/nyttebrøk, som så kan brukes til å prioritere mellom ulike tiltak. Prifo-modellen tar ikke innover seg ulike former for koordineringseffekter, f.eks. at det kan være stordriftsfordeler av å skifte flere komponenter i et gitt område eller at en må skifte flere ulike komponenter før det gir effekt på driften.

Behovet for de fysiske stikkrennetiltakene blir vurdert lokalt av banesjefen etter budsjett og skjønnsmessige hensyn på bakgrunn av årlige kontroller. Det benyttes per i dag ingen modell eller verktøy som kvantifiserer effekten av tiltak og sammenstiller dette mot tiltakenes kostnad.

2 Hva gjør optimeringsmodellen?

Prototypen som ble utviklet og implementert i prosjektet er en taktisk modell som søker å minimere kostnader relatert til stikkrenner samt kostnader knyttet til store nedbørsmengder, og gir råd om hvilke tiltak det er optimalt å gjennomføre over planhorisonten. Den matematiske modellen er beskrevet i detalj i kapittel 4.

Modellen tar utgangspunkt i at Jernbanverket har mulighet til å gjennomføre ulike tiltak for å undersøke eller forbedre stikkrennenes kapasitet:

- Inspisere
- Stake ut hindringer
- Spyle
- Oppgradere eksisterende stikkrenne
- Skifte ut stikkrenner

Hvert av tiltakene har ressursbehov knyttet til personell og maskiner, samt monetære kostnader for f.eks. innkjøp av nye stikkrenner. Ressursbehovet for å gjennomføre et tiltak kan deles opp i to deler. En del er direkte relatert til gjennomføringen av et tiltak, f.eks. innkjøpskostnaden av en stikkrenne og antall mann- og maskintimer som går med til å legge den ned. Den andre delen er tilnærmet uavhengig av hvor mange tiltak som gjennomføres i et område. Eksempler er stenging av et avsnitt eller fremføring av personell, maskiner og komponenter til området, som i begrenset grad er avhengig av hvor mange tiltak som skal gjennomføres. En slik oppdeling av kostnadene gir modellen mulighet til å hente ut stordriftsfordeler og/eller bidra til å minimere tiden et avsnitt stenges. I tillegg kan ulike tiltak ha ulike ressursbehov, samtidig som ressurstilgangen kan variere over tid og være forskjellig i de ulike regionene (disse sammenhengene er vist i kapittel 4.2 i restriksjonssettene (21) – (23c)). Dette kompliserer planleggingen ytterligere.

Modellen tar hensyn til at stikkrennenes tilstand gradvis degraderes og opererer med to ulike tilstandskonsep-ter. Det ene er kapasiteten på stikkrenna som kan bli redusert pga. vegetasjon, grus, ising eller lignende, mens det andre beskriver at den tekniske tilstanden gradvis blir dårligere etter hvert som stikkrenna blir eldre (for en nærmere beskrivelse se kapittel 4.2 og restriksjonssettene (1) – (7)).

De ulike tiltakene påvirker stikkrennene ulikt. Inspeksjonstiltak gir kun informasjon om stikkrennens tilstand, men forbedrer ikke tilstanden. Staking og spyling er tiltak som tar kapasiteten opp til den opprinnelige tilstanden, men påvirker ikke den tekniske tilstanden. En oppgradering vil kunne øke kapasiteten til opprinnelig kapasitet eller gjøre den noe lavere (ettersom stikkrennen får mindre diameter ved valg av en metode som bruker innvendig “strømpe”), og vil forbedre den tekniske tilstanden. En utskiftning vil kunne bringe kapasiteten opp til eller over opprinnelig kapasitet, samt bringe den tekniske tilstanden til det opprinnelige nivået eller et høyere nivå enn den forrige stikkrenna hadde da den var ny. Utskiftning av stikkrenner vil medføre stengning av et avsnitt i en gitt periode.

Modellen tar hensyn til:

- Budsjettbegrensninger per periode og over planhorisonten som helhet.
- Kapasitetsbegrensninger på ulike typer personell og utstyr.
- Kapasitetsbegrensninger på den enkelte stikkrenne (avhengig av diameter).
- Reduksjon av kapasiteten i stikkrennene som følge av gradvis (forventet) tilstopping.
- Stopp av togtrafikken dersom vannstanden overstiger stikkrennene på avsnittet med en viss proSENTSATS.

Modellen antar at tilstanden og endringen av tilstanden på den enkelte stikkrenne er kjent og kartlagt. Modellen tar hensyn til fremtidig nedbørsusikkerhet i form av nedbørsscenarier for hver enkel stikkrenne, hvor hvert scenario beskriver nedbørmengde og sannsynligheten for denne. Beslutninger baseres på at samtlige scenarier håndteres simultant i modellen.

2.1 Minimering av kostnader

Modellen søker på en koordinert måte å minimere samtlige kostnader over planhorisonten ved å gi råd om hvilke tiltak som bør gjennomføres på de ulike stikkrennene, og når tiltakene bør gjennomføres.

Modellen summerer kostnadene over hele planhorisonten for å gjennomføre tiltak på den enkelte stikkrenne samt “oppstartskostnadene” som må tas før tiltak kan gjennomføres (f.eks. få mannskap og maskiner til området og stenging av avsnittet). Disse kostnadene antas å være kjente.

Ved kraftig nedbør vil det kunne oppstå situasjoner hvor en stikkrenne ikke er i stand til å ta unna vannet, enten fordi stikkrenna er for liten eller fordi den har blitt delvis eller helt tett og kapasiteten dermed har blitt redusert. Modellen tar utgangspunkt i meteorologiske data hvor nedbøren kan gis som sanntidsdata eller statistiske data som IVF-kurver (intensitet–varighet–frekvens) for ulike returperioder. Ut fra IVF-kurvene kan nedbørsscenarier konstrueres for f.eks. 2-års-, 5-års-, eller 100-års-nedbør. Hvert av disse nedbørsscenariene beskriver en viss sannsynlighet og nedbørmengde for et spesifikt område og anvendes for hver periode i planhorisonten. Modellen evaluerer samtlige scenarier simultant når den gir råd om beslutninger. Dersom nedbøren i et gitt scenario overstiger stikkrennens kapasitet så må banestrekningen stenges for trafikk, noe som er representert ved en kostnad i modellen. Dersom nedbøren er tilstrekkelig kraftig så kan den i verste fall føre til utvasking av masser og skred, som igjen fører til at avsnittet må stenge i en lengre periode inntil utbedringer er foretatt. I modellen vil en slik situasjon bli representert ved (store) kostnader per enhet nedbør som overstiger et visst nivå.

Modellen finner optimale tiltak innenfor de ressursmessige begrensninger som gjelder, som best balanserer kostnadene ved å utføre tiltak mot skadekostnader ved store nedbørmengder. Modellen kan relativt enkelt tilpasses slik at rådene som gis er i tråd med samfunnøkonomisk teori.

3 Innfasing i Jernbaneverkets driftsorganisasjon og alternative utvidelser av modellen

Prototypen består av to filer, en databasefil og en fil med implementeringen av den matematiske modellen. Databasefilen er laget i MS-Access og beskriver det eller de områdene som skal analyseres, kostnadstall for ulike tiltak, nedbørsscenarier, tilstand og kapasitet på de stikkrenner som inngår i analysen, ressursbegrensninger på personell, materiell og muligheten for å stenge banestrekninger, osv. Optimeringsmodellen er beskrevet i en fil for det matematiske programmeringsspråket Mosel, som henter data fra og skriver resultater til databasefilen.

Prototypen slik den foreligger nå vil kunne brukes til enkle analyser av en dyktig superbruker, men det anses å være hensiktsmessig å gjøre ytterligere forbedringer før denne tas inn i ordinær drift. Vi beskriver videre ulike alternative tilnæringer for å få verktøyet tatt i praktisk bruk.

3.1 Enkel optimeringsmodell for geoteknikere

Jernbaneverket har per i dag ingen beslutningsstøtteverktøy for å vurdere tiltak på stikkrenner som bør gjøres og når disse bør gjøres. For å gi Jernbaneverkets fagfolk innen vann, avrenning, skred og flom et bedre verktøy så kan en se for seg at modellen videreutvikles noe, slik at den understøtter disse og tilgrensende faggrupper.

Ved en slik tilpasning vil verktøyet kunne benyttes til å gi råd om taktisk planlegging av inspeksjon, vedlikehold, oppgradering og utskiftning av stikkrenner for en 5–20 årsperiode, slik det er beskrevet i kapittel 2. Modellen vil også kunne benyttes til å evaluere hvilken nettogevinst en kan forvente av de (optimale) rådene modellen gir for ulike budsjettnivåer i de ulike regioner og på ulike banestrekninger. Dette kan igjen brukes til å balansere ressursbruken knyttet til stikkrenner mellom regionene / banestrekningene slik at Jernbaneverket totalt sett får mest mulig igjen for sine investeringer. Modellen kan også kobles mot de avkastningskrav som Finansdepartementet setter til investeringer, for å få råd om hvilke budsjetter for stikkrenner som hadde vært samfunnsøkonomisk optimale.

For å forenkle og forbedre verktøyet så er det fordelaktig / nødvendig å styrke det langs følgende akser:

- Koble verktøyet mot Banedata slik at systemene “snakker” sammen.
- Gjøre mindre endringer i noen av Banedatas tabeller slik at disse understøtter prototypen. Rent konkret kan en se for seg at den skriftlige beskrivelsen av en stikkrennes tilstand blir erstattet med et karaktersystem fra 1 til 10 for å beskrive stikkrennes kapasitet og et tilsvarende et for å beskrive den tekniske tilstanden.
- Oppkobling mot værddatabase(r) for å forenkle bruken.
- Utvikling av enkelt nettbasert grafisk brukergrensesnitt (f.eks. i ASP.NET).

Det vil også være fordelaktig at flere av Jernbaneverkets fagfolk innen vann, avrenning, skred og flom tester prototypen ytterligere, slik at den kan tilpasses Jernbaneverkets behov enda bedre.

3.2 Modell til bruk i taktisk og operativ planlegging

En mulig utvidelse av modellen er å tilpasse den slik at den også kan brukes til operativ planlegging. Modellen kan da også gi råd om:

- Når eksakt, på hvilke dager, bør tiltak gjennomføres på en banestrekning slik at de gir mest forebyggende effekt?
- Om, når og mellom hvilke stasjoner skal Jernbaneverket stoppe togtrafikken på en banestrekning som følge av regn?

- Hvordan skal Jernbaneverket disponere sine begrensede ressurser (personell og maskiner) på koordinert måte, time for time, for å minimere konsekvensene av store nedbørsmengder?
 - Hvor og når skal en inspiseres, muligens i tilknytning til andre tiltak?
 - Når skal en grave for å lede vannet vekk for å unngå ytterligere skader?
- Hvordan bør Jernbaneverket best agere når skader har oppstått?

En kobling som fremstår som svært interessant er å utvikle et verktøy som kan koordinere taktisk / strategisk planlegging med operativ styring. Fordelen med en slik tilnærming er at en bedre kan balansere ressursbruken på taktisk nivå med de kostnadene som kan forventes å oppstå på operativt nivå. Enkelt forklart vil en balansere kostnadene mellom de to planleggingsnivåene slik at en gjør det som totalt sett gir mest igjen for pengene. For eksempel vil modellen kunne gi råd om å hyppigere inspeksjoner og staking i forkant av perioder med forventet store nedbørsmengder for å minimere kostnadene av ad-hoc tiltak i kritiske situasjoner (som ofte resulterer i tiltak som er vanskelig å gjennomføre på en effektiv måte, samtidig som tiltakene kan måtte gjennomføres ved bruk av kostbar overtid) og eventuelt oppryddingsarbeid som følge av skader.

Videre vil en kobling mellom taktisk og operativt nivå medføre en bedre verifisering av modellen på begge nivå og en tettere kobling mellom ulike fagmiljøer internt i Jernbaneverket.

3.3 Koordinering av tiltak mot andre disipliner i Jernbaneverket

Jernbaneverket foretar også oppgradering og vedlikehold på andre komponenter, slik som ballastpukk, bruer, fjellskjæringer, og overbygningskomponenter slik som f.eks. sporveksler. En del av denne aktiviteten vil naturlig kunne benytte samme personell- og utstyrsressurser som brukes for arbeid relatert til stikkrenner. I den forbindelse er det to muligheter som dukker opp:

1. Er det mulig å koordinere aktivitetene mellom ulike disipliner enda bedre enn det gjøres i dag?
2. Er det mulig å få til en ressursallokering mellom ulike fagdisipliner som gir enda større samfunnsnytte enn i dag?

I dag er Prifo-modellen et viktig verktøy for prioritering av tiltak og et etablert verktøy for Jernbaneverket. Prifo-modellen har en ganske nøyaktig beskrivelse av tilstanden til og degraderingen av komponentene, samt gir innspill om hvordan tiltak bør prioriteres etter en kost-/nyttebrøk. En svakhet til Prifo er at den i liten grad evner å koordinere tiltak når den gir råd om hva som bør gjøres. Satt på spissen så vil for eksempel ikke Prifo "se" at det kan være fordelaktig å gjennomføre to tiltak som medfører stenging av et avsnitt og ligger i umiddelbar nærhet samtidig. En utvidelse av den nåværende prototypen til å også dekke andre disipliner kan derfor være hensiktsmessig med tanke på å kunne hente ut slike stordriftsfordeler. Prifo og prototypen har svært komplementære egenskaper. Prifo har høyt detaljeringsnivå, men begrenset koordinering mellom tiltak, mens prototypen har et lavere detaljeringsnivå, men svært god koordinering mellom ulike tiltak innenfor begrensede ressurser. En bør se på hvordan disse best kan fungere sammen.

Et slikt verktøy vil kreve gode grunndata. Etersom kvaliteten på de data som Banedata besitter varierer noe, samtidig som nytteeffekten av et slikt verktøy kan antas å være forskjellig mellom de ulike disiplinene, så kan det være hensiktsmessig å inkludere ulike disipliner gradvis i en eventuell implementasjon av et slikt verktøy. For eksempel kan en starte med å utvikle et verktøy som er godt tilpasset beslutningsstøtte relatert til stikkrenner før en legger til en og en fagdisiplin i verktøyet. Dette vil kunne redusere kompleksiteten og risikoen i forbindelse med utviklingen og innfasingen av et slikt verktøy i organisasjonen.

3.4 Koordinering av tiltak mot andre etater

Beslutninger om offentlige investeringer styres etter samfunnsøkonomiske prinsipper beskrevet i veiledere fra Finansdepartementet. Gitt dette så vil en se at det er naturlig å koordinere vedlikehold og oppgradering av investeringene der det lar seg gjøre. For stikkrenner kan det være hensiktsmessig å koordinere tiltak og metodikk mellom Jernbaneverket og Statens vegvesen samt kommunesektoren.

3.4.1 Statens vegvesen

Statens vegvesen har i likhet med Jernbaneverket et betydelig antall stikkrenner som krever tilsyn, vedlikehold, oppgradering og utskifting, samtidig som funksjonssvikt kan medføre at infrastrukturen stenges og i verste fall skades dersom ikke stikkrennene har tilstrekkelig kapasitet ved større nedbørsmengder.

De viktigste forskjellene mellom problemstillingene Statens vegvesen og Jernbaneverket står overfor kan oppsummeres som følger:

- Tiltak på stikkrenner på bane er ofte mer ressurskrevende enn på vei:
 - En del av stikkrennene ligger vanskelig til og ikke nødvendigvis lett tilgjengelig med bil.
 - Utskiftning av stikkrenner på jernbane kan medføre stenging av avsnitt og kan ha store konsekvenser for trafikken.
- Antall stikkrenner som Statens vegvesen har ansvar for er vesentlig større enn for Jernbaneverket.

Et annet aspekt er at svikt i stikkrenner underlagt en etat kan få konsekvenser for infrastrukturen til en annen etat. For eksempel vil det kunne skje at dersom en av Statens vegvesens stikkrenner får redusert kapasitet, så kan Jernbaneverkets stikkrenner bli oversvømt og ikke klare å ta unna vannet, med de negative effekter dette gir. Det betyr at manglende vedlikehold i en etat kan medføre problemer for en annen etat. Behovet for felles verktøy og koordinering av tiltak mellom etater synes derfor åpenbar.

3.4.2 Kommunesektoren

Etater slik som Oslo VAV og andre kommunale vann- og avløpsforetak eier og drifter et stort antall stikkrenner, vann- og avløpsrør. Mange av disse er til dels svært gamle, har lekkasjer og en tilstand som kan være nokså usikker. Også her kan det ha alvorlige konsekvenser dersom rørene ikke klarer å ta unna uventet store nedbørsmengder.

Noen av vann- og avløpsetatene har kommet langt med tanke på å modellere problemstillingen med hydrologiske modeller og utvikle gode degraderingsfunksjoner. Imidlertid finnes det, så vidt vi kjenner til, ingen verktøy i bruk hos norske kommuner som gir råd om optimal inspeksjon, vedlikehold, oppgradering (ofte referert til som “no dig”-teknologi) eller utskiftning av stikkrennene / avløpsrør som maksimerer samfunnsøkonomisk nytte for en portefølje av tiltak.

Gitt de ikke ubetydelige likhetene i problemstillinger og kompetansen som f.eks. Oslo VAV sitter på så kan en modellutvikling sammen med denne eller lignende institusjoner bidra til et faglig godt samarbeid og effektiv ressursutnyttelse.

4 Matematisk modellformulering

4.1 Notasjon

Mengder og indekser

Navn	Beskrivelse
$a \in \mathcal{A}$	Strekingsavsnitt, mulige grupperinger av stikkrenner (ID e.l.)
$c \in \mathcal{C}$	”Typer” av personale / arbeidsmanskap
$\mathcal{L}_r \subseteq \mathcal{T}$	Liste av tiltak som <i>må</i> utføres på stikkrenne r innen optimeringsperioden eller et kortere tidsvindu
$n \in \{1, \dots, N\}$	Scenarier over nedbørsmengder
$p \in \mathcal{P} = \{1, \dots, P\}$	Tidsperioder (år)
$\mathcal{P}^S \subseteq \mathcal{P}$	Tidsperioder der avsnitt kan stenges
$r \in \mathcal{R}$	Stikkrenner (ID-nummer e.l.)
$t \in \mathcal{T}$	Tiltak (f.eks. “Staking”, “Spyling”, “Utskifting”, “Oppgradering”)
$\mathcal{T}^+ \subseteq \mathcal{T}$	Tiltak som setter standarden til en gitt verdi (f.eks. utskifting eller oppgradering/utbygging)
$\mathcal{T}^S \subseteq \mathcal{T}$	Tiltak som krever stenging av et avsnitt
$u \in \mathcal{U}$	Typer av utstyr / maskiner
$v \in \mathcal{V}$	Grupper av tiltak der minst ett må gjennomføres

Beslutningsvariabler

Navn	Enhet	Beskrivelse
arb_{rtp}	$\{0,1\}$ for $t \in \mathcal{T}^+$, heltall for $t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+$	Antall tiltak av type t gjennomført på stikkrenne r i tidsperiode p

Hjelpevariabler

Hjelpevariabler er ikke beslutningsvariabler per se men er avledet av beslutningsvariabler. Om ikke annet er angitt, er variablene kontinuerlige og ikke-negative.

Navn	Enhet	Beskrivelse
arb_{atp}^A	$\{0,1\}$	Gjennomføres tiltak t på en (flere) stikkrenner i avsnitt a i tidsperiode p ?
$arbbin_{rp}$	$\{0,1\}$	Gjennomføres et / flere tiltak ($\in \mathcal{T}$) på stikkrenne r i tidsperiode p ?
$arbbin_{rp}^B$	$\{0,1\}$	Gjennomføres et / flere byggetiltak ($\in \mathcal{T}^+$) på stikkrenne r i tidsperiode p ?
$arbbin_{rp}^K$	$\{0,1\}$	Gjennomføres et / flere “ikke-bygge-tiltak” ($\in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+$) på stikkrenne r i tidsperiode p ?
avs_{ap}	$\{0,1\}$	Er avsnitt a stengt i periode p ?
$nedbbin_{rpn}$	$\{0,1\}$	Overstiger nedbørsvolum i scenario n i periode p η_{1a} av brukbar kapasitet til stikkrenne r ?
$nedb_{rpn}$	l/s	Overskytende nedbørsvolum i periode p for stikkrenne r som kan forårsake skade om scenario n inntreffer (volum som overstiger η_{2a} av brukbar kapasitet)
$skadeSum$	Kr per l/s	Totalt forventet skade pga. utilstrekkelig kapasitet
st_{rp}^B	l/s	Byggteknisk tilstand av stikkrenne r i starten av periode p
st_{rp}^K	l/s	Standard (brukbar andel av kapasitet) av stikkrenne r i starten av periode p
$stn_{rp}^{B,1}, stn_{rp}^{B,2}$	l/s	Hjelpevariabel for standardberegning (slitasje)
stn_{rp}^K	l/s	Hjelpevariabel for standardberegning (kapasitet)
$sto_{rp}^{(1)}, sto_{rp}^{(2)}, sto_{rp}^{(3)}$	l/s	Hjelpevariabel for standardberegning (forbedring)

Parametre

Navn	Enhet	Beskrivelse
$A_r \in \mathcal{A}$		Avsnittet til stikkrenne r
B_p^+	Kr	Maksimumsbudsjett å benytte for tiltak i periode p
B_p^-	Kr	Minimumsbudsjett å benytte for tiltak i periode p
\bar{B}	Kr	Totalbudsjett over hele optimeringsperioden
$Kost_t^F$	Kr	“Fast” kostnad for å utføre tiltak t (en eller flere på samme avsnitt)
$Kost_a^{SP}$	Kr	(Straffe)kostnad for <i>planlagt</i> stenging av avsnitt a i løpet av en tidsperiode
$Kost_a^{SU}$	Kr	(Straffe)kostnad for <i>uplanlagt</i> stenging av avsnitt a i løpet av en tidsperiode
$Kost_t^V$	Kr	“Variabel” kostnad for å utføre tiltak t (for hvert tiltak som utføres)
η_{1a}		Andel av stikkrennekapasitet som nedbørsvolum kan overskride før avsnitt a stenges (≥ 1)
η_{2a}		Andel av stikkrennekapasitet som nedbørsvolum kan overskride før skadeverdi beregnes (≥ 1)
N_{cp}^C		Totalt antall arbeidstimer som personale / arbeidsmannskap av type c er tilgjengelig i periode p
N_{ct}^{CF}		Arbeidstimer for personale av type c som trengs for å utføre tiltak t (“fast”: uavhengig av antall tiltak som utføres samtidig på et avsnitt)
N_{ct}^{CV}		Arbeidstimer for personale av type c som trengs for å utføre tiltak t (“variabel”: for hvert tiltak som utføres)
\bar{N}^T		Maksimalt antall tiltak som kan gjennomføres på en stikkrenne i en tidsperiode (modelleringsteknisk parameter)
N_{up}^U		Totalt antall timer som maskiner / utstyr av type u tilgjengelig i periode p
N_{ut}^{UF}		Antall timer som maskiner / utstyr av type u trenger for å utføre tiltak t (“fast”: uavhengig av antall tiltak som utføres samtidig på et avsnitt)
N_{ut}^{UV}		Antall timer som maskiner / utstyr av type u trenger for å utføre tiltak t (“variabel”: for hvert tiltak som utføres)
NV_{rn}	l/s	Nedbørsvolum for stikkrenne r i scenario n
$\bar{N}\bar{V}$	l/s	Maksimalt nedbørsvolum (modelleringsteknisk parameter)
π_n	$\in [0, 1]$	Sannsynlighet for nedbørscenario n
\bar{S}	l/s	Maksimal standard som kan oppnås vha. tiltak
\underline{S}	l/s	Minimal standard påkrevd for alle stikkrenner
$\bar{S}_r^{B,0}$	l/s	Byggteknisk standard av stikkrenne r ved start av planhorisont
$\bar{S}_r^{K,0}$	l/s	Brukbar kapasitet av stikkrenne r ved start av planhorisont
S_r^{B-}	$\in [0, 1]$	Slitasje av stikkrenne r i hver periode (reduserer byggteknisk tilstand st_{rp}^B)
S_r^{K-}	$\in [0, 1]$	Andel av brukbar kapasitet av stikkrenne r som går tapt i hver periode om ingen tiltak gjennomføres (reduserer st_{rp}^K)
S_t^+	l/s	Tiltak t øker standard til S_t^+ (for $t \in \mathcal{T}^+$, absolutte verdier som tilsvarer gitte klasser) eller med S_t^+ (for $t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+$)
S^{EoH}	$\in [0, 1]$	Standard på slutten av planhorisonten skal ligge maks. S^{EoH} under standard ved oppstart
Sen_{rt}		Seneste periode for å utføre tiltak t på stikkrenne r
$SkNed$	Kr	Forårsaket skade per “enhet” nedbør over gitt grense
$Tidl_{rt}$		Tidligste periode for å utføre tiltak t på stikkrenne r
$TilV_{rt}$	$\in \mathcal{T} \cup \{0\}$	Er tiltaket t på stikkrenne r del av en gruppe av alternativer (i så fall, hvilken)

4.2 Matematisk modell

Optimeringsmodellen bestemmer hvilke tiltak som skal gjennomføres hvor ofte på hver enkel stikkrenne i hver tidsperiode slik at kostnaden av å gjennomføre tiltakene og potensiell skade av å ikke gjøre det blir minimert. Den tar hensyn til stikkrennenes aktuelle tilstand, mulige nedbørsforhold og begrensninger for gjennomføring av tiltakene.

4.2.1 Beskravninger

Stikkrennenes tilstand eller standard

Ved start av optimeringen (start av periode 1) har stikkrenne r en gitt byggeteknisk tilstand $st_{r1}^B = S_r^{B,0}$ og en kapasitetsmessig tilstand $st_{r1}^K = S_r^{K,0} \leq S_r^{B,0}$ ($\forall r \in \mathcal{R}$). Begge er gitt i absolutte tall, for eksempel i l/s.

Over tid degraderes tilstandene pga. slitasje / aldring og at rennen blir tett. Forenkelt antas det at dette skjer med gitte *andeler* S_r^{B-} og S_r^{K-} per tidsperiode som kan variere for de ulike stikkrennene. Et tiltak $t \in \mathcal{T}^+$ hever standarden på S_t^+ mens andre tiltak, $t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+$, øker standarden om S_t^+ , men ikke mer enn til st_{rp}^B , begge med *absolutte* verdier (i l/s). Nybygging / utvidelse antas å ikke forandre de periodevise degraderingsratene. Standarden beregnes i starten av perioden p etter at tiltaket ble gjennomført ($\forall r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P} \setminus \{1\} \cup \{P+1\}$): Byggeteknisk standard, dvs. *maksimalt* brukbar kapasitet:

$$st_{rp}^B = \begin{cases} st_{rp-1}^B (1 - S_r^{B-}) & \text{hvis ingen byggetiltak i periode } p-1 \\ \sum_{t \in \mathcal{T}^+} S_t^+ arb_{rp-1t}, & \text{ellers} \end{cases}$$

$$= st_{rp-1}^B (1 - S_r^{B-}) (1 - arbbin_{rp-1}^B) \quad (1a)$$

$$+ \sum_{t \in \mathcal{T}^+} S_t^+ arb_{rp-1t} \quad (1b)$$

Brukbar kapasitet (st_{rp}^K degraderes i tillegg til degradering av st_{rp}^B , derfor må S_r^{B-} inkluderes):

$$st_{rp}^K = \begin{cases} st_{rp}^B, & \text{hvis byggetiltak i periode } p-1 \\ st_{rp-1}^K (1 - S_r^{B-} - S_r^{K-}), & \text{hvis ingen tiltak i periode } p-1 \\ \min\{st_{rp}^B, st_{rp-1}^K + \sum_{t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+} S_t^+ arb_{rp-1t}\}, & \text{ellers} \end{cases}$$

$$= st_{rp}^B arbbin_{rp-1}^B \quad (2a)$$

$$+ st_{rp-1}^K (1 - S_r^{B-} - S_r^{K-}) (1 - arbbin_{rp-1}^B) \quad (2b)$$

$$+ (1 - arbbin_{rp-1}^B) arbbin_{rp-1}^K \min\{st_{rp}^B, st_{rp-1}^K + \sum_{t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+} S_t^+ arb_{rp-1t}\} \quad (2c)$$

Leddene (1b) og (2a) beskriver (bygge)tiltak som hever standarden *på* et gitt nivå (som oppgradering eller utskifting; bare disse kan føre til høyere kapasitet enn den opprinnelige), (2c) tiltak som hever standarden *om* et gitt nivå (som staking eller spyling) mens leddene (1a) og (2b) beskriver degradering av byggeteknisk tilstand og kapasitet om ingen tiltak ble utført i forrige periode.

De ikke-lineære leddene (1a), (2a), (2b) og (2c) kan lineariseres som følger:

(1a) blir til $(1 - S_r^{B-}) stn_{rp-1}^{B,1}$ der

$$stn_{rp-1}^{B,1} = st_{rp-1}^B (1 - arbbin_{rp-1}^B) \quad (3)$$

som kan skrives som

$$\begin{aligned} stn_{rp-1}^{B,1} &\leq st_{rp-1}^B \\ stn_{rp-1}^{B,1} &\leq \bar{S}(1 - arbbin_{rp-1}^B) \\ stn_{rp-1}^{B,1} &\geq st_{rp-1}^B - \bar{S} arbbin_{rp-1}^B \end{aligned}$$

Her er \bar{S} en absolutt høyeste standard som ingen tiltak kan overskride. Dette er et modelleringsteknisk grep uten praktisk betydning.

Ledd (2a) blir til $stn_{rp}^{B,2} = st_{rp}^B arbbin_{rp-1}^B$ som kan omformuleres til

$$\begin{aligned} stn_{rp}^{B,2} &\leq st_{rp}^B \\ stn_{rp}^{B,2} &\leq \bar{S} arbbin_{rp-1}^B \\ stn_{rp}^{B,2} &\geq st_{rp}^B - \bar{S}(1 - arbbin_{rp-1}^B) \end{aligned}$$

Ledd (2b) blir, på lignende måte som (1a), til $(1 - S_r^{B-} - S_r^{K-}) stn_{rp-1}^K$ der

$$stn_{rp-1}^K = st_{rp-1}^K (1 - arbbin_{rp-1}) \quad (4)$$

som kan skrives som

$$\begin{aligned} stn_{rp-1}^K &\leq st_{rp-1}^K \\ stn_{rp-1}^K &\leq \bar{S}(1 - arbbin_{rp-1}) \\ stn_{rp-1}^K &\geq st_{rp-1}^K - \bar{S} arbbin_{rp-1} \end{aligned}$$

Ledd (2c) inneholder et produkt av to binære beslutningsvariabler og et videre ikke-lineært uttrykk bestående av flere beslutningsvariabler. Det kan omformuleres stegvis som

$$sto_{rp}^{(1)} = \min\{st_{rp}^B, st_{rp-1}^K + \sum_{t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+} S_t^+ arb_{rp-1t}\} \quad (5a)$$

$$sto_{rp}^{(2)} = (1 - arbbin_{rp-1}^B) sto_{rp}^{(1)}, \quad (5b)$$

$$sto_{rp}^{(3)} = arbbin_{rp-1}^K sto_{rp}^{(2)}. \quad (5c)$$

Disse uttrykkene kan så lineariseres ved hjelp av følgende restriksjonssett:

$$\begin{aligned} sto_{rp}^{(1)} &\leq st_{rp}^B \\ sto_{rp}^{(1)} &\leq st_{rp-1}^K + \sum_{t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+} S_t^+ arb_{rp-1t} \\ sto_{rp}^{(2)} &\leq sto_{rp}^{(1)} \\ sto_{rp}^{(2)} &\leq \bar{S}(1 - arbbin_{rp-1}^B) \\ sto_{rp}^{(2)} &\geq sto_{rp}^{(1)} - \bar{S} arbbin_{rp-1}^B \\ sto_{rp}^{(3)} &\leq sto_{rp}^{(2)} \\ sto_{rp}^{(3)} &\leq \bar{S} arbbin_{rp-1}^K \\ sto_{rp}^{(3)} &\geq sto_{rp}^{(2)} - \bar{S}(1 - arbbin_{rp-1}^K) \end{aligned}$$

Til enhver tid skal hver stikkrenne holde en gitt minstestandard \underline{S} ($\forall r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P} \setminus \{1\}$):

$$st_{rp}^K \geq \underline{S} \quad (6)$$

Ved slutten av planhorisonten (start av periode $P + 1$) skal stikkrenne $r \in \mathcal{R}$ ha en standard som er ikke mer enn S^{EoH} lavere enn ved starten:

$$st_{rP+1}^K \geq S_r^{K,0} - S^{EoH} \quad (7)$$

Skadepotensiale

Potensialet for skade av for mye nedbør i en periode er direkte relatert til stikkrennens brukbare kapasitet. Bare nedbørsmengder som er mer enn det stikkrennen kan ta unna kan forårsake skader. Akkumulasjon av nedbør er ikke inkludert i den nåværende modellen, heller ikke effekten av eller på nabostikkrenner.

Modellen benytter N scenarier med en sannsynlighet π_n ($n \in \{1, \dots, N\}$) med $\sum_{n=1}^N \pi_n = 1$ der (kritisk) nedbørsvolum NV_{rn} kan variere mellom stikkrennene. F.eks. kan en beskrive $N = 7-8$ scenarier som tilsvarer 1-, 5-, 10-, ... årsnedbør; disse verdiene kan finnes vha. IVF-tabeller. NV_{rn} for et gitt scenario kan derfor tenkes å være høyere for en stikkrenne i et utsatt område enn i et mindre utsatt område. Scenariene er antatt å være uavhengige av hverandre, også mellom nabostikkrenner; dette gjenspeiler nedbørsfeltene. Siden tidsperiodene er antatt til å være år og planhorisonten typisk omfatter ca. 5–20 år, er heller ikke en variasjon over tid (som økende nedbørsvolum) tatt hensyn til. Om nedbørsvolumet NV_{rn} overskrider η_{1a} (f.eks. 1.2) av stikkrennens brukbare kapasitet stenges avsnittet, noe som medfører en straffekostnad $Kost_a^{SU}$. Om NV_{rn} overstiger η_{2a} (f.eks. 1.5) av kapasiteten, beregnes det en skadesum som er lineær med det overskridende volumet. Denne vurderingen kan variere fra avsnitt til avsnitt.

For det første “trinnet” beregnes det derfor en binærvariabel $nedbbin_{rpn}$ som er 1 hvis nedbørsvolumet i scenario n overstiger η_{1a} av stikkrennens brukbare kapasitet og 0 ellers.

$$nedbbin_{rpn} = \begin{cases} 1, & NV_{rn} \geq \eta_{1A_r} st_{rp}^K \\ 0, & \text{ellers} \end{cases} \quad (8)$$

Med f.eks. $\overline{NV} = \max\{NV_{rn}, n \in \{1, \dots, N\}, r \in \mathcal{R}\}$, kan dette lineariseres til

$$\begin{aligned} nedbbin_{rpn} &\in \{0, 1\} \\ nedbbin_{rpn} &\geq \frac{NV_{rn} - \eta_{1A_r} st_{rp}^K}{\overline{NV}} \end{aligned}$$

For hver stikkrenne r , tidsperiode p og nedbørsscenario n er så den nedbørsmengden som kan forårsake skade (dvs. overstiger η_{2a} av brukbar kapasitet):

$$nedb_{rpn} = \max\{0, NV_{rn} - \eta_{2A_r} st_{rp}^K\} \quad (9)$$

Dette kan lineariseres til ($\forall r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, n \in \{1, \dots, N\}$)

$$\begin{aligned} nedb_{rpn} &\geq 0 \\ nedb_{rpn} &\geq NV_{rn} - \eta_{2A_r} st_{rp}^K \end{aligned}$$

Konsekvensen av utilstrekkelig stikkrennekapasitet er dermed (forventet) straff for stenging av avsnittet samt (forventet) skadesum av overskytende nedbør. Termen *skadeSum* inkluderes så i målfunksjonen (24).

$$skadeSum = \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{n=1}^N \pi_n (nedbbin_{rpn} Kost_{A_r}^{SU} + nedb_{rpn} SkNed) \quad (10)$$

Tiltak

Tiltak kan utføres bare innenfor gitt tidsvindu ($\forall r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T}$):

$$\forall p \in \mathcal{P} | p < Tidl_{rt} \text{ eller } p > Sen_{rt} : arb_{rtp} = 0 \quad (11)$$

Tidsvinduer er gitt bare for tiltakene som *må* gjennomføres; for valgfrie tiltak settes tidsvinduet til hele planhorisonten ($\forall r \in \mathcal{R}$),

$$\forall t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{L}_r : Tidl_{rt} = 1, \quad Sen_{rt} = P \quad (12)$$

En tiltaksliste \mathcal{L}_r viser tiltak for hver stikkrenne r som må gjennomføres minst en gang i optimeringsperioden. Imidlertid kan det defineres flere alternativer der (minst) ett av alternativene må gjennomføres. Dette tillater f.eks. å velge mellom ulike stikkrennetyper for et utskiftingstiltak. Mengden \mathcal{V} samler alle slike grupper av tiltak. Markøren $TilV_{rt} \in \mathcal{V}$ viser hvilken gruppe et tiltak hører til. $TilV_{rt} = 0$ eller tom markør betyr at tiltaket må gjennomføres (ingen alternativer) ($\forall r \in \mathcal{R}$):

$$\forall t \in \mathcal{L}_r | TilV_{rt} = 0 : \sum_{p \in \mathcal{P}} arb_{rtp} \geq 1 \quad (13a)$$

$$\forall v \in \mathcal{V} : \sum_{\substack{p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{L}_r \\ TilV_{rt}=v}} arb_{rtp} \geq 1 \quad (13b)$$

Det kan ikke gjennomføres mer enn ett byggetiltak per stikkrenne i hver periode (men slike tiltak kan gjennomføres flere ganger på samme stikkrenne over planhorisonten) ($\forall r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}$).

$$\sum_{t \in \mathcal{T}^+} arb_{rtp} \leq 1 \quad (14)$$

Andre tiltak $t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+$ (staking, spyling) kan gjennomføres flere ganger på en stikkrenne i en periode.

En binær variabel $arbbin_{rp}^B$ bokfører om det planlegges et eller flere (ulike) byggetiltak på en stikkrenne r i en periode p :

$$arbbin_{rp}^B = \begin{cases} 1, & \sum_{t \in \mathcal{T}^+} arb_{rtp} \geq 1 \\ 0, & \text{ellers} \end{cases} \quad (15)$$

Dette kan skrives som

$$arbbin_{rp}^B \geq \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}^+} arb_{rtp}}{\bar{N}^T \cdot |\mathcal{P}|}$$

$$arbbin_{rp}^B \leq \sum_{t \in \mathcal{T}^+} arb_{rtp}$$

På samme vis angir variabelen $arbbin_{rp}^K$ om et eller flere *andre* tiltak blir utført på stikkrenne r i periode p :

$$arbbin_{rp}^K \geq \frac{\sum_{t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+} arb_{rtp}}{\bar{N}^T \cdot |\mathcal{P}|} \quad (16a)$$

$$arbbin_{rp}^K \leq \sum_{t \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}^+} arb_{rtp} \quad (16b)$$

Variabelen $arbbin_{rp}$ angir om et eller flere tiltak utføres på en stikkrenne i en tidsperiode, dvs. $arbbin_{rp}$ er null bare hvis både $arbbin_{rp}^B$ og $arbbin_{rp}^K$ er null.

$$arbbin_{rp} \geq (arbbin_{rp}^B + arbbin_{rp}^K) / 2 \quad (17a)$$

$$arbbin_{rp} \leq arbbin_{rp}^B + arbbin_{rp}^K \quad (17b)$$

For å inkludere stordriftsfordeler av å utføre tiltak samtidig på en gruppe av stikkrenner, bokfører variabelen arb_{atp}^A om et tiltak t gjennomføres på en (hvilken som helst) stikkrenne på et avsnitt a i periode t ($\forall a \in \mathcal{A}, t \in \mathcal{T}, p \in \mathcal{P}$):

$$arb_{atp}^A \geq \frac{1}{|\{r \in \mathcal{R} : A_r = a\}|} \sum_{\substack{r \in \mathcal{R} \\ A_r = a}} arb_{rtp} \quad (18)$$

Noen tiltak krever at avsnittet stenges; for å “samle” ulike slike tiltak (f.eks. oppgradering av en stikkrenne og utskiftning av en annen) og gjennomføre dem i samme tidsperiode, angir variabelen avs_{ap} om avsnitt a er stengt i tidsperiode p ($\forall a \in \mathcal{A}, p \in \mathcal{P}$)

$$avs_{ap} \geq \frac{1}{|\mathcal{T}^S|} \sum_{t \in \mathcal{T}^S} arb_{rtp} \quad (19a)$$

$$avs_{ap} \geq 0 \quad (19b)$$

Tiltak som krever stenging av et avsnitt kan bare gjennomføres i perioder $\mathcal{P}^S \subseteq \mathcal{P}$ der slik stenging er tillatt. Modellen skiller altså ikke mellom tiltak eller stikkrenner men antar at disse periodene er de samme overalt. ($\forall r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T}^S, p \in \mathcal{P} \setminus \mathcal{P}^S$)

$$arb_{rtp} = 0 \quad (20)$$

Begrensninger

Parameteren N_{ut}^{UF} angir antallet timer som **utstyr** av type u trenger for å utføre tiltaket t uavhengig av hvor mange tiltak av denne typen som gjennomføres samtidig på et avsnitt mens N_{up}^{UV} beskriver antallet utstyrstimer som er nødvendig for hvert enkelt tiltak. Parameteren N_{up}^U setter et tak på antallet timer som utstyr av type u totalt er tilgjengelig i en tidsperiode p . Lav N_{up}^U vil derfor føre til at flere tiltak som bruker samme utstyr vil gjennomføres samtidig. ($\forall u \in \mathcal{U}, p \in \mathcal{P}$):

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \left(\sum_{a \in \mathcal{A}} N_{ut}^{UF} arb_{atp}^A + \sum_{r \in \mathcal{R}} N_{ut}^{UV} arb_{rtp} \right) \leq N_{up}^U \quad (21)$$

Antall arbeidstimer som **personale** eller **arbeidsmannskap** er tilgjengelig er modellert på samme måte med “fast” og “variabelt” antall N_{ct}^{CF} og N_{ct}^{CV} ($\forall c \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{P}$):

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \left(\sum_{a \in \mathcal{A}} N_{ct}^{CF} arb_{atp}^A + \sum_{r \in \mathcal{R}} N_{ct}^{CV} arb_{rtp} \right) \leq N_{cp}^C \quad (22)$$

Likeledes oppstår det “faste” og “variable” **kostnader** $Kost_t^F$ og $Kost_t^V$. Budsjettgrenser kan være gitt som både nedre og øvre grense i hver tidsperiode (B_p^-, B_p^+) og som total grense \bar{B} over hele planhorisonten.

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \left(\sum_{a \in \mathcal{A}} Kost_t^F arb_{atp}^A + \sum_{r \in \mathcal{R}} Kost_t^V arb_{rtp} \right) \geq B_p^- \quad (23a)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \left(\sum_{a \in \mathcal{A}} Kost_t^F arb_{atp}^A + \sum_{r \in \mathcal{R}} Kost_t^V arb_{rtp} \right) \leq B_p^+ \quad (23b)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}, p \in \mathcal{P}} \left(\sum_{a \in \mathcal{A}} Kost_t^F arb_{atp}^A + \sum_{r \in \mathcal{R}} Kost_t^V arb_{rtp} \right) \leq \bar{B} \quad (23c)$$

4.2.2 Målfunksjon

Modellen balanserer kostnaden av å gjennomføre tiltakene (inklusive straffekostnad $Kost_a^{SP}$ for stenging av et avsnitt a i en tidsperiode, ref. (19)) med risiko for skader på grunn av utilstrekkelig standard (ref. (10)).

$$\begin{aligned} \min_{arb_{rtp}} Obj = & \sum_{t \in \mathcal{T}, p \in \mathcal{P}} \left(\sum_{a \in \mathcal{A}} Kost_t^F arb_{atp}^A + \sum_{r \in \mathcal{R}} Kost_t^V arb_{rtp} \right) \\ & + \sum_{a \in \mathcal{A}, p \in \mathcal{P}} Kost_a^{SP} avs_{ap} + skadeSum \end{aligned} \quad (24)$$

5 Prototypens databasestruktur (MS Access-database "SRO.accdb")

Dette avsnittet beskriver strukturen av MS Access-databasen som leverer inputparametere til den implementerte prototypen.

5.1 Tabell 'Avsnitt'

Beskriver avsnittene / banestrekningene, kostnadene og grensene for stegning av avsnitt ved mye nedbør.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
Avsnitt	heltall	$a \in \mathcal{A}$	Alle avsnitt
TrinnA	kontinuerlig	η_{1a}	Avsnitt stenges når nedbørsvolum overskrider η_{1a} av stikkrennens brukbare kapasitet
TrinnB	kontinuerlig	η_{2a}	Flomskade beregnes når nedbørsvolum overskrider η_{2a} av stikkrennens brukbare kapasitet
StengKostP	kontinuerlig	$Kost_a^{SP}$	(Straffe)kostnad for planlagt stenging av et avsnitt
StengKostU	kontinuerlig	$Kost_a^{SU}$	(Straffe)kostnad for uplanlagt stenging av et avsnitt
Beskrivelse	tekst		

5.2 Tabell 'NedbScenarier'

Beskriver sannsynlighetene for at de enkelte nedbørsscenariene inntreffer. Sannsynlighetene må ikke summere opp til 1, det er heller ikke nødvendig å angi verdier for scenario 1, modellkoden justerer verdiene tilsvarende.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
Scenario	heltall	$n \in \{1, \dots, N\}$	Alle nedbørsscenarier
Sanns	kontinuerlig	π_n	Sannsynlighet for at scenario n inntreffer
Beskrivelse/Kommentar	tekst		

5.3 Tabell 'Parametre'

Generelle modellparametre som ikke er knyttet til mengder eller indekser.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
MinStandard	kontinuerlig	\underline{S}	Minimumstandard som alle stikkrenner skal holde til enhver tid
TotBudsjett	kontinuerlig	\bar{B}	Total budsjett tilgjengelig over hele optimeringsperioden
EoHStandard	kontinuerlig	S^{EoH}	Maksimal forverring av en stikkrennes standard ved slutten av optimeringsperioden sammenlignet med standard ved start
NedbSkade	kontinuerlig	$SkNed$	Skadebeløp per "enhet" kritisk nedbør (nedbør over stikkrenne-kapasitet)
MaksTilPer	heltall		Maksimum antall tiltak utført på en stikkrenne i en periode

5.4 Tabell 'PerBudsjett'

Parametere med tidsdimensjon: øvre og nedre budsjettgrenser og om avsnitt kan stenges.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
Periode	heltall	$p \in \mathcal{P}$	Alle tidsperioder
BudsjettN	kontinuerlig	B_p^-	Nedre budsjettgrense i perioden ("bruk minst så mye")
BudsjettO	kontinuerlig	B_p^+	Øvre budsjettgrense i perioden
Stenging	binær	definerer \mathcal{P}^S	Kan avsnitt stenges i denne perioden?

5.5 Tabell 'Personale'

Lister ulike typer av personale / arbeidsmannskap og antall arbeidstimer som er tilgjengelige i perioden.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
CrewType	heltall	$c \in \mathcal{C}$	Alle typer personale / arbeidsmannskap for å utføre tiltak
Periode	heltall	$p \in \mathcal{P}$	Alle tidsperioder
TotalAntall	heltall	N_{cp}^C	Antall arbeidstimer for personale av type c som er tilgjengelig i periode p
Beskrivelse	tekst		

5.6 Tabell 'SRKlasser'

Beskriver ulike klasser av stikkrenner — kapasitet.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
KlasseID	heltall		Alle klasser / typer av stikkrenner
Kapasitet	kontinuerlig		Kapasitet av en stikkrenne av denne klassen [l/s]
Beskrivelse	tekst		

5.7 Tabell 'StikkNedb'

Angir volum for nedbørsscenarioene for de ulike stikkrennene.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
Stikk	heltall	$r \in \mathcal{R}$	Alle stikkrenner
Scenario	heltall	$n \in \mathcal{N}$	Alle nedbørsscenarioer
Volum	kontinuerlig	NV_{rn}	Nedbørsvolum [l/s]

5.8 Tabell 'Stikkrenner'

Beskriver alle stikkrenner med strekningsavsnitt, kapasitet, teknisk tilstand og kapasitet ved start og degraderingsrater.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
StikkID	heltall	$r \in \mathcal{R}$	
Avsnitt	heltall	A_r	Strekningsavsnitt e.l. til stikkrennen
Klasse	heltall		Klasse/type av stikkrenne; definerer kapasitet
Kapasitet0	kontinuerlig	$S_r^{B,0}$	Brukbar andel av kapasitet ved start, [0,1]
BStandard0	kontinuerlig	$S_r^{K,0}$	Byggteknisk tilstand ved start, [0,1]
KapasitetNed	kontinuerlig	S_r^{K-}	Kapasitetstap pr. periode, [0,1]
BStandardNed	kontinuerlig	S_r^{B-}	Slitasje pr. periode, [0,1]
Beskrivelse	tekst		

5.9 Tabell 'StikkTiltak'

Liste over tiltak som er obligatorisk for de ulike stikkrennene samt tidsvindu og mulige alternative tiltak.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
Stikkrenne	heltall	$r \in \mathcal{R}$	Alle stikkrenner
Tiltak	heltall	$t \in \mathcal{T}$	Alle tiltak
Tidligst	heltall	$Tidl_{rt}$	Tidligste periode for å gjennomføre tiltak t på stikkrenne r
Senest	heltall	Sen_{rt}	Seneste periode for å gjennomføre tiltak t på stikkrenne r
Valg	heltall	$TilV_{rt}$	Markør for alternative tiltak på denne stikkrennen

5.10 Tabell 'Tiltak'

Beskriver detaljer ved de ulike tiltakene.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
Tiltak	heltall	$t \in \mathcal{T}$	Alle mulige tiltak
StandardOpp	kontinuerlig	S_t^+	Tiltaket øker standarden på eller om dette nivået
VarCost	kontinuerlig	$Kost_t^V$	Variabel kostnad pr. tiltak
FastCost	kontinuerlig	$Kost_t^F$	Fast kostnad pr. gruppe av tiltak (på et avsnitt)
StandardMer	ja/nei	definerer \mathcal{T}^+	Øker tiltaket standarden på nivå <i>emphStandardOpp</i> ?
Stengning	ja/nei	definerer \mathcal{T}^S	Krever tiltaket stenging av avsnittet?
Beskrivelse	tekst		

5.11 Tabell 'TiltakPers'

Beskriver hvor mange timer hvert tiltak krever av hvilken personaletype.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
Tiltak	heltall	$t \in \mathcal{T}$	Alle tiltak
CrewType	heltall	$c \in \mathcal{C}$	Alle typer av personale
FastAntall	heltall	N_{ct}^{CF}	Antall timer som personale av type c trenger pr. gruppe av tiltak t (dvs. på et avsnitt)
VarAntall	heltall	N_{ct}^{CV}	Antall personaltimer av type c pr. tiltak t
Beskrivelse	tekst		

5.12 Tabell 'TiltakUtstyr'

Beskriver hvor mange timer hvert tiltak krever av hvilken utstyrstype.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
Tiltak	heltall	$t \in \mathcal{T}$	Alle tiltak
Utstyrtype	heltall	$u \in \mathcal{U}$	Alle utstyrstyper
FastAntall	heltall	N_{ut}^{UF}	Antall timer som utstyr u kreves pr. gruppe av tiltak t (på et avsnitt)
VarAntall	heltall	N_{ut}^{UV}	Antall timer utstyr pr. tiltak
Beskrivelse	tekst		

5.13 Tabell 'Utstyr'

Lister alle typer utstyr / maskineri som benyttes for de ulike tiltakene.

Kolonnenavn	Type	Modellnotasjon	Beskrivelse
UtstyrType	heltall	$u \in \mathcal{U}$	Alle utstyrstyper
Periode	heltall	$p \in \mathcal{P}$	Alle tidsperioder
TotalAntall	heltall	N_{up}^U	Antall timer som utstyr av type u er tilgjengelig i periode p
Beskrivelse	tekst		

5.14 Tabell 'XPressParametre'

Parametere som styrer programmkjøringen i XPress-MP.

Kolonnenavn	Type	Beskrivelse
Gap	kontinuerlig	Avbryt optimeringen når dette gapet mellom beste heltalls- og optimal kontinuerlig løsning er nådd (ingen verdi eller 0: bruk XPress-standard)
MaksTid	heltall	Avbryt optimeringen etter denne tiden [sec] (ingen verdi eller 0: bruk XPress-standard)
Slakkvariable	heltall	> 0: Bruk slakkvariabler for budsjett-, personal- og utstyrsgrenser (dette kan hjelpe med å finne ut hvorfor et case gir ingen løsning: indikerer hvilke grenser er for strenge og hvor mye)